

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS

Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo



DISSERTAÇÃO

Cidade e crescimento periférico:

modelagem e simulação da formação de periferias urbanas com autômatos celulares.

Christiano Piccioni Toralles

Pelotas, 2013

CHRISTIANO PICCIONI TORALLES

**CIDADE E CRESCIMENTO PERIFÉRICO:
modelagem e simulação da formação de periferias urbanas com autômatos celulares**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Federal de Pelotas, como requisito para obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo (área do conhecimento: Ciências Sociais Aplicadas).

Área de concentração: Arquitetura, patrimônio e sistemas urbanos.

Linha de pesquisa: Sistemas configuracionais urbanos.

Orientador: Maurício Couto Polidori, Dr.

Pelotas, 2013.

Banca examinadora:

Maurício Couto Polidori, Dr. (presidente e orientador)

Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, UFPel

Ana Paula Neto de Faria, Dra.

Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, UFPel

Eliane Constantinou, Dra.

Programa de Pós-Graduação em Planejamento Urbano e Regional, UFRGS

Renato Tibiriçá de Saboya, Dr.

Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, UFSC

Agradecimentos

Aos meus familiares e amigos, que souberam compreender os necessários momentos de ausência para meus estudos e elaboração dessa dissertação.

Aos professores e funcionários do PROGRAU e da FAUrb, pelo suporte didático e institucional para minha formação; também aos colegas mestrandos, pelas parcerias durante a caminhada desse mestrado.

Aos alunos da turma da disciplina de Projeto Arquitetônico e Planejamento Urbano (Projeto 9) de 2011/1, que entenderam minha inexperiência como professor e muito me ensinaram durante o estágio à docência.

Aos colegas do Laboratório de Urbanismo (LabUrb) – professores, mestrandos, graduandos, colaboradores –, pelas inúmeras trocas de conhecimento e pelos momentos de diversão e, consequentemente, pela amizade que caracteriza a convivência nesse grupo, contribuindo não apenas para a formação acadêmica como também para a formação humana.

À CAPES, pelo financiamento recebido na forma de bolsa de estudos e de suporte para participação em congressos.

Aos membros da banca examinadora, que muito gentilmente e educadamente souberam avaliar esse trabalho, contribuindo para melhoria da versão final da dissertação e para a possível continuidade de meus estudos.

Em especial, agradeço a duas pessoas de grande importância para o resultado desse trabalho:

Ao meu colega de PROGRAU e LabUrb, Marcus Vinícius Pereira Saraiva, o “Bagé”, que, além de ser o programador responsável pela tradução de minhas ideias em linguagem computacional, esteve sempre presente para pensar junto e contribuir para a evolução da pesquisa.

Ao meu orientador e amigo, Maurício Couto Polidori, que, desde a graduação – na iniciação científica do grupo PET-FAUrb e LabGeo –, soube instigar o pensamento sobre a arquitetura e a cidade e assim ensinar a fazer ciência, com responsabilidade e liberdade, incentivando a autonomia do indivíduo pesquisador e a coletividade do grupo de pesquisa.

Resumo

TORALLES, C. P. **Cidade e crescimento periférico**: modelagem e simulação da formação de periferias urbanas com autômatos celulares. 2013. 169f. Dissertação: (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

O crescimento das cidades tem sido objeto de estudos, buscando a compreensão de fenômenos socioespaciais inerentes a esse processo. Um desses fenômenos é o crescimento periférico, que ocorre nas interfaces da cidade com o ambiente natural ou rural, sendo destacadas as produções residenciais, tanto dos estratos de maior renda quanto de baixa renda. Nesse caminho, a investigação aborda a temática da produção de periferias urbanas a partir da morfologia urbana, entendendo que o espaço físico e a sociedade estão diretamente associados. O estudo tem como objetivo a identificação de relações entre morfologia e dinâmicas do crescimento periférico, buscando capturar padrões de localização e forma de manchas urbanas relativas à produção das periferias em cidades do extremo sul do Brasil. São utilizadas técnicas de modelagem e geossimulação por autômatos celulares, considerando de maneira integrada os aspectos da cidade e do ambiente natural. Estão delineados experimentos exploratórios com um modelo de crescimento urbano por autômatos celulares implementado no *software CityCell*, aplicados ao caso empírico de uma cidade do extremo sul brasileiro: Pelotas, RS. São experimentos dedicados à simulação da formação de periferias, seguindo a hipótese de associação dos padrões de localização e forma das manchas dos tipos periféricos na estrutura urbana com concentração de facilidades urbanas e de estoques construídos, com características do ambiente natural e com características de similaridade socioeconômica de vizinhança. Os resultados encontrados mostram alto índice de acerto na simulação da estrutura formal das manchas correspondentes aos dois tipos periféricos. Ainda que os estudos não permitam previsão locacional para cenários de futuro, possibilitam especular sobre os arranjos das formas das periferias na estrutura urbana das cidades do sul brasileiro, podendo contribuir para sistemas de tomada de decisão para o planejamento urbano. Além disso, a pesquisa também possibilita potencializar a discussão em prol da compreensão teórica sobre o fenômeno do crescimento periférico e para o desenvolvimento de modelos urbanos com autômatos celulares.

Palavras-chave: crescimento periférico, morfologia urbana, modelagem urbana, geossimulação, autômatos celulares.

Abstract

TORALLES, C. P. **Cidade e crescimento periférico**: modelagem e simulação da formação de periferias urbanas com autômatos celulares. 2013. 169f. Dissertação: (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

Cities' growth has been studied in order to search understanding about socio-spatial phenomena that are inherent to this process. One of these phenomena is the peripheral growth that occurs in the interfaces of cities with natural or rural environments, where residential constructions, from both high and low socioeconomic classes, prevail. This way, the investigation approaches the formation of urban peripheries from urban morphology, understanding that physical space and society are directly associated. The study aims to identify relations between morphology and peripheral growth dynamics, seeking location patterns and forms of urban patches patterns related to periphery production in cities in Southern Brazil. Modeling techniques and geosimulation by cellular automata are used considering aspects of the city and the natural environment in an integrated manner. Exploratory experiments are designed with a model of urban growth by cellular automata implemented in the *CityCell* software and applied to the empirical case of a city in the extreme South of Brazil: Pelotas, RS. These experiments are dedicated to simulating the formation of peripheries, following the hypothesis of association of location patterns and forms of the patches patterns of peripheral types in urban structure with concentration of urban facilities and built stocks, with characteristics from the natural environment and with characteristics of socioeconomic similarity of neighborhoods. Results show a high level of accuracy in the simulation of the formal structure of the stains that correspond to both peripheral types. Although studies do not allow locational predictions for future scenarios, they make it possible to speculate about arrangements of forms of the peripheries in the urban structure in Southern Brazil cities, which can contribute with decision making systems for urban planning. Furthermore, this research also allows enhancing the discussion towards theoretical understanding of the peripheral growth phenomenon and development of urban models with cellular automata.

Keywords: peripheral growth, urban morphology, urban modeling, geosimulation, cellular automata.

SUMÁRIO

Capítulo 1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Apresentação e contextualização do tema	1
1.2 Observações empíricas	4
1.3 Objetivos de pesquisa	11
1.4 Questionamentos e hipóteses de pesquisa	11
1.5 Estrutura da investigação	13
Capítulo 2. CRESCIMENTO PERIFÉRICO URBANO	15
2.1 População e crescimento espacial	15
2.2 Segregação socioespacial e crescimento periférico	20
2.3 Caracterização das periferias urbanas	23
2.4 Vizinhanças	26
2.5 Epílogo do Capítulo 2	28
Capítulo 3. MORFOLOGIA E MODELAGEM	30
3.1 Morfologia urbana	30
3.2 Modelos urbanos	31
3.3 Ideias atuais sobre a dinâmica urbana	36
3.4 Modelagem e simulação urbana	38
3.5 Autômatos celulares	42
3.5.1 Características dos autômatos celulares e adaptações para representação da cidade	42
3.5.2 Simulação de crescimento periférico através de autômatos celulares	45
3.6 Epílogo do Capítulo 3	48
Capítulo 4. MÉTODO E MODELO.....	50
4.1 Método da pesquisa	50
4.2 CityCell, o simulador de crescimento urbano em ambiente celular	53
4.2.1 Entrada de dados	54
4.2.2 Crescimento urbano a partir das medidas de centralidade celular e potencial celular	55
4.2.3 Tensões difusas replicando a lógica produtiva das periferias urbanas	58
4.2.4 Dados de saída	60
4.2.5 Estudo exemplo com tensões difusas	63
4.3 Contribuições ao método e modelo	65
4.4 Validação dos estudos: descritores morfológicos	66
4.5 Epílogo do Capítulo 4	70

Capítulo 5. PROCEDIMENTOS PROPOSTOS PARA MODELAGEM DA FORMAÇÃO DE PERIFERIAS URBANAS: O CASO DE PELOTAS	71
5.1 Delineamento experimental.....	71
5.2 Base espacial e calibração do crescimento urbano.....	72
5.2.1 Dados de entrada	74
5.2.2 Aproximação morfológica do crescimento urbano entre 1985-2010	78
5.3 Álgebras de mapas em ambiente SIG	80
5.3.1 Centralidades celulares e carregamentos urbanos	84
5.3.2 Centralidades celulares e resistências naturais.....	87
5.3.3 Carregamentos urbanos e resistências naturais.....	91
5.3.4 Validação das operações com álgebras de mapas.....	94
5.4 Inclusão das preexistências e suas relações de vizinhança	99
5.4.1 Aplicação da inclusão de preexistências e vizinhanças.....	104
5.4.2 Validação dos estudos com a inclusão de preexistências e vizinhanças	110
5.5 Comparação entre métodos	116
5.6 Considerações finais sobre o estudo de caso	119
5.7 Epílogo do Capítulo 5	121
Capítulo 6. CONCLUSÕES	122
6.1 Alcance dos objetivos	122
6.2 Validade das hipóteses e resposta aos questionamentos.....	123
6.3 Outras observações registradas durante a investigação	130
6.4 Limitações e continuidades	134
6.5 Epílogo do Capítulo 6	139
REFERÊNCIAS	141
ANEXO A: EQUAÇÕES DAS MEDIDAS DE MANCHAS.....	147
ANEXO B: FLUXOGRAMA DO REGRA TCP	151

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Tipos de formação periférica: A) periferização, em Campina Grande, PB, Brasil; B) urbanizações fechadas, em Calgary, Canadá. Fontes: <i>Google Earth</i> , 2011.	2
Figura 1.2: Crescimento urbano com formação de periferias, mostrando mudanças da forma da cidade em curto espaço de tempo em: A) Aurora, IL, EUA, 1998 e 2010; B) Rustenburg, África do Sul, 2004 e 2010. Fontes: desenho do autor sobre imagem <i>Google Earth</i>	4
Figura 1.3: Delimitação espacial da pesquisa: A) Brasil, com destaque para o estado do Rio Grande do Sul; B) Rio Grande do Sul, com destaque para a região sul do estado. Fontes: desenho do autor sobre imagem <i>Google Earth</i> , 2012.	5
Figura 1.4: Mapas de renda média per capita do setor censitário, no Censo 2000 (maiores rendas em vermelho e menores em azul): A) Arroio Grande, RS; B) Canguçu, RS; C) São Lourenço do Sul, RS; D) Jaguarão, RS; E) Santa Vitória do Palmar, RS; F) Bagé, RS; G) Rio Grande, RS; H) Pelotas, RS. Fonte: IBGE, < http://www.ibge.gov.br >, editado pelo autor no <i>software ArcGIS 9.3</i>	6
Figura 1.5: Núcleos de alta renda descentralizados. À esquerda: área efetivamente urbanizada, com destaque para os centros (em branco) e os núcleos de alta renda (em vermelho). À direita: núcleos de alta renda. A) Bagé; B) Rio Grande; C) Pelotas. Fontes: desenho do autor sobre imagem <i>Google Earth</i> , 2012.	7
Figura 1.6: Núcleos de baixa renda gerados em loteamentos formais de interesse social: A) Arroio Grande; B) Rio Grande. Fontes: <i>Google Earth</i> , 2011.	9
Figura 1.7: Núcleos de baixa renda formados em assentamentos informais: A) Bagé; B) Caçapava do Sul; C) Jaguarão; D) São Lourenço do Sul. Fontes: <i>Google Earth</i> , 2011.	9
Figura 1.8: Crescimento por acréscimo em núcleos de baixa renda: A) Pelotas, 2002 e 2010; B) Rio Grande, 2002 e 2009. Fontes: desenho do autor sobre imagem <i>Google Earth</i>	9
Figura 2.1: Exemplos de urbanizações do tipo <i>urban sprawl</i> , ambos em Albuquerque, EUA. Fontes: A) <i>Google Earth</i> , 2010; B) < http://www.mbl.edu/news/features/feature_blackbirds.html >.	23
Figura 2.2: Loteamentos murados (em processo inicial de ocupação ou construção) em Xangri-Lá, RS. Fonte: desenho do autor sobre imagem <i>Google Earth</i> , 2011.	24
Figura 2.3: Modelo conceitual das cidades latino-americanas: 1) área urbana consolidada; 2) área periurbana de baixa renda; 3) setor de alta renda. Fonte: do autor, adaptado de Torres (2007a, p. 7).	25
Figura 2.4: Exemplos de periferização: A) em Porto Alegre, RS; B) em Canguçu, RS. Fontes: <i>Google Earth</i> , 2011.	25
Figura 3.1: Modelos urbanos: A) Weber, 1909; B) Burgess, 1925; C) Christaller, 1933; D) Alonso, 1964. Fontes: A) Almeida <i>et al.</i> (2007); B, C e D) Peres (2010).	33
Figura 3.2: Modelos urbanos: A) Hoyt, 1939; B) Harris e Ullman, 1945. Legenda: 1) centro econômico; 2) setor industrial; 3) população de baixa renda; 4) população de média renda; 5) população de alta renda; 6) setor de indústrias pesadas; 7) subcentro (ou centro de bairro); 8) subúrbio residencial; 9) subúrbio industrial. Fonte: Buzai (2003).	34
Figura 3.3: Modelos urbanos: A) evolução do Rio de Janeiro de Souza, década de 1990; B) evolução latino-americana de Janoschka, 2002. Fontes: A) Souza (2003); B) Buzai (2003).	35
Figura 3.4: Representação por grafos: A) grafo qualquer; B) representação da estrutura urbana através de retas (linhas axiais do sistema viário) para cidade de São Lourenço do Sul, RS. Fontes: A) Diestel, 2005, p. 25; B) do autor.	39
Figura 3.5: Representação celular: NetLogo, modelo de crescimento urbano baseado em autômatos celulares. Fonte: < http://fs.urba.arch.unifi.it/en/ric/netLogo.php.html >.	40
Figura 3.6: Similaridade entre <i>grids</i> celulares e pixels de imagens de satélite (diferentes resoluções para Pelotas, RS). Fonte: Polidori (2004).	43
Figura 3.7: Características do CA: A) <i>grid</i> bidimensional, sendo as células mais escuras possuidoras de estado diferenciado das demais (Torrens, 2000); B) alguns tipos de vizinhanças comuns (adaptado de Batty (2005)).	44

Figura 3.8: Simulações de crescimento urbano a partir de modelos de autômatos celulares: A) Nogales, EUA e Nogales, México, entre 2002 e 2030, a partir do modelo SLEUTH; B) Detroit, EUA, entre 1905 e 1992, a partir do modelo DUEM. Fontes: a) Norman (2012); b) Xie e Sun (2000).	45
Figura 3.9: Simulação de crescimento urbano para Chicago, EUA, e região, entre 1850 e 2000. Tons mais escuros de amarelo indicam menores densidades e maior probabilidade de formações de <i>sprawl</i> . Fonte: Torrens (2006).	46
Figura 3.10: Simulações de crescimento urbano com o <i>Peripherization Model</i> , sendo alta renda em vermelho, média renda em amarelo e baixa renda em azul: A) cidade abstrata; B) Porto Alegre, RS. Fonte: Barros (2004).	47
Figura 3.11: Utilização do SACI para a simulação de crescimento urbano: A) crescimento urbano convencional para a cidade de Pelotas, RS, entre 2000-2045; B) crescimento de cidade abstrata com 100% de tensões difusas do tipo 1; C) crescimento de cidade abstrata com 100% de tensões difusas do tipo 2; D) resultado da álgebra de mapas para periferias do tipo urbanizações fechadas; E) resultado da álgebra de mapas para periferias do tipo periferização. Fontes: Polidori (2004) e Polidori e Krafta (2005).	48
Figura 4.1: Fluxograma das etapas metodológicas para o processo de modelagem. Fonte: do autor, adaptado de Liu (2009).	51
Figura 4.2: Teoria de grafos integrada à técnica de autômato celular (Polidori, 2004): A) representação vetorial de pontos interligados em um grafo; B) atribuição de pontos ao centro de cada célula do <i>grid</i> de um CA; C) integração entre grafo e CA.	54
Figura 4.3: Diagramas em formato de CA, representando os tipos de tensões (Polidori, 2004): A) axial; B) axial de <i>buffer</i> ; C) polar; D) difusa 1; E) difusa 2.	56
Figura 4.4: Exemplos de <i>outputs</i> de células urbanas (<i>cell type</i>), representando as iterações 1, 13, 26 e 40, para simulação de crescimento urbano da cidade de Arroio Grande, RS.	60
Figura 4.5: Exemplos de <i>outputs</i> de carregamentos urbanos (<i>urban load</i>), representando as iterações 1, 13, 26 e 40, para simulação de crescimento urbano da cidade de Arroio Grande, RS.	60
Figura 4.6: Exemplos de <i>outputs</i> de resistências naturais (<i>environmental resistance</i>), representando as iterações 1, 13, 26 e 40, para simulação de crescimento urbano da cidade de Arroio Grande, RS.	61
Figura 4.7: Exemplos de <i>outputs</i> de centralidade celular absoluta (<i>absolute cellular centrality</i>), representando as iterações 1, 13, 26 e 40, para simulação de crescimento urbano da cidade de Arroio Grande, RS.	61
Figura 4.8: Exemplos de <i>outputs</i> de centralidades celulares relativas, representando as iterações 1, 13, 26 e 40, para simulação de crescimento urbano da cidade de Arroio Grande, RS: A) centralidade celular R1 (<i>cellular centrality R1</i>); B) centralidade celular R2 (<i>cellular centrality R2</i>).	61
Figura 4.9: Exemplos de <i>outputs</i> de potencial de crescimento celular (<i>cellular potential</i>), representando as iterações 1, 13, 26 e 40, para simulação de crescimento urbano da cidade de Arroio Grande, RS.	62
Figura 4.10: Dados de entrada no modelo para cidade abstrata: A) carregamento urbano; B) resistências do ambiente natural (em ordem crescente de tons de verde, sendo mais escuros os maiores valores); C) resistências aleatórias.	63
Figura 4.11: <i>Outputs</i> da simulação de crescimento urbano para cidade abstrata, com distribuição de 100% para tensões difusas tipo 1, respectivamente para as iterações 1, 13, 26 e 40: A) células urbanas; B) resistências naturais.	64
Figura 4.12: <i>Outputs</i> da simulação de crescimento urbano para cidade abstrata, com distribuição de 100% para tensões difusas tipo 2, respectivamente para as iterações 1, 13, 26 e 40: A) células urbanas; B) resistências naturais.	64
Figura 4.13: <i>Outputs</i> da simulação de crescimento urbano para cidade abstrata, com distribuição isotensões, respectivamente para as iterações 1, 13, 26 e 40: A) células urbanas; B) resistências naturais; C) carregamentos urbanos; D) centralidades celulares R1; E) centralidades celulares R2.	65
Figura 5.1: Localização da cidade de Pelotas no estado do Rio Grande do Sul. Fonte: desenho do autor sobre imagem <i>Google Earth</i> , 2012.	73
Figura 5.2: Atributos urbanos para Pelotas, RS, respectivamente em 1985 (sobre imagem Landsat 5 TM) e 2010 (sobre imagem <i>Google Earth</i>): área efetivamente urbanizada.	75
Figura 5.3: Atributos naturais para Pelotas, RS, respectivamente em 1985 e 2010: A e B) laguna (Laguna dos Patos); C e D) águas lênticas; E e F) águas lóticicas; G e H) linhas de drenagem.	75

Figura 5.4: Atributos naturais para Pelotas, RS, respectivamente em 1985 e 2010: A e B) banhados; C e D) praias e dunas; E e F) matas nativas; G e H) campos e matas plantadas.	76
Figura 5.5: Atributos naturais para Pelotas, RS: fator aleatório.	76
Figura 5.6: Máscaras dos tipos periféricos para Pelotas, RS, em 2010: A) periferação; B) urbanizações fechadas.	78
Figura 5.7: <i>Outputs</i> de células urbanas para o estudo de calibração do crescimento urbano para Pelotas, RS. Melhores resultados encontrados na iteração 25 dos tipos de crescimento: A) sem predomínio; B) predomínio axial; C) predomínio polar; D) predomínio difuso.	79
Figura 5.8: <i>Outputs</i> de células urbanas para o estudo com álgebra de mapas, para simulação do crescimento urbano de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010. Respectivamente iterações 1, 5, 10, 15, 20 e 25. Simulação disponível em: < http://www.4shared.com/photo/kaeGKv5S/Pelotas_P13-pr_polar-CellType.html >.	82
Figura 5.9: <i>Outputs</i> de centralidades celulares R1 para o estudo com álgebra de mapas, para simulação do crescimento urbano de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010. Respectivamente iterações 1, 5, 10, 15, 20 e 25. Simulação disponível em: < http://www.4shared.com/photo/TMdoz1eQ/Pelotas_P13-pr_polar-CentR1.html >.	82
Figura 5.10: <i>Outputs</i> de centralidades celulares R2 para o estudo com álgebra de mapas, para simulação do crescimento urbano de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010. Respectivamente iterações 1, 5, 10, 15, 20 e 25. Simulação disponível em: < http://www.4shared.com/photo/BodqovvN/Pelotas_P13-pr_polar-CentR2.html >.	83
Figura 5.11: <i>Outputs</i> de carregamentos urbanos para o estudo com álgebra de mapas, para simulação do crescimento urbano de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010. Respectivamente iterações 1, 5, 10, 15, 20 e 25. Simulação disponível em: < http://www.4shared.com/photo/MTVOp9n/Pelotas_P13-pr_polar-ULoad.html >.	83
Figura 5.12: <i>Outputs</i> de resistências naturais para o estudo com álgebra de mapas, para simulação do crescimento urbano de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010. Respectivamente iterações 1, 5, 10, 15, 20 e 25. Simulação disponível em: < http://www.4shared.com/photo/aD3disY1/Pelotas_P13-pr_polar-ResistE.html >.	83
Figura 5.13: Resultados gráficos da álgebra de mapas com centralidades celulares e carregamentos urbanos, indicando tendências de conversão orientadas para periferação na cidade de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010. Respectivamente iterações 1, 5, 10, 15, 20 e 25.	86
Figura 5.14: Resultados gráficos da álgebra de mapas com centralidades celulares e carregamentos urbanos, indicando tendências de conversão orientadas para urbanizações fechadas na cidade de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010. Respectivamente iterações 1, 5, 10, 15, 20 e 25.	86
Figura 5.15: Resultados gráficos da álgebra de mapas com centralidades celulares e carregamentos urbanos, indicando tendências finais (acumuladas) de conversão orientadas para a formação de periferias na cidade de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010: A) periferação; B) urbanizações fechadas.	87
Figura 5.16: Resultados gráficos da álgebra de mapas com centralidades celulares e resistências naturais, indicando tendências de conversão orientadas para periferação na cidade de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010. Respectivamente iterações 1, 5, 10, 15, 20 e 25.	89
Figura 5.17: Resultados gráficos da álgebra de mapas com centralidades celulares e resistências naturais, indicando tendências de conversão orientadas para urbanizações fechadas na cidade de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010. Respectivamente iterações 1, 5, 10, 15, 20 e 25.	90
Figura 5.18: Resultados gráficos da álgebra de mapas com centralidades celulares e resistências naturais, indicando tendências finais (acumuladas) de conversão orientadas para a formação de periferias na cidade de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010: A) periferação; B) urbanizações fechadas.	90
Figura 5.19: Resultados gráficos da álgebra de mapas com carregamentos urbanos e resistências naturais, indicando tendências de conversão orientadas para periferação na cidade de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010. Respectivamente iterações 1, 5, 10, 15, 20 e 25.	92
Figura 5.20: Resultados gráficos da álgebra de mapas com carregamentos urbanos e resistências naturais, indicando tendências de conversão orientadas para urbanizações fechadas na cidade de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010. Respectivamente iterações 1, 5, 10, 15, 20 e 25.	92
Figura 5.21: Resultados gráficos da álgebra de mapas com carregamentos urbanos e resistências naturais, indicando tendências finais (acumuladas) de conversão orientadas para a formação de periferias na cidade de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010: A) periferação; B) urbanizações fechadas.	93

Figura 5.22: Resultados gráficos da álgebra de mapas com centralidades celulares e carregamentos urbanos, indicando tendências superiores de conversão, orientadas para a formação de periferias na cidade de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010: A) periferização; B) urbanizações fechadas.	94
Figura 5.23: Resultados gráficos da álgebra de mapas com centralidades celulares e resistências naturais, indicando tendências superiores de conversão, orientadas para a formação de periferias na cidade de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010: A) periferização; B) urbanizações fechadas.	94
Figura 5.24: Resultados gráficos da álgebra de mapas com carregamentos urbanos e resistências naturais, indicando tendências superiores de conversão, orientadas para a formação de periferias na cidade de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010: A) periferização; B) urbanizações fechadas.	95
Figura 5.25: Fluxograma geral da TCP, mostrando a atuação conjunta com a regra Potencial de Crescimento com Limiar (<i>Threshold Potential</i> - TP). Em cinza claro, a TP, adaptado de Polidori (2004, p. 75); em cinza escuro, a TCP.	100
Figura 5.26: Esquema simplificado das tendências que compõem o crescimento periférico na TCP. Em cinza claro, rotinas para simulação da formação de periferias, destacadas do fluxograma básico adaptado da regra Potencial de Crescimento com Limiar; em cinza escuro, etapas que compõem o crescimento periférico.	101
Figura 5.27: Máscaras dos tipos periféricos para Pelotas, RS, em 1985: A) periferização; B) urbanizações fechadas.	105
Figura 5.28: <i>Outputs</i> de células urbanas do estudo com a TCP, para simulação do crescimento urbano de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010. Respectivamente iterações 1, 5, 10, 15, 20 e 25. Simulação disponível em: http://www.4shared.com/photo/9VaMbkk0/Pelotas_P12-TCP-CellType.html >.....	105
Figura 5.29: <i>Outputs</i> de centralidades celulares R1 do estudo com a TCP, para simulação do crescimento urbano de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010. Respectivamente iterações 1, 5, 10, 15, 20 e 25. Simulação disponível em: http://www.4shared.com/photo/WdXwnJgh/Pelotas_P12-TCP-CentR1.html >.....	106
Figura 5.30: <i>Outputs</i> de centralidades celulares R2 do estudo com a TCP, para simulação do crescimento urbano de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010. Respectivamente iterações 1, 5, 10, 15, 20 e 25. Simulação disponível em: http://www.4shared.com/photo/OzQzHnhS/Pelotas_P12-TCP-CentR2.html >.....	106
Figura 5.31: <i>Outputs</i> de carregamentos urbanos do estudo com a TCP, para simulação do crescimento urbano de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010. Respectivamente iterações 1, 5, 10, 15, 20 e 25. Simulação disponível em: http://www.4shared.com/photo/1xKPFIRI/Pelotas_P12-TCP-ULoad.html >.....	106
Figura 5.32: <i>Outputs</i> de resistências naturais do estudo com a TCP, para simulação do crescimento urbano de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010. Respectivamente iterações 1, 5, 10, 15, 20 e 25. Simulação disponível em: http://www.4shared.com/photo/i8sKp3Ph/Pelotas_P12-TCP-ResistE.html >.....	107
Figura 5.33: <i>Outputs</i> de tendências difusas acumuladas para periferização, com a TCP, para simulação do crescimento urbano de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010. Respectivamente iterações 1, 5, 10, 15, 20 e 25. Simulação disponível e não acumulada em: http://www.4shared.com/photo/auwQuu7y/Pelotas_P12-TCP-periph-diffuse.html >.....	107
Figura 5.34: <i>Outputs</i> de tendências de vizinhança acumuladas para periferização, com a TCP, para simulação do crescimento urbano de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010. Respectivamente iterações 1, 5, 10, 15, 20 e 25. Simulação disponível e não acumulada em: http://www.4shared.com/photo/ydUetEO4/Pelotas_P12-TCP-periph-neighbo.html >.....	107
Figura 5.35: <i>Outputs</i> de tendências finais acumuladas para periferização, com a TCP, para simulação do crescimento urbano de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010. Respectivamente iterações 1, 5, 10, 15, 20 e 25. Simulação disponível e não acumulada em: http://www.4shared.com/photo/ECfndaKu/Pelotas_P12-TCP-periph-final_t.html >.....	108
Figura 5.36: <i>Outputs</i> de máscaras para periferização, no estudo com a TCP, para simulação do crescimento urbano de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010. Respectivamente iterações 1, 5, 10, 15, 20 e 25. Simulação disponível em: http://www.4shared.com/photo/fu457qVI/Pelotas_P12-TCP-periph-final_m.html >.....	108
Figura 5.37: <i>Outputs</i> de tendências difusas acumuladas para urbanizações fechadas, com a TCP, para simulação do crescimento urbano de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010. Respectivamente iterações 1, 5, 10, 15, 20 e 25. Simulação disponível e não acumulada em: http://www.4shared.com/photo/lmK_oRqh/Pelotas_P12-TCP-clurb-diffuse_.html >.....	108
Figura 5.38: <i>Outputs</i> de tendências de vizinhança acumuladas para urbanizações fechadas, com a TCP, para simulação do crescimento urbano de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010. Respectivamente iterações 1, 5, 10,	

15, 20 e 25. Simulação disponível e não acumulada em: < http://www.4shared.com/photo/l5zoUuuF/Pelotas_P12-TCP-clurb-neighbor.html >.....	109
Figura 5.39: <i>Outputs</i> de tendências finais acumuladas para urbanizações fechadas, com a TCP, para simulação do crescimento urbano de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010. Respectivamente iterações 1, 5, 10, 15, 20 e 25. Simulação disponível e não acumulada em: < http://www.4shared.com/photo/7WypTKKy/Pelotas_P12-TCP-clurb-final_te.html >.....	109
Figura 5.40: <i>Outputs</i> de máscaras para urbanizações fechadas, no estudo com a TCP, para simulação do crescimento urbano de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010. Respectivamente iterações 1, 5, 10, 15, 20 e 25. Simulação disponível em: < http://www.4shared.com/photo/VgZvYowa/Pelotas_P12-TCP-clurb-final_ma.html >.....	109
Figura 5.41: Síntese dos melhores resultados finais das 4 variações de raio de repulsa com a TCP, na iteração 25, para a formação de periferias na cidade de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010: A) raio 0; B) raio 1; C) raio 2; D) raio 3. Células urbanas em marrom, periferização em azul e urbanizações fechadas em vermelho.	115
Figura 5.42: Síntese do cenário de controle, em 2010, para o estudo de caso da formação de periferias na cidade de Pelotas, RS. Células urbanas em marrom, periferização em azul e urbanizações fechadas em vermelho.	116

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 5.1: Comparação entre os melhores resultados das medidas de manchas para os estudos com álgebras de mapas aplicadas ao caso do crescimento periférico de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010: periferização.....	96
Gráfico 5.2: Comparação entre os melhores resultados das medidas de manchas para os estudos com álgebras de mapas aplicadas ao caso do crescimento periférico de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010: urbanizações fechadas.....	97
Gráfico 5.3: Comparação entre os melhores resultados das medidas de manchas com a TCP aplicadas ao caso do crescimento periférico de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010: periferização.	112
Gráfico 5.4: Comparação entre os melhores resultados das medidas de manchas com a TCP aplicadas ao caso do crescimento periférico de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010: urbanizações fechadas.	113
Gráfico 5.5: Comparação entre os melhores resultados das medidas de manchas para os estudos com álgebras de mapas (linha azul) e com a TCP (linha vermelha) aplicadas ao caso do crescimento periférico de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010: periferização.....	117
Gráfico 5.6: Comparação entre os melhores resultados das medidas de manchas para os estudos com álgebras de mapas (linha azul) e com a TCP (linha vermelha) aplicadas ao caso do crescimento periférico de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010: urbanizações fechadas.	118

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Dados de população e taxa geométrica de crescimento anual média para o Brasil, entre 1872 e 2010. Fonte: IBGE, 2011.....	16
Tabela 2.2: Contagem de população dos municípios da zona sul do Rio Grande do Sul, nos censos de 2000 e 2010 e taxa crescimento para o período. Fonte: IBGE, < http://www.ibge.gov.br >, adaptado pelo autor.	17
Tabela 2.3: Comparativo entre a população urbana dos municípios da zona sul do Rio Grande do Sul, nos censos de 2000 e 2010. Fonte: IBGE, < http://www.ibge.gov.br >, adaptado pelo autor.	18
Tabela 2.4: Quantidade de domicílios dos municípios da zona sul do Rio Grande do Sul, nos censos de 2000 e 2010 e taxa crescimento para o período. Fonte: IBGE, < http://www.ibge.gov.br >, adaptado pelo autor.	19
Tabela 5.1: Resumo dos atributos utilizados para a simulação de crescimento urbano de Pelotas, RS.	77
Tabela 5.2: Resumo dos melhores resultados para a calibração do crescimento urbano de Pelotas, RS, no recorte temporal entre 1985 e 2010. Melhor resultado destacado em vermelho.	79

Tabela 5.3: Melhores resultados de proporção de concordância celular para os estudos com álgebra de mapas aplicadas ao caso do crescimento periférico de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010. Melhores resultados destacados em vermelho.	95
Tabela 5.4: Melhores resultados das medidas de manchas para os estudos com álgebra de mapas aplicadas ao caso do crescimento periférico de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010: periferização. Melhores resultados destacados: bons em vermelho; medianos em azul.	96
Tabela 5.5: Melhores resultados das medidas de manchas para os estudos com álgebra de mapas aplicadas ao caso do crescimento periférico de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010: urbanizações fechadas. Melhores resultados destacados: bons em vermelho; medianos em azul.	97
Tabela 5.6: Melhores resultados de proporção de concordância celular para os estudos com álgebra de mapas aplicadas ao caso do crescimento periférico de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010. Melhores resultados destacados em vermelho.	110
Tabela 5.7: Melhores resultados das medidas de manchas para os estudos com a TCP aplicadas ao caso do crescimento periférico de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010: periferização. Melhores resultados destacados: bons em vermelho; medianos em azul.	112
Tabela 5.8: Melhores resultados das medidas de manchas para os estudos com a TCP aplicadas ao caso do crescimento periférico de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010: urbanizações fechadas. Melhores resultados destacados: bons em vermelho; medianos em azul.	113
Tabela 5.9: Comparação entre os melhores resultados das proporções de concordância celular para os estudos com álgebras de mapas e com a TCP aplicadas ao caso do crescimento periférico de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010.	116
Tabela 5.10: Comparação entre os melhores resultados das medidas de manchas para os estudos com álgebras de mapas e com a TCP aplicadas ao caso do crescimento periférico de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010: periferização. Melhores resultados destacados: bons em vermelho; medianos em azul.	117
Tabela 5.11: Comparação entre os melhores resultados das medidas de manchas para os estudos com álgebras de mapas e com a TCP aplicadas ao caso do crescimento periférico de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010: urbanizações fechadas. Melhores resultados destacados: bons em vermelho; medianos em azul.	118

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 3.1: Notação básica de um autômato celular. Fonte: Polidori (2004, p. 22)	44
Equação 4.1: Tensão gerada a partir de um par de células. Fonte: Krafta (2001, p. 35.2)	55
Equação 4.2: Centralidade gerada a partir de um par de células. Fonte: Krafta (2001, p. 35.2)	55
Equação 4.3: Centralidade celular com base na soma ponderada da distribuição das diferentes tensões. Fonte: adaptada de Polidori (2004, p. 47).	57
Equação 4.4: Potencial celular de crescimento. Fonte: Polidori (2004, p. 51)	57
Equação 4.5: Probabilidade da célula receber tensões difusas do tipo 1. Fonte: Saraiva <i>et al.</i> (2011).	59
Equação 4.6: Probabilidade da célula receber tensões difusas do tipo 2. Fonte: Saraiva <i>et al.</i> (2011).	59
Equação 4.7: Índice de erro formal a partir das medidas de manchas da paisagem. Fonte: do autor.	68
Equação 5.1: Tendência de conversão urbana orientada para populações de estratos socioeconômicos inferiores, a partir das medidas de centralidades celulares e carregamentos urbanos. Fonte: adaptado de Polidori <i>et al.</i> (2011, p. 57).	84
Equação 5.2: Tendência de conversão urbana orientada para populações de estratos socioeconômicos superiores, a partir das medidas de centralidades celulares e carregamentos urbanos. Fonte: adaptado de Polidori <i>et al.</i> (2011, p. 55).	84
Equação 5.3: Tendência acumulada de conversão urbana orientada para populações de estratos socioeconômicos inferiores. Fonte: do autor.	85

Equação 5.4: Tendência acumulada de conversão urbana orientada para populações de estratos socioeconômicos superiores. Fonte: do autor.	85
Equação 5.5: Tendência de conversão urbana orientada para populações de estratos socioeconômicos inferiores, a partir das medidas de centralidades celulares e resistências naturais. Fonte: do autor.	89
Equação 5.6: Tendência de conversão urbana orientada para populações de estratos socioeconômicos superiores, a partir das medidas de centralidades celulares e resistências naturais. Fonte: do autor.	89
Equação 5.7: Tendência de conversão urbana orientada para populações de estratos socioeconômicos inferiores, a partir das medidas de carregamentos urbanos e resistências naturais. Fonte: do autor.	91
Equação 5.8: Tendência de conversão urbana orientada para populações de estratos socioeconômicos superiores, a partir das medidas de carregamentos urbanos e resistências naturais. Fonte: do autor.	91
Equação 5.9: Tendência difusa para conversão urbana orientada para populações de estratos socioeconômicos inferiores. Fonte: adaptado de Polidori <i>et al.</i> (2011, p. 57).	101
Equação 5.10: Tendência difusa para conversão urbana orientada para populações de estratos socioeconômicos superiores. Fonte: adaptado de Polidori <i>et al.</i> (2011, p. 55).	102
Equação 5.11: Tendência de vizinhança para conversão urbana orientada para populações de estratos socioeconômicos inferiores. Fonte: do autor.	102
Equação 5.12: Tendência de vizinhança para conversão urbana orientada para populações de estratos socioeconômicos superiores. Fonte: do autor.	102
Equação 5.13: Tendência final para conversão urbana orientada para populações de estratos socioeconômicos inferiores. Fonte: do autor.	103
Equação 5.14: Tendência de vizinhança para conversão urbana orientada para populações de estratos socioeconômicos superiores. Fonte: do autor.	103

Capítulo 1. INTRODUÇÃO

O capítulo 1 apresenta e contextualiza a temática do crescimento urbano e a produção de periferias, a qual será abordada ao longo da dissertação. Também são indicados os objetivos, passando por observações empíricas sobre o problema de pesquisa em cidades do sul do Rio Grande do Sul e encaminhando para as perguntas e as hipóteses. Por fim, é apresentada a estruturação dos demais capítulos do trabalho.

1.1 Apresentação e contextualização do tema

O processo de conversão de solo não urbanizado (natural ou rural) em solo urbano e de concentração cada vez maior de pessoas vivendo em cidades tem sido percebido como um fenômeno contínuo, crescente e de escala mundial, principalmente ao longo do século XX e início de XXI (Barros, 2004). Se em 1900 as cidades concentravam menos de 15% da população do planeta, o número atual já superou os 50% e estimativas apontam que o percentual seguirá aumentando, principalmente em países subdesenvolvidos ou em desenvolvimento (Brakarz, 2002; Souza, 2003; UN-Habitat, 2008). Em alguns países, esses percentuais já apresentam valores mais altos, como o caso do Brasil, onde a quantidade de população que vive em meio urbano se aproxima de 85% (IBGE, 2010).

Na América Latina, incluso Brasil, após grande aumento da população nas décadas de 1960 e 1970, as taxas de crescimento populacional vêm diminuindo desde a década de 1980 e tendem a seguir assim, como apontam recentes dados censitários brasileiros (IBGE, 2010, 2011). Todavia, a queda nas taxas de crescimento populacional não indica uma queda no crescimento espacial das áreas urbanas, sendo a produção (ou “invenção”) de novos lugares uma atividade econômica de importância dentro do sistema capitalista (Abramo, 2007). Num quadro geral, mesmo com queda nas taxas de crescimento populacional, as áreas urbanizadas seguem aumentando espacialmente na maior parte do globo (Barros, 2004; Torres, 2007; Aguilar e Escamilla, 2009). Esse crescimento espacial urbano é verificado tanto em locais que se apresentam atrativos para aumento populacional, como o caso de municípios da

expansão da fronteira agrícola nas regiões Centro-Oeste e Norte do Brasil, quanto em locais que apresentaram taxas de crescimento populacional negativas, como os municípios do sul do país, onde foi percebida diminuição da população entre os censos de 2000 e 2010.

A cidade exerce um poder de atração, o qual mantém contínuo o processo de urbanização, reforçando o papel das cidades enquanto centro de gestão e poder e local de concentração de oportunidades, diversidades e sinergias de mercado, trabalho, oferta de serviços, relações sociais, atividades culturais, entre outros. Por outro lado, a produção do espaço urbano também tem sido marcada por diversos problemas, tais como a segregação espacial, concentração de pobreza, rarefação de facilidades, violência urbana e degradação do ambiente natural. Diante dessa realidade, de aspectos positivos e de consequências negativas da urbanização, para Li (2011), o crescimento urbano e as mudanças que ele gera no ambiente natural são vistos como um dos principais desafios da humanidade para o século XXI.

Sendo assim, estudos relacionados à temática da cidade e que considerem as inter-relações dela com ambiente natural são importantes para a compreensão dos fenômenos intrínsecos ao processo de urbanização. Um desses fenômenos é o crescimento periférico, que ocorre nas bordas de interface entre a cidade e a paisagem natural, consistindo na conversão de áreas não urbanizadas em áreas urbanas, principalmente para uso residencial (Barros, 2004; Czamanski *et al.*, 2008). Dois tipos de formações periféricas, relacionados à produção do espaço urbano e sua segregação para uso residencial, são destacados (Barros, 2004; Buzai e Marcos, 2012): 1) a periferização, relacionada à concentração de população de baixa renda (fig. 1.1A); 2) as urbanizações fechadas¹, relacionado aos núcleos residenciais para população de média-alta e alta renda (fig. 1.1B).



Figura 1.1: Tipos de formação periférica: A) periferização, em Campina Grande, PB, Brasil; B) urbanizações fechadas, em Calgary, Canadá. Fontes: Google Earth, 2011.

Grande parte dos estudos sobre a formação de periferias urbanas tem seu foco em questões políticas, econômicas e sociológicas, sendo menos recorrentes estudos com abordagem no campo da

¹ Considerando também os núcleos que não são fisicamente fechados, mas são segregados e destinados, principalmente, às populações de estratos de renda superiores.

morfologia (Barros, 2004). A morfologia urbana busca estudar as relações entre os fenômenos urbanos e a forma da cidade, os padrões de organização espacial dessas formas e as mudanças que ocorrem ao longo do tempo (Lamas, 1992; Batty, 2008). A forma da cidade não é simples consequência do processo social, estando o espaço físico diretamente associado com a sociedade, o que Soja (1993) chama de “espacialidade”. Entende-se aqui que, a partir das espacialidades, ou seja, das inter-relações entre características espaciais e sociais, podem ser identificados padrões da morfologia urbana que sejam capazes de representar a formação das periferias, no que tange à suas localizações e seus arranjos formais na estrutura urbana e às mudanças da forma da cidade.

Diversos autores, principalmente a partir do início do último século, têm traçado modelos sobre questões socioespaciais das urbes, de modo a identificar a lógica dos processos inerentes à dinâmica e à configuração das cidades e teorizar sobre eles. Aproximadamente a partir da metade do século XX, com o desenvolvimento da tecnologia computacional e a crescente ampliação de sua capacidade de armazenamento e processamento de dados, abriu-se o campo para exploração da dimensão morfológica dos padrões de organização das cidades. Com a modelagem urbana, teorias e hipóteses sobre processos relativos às cidades podem ser traduzidos em equações matemáticas e testados em ambiente computacional, replicando dinâmicas espaciais através de simulações. Técnicas de modelagem e geossimulação, com destaque para autômatos celulares (*cellular automata* – CA), têm permitido avançar significativamente na representação temporal e espacial e na integração com sistemas de informações geográficas (SIG) (Almeida *et al.*, 2007), sendo usadas para interpretação dos fenômenos de crescimento urbano e suas dinâmicas morfológicas (Sobreira, 2003; Barros, 2004; Torrens, 2006).

Diante do contexto apresentado, o estudo do crescimento periférico é importante para a entendimento desse fenômeno socioespacial que tem impactos na conversão do ambiente natural e na segregação do ambiente urbano. Modelagem urbana e geossimulação são importantes para auxiliar o processo de planejamento das cidades, buscando a minimização dos impactos negativos decorrentes do fenômeno. Nesse caminho, a pesquisa apresentada na dissertação busca a compreensão das relações entre a morfologia e os processos que regem a dinâmica de produção das periferias na estrutura urbana. Para isso é feito uso de autômatos celulares, enquanto técnica de modelagem e simulação em ambiente digital, considerando aspectos da cidade e do ambiente natural de maneira integrada. Os estudos partem de observações empíricas e do lançamento de hipóteses sobre o fenômeno, as quais serão apresentadas a seguir; passam por revisão sobre as abordagens teórica e metodológica da pesquisa, com ênfase no crescimento periférico e na modelagem urbana; seguem para a formulação do método de investigação, usando a base de um modelo de crescimento urbano com CA; e culminam na aplicação do método para teste das hipóteses enunciadas sobre a formação de periferias urbanas,

através do caso de uma cidade do extremo sul do Brasil. Os resultados encontrados são avaliados segundo descritores de forma e de localização espacial, conduzindo para as conclusões e discussões ao final da dissertação.

1.2 Observações empíricas

O crescimento urbano e a formação de periferias, sejam de alta ou de baixa renda, têm sido observados em cidades de diferentes portes e em todas as regiões do planeta (fig. 1.2). Nos países de Primeiro Mundo o fenômeno do crescimento periférico é entendido em termos de *urban sprawl*, como os *suburbs* e *edge cities* nas cidades dos Estados Unidos. Formações semelhantes ao *sprawl* também são encontradas nos países subdesenvolvidos ou em desenvolvimento, associadas ao movimento das populações de maior renda em direção às bordas urbanas (Barros, 2004), principalmente nas grandes e médias cidades, caracterizadas por grandes loteamentos ou condomínios horizontais murados (Davis, 2006), aqui chamados de urbanizações fechadas (Buzai e Marcos, 2012).

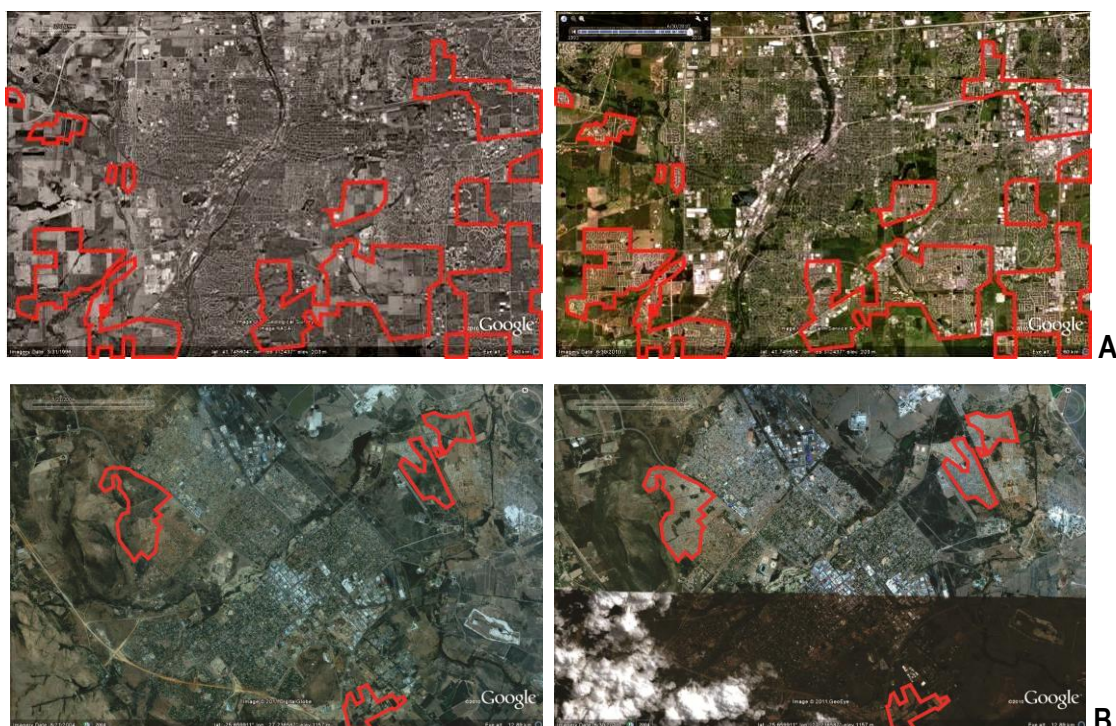


Figura 1.2: Crescimento urbano com formação de periferias, mostrando mudanças da forma da cidade em curto espaço de tempo em: A) Aurora, IL, EUA, 1998 e 2010; B) Rustenburg, África do Sul, 2004 e 2010. Fontes: desenho do autor sobre imagem Google Earth.

Embora sejam encontrados núcleos semelhantes ao *sprawl* no Terceiro Mundo, nesses países o fenômeno do crescimento periférico está relacionado, principalmente, aos processos de periferização, gerando núcleos com concentração de população de baixa renda. Ambos os tipos de periferias apare-

cem na forma de expansões do tecido urbano, nas bordas e vazios da cidade, avançando em direção ao ambiente natural ou rural, como pôde ser visto nas figuras 1.2A e 1.2B, que mostram novos núcleos de *sprawl* e de periferização. São núcleos formados em curto espaço de tempo, denotando uma rápida dinâmica de mudança da forma urbana das cidades.

As cidades brasileiras não são diferentes dessa realidade. De modo a contextualizar as hipóteses e argumentos teóricos que serão traçados ao longo do texto, foram efetuadas observações de caráter empírico, com base em cidades da zona sul do estado do Rio Grande do Sul (fig. 1.3). A escolha desse recorte espacial partiu das características de relativa homogeneidade geográfica, topográfica, histórica e socioeconômica das cidades da região, além da disponibilidade de dados e, principalmente, da presença de formações de periferias, que são o objeto dessa pesquisa. As observações empíricas sobre as cidades desse recorte espacial foram realizadas a partir de dados censitários e de imagens de satélite disponíveis na plataforma do *software Google Earth*.

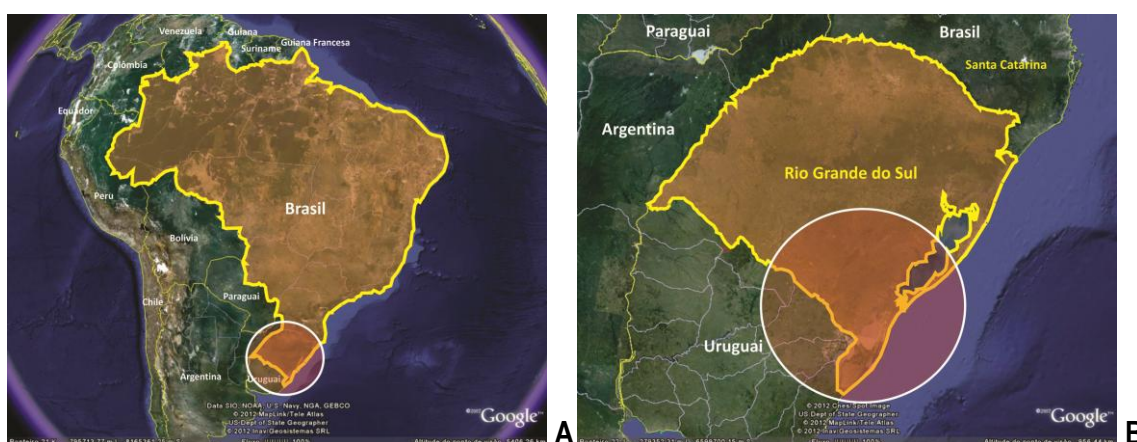


Figura 1.3: Delimitação espacial da pesquisa: A) Brasil, com destaque para o estado do Rio Grande do Sul; B) Rio Grande do Sul, com destaque para a região sul do estado. Fontes: desenho do autor sobre imagem *Google Earth*, 2012.

A Figura 1.4 mostra mapas de renda per capita dos setores censitários (Censo 2000² do IBGE) de oito cidades da região sul do Rio Grande do Sul. São elas, com respectiva população urbana (Censo 2010 do IBGE): A) Arroio Grande, 16.086 hab.; B) Canguçu, 19.696 hab.; C) São Lourenço do Sul, 24.234 hab.; D) Jaguarão, 26.101 hab.; E) Santa Vitória do Palmar, 26.890 hab.; F) Bagé, 97.762 hab.; G) Rio Grande, 189.472 hab.; H) Pelotas, 305.696 hab.

² Dados de renda dos setores censitários, referentes ao Censo 2010 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), ainda não estavam disponíveis na data em que foi realizado o levantamento para essa dissertação.

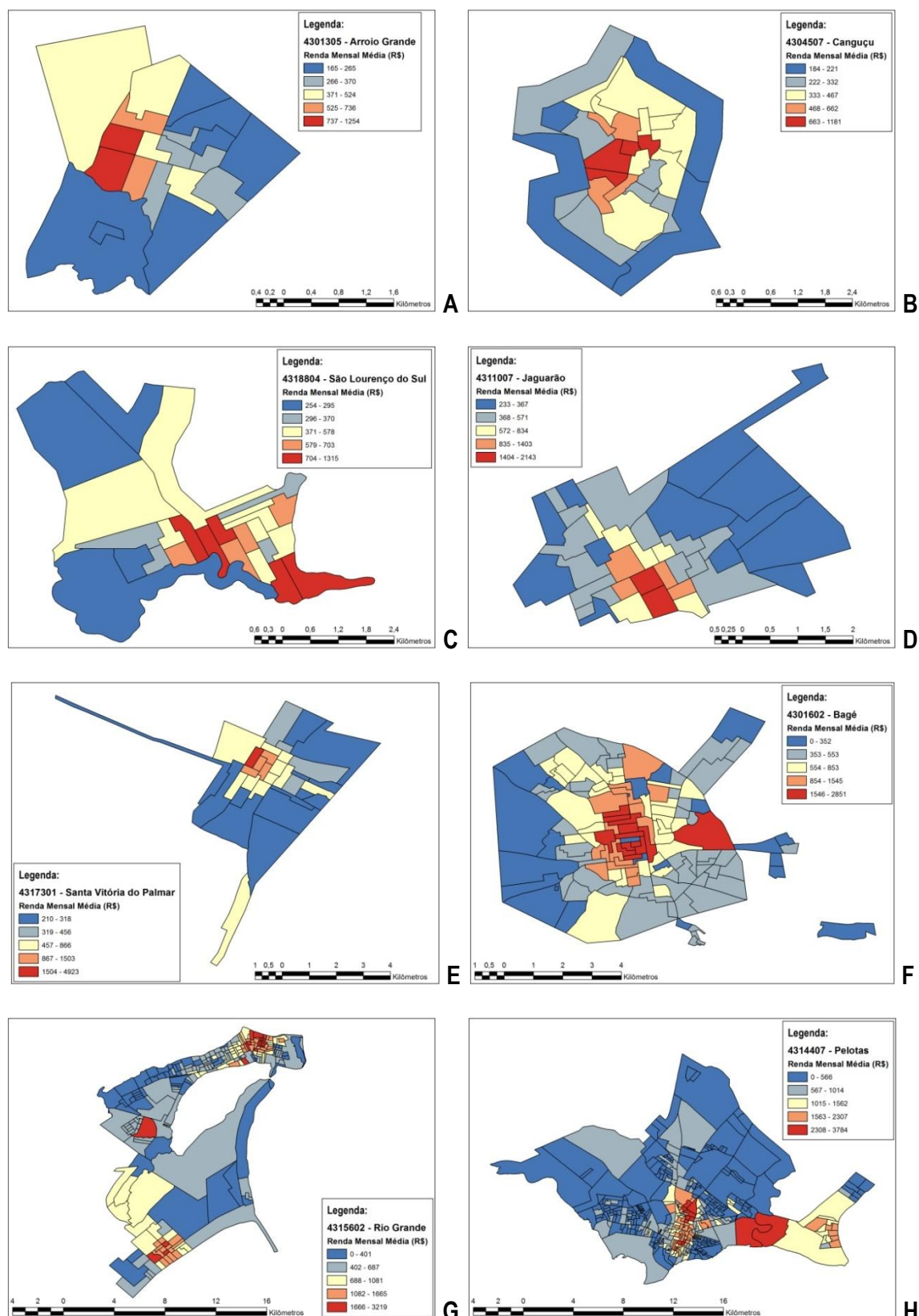


Figura 1.4: Mapas de renda média per capita do setor censitário, no Censo 2000 (maiores rendas em vermelho e menores em azul): A) Arroio Grande, RS; B) Canguçu, RS; C) São Lourenço do Sul, RS; D) Jaguarão, RS; E) Santa Vitória do Palmar, RS; F) Bagé, RS; G) Rio Grande, RS; H) Pelotas, RS. Fonte: IBGE, <<http://www.ibge.gov.br>>, editado pelo autor no software ArcGIS 9.3.

Segundo Barros (2004), diferentemente das cidades dos países de Primeiro Mundo, as cidades latino americanas ainda seguem o padrão centro-periferia, com população de maior renda nas áreas centrais e a população de baixa renda localizada nas bordas. Esse padrão pode ser observado nos mapas da Figura 1.4. Em todas as cidades apresentadas, o centro comercial, econômico e histórico apresenta setores censitários com estratos de renda superior, assim como todas as cidades apresentam setores censitários com estratos de renda inferiores em suas bordas.

Pelotas (fig. 1.4H) e Rio Grande (fig. 1.4G), as duas maiores cidades da região, possuem características de cidades polinucleadas, com conformação de um segundo centro em bairros balneários, sendo esses centros também concentradores de atividades comerciais, serviços e equipamentos. Os balneários também concentram população de maior renda nos centros e possuem diminuição da renda média nos setores de suas respectivas periferias. Juntamente com Bagé (fig. 1.4F), a terceira maior cidade da região, essas duas cidades também mostram presença de setores com maior renda fora de seus centros. Esses setores correspondem aos tipos de urbanizações que parecem estar associados ao que Barros (2004) chama de “movimento das elites para as periferias” e às formações semelhantes ao *urban sprawl* (fig. 1.5). São núcleos destinados à população de maior poder aquisitivo, sendo alguns fechados por muros, cercas ou portarias, ou abertos, mas possuindo vigilância ostensiva nas ruas.



Figura 1.5: Núcleos de alta renda descentralizados. À esquerda: área efetivamente urbanizada, com destaque para os centros (em branco) e os núcleos de alta renda (em vermelho). À direita: núcleos de alta renda. A) Bagé; B) Rio Grande; C) Pelotas. Fontes: desenho do autor sobre imagem *Google Earth*, 2012.

Nas demais cidades analisadas a presença de núcleos de alta renda distantes dos centros não é percebido, com exceção de São Lourenço do Sul (fig. 1.4C). Essa cidade possui uma segunda área de alta renda, localizada em uma praia da Laguna dos Patos, mas pode não traduzir o movimento das elites, pois, em função do porte pequeno da cidade, essa é uma área muito próxima do centro.

Quanto às características e aos padrões de localização e forma dos núcleos periféricos de alta renda, eles normalmente ocupam grandes glebas urbanas, com concentração de estoques edificados relativamente inferior ao que é encontrado em outras áreas da cidade (em função do maior tamanho de lotes), podendo se inferir menores densidades demográficas. São loteamentos planejados, localizados na cidade em áreas distantes dos centros, porém próximos do sistema viário principal, indicando facilidades de acesso. Muitos são encontrados nas proximidades de áreas de melhor qualidade do ambiente natural, como cursos d'água e praias. Parecem tender a estar localizados distantes de áreas de baixa renda, embora seja possível encontrar casos de proximidade.

Núcleos de periferização existem em maior quantidade e aparentam estar associados a dois tipos de formação: 1) produção formal de conjuntos habitacionais e loteamentos de interesse social (fig. 1.6); 2) assentamentos espontâneos ou informais (fig. 1.7). Os núcleos formais tendem a ocupar áreas maiores no tecido urbano, enquanto núcleos informais tendem a gerar núcleos menores e espalhados pela cidade. Essas nucleações costumam crescer por acréscimo das áreas originais, indicando uma dinâmica de atração para vizinhanças similares (Barros, 2004) (fig. 1.8). Ambos os tipos são encontrados, principalmente, nas bordas das cidades, em áreas distantes do centro, dificultando a oferta de infraestrutura, equipamentos e serviços. Devido ao pequeno tamanho dos lotes, tanto os núcleos formais quanto os informais tendem a concentrar edificações e possuir maiores densidades demográficas.

Ainda que possam ser encontrados em enclaves próximos dos centros, os núcleos de baixa renda tendem a surgir em áreas distantes das centralidades e com menor acesso ao sistema viário principal. Normalmente estão próximos de estruturas da paisagem natural que são restritivas à urbanização ou são de baixo interesse ao investimento imobiliário. Ocasionalmente são áreas de risco, tais como: áreas públicas (próximas de leitos ferroviários, zonas de expansão portuária ou aeroportuária (fig. 1.6B), pedreiras abandonadas (fig. 1.7C)); áreas degradadas (próximas de aterros sanitários); áreas de proteção ambiental (próximas de cursos d'água³ (fig. 1.6A, 1.7B, 1.7D, 1.8A), matas (fig. 1.7A), dunas (fig. 1.8B), banhados, áreas inundáveis). A exceção está nos conjuntos e loteamentos de interesse social, que são encontrados em áreas de menores restrições à urbanização, mas de baixo interesse econômico para as populações de maior renda.

³ Quanto à localização nas proximidades de rios, arroios e afins, as ocupações de baixa renda se diferem dos núcleos de alta renda por tender a estar localizadas às margens de cursos d'água degradados por depósito de lixo, despejo de esgotos ou outros tipos de poluição.



Figura 1.6: Núcleos de baixa renda gerados em loteamentos formais de interesse social: A) Arroio Grande; B) Rio Grande. Fontes: Google Earth, 2011.

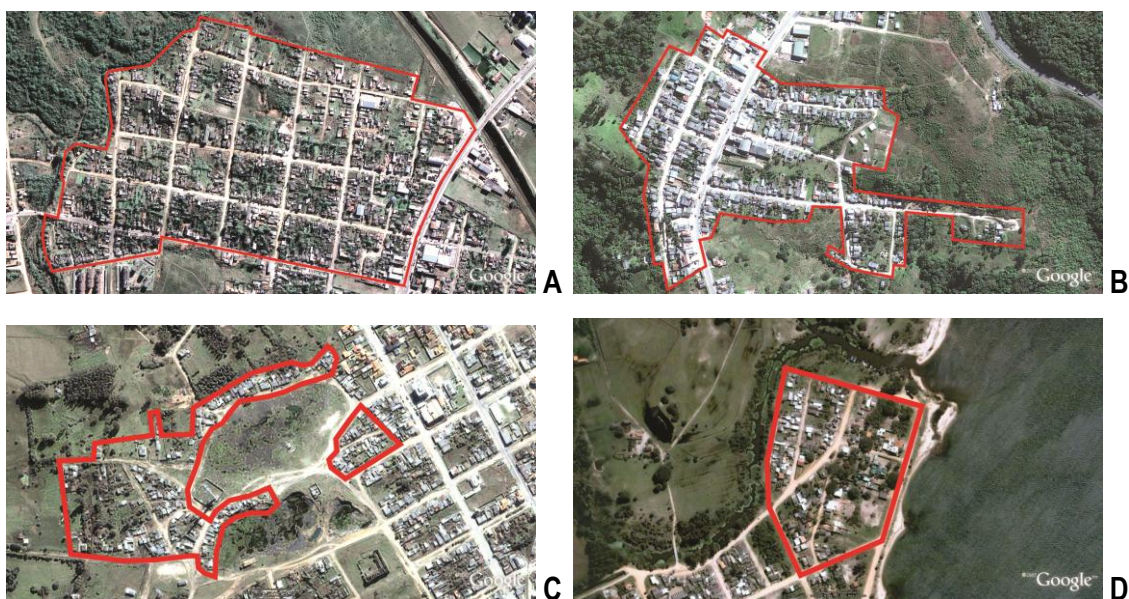


Figura 1.7: Núcleos de baixa renda formados em assentamentos informais: A) Bagé; B) Caçapava do Sul; C) Jaguarão; D) São Lourenço do Sul. Fontes: Google Earth, 2011.



Figura 1.8: Crescimento por acréscimo em núcleos de baixa renda: A) Pelotas, 2002 e 2010; B) Rio Grande, 2002 e 2009. Fontes: desenho do autor sobre imagem Google Earth.

Outros casos de formações de núcleos de alta renda e, principalmente, de baixa renda podem ser encontrados nas mesmas cidades apresentadas e nas outras cidades da região, sendo possíveis de identificar semelhanças nas suas características de forma e localização na estrutura da cidade. De maneira resumida, com base nessas observações empíricas, pode-se inferir o seguinte:

- As cidades crescem espacialmente e as bordas da cidade aparecem como local onde ocorrem expansões do tecido urbano sobre o ambiente natural ou rural, com destaque para uso residencial.
- Nas cidades latino americanas, o padrão de organização socioespacial ainda é o centro-periferia, o que pode ser observado nas cidades do sul do Rio Grande do Sul.
- O “movimento das elites para as periferias”, com núcleos descentralizados com população de alta renda não é percebido nas menores cidades do sul do Rio Grande do Sul, onde as dinâmicas de mudança da forma urbana são mais lentas, mas pode ser visto nas maiores cidades da região, indicando que é um fenômeno a ser considerado em cenários de futuro.
- Os núcleos periféricos de alta renda parecem se caracterizar por ocupar maiores glebas, em loteamentos com menor concentração de estoques construídos, próximos do sistema viário principal e de privilégios do ambiente natural e distantes de áreas de baixa renda.
- Os núcleos periféricos de baixa renda parecem estar associados ao menor acesso ao sistema viário principal e maior concentração de estoques construídos. Aqueles produzidos de maneira formal aparentam forma maior e mais compacta; enquanto os núcleos informais possuem morfologia fragmentada em pequenos núcleos (às vezes lineares, em leitos ferroviários, costas de cursos d’água) e se expandem por acréscimo das áreas originais. Esses núcleos costumam estar localizados em áreas com fatores naturais ou urbanos restritivos à urbanização.

Nas cidades do sul gaúcho também é encontrada concentração de população com renda superior no centro da cidade e em áreas não periféricas. De mesma forma, áreas com populações de baixa renda também são encontradas fora das bordas das cidades, ocupando enclaves urbanos próximos de áreas mais centrais, buscando maiores vantagens locais em terrenos negligenciados. Por outro lado, assim como nas áreas centrais são encontradas populações de alta e baixa renda, nas bordas das cidades também são encontradas outros tipos periféricos, como loteamentos para populações de rendas intermediárias ou para outros usos não residenciais, como os núcleos industriais. Entretanto, o trabalho aqui apresentado destina seu foco para o recorte tipológico dos núcleos prioritariamente residenciais dos extremos socioeconômicos; o recorte espacial na escala de cidade para áreas não urbanizadas, em especial as bordas periféricas ou grandes vazios; e, na escala de região, o recorte espacial

para as cidades da zona sul do Rio Grande do Sul (fig. 1.3B). O estudo de caso, que será apresentado no capítulo 5, está delimitado por esse mesmo recorte espacial.

1.3 Objetivos de pesquisa

Partindo da apresentação da temática do crescimento periférico das cidades, estudado a partir de sua dinâmica morfológica, através de modelagem e simulação urbana, pode-se indicar o seguinte objetivo geral da pesquisa:

Identificar relações entre morfologia urbana e dinâmicas do crescimento periférico, capturando padrões de forma e localização relativos à produção das periferias em cidades do sul do Rio Grande do Sul, considerando a integração entre aspectos da cidade e do ambiente natural.

Relacionados ao objetivo geral encontram-se os objetivos específicos, os quais abordam três diferentes enfoques: teórico, metodológico e empírico. São eles, respectivamente:

- 1) *construir interpretação teórica sobre o crescimento periférico urbano, com ênfase nas cidades do sul brasileiro, contribuindo para o avanço na área de estudos da morfologia urbana.*
- 2) *desenvolver um processo ou instrumento novo no campo da modelagem urbana, através de autômatos celulares, dedicado ao caso da formação de periferias, considerando características de vizinhanças e do ambiente natural.*
- 3) *simular o fenômeno do crescimento periférico em uma cidade de médio porte do sul do estado do Rio Grande do Sul.*

1.4 Questionamentos e hipóteses de pesquisa

Com base nos objetivos de pesquisa, é possível formular questionamentos, cujas respostas são buscadas ao longo do trabalho. Todavia, para dar início ao processo de investigação, hipóteses são lançadas, sendo interpretadas como respostas provisórias aos questionamentos formulados, de maneira a auxiliar no desenvolvimento das bases teóricas e metodológicas e no delineamento experimental da pesquisa.

A principal pergunta que norteia essa investigação e sua hipótese associada, relacionada ao objetivo geral, são as seguintes:

Questão principal: *quais padrões espaciais de forma e localização na estrutura urbana estão associados às periferias no processo de crescimento urbano das cidades do sul do Rio Grande do Sul?*

Hipótese principal: *os padrões espaciais de forma e localização das periferias urbanas estão associadas à concentração de facilidades urbanas, concentração de estoques construídos, características do ambiente natural e relações de vizinhança.*

Associadas à pergunta geral e aos objetivos específicos são enunciadas outros questionamentos e as hipóteses formuladas em resposta a eles:

Questão 1: *como abordar o fenômeno do crescimento periférico, a partir dos padrões de forma e localização, de modo a permitir a compreensão da dinâmica socioespacial das periferias urbanas?*

Hipótese 1: *o crescimento periférico ocorre nas bordas de interface entre a cidade e o ambiente não urbanizado e, sendo assim, o fenômeno pode ser abordado através sua morfologia (seus padrões de forma e localização das periferias) e considerando integralmente aspectos urbanos e elementos da paisagem natural e suas inter-relações.*

Questão 2: *como capturar e simular a formação de periferias urbanas em ambiente computacional?*

Hipótese 2: *a formação de periferias urbanas pode ser capturada e simulada considerando que: a) periferias de baixa renda estão relacionadas à rarefação de facilidades urbanas, maiores densidades construídas, maiores restrições do ambiente natural à urbanização e exercem atração para similaridade de vizinhança; b) periferias de alta renda também estão associadas à atração para vizinhanças similares, mas possuem repulsa às vizinhanças de baixa renda, ocorrem em áreas com menores restrições de conversão do ambiente natural, menores densidades construídas e com melhor dotação de facilidades urbanas (embora em menor concentração que os centros das cidades). Para isso, como premissa do trabalho, é utilizada a técnica de autômatos celulares, que é baseada nas relações de vizinhança celular e*

permite a modelagem e simulação de processos dinâmicos, como o caso do fenômeno do crescimento periférico.

Questão 3: *é possível explicar o crescimento periférico a partir das localização e arranjos formais das periferias urbanas em cenários de futuro para as cidades do extremo sul do Brasil?*

Hipótese 3: *a localização e a forma das periferias urbanas podem ser explicadas a partir da concentração de facilidades urbanas, da concentração de estoques construídos, de características do ambiente natural que restrinjam a urbanização e de suas relações de similaridade de vizinhança; e podem ser mensuradas com uso de modelagem urbana e SIG, bem como por descritores de sua morfologia.*

1.5 Estrutura da investigação

O título do trabalho, Cidade e crescimento periférico: modelagem e simulação da formação de periferias urbanas com autômatos celulares, procura expressar o problema central da pesquisa, que é o crescimento periférico das cidades, relacionado à formação de periferias para uso residencial de populações de estratos inferiores e superiores de renda. Também resume a abordagem metodológica com a qual o problema será estudado, através de técnicas de modelagem e simulação urbana com autômatos celulares.

No Capítulo 1. Introdução, como visto, foi feita a apresentação e contextualização do tema, com indicações sobre a abordagem teórica e metodológica da pesquisa. Também foram apresentadas observações empíricas sobre o fenômeno do crescimento periférico, propondo um recorte espacial para o estudo. Por fim foram traçados os objetivos do trabalho e enunciadas perguntas de pesquisa e respectivas hipóteses.

A revisão teórica está dividida em dois capítulos. O Capítulo 2. Crescimento periférico urbano traz a primeira parte da revisão teórica, focando no problema de pesquisa, que é a formação de periferias nas cidades, contextualizando e conceituando o fenômeno e apresentando suas características morfológicas. Já o Capítulo 3. Morfologia e modelagem é dedicado à revisão bibliográfica das bases metodológicas com que o problema de pesquisa será estudado, apresentando conceitos, paradigmas contemporâneos, a técnica de autômatos celulares e modelos que a aplicam para estudos sobre a formação de periferias urbanas.

O Capítulo 4. Método e modelo traz o delineamento metodológico aplicado na investigação. Também apresenta o modelo de simulação do crescimento urbano SACI (Polidori, 2004), implementado no *software CityCell* (Saraiva *et al.*, 2011; Polidori *et al.*, 2011), mostrando suas características, variáveis, rotinas de cálculo e dados de saída. Complementarmente ao método, no Capítulo 5. Procedimentos propostos para modelagem da formação de periferias urbanas: o caso de Pelotas estão apresentados os procedimentos propostos para a modelagem e simulação do crescimento periférico, exemplificados através da aplicação em estudos exploratórios para a cidade de Pelotas, RS. No estudo, são testadas as hipóteses sobre a dinâmica de formação de periferizações e urbanizações fechadas, a partir da modelagem e simulações com procedimentos com CA e SIG, avaliadas por descritores de forma e localização na estrutura espacial da cidade.

No Capítulo 6. Conclusões é feita a avaliação do alcance dos objetivos e validade das hipóteses, traçando conclusões sobre a investigação, apresentando observações verificadas ao longo da pesquisa, indicando limitações e propondo continuidades para sequência de estudos. Logo após são listadas as referências usadas na confecção da dissertação e, por fim, apresentados os anexos.

Capítulo 2. CRESCIMENTO PERIFÉRICO URBANO

O capítulo 2 inicia a etapa de revisão teórica abordando a problemática do crescimento periférico urbano, visando conceituar o fenômeno e fornecer bases para sua modelagem. Para isso, o capítulo traz inicialmente uma contextualização do fenômeno no cenário atual de constante urbanização, passando pela questão da segregação social do espaço urbano e termina com a apresentação de características morfológicas de urbanizações fechadas e de periferização.

2.1 População e crescimento espacial

Há pouco mais de 100 anos, no início do século XX, viver em uma cidade não era uma realidade para a maioria da população do planeta. Ainda que existissem várias cidades bastante populosas no mundo, elas concentravam apenas cerca de 15% da humanidade. Com o passar do século, o predomínio da população rural foi diminuindo e, na entrada dos anos 2000, a quantidade de pessoas vivendo em meio urbano já ultrapassava 50% do total. Esse número mostra um processo da urbanização que tem sido percebido como um fenômeno de escala mundial, contínuo e crescente, principalmente em países sub-desenvolvidos ou em desenvolvimento (Souza, 2003). Estima-se que, no ano de 2030, 60% a população mundial esteja concentrada em áreas urbanas (UN-Habitat, 2008; Liu, 2009) e que, em 2050, as cidades sejam responsáveis por quase a totalidade do crescimento populacional global (Davis, 2006). Para América Latina as estimativas são de que a concentração urbana atinja a marca de 75% em 2025 (Brakarz, 2002). Em vários países, esse percentual já ultrapassou os 3/4 da população, como o caso do Brasil, cujo registro do Censo de 2010 aponta que 84,35% das pessoas vivem em cidades (IBGE, 2010).

O aumento da urbanização ao longo do século XX, em países latino-americanos, guarda relações com o desenvolvimento industrial e o crescimento populacional que o acompanhou. Tomando o caso brasileiro como exemplo, em 1900 a população registrada era de pouco mais de 17 milhões de habitantes e, 100 anos depois, o Censo de 2000 apontou pouco menos de 170 milhões. A taxa geomé-

trica de crescimento iniciou o século passado com uma média anual de cerca de 2%, aproximando-se de 3% entre as décadas de 1950 e 1970, quando a América Latina, num quadro geral, também registrou seu *boom* populacional.

Entretanto, as taxas de crescimento populacional estão diminuindo na América Latina, principalmente a partir dos anos de 1980, com tendências de seguir assim (Barros, 2004). No Brasil, na mesma década, a taxa geométrica de crescimento populacional, já em queda, começou a apresentar média inferior a 2% ao ano, atingindo atualmente, para o intervalo de tempo entre 2000 e 2010, uma média de 1,17% ao ano (tab. 2.1). Valores abaixo de 1,5% ao ano não eram encontrados desde o censo de 1940.

POPULAÇÃO E TAXA MÉDIA DE CRESCIMENTO ANUAL - BRASIL - 1872-2010		
datas	população residente	taxa média geométrica de crescimento anual (%)
01/08/1872	9.930.478	-
31/12/1890	14.333.915	2,01
31/12/1900	17.438.434	1,98
01/09/1920	30.635.605	2,91
01/09/1940	41.165.289	1,49
01/07/1950	51.941.767	2,39
01/09/1960	70.070.457	2,99
01/09/1970	93.139.037	2,89
01/09/1980	119.002.706	2,48
01/09/1991	146.825.475	1,93
01/08/2000	169.799.170	1,64
01/08/2010	190.755.799	1,17

Tabela 2.1: Dados de população e taxa geométrica de crescimento anual média para o Brasil, entre 1872 e 2010. Fonte: IBGE, 2011.

Alguns municípios brasileiros mostraram andar no caminho inverso à tendência de queda populacional, com taxas muito superiores à média nacional. Em 19 casos (14 localizados nas regiões Centro-Oeste e Norte do país) a população dobrou em quantidade no período 2000-2010. Por outro lado, de um universo de 5565 municípios brasileiros, 1520 (cerca de 27% do total do país) apresentaram taxas negativas, com diminuição da população municipal, como o caso de 275 municípios do estado do Rio Grande do Sul (cerca de 55% do total do estado). Na tabela 2.2 está apresentada a taxa de crescimento populacional para os municípios da zona sul do Rio Grande do Sul, mostrando principalmente valores próximos de zero ou negativos.

Municípios da zona sul do Rio Grande do Sul			
Nome do município	Total da população 2000	Total da população 2010	Taxa de crescimento (% aa)
Aceguá	0	4.394	s/d
Amaral Ferrador	5.740	6.355	1,02
Arroio do Padre	0	2.730	s/d
Arroio Grande	19.152	18.469	-0,36
Bagé	118.767	116.792	-0,17
Caçapava do Sul	34.643	33.700	-0,28
Candiota	8.065	8.776	0,85
Canguçu	51.447	53.268	0,35
Capão do Leão	23.718	24.294	0,24
Cerrito	6.925	6.404	-0,78
Chuí	5.167	5.919	1,37
Cristal	6.632	7.280	0,94
Herval	8.487	6.757	-2,25
Hulha Negra	5.359	6.048	1,22
Jaguarão	30.093	27.942	-0,74
Morro Redondo	5.998	6.231	0,38
Pedras Altas	0	2.218	s/d
Pedro Osório	8.107	7.817	-0,36
Pelotas	323.158	327.778	0,14
Pinheiro Machado	14.594	12.787	-1,31
Piratini	19.414	19.831	0,21
Rio Grande	186.544	197.253	0,56
Santa Vitória do Palmar	33.304	31.002	-0,71
São José do Norte	23.796	25.523	0,70
São Lourenço do Sul	43.691	43.114	-0,13
Tavares	5.342	5.351	0,02
Turuçu	3.710	3.522	-0,52
Total	991.853	1.011.555	0,20

s/d = sem dados, para municípios emancipados após o ano 2000

Tabela 2.2: Contagem de população dos municípios da zona sul do Rio Grande do Sul, nos censos de 2000 e 2010 e taxa crescimento para o período. Fonte: IBGE, <<http://www.ibge.gov.br>>, adaptado pelo autor.

Conforme Torres (2007), ainda que haja declínio na quantidade de população, as cidades seguem crescendo espacialmente, independente de seu porte⁴. Isso vai ao encontro do que pode ser percebido nas tabelas seguintes, as quais mostram que mesmo em municípios com diminuição nas taxas de crescimento populacional municipal (tab. 2.2), a população urbana segue aumentando (tab. 2.3). Também demonstra que a “invenção” de novos lugares, prática do processo de produção e reprodução de espaço urbano, segue sendo uma atividade de importância econômica e política, reforçando o papel do setor imobiliário e da construção civil na estrutura do sistema capitalista (Harvey, 1985; Abramo, 2007). Dados do Censo 2010 mostram que houve aumento da quantidade de domicílios em todas as cidades da zona sul do Rio Grande do Sul (tabela 2.4). Em algumas cidades, a quantidade de

⁴ No Brasil, é apontado maior destaque para as cidades de porte médio (Souza, 2003; Barros, 2004; Sposito, 2008).

novos domicílios, que surgiram no intervalo de 10 anos entre censos, se aproxima de 50% do que havia no ano 2000.

Municípios da zona sul do Rio Grande do Sul				
Nome do município	Total da população urbana 2000	% de população urbana em 2000	Total da população urbana 2010	% de população urbana em 2010
Aceguá	s/d	s/d	1.059	24,10
Amaral Ferrador	1.131	19,70	1.866	29,36
Arroio do Padre	s/d	s/d	454	16,63
Arroio Grande	15.692	81,93	16.086	87,10
Bagé	97.290	81,92	97.762	83,71
Caçapava do Sul	19.328	55,79	25.420	75,43
Candiota	2.657	32,94	2.600	29,63
Canguçu	17.695	34,39	19.696	36,98
Capão do Leão	21.354	90,03	22.378	92,11
Cerrito	3.968	57,30	3.747	58,51
Chuí	4.859	94,04	5.699	96,28
Cristal	4.014	60,52	4.077	56,00
Herval	4.461	52,56	4.523	66,94
Hulha Negra	2.416	45,08	2.914	48,18
Jaguarão	27.174	90,30	26.101	93,41
Morro Redondo	2.151	35,86	2.648	42,50
Pedras Altas	s/d	s/d	772	34,81
Pedro Osório	7.291	89,93	7.309	93,50
Pelotas	301.081	93,17	305.696	93,26
Pinheiro Machado	10.201	69,90	9.791	76,57
Piratini	9.853	50,75	11.564	58,31
Rio Grande	179.208	96,07	189.472	96,06
Santa Vitória do Palmar	27.952	83,93	26.890	86,74
São José do Norte	17.294	72,68	17.403	68,19
São Lourenço do Sul	23.463	53,70	24.234	56,21
Tavares	2.604	48,75	3.299	61,65
Turuçu	1.638	44,15	1.487	42,22
Total	804.775	81,14	834.947	82,54

s/d = sem dados, para municípios emancipados após o ano 2000

Tabela 2.3: Comparativo entre a população urbana dos municípios da zona sul do Rio Grande do Sul, nos censos de 2000 e 2010. Fonte: IBGE, <<http://www.ibge.gov.br>>, adaptado pelo autor.

Municípios da zona sul do Rio Grande do Sul			
Nome do município	Total de domicílios 2000	Total de domicílios 2010	Taxa de crescimento (% aa)
Aceguá	s/d	1.723	s/d
Amaral Ferrador	1.676	2.570	4,37
Arroio do Padre	s/d	783	s/d
Arroio Grande	6.195	8.173	2,81
Bagé	35.736	43.105	1,89
Caçapava do Sul	10.855	15.258	3,46
Candiota	2.347	3.542	4,20
Canguçu	15.167	20.935	3,28
Capão do Leão	6.955	8.950	2,55
Cerrito	2.275	2.917	2,52
Chuí	1.562	2.290	3,90
Cristal	1.923	2.815	3,88
Herval	2.865	3.529	2,11
Hulha Negra	1.631	2.428	4,06
Jaguarão	9.708	11.654	1,84
Morro Redondo	1.924	2.827	3,92
Pedras Altas	s/d	1.015	s/d
Pedro Osório	2.652	3.339	2,33
Pelotas	100.370	129.145	2,55
Pinheiro Machado	4.888	5.875	1,86
Piratini	6.326	9.536	4,19
Rio Grande	57.836	81.477	3,49
Santa Vitória do Palmar	10.683	17.127	4,83
São José do Norte	7.453	11.798	4,70
São Lourenço do Sul	11.819	15.719	2,89
Tavares	1.757	2.766	4,64
Turuçu	987	1.283	2,66
Total	298.137	412.579	3,30

s/d = sem dados, para municípios emancipados após o ano 2000

Tabela 2.4: Quantidade de domicílios dos municípios da zona sul do Rio Grande do Sul, nos censos de 2000 e 2010 e taxa crescimento para o período. Fonte: IBGE, <<http://www.ibge.gov.br>>, adaptado pelo autor.

Conforme visto nas tabelas, ainda que haja uma tendência de diminuição populacional, é esperado que as cidades sigam apresentando dinâmicas de crescimento urbano. Guardadas as diferenças de proporção entre os portes de cidades, essas dinâmicas podem estar relacionadas tanto ao crescimento interno quanto às expansões da área efetivamente urbanizada das cidades, onde há conversão de solo não urbanizado em novas áreas urbanas. É nesse processo de expansão do tecido urbano que se insere o objeto de estudo dessa pesquisa, o crescimento periférico, com surgimento de novas áreas residenciais marcadas por diferenças sociais, que, no caso brasileiro, possuem destaque aquelas relacionadas à segregação por classes socioeconômicas, como será visto no item a seguir.

2.2 Segregação socioespacial e crescimento periférico

As cidades, cada vez mais, têm exercido um forte poder de atração para o ser humano. Cidades são vistas, além de centros de gestão e poder, como locais de concentração de oportunidades, diversidades e sinergias de mercado, arranjos produtivos, oferta de serviços, oferta de trabalho, relações sociais; atividades culturais, produção artística e intelectual (Johnson, 2011). Em contraposição, o espaço urbano também tem sido marcado por aspectos negativos, tais como a segregação urbana. Esse tipo de segregação é caracterizado por uma profunda divisão social da população, com forte expressão na dimensão espacial das cidades (Netto e Krafta, 1999; Villaça, 2001). Outros problemas urbanos estão associados com a segregação socioespacial, tais como a rarefação de facilidades (serviços, equipamentos, infraestrutura), a violência urbana, a degradação do ambiente natural, as tragédias relacionadas às ocupações de áreas de risco. Um dos fenômenos que tem acompanhado o processo de urbanização contemporâneo e está relacionado ao crescimento físico das cidades e à segregação socioespacial é o tema principal do presente trabalho: o crescimento periférico.

Usando a expressão “*periurban dynamics*”, Czamanski *et al.* (2008) explica o fenômeno como sendo um processo de crescimento que ocorre nas fronteiras da cidade e onde há interação entre os meios urbano, rural e natural. Aguilar e Escamilla (2009) citam que o crescimento periférico, nas bordas, como um padrão de urbanização dispersa que se dá em um ritmo mais rápido que no conjunto como um todo, transformando ecossistemas e modificando o futuro da ordem social e ambiental. De forma mais sintética, Barros (2004) e Torrens (2006) explicam o crescimento periférico simplesmente como um crescimento rápido através de suburbanização, que ocorre nas bordas das cidades. Barros (2004) alerta para as diferenças de abordagens sobre o fenômeno, que conduzem a destacar dois tipos de formações periféricas, os quais possuem morfologias diferentes e, principalmente, um predomínio diferente de estratos de renda da população residente.

Nos países desenvolvidos (ou Primeiro Mundo), segundo Barros (2004), o enfoque dos estudos relacionados ao crescimento periférico está no chamado *urban sprawl*⁵, que é um tipo de formação periférica destinada aos núcleos residenciais produzidos para população de média-alta e alta renda. Como visto, nos países subdesenvolvidos ou em desenvolvimento (ou Terceiro Mundo), formações semelhantes ao *sprawl* também são encontradas, principalmente nas grandes e médias cidades, tais como as chamadas urbanizações fechadas⁶ (Buzai e Marcos, 2012). Conquanto, nesses países, o

⁵ Na literatura, *urban sprawl* pode ser encontrado traduzido para expressões como expansão urbana, alastramento ou espraiamento urbano (Jakob, 2002). São termos muito genéricos e que não explicam as peculiaridades do fenômeno, podendo inclusive não guardar relação com fatores socioeconômicos e conduzir à associação do termo em inglês às expansões formais para populações de qualquer renda.

⁶ As expressões *closed urbanization* ou *closed communities* são usadas por Buzai e Marcos (2012) para tratar de núcleos residenciais para populações de maior renda. Ainda que, conforme item 1.2, nas cidades do sul do Rio Grande do Sul sejam

principal problema abordado é a periferização⁷, relacionada à concentração de população de baixa renda (Barros, 2004).

Domingues (1995), usando a expressão “subúrbios”, os conceitua como sendo um tipo de formação urbana extensiva e fragmentada, localizada às margens da cidade, podendo ser planejados de maneira formal ou ocupados na informalidade. Nas bordas das cidades brasileiras – e de outros países semelhantes –, é possível encontrar tanto núcleos de baixa renda quanto de alta renda, bem como núcleos produzidos formalmente ou informalmente.

A periferização no Brasil, conforme Maricato (2001), está associada às obras de higienização e embelezamento que ocorreram, entre o final do século XIX e início do século XX, nas grandes cidades do país na época. A população pobre, removida de suas moradias, rumava para áreas de morros e bordas das cidades. Ainda que já existissem núcleos informais no país, como relatou Maricato, para Bonduki (1994), o marco inicial do processo de periferização no Brasil data da década de 1940. Segundo o autor, esse marco coincide com a época das primeiras iniciativas governamentais dedicadas a questão da solução do déficit habitacional brasileiro. Influenciadas pelo congelamento nos valores dos aluguéis, essas iniciativas levaram a população pobre despejada dos imóveis centrais e os novos migrantes rurais para loteamentos periféricos em terrenos públicos – marcados pela autoconstrução da habitação e por deficiências de infraestrutura urbana.

Após isso, no período que funcionou o programa nacional de habitação do SFH/BNH (Sistema Financeiro de Habitação/Banco Nacional da Habitação), entre 1964 e 1986, cerca de 33% do total de moradias executadas foram destinadas à população de baixa renda. Com o aumento dos preços dos terrenos urbanos, conforme relatam Maricato (2001) e Rolnik e Nakano (2009), muitas dessas moradias foram construídas em conjuntos implantados nas bordas das cidades, contribuindo para a periferização nas cidades brasileiras.

[...] as aquisições eram feitas quase sempre de forma isolada, mais influenciadas pelas ofertas dos terrenos, e destacadamente por seus custos. Em consequência, os terrenos financiados encontravam-se cada vez mais distantes dos centros urbanos, em áreas nem sempre prioritárias para o crescimento físico das cidades, e que exigiam investimentos adicionais por parte do poder público, para o provimento dos serviços necessários. (Serpa *apud* Rolnik *et al.*, 2008, p. 2)

encontrados núcleos não fechados por muros (ou cercas, grades), é assumido o uso da tradução “urbanizações fechadas” em função das características morfológicas e segregadoras, as quais serão apresentadas nas próximas páginas.

⁷ Barros (2004) utiliza a palavra *peripherisation*, que é um neologismo em língua inglesa. Ainda que possa ser entendido como um termo genérico, a conceituação dada pela autora, explicando periferização como a urbanização para uso predominantemente residencial de população de baixa-renda, faz parte da conotação popular e justifica assumir o seu uso nessa dissertação.

A localização dos terrenos em áreas periféricas, distantes da malha urbana, aumenta o custo social, com a necessidade de levar a localidades distantes as redes de infraestrutura de energia elétrica, água potável e saneamento, coleta de lixo, equipamentos comunitários, bem como a oferta de serviços de transporte coletivo, visto que a população passa a viver longe dos postos de trabalho. Essa urbanização incompleta é uma característica comum tanto à produção formal quanto à produção informal dos núcleos periféricos de baixa renda (Rolnik, 2004).

Entendam-se como núcleos informais aqueles também chamados de assentamentos espontâneos⁸, que são produzidos pelos próprios moradores, sem existência de planos, projetos ou qualquer tipo de controle (Barros, 2004). Brakarz (2002) cita que esses assentamentos costumam estar localizados em terras de pouco interesse comercial, enquanto Villaça (2001) explica que áreas residenciais da população de baixa renda localizam-se em terras urbanas desprezadas pelos estratos de maior renda. Essa característica de dependência da informalidade em relação aos interesses locacionais da população de maior renda e do mercado capitalista denota o fato da renda ser fator preponderante para a segregação socioespacial brasileira. Ou, em outras palavras, conforme cita Abramo (2001), a renda é parâmetro de restrição das escolhas de localização espacial.

Por outro lado, quanto às formações periféricas do tipo urbanizações fechadas, a capacidade diferenciada de consumo do espaço, que a população dos estratos de maior renda possui, torna o fator renda não um parâmetro restritivo, mas sim de liberdade de escolhas locacionais. Sendo assim, no movimento das camadas de alta e média-alta renda dos centros para as periferias, é possível enxergar a segregação socioespacial como um processo de autosegregação (Souza, 2003) ou segregação voluntária (Villaça, 2001). Diante do leque de opções, essas camadas demonstram intencionalidade nas suas decisões de instalação em determinado local e, mais que isso, possuem tendência de estar próximos dos iguais (Barros, 2004). Conforme alega Villaça (2001), a segregação socioespacial é um processo dialético, no qual a segregação daqueles que possuem maior renda provoca a segregação das populações de menor renda.

Essa dialética, percebida por Villaça no processo social da segregação do espaço urbano, está inter-relacionada com sua morfologia. Ou seja, a forma da cidade não é simples resultado “geométrico” dos processos sociais, estando o espaço físico associado diretamente com a sociedade – numa relação dialeticamente interdependente –, o que é chamado por Soja (1993) de “espacialidade”. Ou, como cita o próprio Villaça (2012; p. 16), “não existe transformação social sem a transformação do espaço, e não existe transformação do espaço sem a transformação social”.

⁸ Na literatura e na linguagem popular também é possível encontrar outras expressões para tratar de núcleos informais, como, por exemplo, invasões, ocupações irregulares ou ilegais e loteamentos clandestinos, entre outras.

Padrões morfológicos referentes às espacialidades das periferias urbanas podem auxiliar na sua identificação e contribuir para modelagem das transformações que geram o crescimento periférico. Sendo assim, no próximo item serão apresentadas características encontradas nas morfologias dos núcleos periféricos.

2.3 Caracterização das periferias urbanas

Como visto anteriormente, o crescimento periférico é um fenômeno intrínseco ao crescimento das cidades, que ocorre nas suas bordas e possui uma dinâmica mais rápida que a dinâmica verificada nos espaços intraurbanos. Nas expansões de tecido para uso residencial, destacam-se dois tipos de formação periférica, as urbanizações fechadas e a periferização. Os dois tipos são diferenciados principalmente pela segregação do espaço, constituindo núcleos com predominância de um determinado padrão de renda da população. Entretanto, além do fator renda, existem outros fatores que caracterizam esses tipos de periferias com base em sua dimensão morfológica na macro e micro estrutura urbana, relacionados com padrões de localização e distribuição, tamanho das formas construídas, relações com outras formas construídas, entre outros.

As expansões do tecido urbano (fig. 2.1) consideradas relativas aos assentamentos formais destinados à população de média-alta e alta renda, conforme Torrens (2006), podem ser caracterizadas por possuir baixa densidade demográfica, com homogeneidade de uso do solo, predominantemente residencial unifamiliar. Barros (2004) cita que, embora a população com maior renda seja pouco numerosa (principalmente nos países de Terceiro Mundo), seus núcleos residenciais ocupam grande espaço urbano, reforçando a característica de baixa densidade demográfica. Sua morfologia apresenta padrão difuso e descentralizado em relação ao centro da cidade, o que ocasiona problemas de acessibilidade e forte dependência do transporte automotivo (Torrens e Alberti, 2000; Torrens, 2006).



Figura 2.1: Exemplos de urbanizações do tipo *urban sprawl*, ambos em Albuquerque, EUA. Fontes: A) Google Earth, 2010; B) <http://www.mbl.edu/news/features/feature_blackbirds.html>.

Amato (1970b *apud* Barros, 2004), apresenta três hipóteses que guiariam as decisões locacionais da alta renda e a implantação dos seus núcleos residenciais. São elas:

- Critério de acessibilidade: implantam-se próximos de artérias do sistema viário, de modo a atingir com rapidez as facilidades urbanas que se localizam no centro da cidade.
- Critério de características do sítio: implantam-se nas proximidades ou em áreas de alta qualidade do ambiente natural. É o que Caruso *et al.* (2008) e Sposito (2008) chamam de utilização de “externalidades”, tais como localização com vista para o mar e topografia privilegiada, que permitem a formação de núcleos diferenciados com valor venal do solo também diferenciado.
- Critério de vizinhança imediata: os grupos de maior renda buscam não se instalar próximos aos grupos de baixa renda, indicando a autosegregação da alta renda, como aparece também em Villaça (2001), Gilbert (1987 *apud* Barros, 2004), Davis (2006) e Torrens (2006).

Nas cidades dos países subdesenvolvidos ou em desenvolvimento, sua morfologia está associada ao movimento das populações de extratos de renda superiores em direção às bordas da cidade (Barros, 2004). Esse movimento se dá principalmente nas grandes e médias cidades, com os núcleos sendo construídos como grandes condomínios de lotes fechados (ou loteamentos murados) (Jakob, 2002; Sposito, 2005; Davis, 2006; Torres, 2007a; Buzai e Marcos, 2012) (fig. 2.2). A Figura 2.3 mostra um modelo conceitual simplificado das cidades latino-americanas, adaptado de Torres (2007a, p. 7), mas que auxilia na compreensão da distribuição espacial dos núcleos de alta renda, com relação à cidade consolidada e suas bordas.



Figura 2.2: Loteamentos murados (em processo inicial de ocupação ou construção) em Xangri-Lá, RS. Fonte: desenho do autor sobre imagem *Google Earth*, 2011.

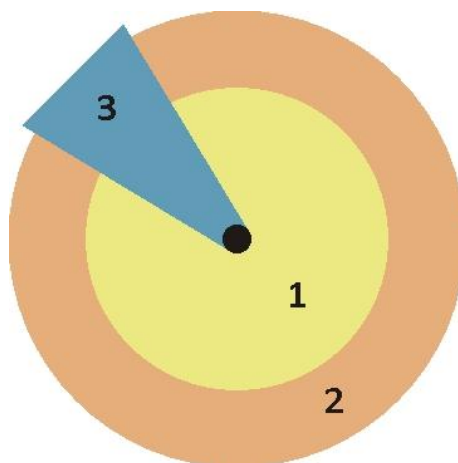


Figura 2.3: Modelo conceitual das cidades latino-americanas: 1) área urbana consolidada; 2) área periurbana de baixa renda; 3) setor de alta renda Fonte: do autor, adaptado de Torres (2007a, p. 7).

Loteamentos do tipo urbanizações fechadas, localizados nas bordas da cidade, possuem aspectos negativos principalmente com relação à sustentabilidade dos empreendimentos. São loteamentos que ocupam grandes áreas do ambiente natural e necessitam de investimentos nas redes de infraestrutura, as quais precisam cruzar longas distâncias para atingir apenas uma pequena parcela da população das cidades. Em função da dependência do transporte automotivo, também geram impactos negativos na mobilidade urbana e na qualidade do ambiente urbano, como congestionamentos e poluição do ar. Além disso, a segregação, principalmente no caso dos loteamentos cercados ou murados, não contribui para o caráter de diversidade e sinergia das relações sociais que a vida nas cidades poderia proporcionar.

Já a periferização (fig. 2.4), relativa às áreas residenciais com concentração de população de baixa renda, principalmente na forma de assentamentos espontâneos, segundo Domingues (1995), possui alternância de elevada densificação e espaços vazios ao longo da franja urbana, na escala de cidade. A dinâmica de crescimento dos núcleos se dá através de expansão por adições sucessivas, em um acréscimo contínuo de ocupações (Domingues, 1995; Barros, 2004).



Figura 2.4: Exemplos de periferização: A) em Porto Alegre, RS; B) em Canguçu, RS. Fontes: Google Earth, 2011.

Em sendo um tipo de expansão do tecido urbano que ocorre nas bordas da cidade, tanto as urbanizações fechadas quanto a periferização têm em seus padrões morfológicos relações com o ambiente natural (ou rural). Se os estratos de alta renda, em função de sua capacidade diferenciada de consumo do espaço, buscam qualidades ambientais nas suas decisões locacionais, as populações de baixa renda, ao contrário, em função das restrições de escolha, optam por ocupar áreas sem privilégios do ambiente natural (Davis, 2006).

[...] los pobres normalmente buscan tierras de poco interés comercial o que están restringidas por la legislación urbana. [...] normalmente tienen restricciones ambientales y suelen presentar riesgos para uso residencial, como son las fuertes pendientes, zonas inundables, suelos contaminados, proximidad a basurales, lechos de ríos y otras. También se producen ocupaciones en terrenos destinados a programas de obras públicas no ejecutadas, tierras declaradas de protección ambiental o de reserva ecológica, o áreas que se han apartado con fines de equipamiento público o ocupadas por infraestructuras en desuso [...] (Brakarz, 2002, p. 15)

Além das características morfológicas, também são características das periferias de baixa renda: falta de equipamentos e serviços (educação, saúde, lazer, transporte); carência de infraestrutura adequada (água potável, saneamento básico, coleta de lixo, pavimentação); insegurança na posse da terra; habitações de baixa qualidade; maiores taxas de crescimento populacional (se comparadas com outras áreas da cidade), população jovem; e altos índices de desemprego formal (Barros, 2004; Torres, 2007a; UN-Habitat, 2010). Essas características das periferias pobres são amplamente conhecidas, mas os processos relativos à forma e à localização espacial de lugares com tais características ainda estão por ser estudados.

2.4 Vizinhanças

Segundo a hipótese de pesquisa principal e algumas das características apresentadas no item anterior, as periferias urbanas estão associadas à concentração de estoques construídos, ou seja, com o modo e intensidade de ocupação da fração privada de solo urbano, o lote. Estão associadas também à concentração de facilidades urbanas, que está relacionada, principalmente, com os espaços de uso público e sua dotação de infraestrutura, equipamentos, serviços e acessos. Além disso, também possuem associação às características do ambiente natural, denotando a existência de inter-relação entre a cidade e a natureza nas escolhas locacionais. Essas hipóteses foram apresentadas a partir de observações empíricas, no início da dissertação, e foram referenciadas a partir de bibliografia, no item anterior. Somam-se às três associações as características de similaridade de vizinhança, também denotando uma

espécie de inter-relação entre a cidade e seus tipos de uso do solo. O termo vizinhança e suas relações são usados no campo de estudos do urbanismo há diversas décadas, bem como da área da modelagem computacional urbana, como será visto a seguir.

Com a crescente urbanização no período da Revolução Industrial, no século XIX, e seus problemas decorrentes, vários teóricos⁹ propuseram alternativas à cidade tradicional. Muitas das propostas tinham como ideal a formação de pequenos núcleos distantes dos centros, com relação com o meio rural ou com a natureza (Benevolo *et al.*, 1987). Adaptando a ideia de uma dessas propostas (a “cidade jardim”, formulado pelo inglês Ebenezer Howard no final dos 1800), o arquiteto americano Clarence Perry cria o conceito de “unidade de vizinhança” (Ferrari, 1979). O termo “vizinhança” aparece para o projeto e planejamento urbano como uma unidade homogênea da cidade, com determinada população e densidade; dotadas de infraestrutura; com equipamentos distribuídos de modo a atender toda essa unidade, em distâncias de fácil percurso e possibilitando o convívio social.

Projetos de cidades modernistas, como Brasília, utilizaram o conceito de unidades de vizinhança como modelo para o projeto de suas áreas residenciais. Núcleos de *urban sprawl* parecem também possuir características associadas aos conceitos de unidade de vizinhança (e de cidade jardim). Todavia, ainda que intencionem agregar qualidades positivas ao modo de viver urbano, unidades de vizinhança também possuem um potencial de isolamento e autossegregação. É o caso das urbanizações de alta renda brasileiras, fechadas ou não, que guardam semelhança com o *urban sprawl*.

Utilizando uma abordagem morfológica em seus estudos, Kevin Lynch (1960) usa o termo *neighborhood*¹⁰ para nomear um dos cinco elementos que definem a imagem de uma cidade. Segundo o autor, *neighborhoods* são regiões da cidade que são reconhecíveis por possuir características similares, sejam físicas (tipos edifícios, gabaritos, tipos de usos) ou sociais (étnicas, socioeconômicas). Com homogeneidade de características, áreas da cidade tradicional, unidades ou conjuntos de unidades de vizinhanças do período modernista ou núcleos de alta renda contemporâneos, podem ser entendidos como um *neighborhood*. Mesmo sem um planejamento formal e com carências na dotação de facilidades urbanas, núcleos de baixa renda também apresentam características comuns que podem permitir ser entendidos como uma *neighborhood* na cidade.

⁹ Entre o final do século XIX e início do século XX, podem ser destacados diversos nomes de teóricos que propuseram alternativas para solucionar os problemas da cidade tradicional e industrial, tais como Robert Owen, François Fourier, Karl Marx, Camilo Sitte, Ebenezer Howard, Tony Garnier, Patrick Geddes, Raymond Unwin, Le Corbusier (Ferrari, 1979).

¹⁰ Em traduções do livro “A imagem da cidade”, de Kevin Lynch (1960), para a Língua Portuguesa, a palavra inglesa *neighborhood* tem sido traduzida como “bairro”. Porém, essa palavra também pode ser traduzida como “vizinhança”, “cercania”, “zona” e “proximidade”, indicando relações que não se limitam na definição de bairro enquanto desagregação política de uma cidade em unidades de planejamento, como é recorrente no Brasil.

As decisões locacionais da alta renda, guiadas pelo critério de vizinhança imediata (Amato, 1970b *apud* Barros, 2004), bem como a dinâmica de expansão da baixa renda, realizada por adições sucessivas (Domingues, 1995; Barros, 2004), seguem relações na escala de vizinhança que vão além de um modelo de projeto urbano e se constituem em um padrão morfológico de arranjo espacial. Na área da modelagem urbana, a técnica de autômatos celulares (CA), inserida na abordagem metodológica dessa pesquisa, também tem nas relações de vizinhanças uma de suas características básicas. Assim como uma periferia de baixa ou alta renda, em um modelo computacional que trabalhe com CA, uma célula tem suas características e sua dinâmica dependentes das características das células vizinhas. Em um ambiente celular, por exemplo, uma célula descrita como não urbanizada poderá se transformar em cidade se na sua vizinhança imediata (ou conforme um raio de vizinhança determinado) existir células com características que potencializem a urbanização.

Essas aproximações entre tema e abordagem e entre hipótese e técnica de pesquisa conduzem à revisão teórica que será apresentada no próximo capítulo, dedicado à morfologia e modelagem. No capítulo 5, dedicado ao estudo de caso, essas aproximações serão exploradas com mais ênfase, com a aplicação do método e a formulação de procedimentos que consideram as relações de vizinhança e visam simular a formação de periferias em ambiente computacional.

2.5 Epílogo do Capítulo 2

No capítulo 2 foram revisados temas e conceitos referentes ao problema de pesquisa. O crescimento periférico foi contextualizado no cenário atual de crescimento das cidades e de segregação social do espaço urbano, permitindo traçar sua conceituação. Entende-se aqui como crescimento periférico as expansões urbanas que ocorrem nas bordas de interface entre a cidade e o ambiente não urbanizado, principalmente para uso residencial, numa rápida dinâmica de interação e conversão de áreas naturais ou rurais em áreas urbanas.

Também foram apresentadas características morfológicas dos tipos de formação periférica para uso residencial, as urbanizações fechadas e a periferização, e as relações de vizinhança no processo de crescimento urbano. Em resumo, segundo revisão teórica, as periferias parecem estar associadas com:

- Facilidades urbanas: carência de facilidades geradas por equipamentos, serviços, infraestrutura e sistema viário principal para baixa renda e, em oposição, concentração dessas facilidades para alta renda.

- Densidade construída: maior densidade demográfica (e, consequentemente, de edificações, em função do menor grão das unidades de parcelamento do solo) em núcleos de baixa renda e menor densidade para urbanizações fechadas.
- Ambiente natural: maiores restrições à urbanização oferecida pelo ambiente natural para núcleos de periferização (em função de legislação, propriedades públicas, áreas abandonadas, risco ou falta de privilégios locacionais); enquanto núcleos de alta renda buscam estar próximos de locais com maiores privilégios, mas com menores restrições, passíveis de exploração e modificação das externalidades oferecidas pela natureza.
- Vizinhanças: adições sucessivas de mesmo tipo para preexistências de periferias de baixa renda; e autosegregação com repulsa dos diferentes, proximidade dos iguais e distância dos diferentes, para núcleos de alta renda.
- Quantidade e forma: para periferização, maior quantidade, com alternância de núcleos que deixam espaços vazios na borda urbana; enquanto para urbanizações fechadas, núcleos descentralizados, com grande tamanho e em menor quantidade.

As características listadas, relacionadas à localização e forma, reforçam as observações empíricas e as hipóteses de pesquisa. No capítulo 3, dedicado à revisão teórica de conceitos relacionados ao campo da morfologia e modelagem urbana, será apresentada a abordagem metodológica da pesquisa. Conjuntamente com o apresentado no capítulo 2, as revisões teóricas são base para compreensão do problema, formulação do método e para as interpretações dos resultados e conclusões do estudo.

Capítulo 3. MORFOLOGIA E MODELAGEM

Neste capítulo, a segunda parte da revisão teórica se aproxima das bases metodológicas que conduzirão a metodologia a ser apresentada no próximo capítulo. Inicialmente são abordados conceitos sobre morfologia urbana e modelos. Na sequência são relatados modelos urbanos usados para representar teorias relativas à organização e evolução do espaço urbano e, logo após, são apresentados conceitos de sistemas, complexidade, auto-organização e emergências, que fazem parte de teorias urbanas contemporâneas, abrindo caminho para uma introdução à modelagem urbana, passando brevemente pela Teoria de Grafos, Autômatos Celulares e Sistemas de Informações Geográficas. Por fim, o capítulo 3 aborda a técnica de autômatos celulares aplicada aos estudos urbanos e apresenta modelos que aplicam a técnica para simulação do crescimento de periferias.

3.1 Morfologia urbana

A cidade e seus processos podem ser interpretados de diversas maneiras. Para Soja (1993), o espaço físico está diretamente relacionado aos processos sociais que nele ocorrem, numa interdependência dialética entre ambos. Sendo assim, se a sociedade modifica o espaço e a forma resultante é capaz de influenciar nas práticas dessa sociedade (Villaça, 2012), entende-se que partir da organização espacial, é possível se interpretar os processos sociais (Krafta, 1997). Entretanto, segundo Barros (2004), grande parte dos estudos sobre os processos de urbanização e a formação de periferias urbanas tem seu foco voltado às questões políticas, econômicas e sociológicas, sendo menos recorrentes estudos com abordagem no campo da morfologia.

A morfologia urbana, conforme Lamas (1992), é entendida como um campo do conhecimento que estuda a forma da cidade – ou as formas que a compõe –, abordando a organização da estrutura urbana conjuntamente com os fenômenos que lhes originaram e suas transformações ao longo do tempo. Para Batty (2008), a morfologia urbana estuda os padrões da estrutura urbana, baseados no modo como as atividades são ordenadas no que se refere a sua localização. Já segundo Moudon

(1997), a análise morfológica é baseada em três princípios, correspondendo à forma física, escala de resolução (ou abrangência espacial) e evolução no tempo. Respectivamente:

- A forma urbana é definida por três elementos físicos: as construções (e suas relações com espaços abertos), os lotes e as vias.
- A forma urbana pode ser captada em diferentes níveis de resolução, sendo comuns quatro escalas: edificação/lote (escala edilícia), via/quarteirão (escala de bairro ou de vizinhança), cidade e região.
- A forma urbana pode ser entendida historicamente a partir da evolução temporal dos elementos que a compõem, os quais continuamente são substituídos ou transformados.

Em resumo, a morfologia urbana estuda as relações entre os fenômenos urbanos e a forma da cidade, no que diz respeito a sua dinâmica temporal e ordenação espacial. Para trabalhar com a morfologia urbana é necessária a construção e o uso de instrumentos que permitam ler a cidade, organizando e estruturando os elementos que configuram o espaço urbano (Lamas, 1992). Dada a pluralidade inerente à cidade e seus processos, múltiplos são os elementos e múltiplas são as leituras possíveis, sendo importante que os instrumentos utilizados sejam capazes de destacar os fenômenos urbanos a que cada estudo objetiva.

Dois aspectos morfológicos são importantes para o presente estudo: os padrões de forma e os padrões de localização das periferias na estrutura urbana. Para perseguir os objetivos da pesquisa e capturar esses padrões, foi escolhida a modelagem urbana como abordagem metodológica, tendo como premissa o uso da técnica de autômatos celulares. Com uso dessa técnica na formulação de um modelo urbano matemático em ambiente computacional, como base instrumental da investigação, a forma física da cidade (e do ambiente que a cerca) é definida por células, enquanto entidades espaciais que representam determinados atributos da área de trabalho; o nível de resolução é adequado para a escala da cidade, sem desconsiderar o meio ambiente natural de entorno; e a evolução temporal também é considerada, visto que é característica dos autômatos celulares e do fenômeno estudado, marcado pela dinâmica de mudança, com conversão de áreas não urbanizadas em cidade.

3.2 Modelos urbanos

Modelos são representações, de forma simplificada e compreensível, relevantes para auxiliar o melhor entendimento do objeto que se está estudando (Echenique, 1975; Reif, 1978). Nas ciências, a simplificação de objetos e fenômenos da realidade na forma de modelos tem sido usada por pensadores e

pesquisadores, possibilitando desde a interpretação das invisíveis estruturas subatômicas até a explicação do intangível Universo como um todo, passando por modelos que representam as forças que atuam na estrutura de uma edificação ou os fenômenos intrínsecos a uma cidade, entre tantos outros.

El hombre ha venido utilizado modelos en todos los períodos de la historia, y podemos decir que el modelo es en sí la herramienta intelectual más antigua de la humanidad. Una imagen mental utilizada por el pensamiento es un modelo. Los juguetes, los dibujos, las películas y las palabras son otros tantos tipos de modelos. (Reif, 1978, p. 107)

Quanto à tipologia dos modelos, segundo Echenique (1975) e Reif (1978), podem ser físicos, quando a realidade é representada por si mesma ou por analogias, ou conceituais, cuja representação se dá através de símbolos. Os modelos físicos se dividem em: icônicos, aqueles cuja simplificação acontece por simples mudança de escala, como fotografias, projetos arquitetônicos e maquetes; e analógicos, que transformam propriedades da realidade para facilitar representá-la, necessitando de legenda, tais como mapas temáticos e gráficos. Já os modelos conceituais são divididos em: verbais, aqueles cuja descrição da realidade se dá através do uso da lógica por meio oral ou textual; e simbólicos (ou matemáticos), que abstraem a realidade através de algoritmos e equações matemáticas.

Quanto ao uso, os modelos podem ser classificados como (Echenique, 1975; Almeida *et al.*, 2007):

- descritivos: têm o objetivo de ser simplesmente explicativos, porém são essenciais, pois, para explorar ou planejar, é necessária uma descrição da realidade;
- exploratórios: são variações nos elementos constituintes e parâmetros de modelos descritivos, permitindo vislumbrar outras realidades possíveis segundo testes de “e se” (*what if*);
- preditivos: incorporam a variável tempo e visam explorar imagens de futuro, baseados na suposição de que o modelo consegue representar a maneira como a realidade se altera;
- operacionais: permitem interferência externa do modelador, introduzindo fatores exógenos ao modelo, alterando o comportamento do sistema, visando atingir um estado ótimo.

Com base em literatura sobre a ciência urbana, é possível encontrar referências a vários autores que, desde o século XIX, traçaram teorias locais e evolutivas, representando-as através de modelos descritivos da lógica da organização e da forma urbana em seus processos de crescimento.

O modelo proposto por Von Thünen, de 1826, chamado de “Teoria dos Anéis Concêntricos”, explora questões econômicas e locais em escala regional, relacionando o custo do solo e sua intensidade de uso agrícola à sua distância em relação ao centro de uma cidade e à possibilidade de maximização de lucros em função dos custos com o transporte (Batty, 1976; Almeida *et al.*, 2007). Es-

sa maximização está presente também no modelo de localização industrial proposto por Weber, de 1909, que, a partir de um plano triangular, teoriza que a implantação ideal de uma indústria busca estar em um ponto no qual os custos do transporte de matéria-prima e produto final sejam mínimos (fig. 3.1A) (Almeida *et al.*, 2007).

Também utilizando a morfologia concêntrica, o modelo de Burgess, de 1925, visava explicar o crescimento urbano das cidades industriais da época – a partir do caso de Chicago – e à lógica de competição espacial em busca do lucro oriundo de vantagens locacionais, relacionando cada zona anelar com fases de expansão (por invasão-sucessão) e estabilização, e com determinados usos e características sociais predominantes (fig. 3.1B) (Buzai, 2003; Constantinou, 2007). A “Teoria do Lugar Central”, de 1933, proposta por Christaller, propõe um modelo econômico em escala de interação regional e que representa áreas de influência ideais para cidades, a partir de uma malha de hexágonos regulares, hierárquicos e concêntricos (fig. 3.1C) (Almeida *et al.*, 2007). Semelhante a lógica proposta por Von Thünen, o modelo econômico de Alonso, de 1964, proposto para a escala intraurbana, está baseado na relação de custos com transporte e habitação, levados em consideração nas decisões locacionais residenciais (fig. 3.1D) (Almeida *et al.*, 2007).

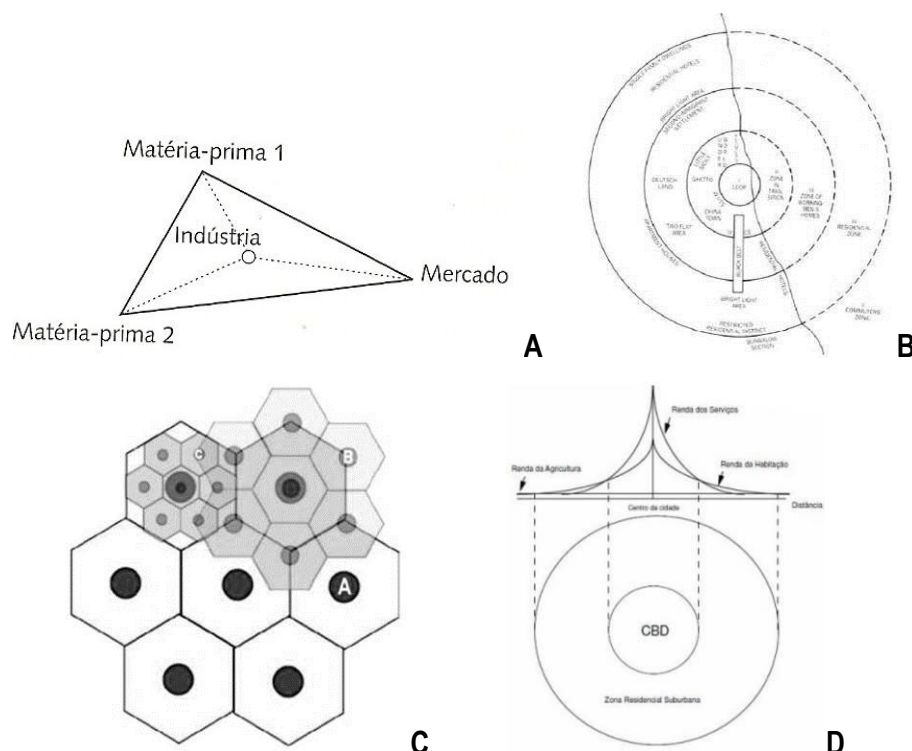


Figura 3.1: Modelos urbanos: A) Weber, 1909; B) Burgess, 1925; C) Christaller, 1933; D) Alonso, 1964. Fontes: A) Almeida *et al.* (2007); B, C e D) Peres (2010).

Proposto por Hoyt, em 1939, a “Teoria dos Setores” e seu modelo representam um padrão de configuração da cidade em setores, onde predominam determinados usos do solo e a diferenciação de

classes sociais, estruturando o espaço urbano por eixos viários (relacionados aos sistemas de transporte) que ligam o centro à periferia e quebram o modelo concêntrico (fig. 3.2A) (Buzai, 2003; Constantinou, 2007). O modelo de Harris e Ullman para a “Teoria dos Núcleos Múltiplos”, de 1945, rompe a dura simetria formal encontrada nos modelos concêntricos, considerando que nas cidades existem lugares centrais, que os sistemas de transporte geram linearidades na distribuição da estrutura espacial e que usos do solo especializados se concentram e estão associados a áreas de influência, configurando a urbe também por setores, mas esses possuindo nuclearidades de especialização de atividades e de segregação social (fig. 3.2B) (Buzai, 2003).

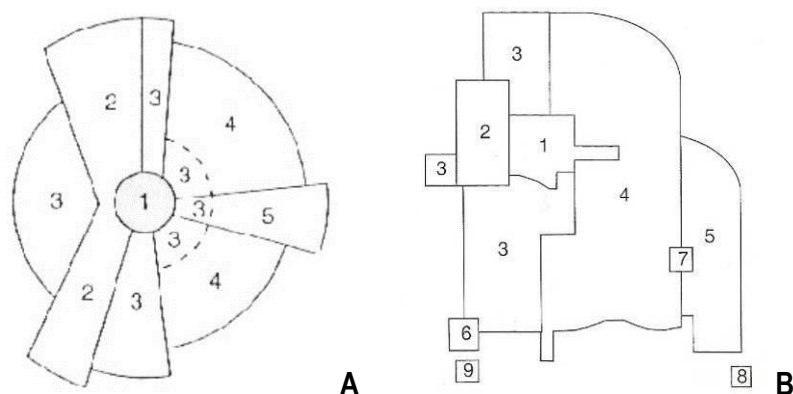


Figura 3.2: Modelos urbanos: A) Hoyt, 1939; B) Harris e Ullman, 1945. Legenda: 1) centro econômico; 2) setor industrial; 3) população de baixa renda; 4) população de média renda; 5) população de alta renda; 6) setor de indústrias pesadas; 7) subcentro (ou centro de bairro); 8) subúrbio residencial; 9) subúrbio industrial. Fonte: Buzai (2003).

Esses modelos, ainda que tenham importância enquanto base para as teorias urbanas contemporâneas, sendo possível perceber neles uma evolução do pensamento sobre o espaço urbano e das forças que impulsionam a sua construção (valorização do solo agrícola, eficiência da localização industrial, papel dos meios de transporte e sistema viário, multacentralidades), parecem não conseguir explicar a morfologia da cidade contemporânea. Também são modelos que, embora com intenção de representar uma cidade abstrata, se basearam em evidências empíricas de cidades do Primeiro Mundo e não foram capazes de demonstrar as diferenças que existem com relação às cidades de países do Terceiro Mundo, conduzindo pesquisadores à formulação de novos modelos que solucionassem essas deficiências.

Sem encontrar modelos que evidenciassem aspectos próprios da realidade brasileira, Souza, no início da década de 1990, propôs um modelo evolutivo específico para a cidade do Rio de Janeiro. Com enfoque na segregação socioespacial, os cinco esquemas gráficos demonstram uma cidade que, no processo de crescimento, passa por momentos de realocação de baixa renda do centro para as bordas da cidade, setorização da alta renda denotando o movimento em direção à periferia, surgimento de conjuntos habitacionais e multacentralidades especializadas (fig. 3.3A) (Souza, 2003). Esse modelo

guarda semelhanças com os modelos da cidade latino-americana propostos por Bähr, de 1981, e Borsdorf, de 1982 (Buzai, 2003), mas pouco demonstra a fragmentação morfológica encontrada na cidade contemporânea.

O “Modelo da Cidade Fragmentada”, proposto por Janoschka, de 2002, apresenta um quadro evolutivo do crescimento das cidades latino-americanas, incorporando o surgimento de loteamentos e conjuntos habitacionais fechados nas últimas décadas. Nesse modelo é possível verificar que a cidade passa por diferentes estágios de evolução, apresentando diferentes princípios de estruturação espacial: a origem colonial compacta e concêntrica (até início do século XIX); o surgimento linearidades e setorizações, em função de meios de transporte e eixos viários; a configuração de polo central; a descentralizações e as multicentralidades, fragmentando e segregando o espaço urbano (Buzai, 2003), criando uma estrutura que se dispersa pelo território, orbitando nas bordas da cidade (fig. 3.3B).

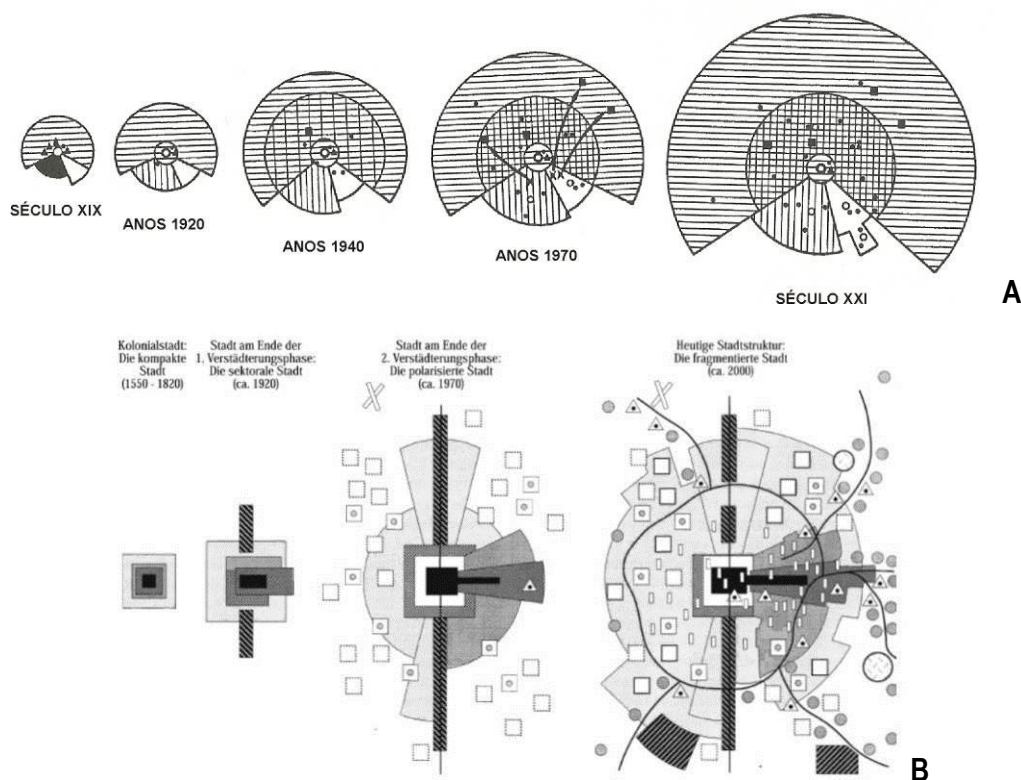


Figura 3.3: Modelos urbanos: A) evolução do Rio de Janeiro de Souza, década de 1990; B) evolução latino-americana de Janoschka, 2002. Fontes: A) Souza (2003); B) Buzai (2003).

Ainda que se aproxime da realidade observada nas cidades latino-americanas, inclusive brasileiras, o “Modelo da Cidade Fragmentada” é um modelo estático, apenas sendo capaz de descrever a evolução da cidade por comparação entre instantes de tempo. Assim como os demais modelos apresentados, não possui uma base realmente dinâmica, como um sistema que varia no tempo e é retroalimentado em função de seus estados anteriores. Diante disso, como será visto ao fim do capítulo, mo-

delar de modo dinâmico a cidade passa a ser uma atividade recorrente nas pesquisas atuais sobre os processos urbanos. Nesse caminho, a seguir são apresentadas ideias e argumentos que têm servido de paradigmas sob os quais o espaço da cidade tem sido abordado atualmente na ciência urbana.

3.3 Ideias atuais sobre a dinâmica urbana

Em meados do século XIX, o então jovem Friedrich Engels esteve na Inglaterra do período da Revolução Industrial e relatou, transformando em livro, a situação da classe operária nas grandes cidades daquele país (Engels, 1975). Para Johnson (2003), o texto de Engels não é somente um relato sobre condições sociais e trabalhistas, é também um importante registro sobre a história urbana e da forma da cidade. Nas observações de Engels, com destaque para a “caótica” cidade de Manchester, que havia se expandido nos últimos 75 anos sem acompanhamento e planejamento público formal (inclusive sem ser considerada legalmente uma cidade), ele verificou características comuns nos espaços urbanos. Engels percebeu estruturas repetitivas e localizações de usos e ocupações relacionados uns aos outros, ou seja, percebeu padrões de organização, como as existentes em cidades ditas planejadas e ordenadas.

As cidades, conforme Batty (2005), em geral, não se desenvolvem em função de grandes planos. Para o autor, mesmo as cidades planejadas, com o passar do tempo, apresentam um desenvolvimento orgânico e emergente.

[...] when we look at urban morphologies, they are messy but ordered, self-similar across many scales, but growing organically from the bottom up. Planned cities are always the exception rather than the rule and when directly planned, they only remain so for very short periods of time. (Batty, 2008, p. 7)

Segundo Peres (2010), o entendimento das cidades (e outras estruturas e sociedades complexas) funcionando como máquinas, planejadas sob regras ditadas por um poder maior, de cima para baixo (*top-down*), perdurou até a metade do século XX, ignorando a aleatoriedade e as decisões individuais que surgem dos múltiplos componentes. Desde o surgimento da teoria dos sistemas, tem havido uma mudança de paradigma, saindo de uma noção determinística com organização centralizada e profunda hierarquia (*top-down*) para uma visão de descentralização e estruturas emergentes (*bottom-up*) (Batty, 2008). Ainda que as duas ideias não sejam excludentes uma da outra, atualmente a abordagem da cidade funcionando não como uma máquina, mas sim como um organismo, tem seus estudos direcionados para os novos paradigmas relacionados à teoria dos sistemas, complexidade, emergências e auto-organização (Polidori, 2004).

Entende-se como sistema o “*conjunto de objetos con relaciones internas entre los propios objetos e sus atributos*” e seu entorno é formado pelos objetos externos ao sistema “*cuyas alteraciones modifican el sistema*” ou “*cuyos atributos son modificados por el funcionamiento del sistema*” (Hall, 1968 apud Reif, 1978, p. 31-33). O sistema urbano é um modo de entender (e representar) a cidade real através da rede complexa de relações entre seus componentes, articulando interações entre as partes, com o ambiente no qual está inserido e com tensões exógenas, estabelecendo uma dinâmica de relações delas com o todo (Reif, 1978, Liu, 2009). Qualquer mudança em um dos componentes pode gerar uma nova rede de relações que partem do nível micro e geram reflexos no nível macro, permitindo, assim, ocorrer o processo de mudança no sistema (Constantinou, 2007; Krafta, 2008; Liu, 2009).

Johnson (2003) alerta que a expressão complexidade, costumeiramente relacionada às características das cidades, pode ser interpretada por dois significados, podendo estar relacionada a uma “sobrecarga sensorial”, como também a um sistema de auto-organização.

A cidade é complexa porque surpreende, sim, mas também porque tem uma personalidade coerente, uma personalidade que se auto-organiza a partir de milhões de decisões individuais, de uma ordem global construída a partir de interações locais. (Johnson, 2003, p. 29)

Portanto, conforme Johnson (2003), a complexidade está naqueles sistemas que se adaptam através de um comportamento emergente. Ou seja, quando um sistema tem múltiplos componentes interagindo de diversas maneiras dinamicamente, seguindo regras locais e sem que seja percebida a existência de alguma instrução de nível mais alto, tem-se um comportamento complexo. Quando essas interações locais geram um padrão – algum tipo de comportamento possível de ser percebido na macroescala, como o relatado por Engels na Manchester do século XIX –, tem-se um comportamento emergente. É formada então uma rede de auto-organização, com diferentes componentes, sem intervenção determinista, criando uma ordem de nível mais alto, ou seja, gerando um sistema que emana de baixo para cima (*bottom-up*).

De maneira semelhante, Portugali (2000) cita a auto-organização como sendo uma das propriedades fundamentais de sistemas complexos, definindo-a como um fenômeno que ocorre quando um sistema organiza sua estrutura interna independente de causas externas. Liu (2009) reforça que o crescimento urbano, enquanto processo espacialmente dinâmico, mostra características de sistemas auto-organizados. A estrutura do sistema urbano emerge a partir de ações locais, cujas decisões sem coordenação superior originam padrões globais coordenados.

Sistemas auto-organizados possuem componentes interconectados por uma rede complexa de círculos de *feedback*, ou seja, sendo um sistema dinâmico, relações entre componentes retroalimentam

o sistema de modo a interferir positiva ou negativamente em novas relações no período de tempo seguinte (Portugali, 2000). Segundo Johnson (2003), círculos de *feedbacks* positivos são entendidos como retroalimentações de um sistema que estimulam determinados comportamentos emergentes. O mesmo autor cita como exemplo de *feedback* positivo a formação de núcleos de baixa renda. Já os círculos de *feedback* negativo funcionam de maneira oposta, com retroalimentações que desestimulam determinados comportamentos, sendo uma maneira de adaptação do sistema para alcançar determinado padrão desejável.

Aproximando das observações empíricas e das hipóteses de pesquisa apresentadas no capítulo 1, bem como das características morfológicas dos tipos de periferia encontradas na literatura e apresentadas no capítulo 2, é possível interpretar que o mesmo ocorre com a população de alta renda, que se autossegrega em núcleos que agregam um valor ao espaço urbano que é desejável para a população de mesmo tipo, podendo ser considerado um círculo de *feedback* positivo. Por outro lado, a periferização, ao mesmo tempo em que gera um círculo de *feedback* positivo para a sua própria formação (cresce por adições sucessivas, como visto no item 2.3), exerce um *feedback* negativo para população de maior renda.

Esses novos paradigmas da ciência urbana, de certa forma, contrariam a ideia de que sociedades são regidas pela administração e liderança de um poder central e determinista. Além disso, fornecem um quadro mais realista dos processos urbanos, que podem ser modelados e, assim, simular cenários alternativos, balizando ações de planejamento e gestão do espaço.

Técnicas de modelagem urbana, como os autômatos celulares, têm incluído o comportamento auto-organizativo dos sistemas urbanos em modelos de representação e simulação dos processos referentes às cidades (Portugali, 2000; Mahany e Gholamalifard, 2007; Liu, 2009). Segundo Li (2011), modelos *bottom-up* são capazes de replicar comportamentos complexos e padrões de fenômenos espaciais, com resultados de simulações podendo coincidir com a morfologia de cidades reais, permitindo a construção de cenários de futuro.

3.4 Modelagem e simulação urbana

A modelagem urbana consiste no processo de tradução de teorias urbanas em modelos matemáticos, testados através de experimentações e simulações em ambiente computacional, o qual funciona como laboratório (Batty, 2005; 2009). Para Furtado e Van Delden (2011), o uso de meio computacional como laboratório de pesquisa, através da modelagem urbana, tem grande importância, pois permite elabora-

ção de testes, eliminação de hipóteses, proposição de alternativas e a compreensão dos fenômenos que se observa.

Com os avanços alcançados na área da computação, a partir da década de 1950, foi possível o desenvolvimento do campo da modelagem urbana, principalmente nos Estados Unidos e Canadá, inicialmente destinada à simulação de sistemas de transportes, alocação de uso do solo e demografia, visando auxiliar na atividade de planejamento das cidades (Almeida *et al.*, 2007). Com aumento do poder de uso de computadores pessoais e o desenvolvimento de ferramentas de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), a partir da década de 1990 houve aumento na dedicação de pesquisadores para o uso de modelos (Ghenó, 2009; Liu, 2009). Na metade dessa década, Wegener (1994) listou vinte modelos que, na época, estavam operacionais – aplicados a casos de cidades reais – ao redor do mundo, construídos principalmente por instituições de pesquisas acadêmicas dos Estados Unidos, Europa Ocidental e Japão. Como contribuições para a evolução dos modelos, Wegener (1994) sugeriu a atenção às questões de equidade e sustentabilidade urbanas e a efetiva relação com os SIGs.

Benenson e Torrens (2004), citando o Douglas Lee, ensinam que o objetivo a que o modelo se destina é que deve conduzir à escolha da metodologia apropriada para sua construção, não vice-versa. Sendo assim, dependendo do objetivo, os modelos podem ser estruturados com tipos de representação, sistemas descritivos e abordagens técnicas diferenciadas. Ramos *et al.* (2007) citam que os dados urbanos podem ser estruturados em duas classes: estruturas vetoriais e estruturas matriciais.

Estruturas vetoriais são utilizadas para representar os elementos físicos da forma urbana através do uso de elementos básicos da geometria euclidiana (pontos, retas e planos), descrevendo vetorialmente os espaços construídos e os espaços abertos, mantendo suas relações de conectividades e adjacências. Esse tipo de representação possibilita o uso da Teoria de Grafos aplicada à morfologia, representando a cidade como um sistema estruturado na forma de redes (fig. 3.4).

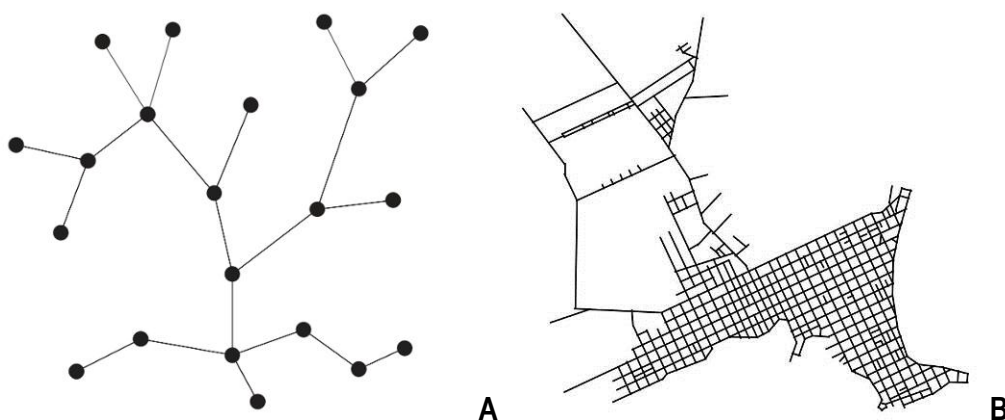


Figura 3.4: Representação por grafos: A) grafo qualquer; B) representação da estrutura urbana através de retas (linhas axiais do sistema viário) para cidade de São Lourenço do Sul, RS. Fontes: A) Diestel, 2005, p. 25; B) do autor.

Em estruturas matriciais o espaço é representado através de *grids* celulares, que são representações da superfície em matrizes ou malhas de pontos ou células espaçadas regularmente (Silva *et al.*, 2004), favorecendo as relações contextuais de vizinhança. Assim, o espaço é tratado como um plano bidimensional, no qual cada ponto ou célula está associado a uma porção da área de estudo (Ramos *et al.*, 2007). A conversão dos elementos físicos em *grids*, podendo integrar a abordagem euclidiana com a leibniziana (Polidori e Krafta, 2005), é um recurso que permite trabalhar diversos tipos de dados de um modo espacialmente homogêneo. Esse tipo de representação espacial é uma das características fundamentais de modelos construídos sob a técnica de Autômatos Celulares (*cellular automata* – CA) (fig. 3.5).



Figura 3.5: Representação celular: NetLogo, modelo de crescimento urbano baseado em autômatos celulares. Fonte: <<http://fs.urba.arch.unifi.it/en/ric/netLogo.php.html>>.

Os SIGs são ferramentas digitais que possibilitam gerenciar de forma eficiente informações espaciais, permitindo armazenar, manipular e visualizar a geometria e os atributos de dados georreferenciados (Câmara *et al.*, 2000; Li, 2011). SIGs operam tanto com dados representados na forma vetorial, propícia para uso da Teoria de Grafos, quanto no formato *raster*, próprio para CAs. O uso de geocomputação permite avançar nos recursos de SIG, agregando programação, estatística e análises espaciais (Polidori, 2004).

Batty (2007) alega que SIGs são plataformas essenciais mínimas para um processo de planejamento efetivo, ainda que não vinculados a nenhum modelo. Todavia, segundo Li (2011), SIGs comumente não funcionam sob uma abordagem *bottom-up*, propícia para processos complexos (que incluem comportamento emergente, componentes aleatórios e *feedbacks* nas escalas espacial e temporal, como o caso da dinâmica urbana), necessitando estar integrados com modelos, como já havia previsto Wegener (1994).

De acordo com Buzai e Robinson (2010), avanços na operacionalidade de análises espaciais em ambiente SIG têm sido possibilitados através da vinculação de técnicas de modelagem. Liu (2009) identifica 4 maneiras de integração de modelagem urbana com SIGs: troca de dados entre SIGs e modelos (através de rotinas de importação e exportação), possibilitados por extensões em comum; plataformas SIG com macros que possibilitem a programação de modelos; incorporação de modelos em plataformas de SIG; e incorporação de funcionalidades de SIG em pacotes de modelagem.

Liu (2009) também cita que a mudança da compreensão dos processos urbanos da abordagem *top-down* para abordagem *bottom-up*, com modelos que utilizam técnicas de autômatos celulares, tem demonstrado potencial para integração entre SIGs e modelagem urbana. Isso vai ao encontro do que diz Torrens (2009), que afirma haver um paradigma de mudança para um novo estilo de SIG, cuja nova geração será guiada por modelos, que representam a evolução da tecnologia existente e, estimuladas por inteligência artificial, conduzirão as operações tradicionais dos SIGs para o mundo da dinâmica, com computação proativa na Internet, interligando dados aos agentes de *softwares* inteligentes. O presente trabalho se insere parcialmente nesse cenário, integrando ferramentas de SIG em um modelo urbano dinâmico, fazendo uso de autômatos celulares para simulação do crescimento da cidade e da formação de suas periferias.

Segundo Batty (2008), simulação é entendida como o processo de geração de distribuições locais – ou seja, distribuição de elementos característicos (usos, tipos, medidas) do espaço físico –, de acordo com equações e regras implementadas em modelos. Simulações urbanas também são dedicadas a replicar, em ambiente computacional, a conformação de arranjos formais, a partir de características relativas à cidade e segundo técnicas de modelagem urbana, como, por exemplo, autômatos celulares.

O uso de simuladores na ciência urbana possibilita ainda a construção de cenários, principalmente de futuro, que são importantes exercícios exploratórios para reflexão sobre o que se espera das cidades do amanhã. Souza (2003) cita que a construção de cenários de futuro, a partir de simulações, é um trabalho que possibilita a geração de alertas ou balizamentos que auxiliem no planejamento urbano. Para o caso das periferias urbanas, a construção especulativa de cenários de futuro pode auxiliar as atividades de planejamento, alertando sobre tendências de ocupações em áreas ambientalmente frágeis ou que ofereçam risco ao ser humano.

3.5 Autômatos celulares

Autômatos celulares são objetos de um universo computacional celular que existem no tempo e no espaço, cujas características mudam a partir de regras simples, em função das características dos objetos vizinhos (Portugali, 2000; Batty, 2005). Técnicas de CA simulam processos onde ações locais geram como reflexos comportamentos de ordem global, ou seja, reflexos que emergem sistemicamente como consequência das regras que incorporam processos locais. Ainda que modelos sejam entendidos como simplificações, a possibilidade de simular processos sistêmicos permite incorporar a complexidade na modelagem (Batty, 2005; Gremonini e Vicentini, 2008) e, conseqüentemente, as interações espaço-temporais que ocorrem na cidade real (Peres, 2010). Modelos de CA são considerados flexíveis, podendo operar com processos dinâmicos e teorias tanto do campo da complexidade (emergência, auto-organização, caos, fractais), quanto da Inteligência Artificial (redes neurais artificiais, sistemas especialistas, aprendizagem evolucionária) (Almeida *et al.*, 2007).

Os CA surgiram na década de 1940, a partir dos estudos de John von Newman e Stanislaw Ulam para criação de sistemas autorreplicativos (Liu, 2009). Porém, foram nos anos 1970 que os CA ganharam destaque, com o chamado Jogo da Vida (*Game of Life*), de John Conway. Esse jogo simula, a partir de regras simples, em um ambiente celular, os processos de nascimento, sobrevivência e morte de uma população, considerando a cada rodada do jogo as relações de cada célula do sistema com sua vizinhança imediata (Torrens, 2000; Gremonini e Vicentini, 2008). Nas últimas décadas, esforços no campo da modelagem com CA conduziram a avanços na representação espacial em modelos urbanos, tais como a incorporação das dimensões ambientais, socioeconômicas e políticas (Almeida *et al.*, 2007; Furtado e Van Delden, 2011), potencializando o uso para dinâmicas temporais em estudos urbanos (Pascual *et al.*, 2011).

3.5.1 Características dos autômatos celulares e adaptações para representação da cidade

A metodologia escolhida para a construção de um modelo urbano em ambiente computacional deve ser apropriada ao seu objetivo, como alertam Benenson e Torrens (2004). Para Portugali (2000), modelos que trabalham com CA apresentam-se como ferramentas atrativas para simulação urbana, pois possuem semelhanças entre as células do ambiente computacional e as unidades espaciais de cidades reais (edificações, lotes, quarteirões), como também com os pixels de imagens *raster*, tais como imagens de satélite (fig. 3.6).



Figura 3.6: Similaridade entre *grids* celulares e pixels de imagens de satélite (diferentes resoluções para Pelotas, RS).
Fonte: Polidori (2004).

Autômatos celulares podem ser definidos por 5 características básicas (Torrens, 2000; Batty, 2005; Liu, 2009) (fig. 3.7): *grid* celular; estado; vizinhança; regras de transição; tempo. Todavia, Polidori (2004) acrescenta que, para representar a cidade, são necessárias adaptações. Essas 5 características podem ser definidas e adaptadas para a representação urbana da seguinte maneira:

- *Grid* celular: compreende o espaço onde existe o CA. É n-dimensional. Para representação do espaço geográfico (e urbano), comumente se usam CAs bidimensionais, não contínuos (ou seja, são limitados pelos limites da área de trabalho) e células com tamanho ajustado à escala do espaço.
- Estado: cada célula possui 1 estado em cada tempo, dentro de um grupo de estados de saída. São as descrições dos atributos espaciais do ambiente urbano.
- Vizinhança: o estado de cada célula depende do estado e da configuração das células adjacentes a ela. Para a representação da cidade, a vizinhança não se restringe a 4 ou 8 células adjacentes, podendo ser regulada com raios de abrangência.
- Regras de transição: ditam as mudanças no comportamento de cada célula, no espaço de tempo e em função do que existe nela e do que acontece em sua vizinhança; traduzem como um sistema real funciona. Para simulação urbana, as regras tentam replicar processos reais que ocorrem na cidade.
- Tempo: é discreto, não contínuo, que procede em passos iterativos e, através da calibração de parâmetros envolvidos nos cálculos, pode conduzir a abstrações de intervalos de tempo reais (meses, anos, décadas, etc.).

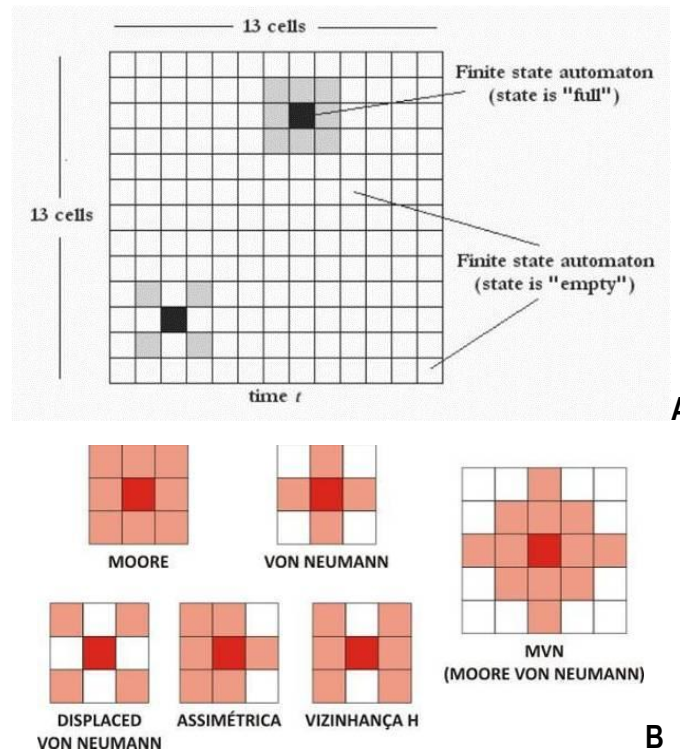


Figura 3.7: Características do CA: A) *grid* bidimensional, sendo as células mais escuras possuidoras de estado diferenciado das demais (Torrens, 2000); B) alguns tipos de vizinhanças comuns (adaptado de Batty (2005)).

Em um modelo de CA, portanto, a dinâmica de alteração ou permanência do estado de uma dada célula é determinada em função do estado das células vizinhas na iteração anterior, segundo uma determinada regra de transição. A Equação 3.1 apresenta a notação básica da representação matemática de um CA:

$$Cel_i(t+1) = \int \{ [CelVizS.(t)]. (RegraViz) \}$$

Onde:

Cel_i : célula i

$(t+1)$: unidade de tempo seguinte

$CelVizS$: células da vizinhança

t : tempo atual, anterior a $(t+1)$

$RegraViz$: regra de transformação vinculada à vizinhança

Equação 3.1: Notação básica de um autômato celular. Fonte: Polidori (2004, p. 22)

Liu (2009) explica que, nos modelos de CA básicos, a influência da vizinhança se restringe às células imediatamente adjacentes a uma dada “célula i ”, sendo mais comum o uso das vizinhanças de Moore e de Von Newmann (fig. 3.7B), não havendo “ações a distância” (*action-at-a-distance*). Conquanto, em modelos de crescimento urbano, as vizinhanças são ampliadas, sendo usados raios de influência a partir da “célula i ” ou ações que podem considerar a totalidade do *grid*. Para vizinhanças maiores que a vizinhança imediata, podem ser aplicados efeitos de enfraquecimento conforme a dis-

tância (*distance-decay*). O uso de efeitos de enfraquecimento permite representar influências do sistema em uma maior abrangência, sem perder a força das relações de proximidade local. A abrangência das vizinhanças (imediate, por raio ou englobando a totalidade do *grid*) e os efeitos de enfraquecimento; ações de atração ou repulsa; e as variáveis envolvidas, podem fazer parte das regras de transição, conforme o processo que está sendo estudado e que se pretende simular.

Atualmente existem diversos modelos urbanos, que utilizam CA, em uso no planeta. Grande parte deles é proposta como ferramenta científica para uso acadêmico. São exemplos de modelos urbanos utilizados para simulações de mudança de uso do solo intraurbana, comumente citados pela literatura: o Dinamica EGO, desenvolvido pelo Centro de Sensoriamento Remoto da Universidade Federal de Minas Gerais; e o Metronamica, desenvolvido pelo RIKS (*Research Institute for Knowledge Systems*) (Furtado e Van Delden, 2011). Como exemplos de modelo para simulação de crescimento urbano, podem ser citados (Polidori, 2004; Batty, 2009): o SLEUTH (*Slope, land use, excluded land, urban extend, transportation and hillshading*), desenvolvido pelo *US Geological Survey's Urban Dynamics Research Program* (fig. 3.8A); e o DUEM (*Dynamic Urban Evolution Modeling*), elaborado pelo pesquisador Yichun Xie (fig. 3.8B).

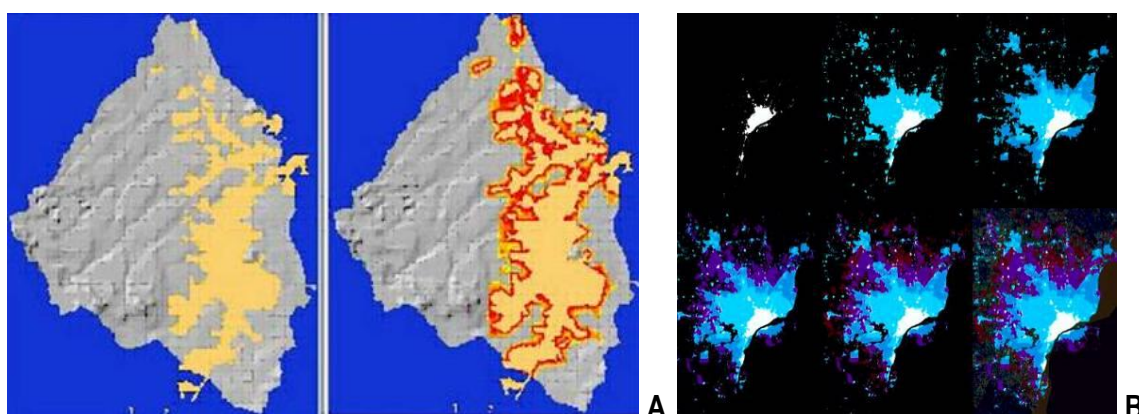


Figura 3.8: Simulações de crescimento urbano a partir de modelos de autômatos celulares: A) Nogales, EUA e Nogales, México, entre 2002 e 2030, a partir do modelo SLEUTH; B) Detroit, EUA, entre 1905 e 1992, a partir do modelo DUEM. Fontes: a) Norman (2012); b) Xie e Sun (2000).

3.5.2 Simulação de crescimento periférico através de autômatos celulares

Como visto, modelos que usam CA são atrativos para o uso em estudos urbanos e possuem características que são adaptáveis para esse objetivo. Alguns modelos existentes são dedicados à dinâmica de mudanças de uso do solo intraurbana, outros ao crescimento urbano e existem ainda modelos construídos para outros objetivos, como o caso de modelos de transporte urbano. Dentre aqueles dedicados ao crescimento urbano, alguns têm destinando foco para o caso das formações periféricas nas cidades, como os modelos propostos por Torrens (2006), Barros (2004) e Polidori (2004).

Motivado pela problemática dos *suburbs* e *edge cities* norte-americanos, semelhantes às urbanizações fechadas brasileiras, Torrens (2006) formulou um modelo que busca simular a formação de *urban sprawl*. O modelo considera aumentos e quedas populacionais para o crescimento urbano interno e externo, representando os processos geradores do *sprawl* através de: inércia geográfica (com base na iteração anterior), difusão (com base na vizinhança imediata), regras de movimento de agentes (na vizinhança imediata de Moore, nas células adjacentes à vizinhança imediata, em saltos tipo *leap-frog*, disperso ou irregular) e restrições à urbanização. Aplicando o modelo para o caso da região da cidade de Chicago, EUA (fig. 3.9), Torrens verifica as formações de *sprawl* através de análise da morfologia fractal e de medidas de fragmentação, compacidade e justaposição dos núcleos simulados como descritores de sua configuração. Além dessas, o resultado gráfico possibilita ser comparado com densidades demográficas e auxilia na inferência da localização de núcleos de *urban sprawl*.



Figura 3.9: Simulação de crescimento urbano para Chicago, EUA, e região, entre 1850 e 2000. Tons mais escuros de amarelo indicam menores densidades e maior probabilidade de formações de *sprawl*. Fonte: Torrens (2006).

Visando simular a expansão urbana por periferização para cidades da América Latina, Barros (2004) elaborou o “*Peripherization Model*”, um modelo com dados de entrada pautados nas três classes socioeconômicas (alta, média e baixa renda) e sua pirâmide de distribuição de renda (por proporção do total da população), usando regras de transição bastante simples. Entendendo que todas as classes socioeconômicas dividem as mesmas preferências locacionais, a dinâmica de crescimento se dá através de movimentos de sucessão e expansão. As células correspondentes à alta renda podem ocupar e recontextualizar as áreas de rendas inferiores, enquanto as de baixa renda só podem se movimentar e ocupar células vacantes, gerando um crescimento que tende à morfologia concêntrica (fig. 3.10A), dependendo das restrições ambientais (fig. 3.10B). O modelo possui maior possibilidade de representação da realidade através do uso de regras de consolidação de assentamentos espontâneos, decadência de centros e o movimento de populações de alta renda para as bordas da cidade (Barros e Sobreira, 2002; Barros, 2004).

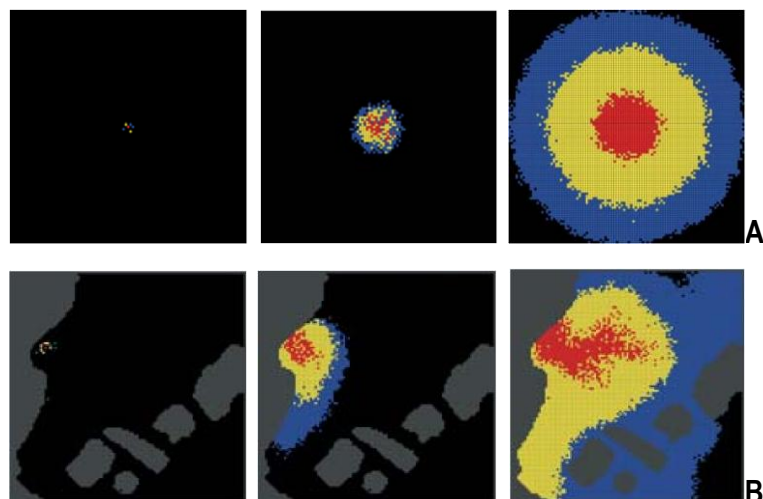


Figura 3.10: Simulações de crescimento urbano com o *Peripherization Model*, sendo alta renda em vermelho, média renda em amarelo e baixa renda em azul: A) cidade abstrata; B) Porto Alegre, RS. Fonte: Barros (2004).

O SACI (Simulador do Ambiente da Cidade), proposto por Polidori (2004), é um modelo genérico, destinado à exploração do crescimento urbano e que considera conjuntamente atributos urbanos, institucionais e do ambiente natural (fig. 3.11A). O cálculo das células que são convertidas em área urbana, a cada iteração do modelo, se dá a partir das medidas de centralidade e potencial celular e de resistências à urbanização. O crescimento da cidade é reproduzido no modelo a partir da distribuição de 5 tipos diferentes de tensões, sendo que duas dessas tensões, chamadas de difusas, são distribuídas de maneira semialeatória, em um sorteio probabilístico que leva em consideração baixas centralidades celulares e resistências do ambiente natural, possibilitando incorporar a morfologia da formação de núcleos dispersos. A tensão chamada Difusa 1 produz morfologia que se assemelha à lógica de produção de núcleos de alta e média-alta renda (fig. 3.11B) e a tensão Difusa 2 guarda similaridade com a formação de núcleos de baixa-renda (fig. 3.11C). Sendo um modelo genérico de crescimento urbano, mesmo com a presença de tensões difusas, os *outputs* próprios do SACI não possibilitam inferir a morfologia dos núcleos periféricos. Polidori indica operações com álgebra de mapas em ambiente SIG, a partir dos *outputs* do modelo, como técnica que pode ser explorada para encontrar a localização e forma das periferias urbanas (fig. 3.11D e 3.11E).

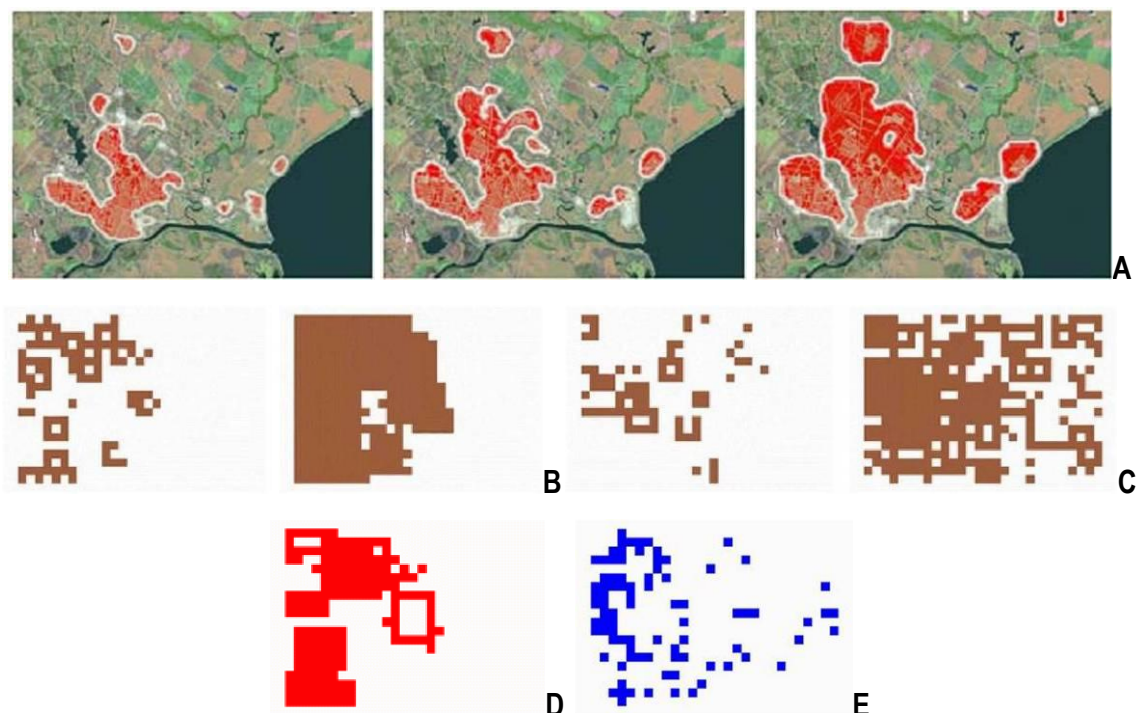


Figura 3.11: Utilização do SACI para a simulação de crescimento urbano: A) crescimento urbano convencional para a cidade de Pelotas, RS, entre 2000-2045; B) crescimento de cidade abstrata com 100% de tensões difusas do tipo 1; C) crescimento de cidade abstrata com 100% de tensões difusas do tipo 2; D) resultado da álgebra de mapas para periferias do tipo urbanizações fechadas; E) resultado da álgebra de mapas para periferias do tipo periferação.

Fontes: Polidori (2004) e Polidori e Krafta (2005).

Partindo do modelo do SACI, recentemente atualizado e implementado no *software CityCell* (Saraiva *et al.*, 2011; Polidori *et al.*, 2011), como base instrumental e metodológica, o presente trabalho busca avançar nos estudos sobre crescimento urbano com ênfase dedicada às formações periféricas. O próximo capítulo, voltado ao método de pesquisa, apresentará o modelo *CityCell*, suas características e variáveis adotadas para modelagem e simulação de crescimento periférico, conduzindo ao capítulo 5, no qual serão demonstrados os estudos dessa investigação.

3.6 Epílogo do Capítulo 3

O capítulo 3 trouxe conceitos relacionados ao campo da morfologia e modelagem urbana e que se aproximam das bases metodológicas com as quais essa pesquisa será executada. Foram apresentados modelos urbanos clássicos e contemporâneos e suas limitações, mostrando, em seguida, que avanços na área da computação têm permitido o desenvolvimento da modelagem urbana, possibilitando que os fenômenos relativos à cidade possam ser estudados e simulados em ambiente computacional, considerando conceitos de teoria de sistemas, complexidade, auto-organização e emergências, enquanto paradigmas contemporâneos da ciência urbana. Foi visto que a técnica de autômatos celula-

res é uma ferramenta atrativa para a modelagem e simulação urbana e que possibilita trabalhar com processos dinâmicos e incorporar os paradigmas contemporâneos. Por fim, como marco teórico-metodológico, foram apresentados modelos que usam CA para modelagem e simulação de periferias urbanas, entre eles o SACI, que será utilizado para elaboração dessa pesquisa e cuja atualização será apresentada no próximo capítulo, dedicado ao método de investigação e ao modelo a ser utilizado.

Capítulo 4. MÉTODO E MODELO

O capítulo 4 é dedicado ao método de pesquisa, apresentando e justificando o delineamento experimental e suas etapas. Também são apresentados o modelo SACI e o *software CityCell*, utilizados para aplicação do estudo, mostrando suas características, as variáveis utilizadas na modelagem e simulação de crescimento urbano e os *outputs* gerados como resultados do processo. Após, é demonstrado o funcionamento das tensões difusas, através de um estudo exemplo, mostrando potencialidades e limitações do modelo. Por fim, são citadas as contribuições propostas para o modelo, dedicadas à modelagem e simulação do crescimento periférico urbano, e os descritores morfológicos, utilizados para validação dos estudos.

4.1 Método da pesquisa

Conforme visto no final do capítulo anterior, a técnica de autômatos celulares tem sido usada para a modelagem e simulação da dinâmica urbana e alguns modelos que usam essa técnica são dedicados especificamente ou parcialmente à formação de periferias. Independente do objeto de estudo, a construção de modelos segue metodologicamente determinadas etapas gerais de modelagem (fig. 4.1, adaptada de Liu (2009)), que partem da especificação do problema, passam pela elaboração do modelo, formulação do modelo, implementação em *software*, testes de funcionamento do modelo e terminam na calibração e validação do modelo. Essas etapas podem ser entendidas da seguinte maneira:

- 1) Especificação do problema: está relacionada à descrição do problema de pesquisa, amparada em observações da realidade e em fundamentação teórica.
- 2) Elaboração do modelo: corresponde à elaboração de objetivos e à construção de hipóteses ou premissas para a investigação.
- 3) Formulação do modelo: corresponde à escolha de variáveis e a abstração da realidade em equações que possam ser traduzidas em algoritmos para linguagem de programação computacional.

- 4) Implementação em *software*: trata-se da implementação dos algoritmos em *software* e dos ajustes através de parâmetros.
- 5) Testes de funcionamento do modelo: correspondem aos testes para verificar se os algoritmos implementados funcionam corretamente para o problema de pesquisa.
- 6) Calibração e validação do modelo: por fim, é necessário calibrar os parâmetros e comparar os resultados oriundos do modelo com a realidade observada, através de testes de validação.

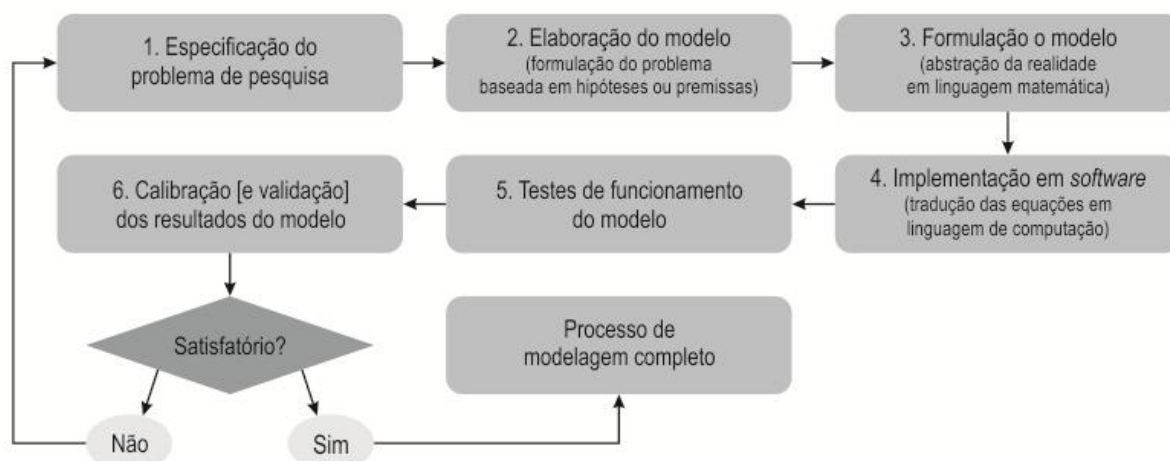


Figura 4.1: Fluxograma das etapas metodológicas para o processo de modelagem. Fonte: do autor, adaptado de Liu (2009).

Além das etapas adaptadas de Liu (2009), Clarke (2004) alerta que também é necessária a repetitividade dos estudos, evitando validar resultados a partir da sorte de um bom resultado inicial.

No crescimento periférico, que ocorre nas bordas de interface entre o meio urbano e o natural (ou rural), cidade e natureza são alterados e geram influência nos processos de expansão espacial urbana. É importante, portanto, que o modelo utilizado para estudos de modelagem e simulação do crescimento periférico seja capaz de considerar aspectos morfológicos da cidade e do ambiente natural. O modelo SACI (Polidori, 2004) considera integradamente atributos urbanos e da paisagem natural e possui uma base sólida para também modelar outros fenômenos afins ao crescimento urbano, tais como o crescimento periférico. Além de ser um modelo urbano que usa a técnica de autômatos celulares e que considera atributos urbanos e da paisagem natural, a escolha do SACI também é justificada pela facilidade de manipulação e programação do *software CityCell* (onde o modelo está implementado). O modelo e *software* são desenvolvidos pela equipe do Laboratório de Urbanismo da Universidade Federal de Pelotas, que é o local onde a pesquisa dessa dissertação foi realizada.

Nesse caminho, adaptando das etapas de modelagem sugeridas por Liu (2009) e fazendo uso das potencialidades do SACI, o método proposto para a pesquisa segue o seguinte delineamento:

- Partindo do problema de pesquisa, é feita a elaboração de objetivos e premissas ou hipóteses, amparados em observações empíricas da realidade (em um recorte espacial delimitado) e em revisão de literatura. Essas etapas foram apresentadas nos capítulos 1, 2 e 3, compreendendo as premissas da escolha do tipo de abordagem (morfológica e dinâmica) e de técnica (modelagem e simulação por autômatos celulares), bem como o recorte espacial (sul do Rio Grande do Sul) e tipológico (periferias de baixa renda e de alta renda) a ser utilizados para tratar do problema do crescimento periférico.
- Também como premissa metodológica, foi feita a escolha de um modelo que use a técnica de CA para processos relativos ao crescimento urbano e ao crescimento periférico e que ofereça possibilidade de aplicação de testes e de contribuições de melhorias dedicadas ao caso da formação de periferias. Para isso, como visto, é utilizada a base do modelo SACI, implementada no *software CityCell*, o qual será apresentado no item a seguir.
- Para testar o modelo e os procedimentos propostos para a modelagem da formação de periferias, foi selecionado como estudo de caso exploratório a cidade de Pelotas, que é uma cidade de porte médio do sul do Rio Grande do Sul. A descrição dos procedimentos e dados utilizados para a construção da base espacial do estudo de caso será apresentada no capítulo 5, item 5.2.
- Antes de testar os procedimentos dedicados ao crescimento periférico, foi realizada a calibração dos parâmetros residentes do SACI-*CityCell*, de modo a ajustar o crescimento urbano genérico simulado à morfologia urbana que se deseja alcançar. Essa etapa será apresentada no início do capítulo 5, item 5.2.2.
- Testes com as hipóteses de pesquisa serão apresentados no capítulo 5, realizados de duas maneiras distintas: a) a partir dos procedimentos originais do SACI (com a regra *Threshold Potential*), no item 5.3 os estudos iniciais utilizam recursos de álgebra de mapas em ambiente SIG para identificar a dinâmica das tendências de formação de periferias, trabalhando com variáveis correspondentes às hipóteses de associação das periferias com concentração de facilidades urbanas, concentração de estoques construídos e características do ambiente natural; b) a partir da formulação de um protótipo de uma nova regra de transição, chamada Tendência de Crescimento Periférico, no item 5.4 são feitos testes adicionando a hipótese de similaridade socioeconômica de vizinhança, através da inclusão das periferias preexistentes e suas relações de vizinhança no modelo.

- Testes de validação do modelo foram aplicados tanto nos estudos com álgebra de mapas quanto nos estudos com a inclusão das relações de vizinhanças. Para isso, foi simulado o crescimento da cidade entre dois intervalos de tempo, um no passado e outro atual (respectivamente 1985 e 2010), sendo possível comparar os resultados simulados com os dados levantados para a realidade. As comparações são feitas a partir da análise visual e de descritores morfológicos, de modo a interpretar os resultados quanto os aspectos de forma e localização no espaço. Os descritores utilizados serão apresentados ao final do capítulo 4, item 4.4.
- Por fim, é feita comparação dos melhores resultados obtidos com o método das álgebras de mapas e com a regra que inclui as preexistências e suas relações de vizinhança, apresentada ao final do capítulo 5, item 5.5, abrindo espaço para conclusões sobre os estudos.

4.2 *CityCell*, o simulador de crescimento urbano em ambiente celular

O planejamento do espaço urbano, segundo Polidori (2004), tem tradicionalmente trabalhado com meios isotrópicos, separando cidade e natureza. Enquanto muitos modelos urbanos tem se preocupado em representar a cidade apenas por sua área efetivamente urbanizada, os modelos ecológicos têm dificuldades para incluir a influência das cidades, tratadas muitas vezes de forma estática e determinística. Reconhecendo a necessidade de superar as abordagens isotrópicas para estudar a expansão de cidades, foi construído o modelo SACI (Polidori, 2004), recentemente atualizado e implementado no *software* chamado *CityCell – Urban Growth Simulator*¹¹ (Saraiva *et al.*, 2011; Polidori *et al.*, 2011), desenvolvido no Laboratório de Urbanismo da Universidade Federal de Pelotas.

No modelo implantado no *software CityCell* a cidade e o território são capturados e modelados em ambiente computacional com apoio em técnicas de CA, integradas à teoria de grafos (fig. 4.1), geotecnologias e modelagem adaptativa (permitindo regulagens pelo usuário e entrada de dados conforme interesse do trabalho). Trata-se de um *software* independente, com uma plataforma de SIG aliada a um modelo urbano dinâmico que considera atributos naturais, urbanos e institucionais, através de medidas de centralidade e potencial celular – adaptadas de Krafta (1994) – e de resistências e atrações à urbanização acumuladas. Com isso, o modelo permite explorar cenários de futuro, através do direcionamento do crescimento urbano, de modo a realizar especulações sobre possíveis morfologias, aproximando assim de casos reais.

¹¹ O *software CityCell* foi elaborado por pesquisadores brasileiros, mas possui nome, interface e dados de saída em Língua Inglesa, facilitando o eventual uso por pesquisadores estrangeiros. Sendo assim, as contribuições ao modelo, que são propostas nesse trabalho, também utilizam expressões em Inglês, de modo a se adequar à base do *software*.

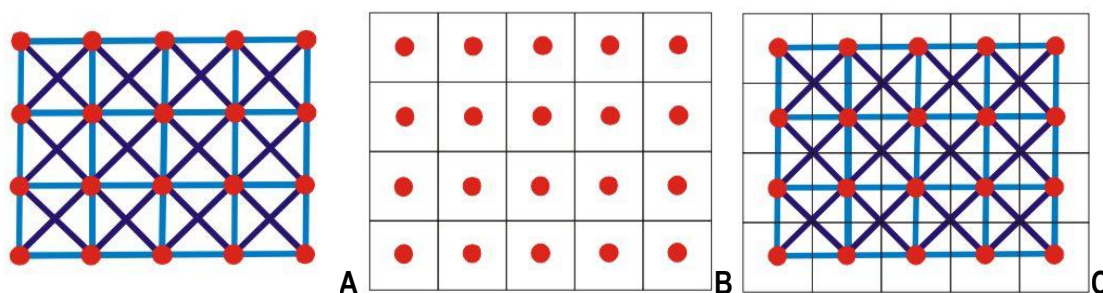


Figura 4.2: Teoria de grafos integrada à técnica de autômato celular (Polidori, 2004): A) representação vetorial de pontos interligados em um grafo; B) atribuição de pontos ao centro de cada célula do *grid* de um CA; C) integração entre grafo e CA.

4.2.1 Entrada de dados

Para simulação do crescimento urbano, são definidas como dados de entrada (*input*) no modelo variáveis espaciais consideradas relevantes para o processo, que são vinculadas e chamadas de atributos. Entendem-se como atributos os elementos componentes do sistema heterotrópico, que contém uma tabela de propriedades vinculada às células do *grid raster*. No modelo, os atributos podem gerar tensões de atração ou de resistência à urbanização, relevantes para simular a dinâmica de mudança da realidade. São atributos considerados pelo modelo:

- Atributos naturais: são aqueles que descrevem o ambiente não urbanizado, tais como cursos d'água, praias, banhados, nascentes, matas nativas, afloramentos rochosos, solos agrícolas, solos erodidos, declividades, bem como relações de proximidades com os esses fatores naturais. Para representar fatores sem descrição específica, é incluído nos processos de simulação um fator de aleatoriedade, a partir de um *grid* randômico, o qual também pode ser considerado como um atributo natural.
- Atributos urbanos: são aqueles que descrevem o ambiente urbanizado, tais como comércios, indústrias, áreas residenciais, equipamentos comunitários, praças e parques, hierarquia viária, densidade demográfica, custo do solo, indicadores socioeconômicos. Em resumo, descrevem a área efetivamente urbanizada, como também suas relações de proximidade.
- Atributos institucionais: são aqueles que representam planos e políticas públicas que sejam capazes de intervir no processo de crescimento urbano, tais como áreas de valor cultural, zonas de conservação natural, impostos diferenciados (imposto predial territorial urbano (IPTU), imposto sobre serviço de qualquer natureza (ISSQN) etc.), taxa de ocupação (TO) e índice de aproveitamento (IA), entre outros.

A tabela de propriedades dos atributos permite conter, por exemplo, as informações de nome e descrição, peso, tipo (natural, urbano, institucional), comportamento (atração ou resistência). As células

do sistema que possuem atributos cujo comportamento é de atração são entendidas como células que podem gerar tensões e, conseqüentemente, causar mudança de estado e crescimento urbano, enquanto as células cujo atributo tem comportamento de resistências são aquelas que dificultam o crescimento da cidade. “Tensões” são abstrações associadas a diversos tipos de fluxos (de energia, pessoas, veículos, informações) e que representam ações ou investimentos na modificação do espaço. No modelo, as tensões influenciam no cálculo das medidas de centralidade celular e de potencial celular, como será visto a seguir.

4.2.2 Crescimento urbano a partir das medidas de centralidade celular e potencial celular

Para simular o crescimento urbano, como já dito anteriormente, o *CityCell* usa as medidas de centralidade e potencial celular, adaptadas por Polidori (2004) a partir dos estudos de Krafta (1994; 2001), para modelagem e simulação do crescimento urbano. A integração da teoria de grafos à técnica de CA permite adaptar o cálculo da medida de centralidade proposta por Krafta (2001) ao modelo implementado no *CityCell*. A centralidade celular é entendida como o acúmulo de tensões recebidas por uma célula do sistema, sendo mais central a célula que acumula o maior número de tensões. Tensões são geradas por células do sistema que possuem o comportamento de atração e carregamentos urbanos diferentes de zero e são calculadas a partir do produto entre pares de células com essas características (equação 4.1). As tensões são distribuídas pelas células que participam do caminho mínimo entre esse par de células, sendo calculada assim a centralidade celular entre pares de células, como pode ser observado na equação 4.2.

$$T_{ij} = (a_i \cdot a_j)$$

Onde:

T_{ij} : tensão gerada entre as células i e j
 a_i ; a_j : carregamentos urbanos das células i e j

Equação 4.1: Tensão gerada a partir de um par de células. Fonte: Krafta (2001, p. 35.2)

$$c_{ij} = \frac{T_{ij}}{n_{ij}}$$

Onde:

c_{ij} : medida de centralidade entre um par de células i e j
 T_{ij} : tensão gerada entre as células i e j
 n_{ij} : quantidade de espaços localizados no caminho mínimo entre i e j

Equação 4.2: Centralidade gerada a partir de um par de células. Fonte: Krafta (2001, p. 35.2)

O caminho mínimo calculado pelo modelo do *CityCell* não é necessariamente aquele de menor distância entre dois pontos do sistema. O modelo leva em consideração as resistências, entendendo

como caminho mínimo o caminho preferencial, ou seja, aquele que oferece, além da menor distância, a menor quantidade de resistências acumuladas. Além disso, na adaptação dos cálculos de Krafta ao ambiente celular, o procedimento de distribuição de tensões não ocorre apenas nos caminhos preferenciais do grafo, mas através de três modos distintos: a) no caminho preferencial; b) na vizinhança celular; c) de forma dispersa e semialeatória, considerando características de comportamento e morfologia. Com isso, a morfologia do crescimento urbano é reproduzida no modelo do *CityCell* com base na distribuição de cinco diferentes tipos de tensões, que visam replicar diferentes processos de produção urbana e conversão do solo natural. As cinco tensões são as seguintes (fig. 4.2):

- Axial: ao longo dos caminhos preferenciais entre pares de células com carregamentos urbanos, sendo associadas ao sistema de circulação urbana.
- Axial de *buffer*: na vizinhança dos caminhos preferenciais, representando uma área de influência desse caminho.
- Polar: ocorre de forma concêntrica, na vizinhança imediata de uma célula geradora de tensão, representando influências de escala local.
- Difusa 1: distribuída de maneira semialeatória (a partir de um sorteio probabilístico que considera características de comportamento e morfologia das células do sistema), sendo diretamente proporcional a baixos valores de centralidade celular e baixas resistências e representando a produção imobiliária formal, relativa às populações de média e alta renda.
- Difusa 2: distribuídas de maneira semialeatória, diretamente proporcional as baixas centralidades e altas resistências do ambiente celular, representando a produção imobiliária informal, utilizada por populações de baixa renda.

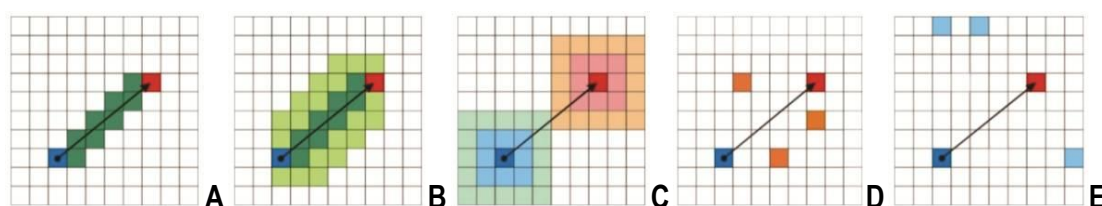


Figura 4.3: Diagramas em formato de CA, representando os tipos de tensões (Polidori, 2004): A) axial; B) axial de *buffer*; C) polar; D) difusa 1; E) difusa 2.

O padrão de distribuição de tensões do modelo é chamado isotensões, que é a distribuição igual para todas (20% para cada), embora possam ser efetuadas regulagens conforme o objetivo do estudo e as características do objeto. Sendo assim, adaptando a definição de centralidade de Krafta para o sistema celular, pode-se enunciar que a centralidade celular de uma dada “célula *i*” é o somató-

rio ponderado das participações de todas as tensões que passam pela “célula i ” nos diferentes modos de distribuição entre duas células quaisquer que tenham carregamentos urbanos no sistema (equação 4.3).

$$CentCel_{iN} = (x.A) + (y.B) + (z.P) + (w.D1) + (q.D2)$$

Onde:

$CentCel_{iN}$: centralidade celular da célula i na interação N

x, y, z, w, q : quantidades relativas dos modos de distribuição de tensões, sendo $\sum = 1$

$A, B, P, D1, D2$: distribuição axial, axial de buffer, polar, difuso 1 e difuso 2, respectivamente

Equação 4.3: Centralidade celular com base na soma ponderada da distribuição das diferentes tensões. Fonte: adaptada de Polidori (2004, p. 47).

O *grid* que representa a estrutura da cidade passa a ser composto por células associadas a diferentes valores de centralidade celular. A lógica usada para simular a dinâmica do crescimento urbano segue o entendimento que a centralidade celular é capaz de descrever o potencial de mudança do espaço urbano, podendo ser considerada uma indicadora de desequilíbrio locacional no sistema da cidade. Altos valores de centralidade celular denotam áreas de convergência de interesse, movimento e valor urbano, enquanto baixos valores denotam o oposto. O potencial celular para mudança se concentra na interface detentora da maior diferença entre os maiores e menores valores de centralidade celular entre um local e sua vizinhança (equação 4.4), pois essa área alia vantagens locacionais com menor custo do solo, maximizando renda do empreendimento. Como essas oportunidades locacionais são logo descobertas e assimiladas pelos concorrentes, o estado inicial do sistema é alterado e o processo se torna iterativo, permanente e complexo (Granero e Polidori, 2002; Constantinou, 2007; Polidori *et al.*, 2010).

$$PoteCel_i = [(CentCel_{Max\Delta buffer_i}) - (CentCel_i)]^\lambda$$

Onde:

$PoteCel_i$: potencial celular de crescimento celular da célula i

$CentCel_{Max\Delta buffer_i}$: centralidade celular máxima do buffer da célula i

$CentCel_i$: centralidade celular da célula i

λ (lambda): coeficiente relacionado à taxa de crescimento

Equação 4.4: Potencial celular de crescimento. Fonte: Polidori (2004, p. 51)

Portanto, partindo da distribuição de tensões entre as células com comportamento de atração, é calculada a centralidade celular. Com a diferença entre a centralidade de uma célula e a de suas vizinhas, é calculado o potencial de crescimento celular. O valor encontrado para o potencial celular pode ser utilizado de três maneiras distintas. Quando a célula não for urbana, ele vai consumir as resistências e, quando superá-las, converterá a célula para o estado urbano. Quando já for uma célula urbana, o potencial celular aumentará o carregamento urbano da célula, representando a intensidade de

ocupação do espaço. É entendido aqui que os carregamentos urbanos funcionam como um indicador de densificação de pessoas e edificações.

A regra de transição padrão do modelo do *CityCell* é chamada de Potencial de Crescimento com Limiar¹² (*Threshold Potential* - TP), dedicada à produção e crescimento de células urbanas conforme a lógica de centralidade-potencial celular. A expressão “limiar” se refere à existência de um limite de crescimento que, quando superado, indica possibilidade de haver problemas ambientais intraurbanos. Havendo problemas, tornam-se necessários esforços para que eles sejam solucionados nas próximas iterações do processo. Sendo assim, a terceira possibilidade de uso do valor do potencial celular representa esses esforços e investimentos na mitigação dos problemas, diminuindo os carregamentos urbanos da célula com o passar das iterações, até que voltem a estar abaixo do limiar. Essa operação pode ser considerada uma indicadora de sustentabilidade urbana.

Sendo o crescimento urbano um processo dinâmico, a variável tempo assume um papel estrutural no modelo, porém o *software* não informa o intervalo de tempo específico que está sendo simulado, mas permite que o crescimento celular seja regulado mediante ajustes em parâmetros. Um dos resultados tabulares fornecidos pelo modelo é a taxa de crescimento espacial simulada, a qual pode ser confrontada com dados da realidade (ou conhecimento empírico do modelador) sobre o objeto estudado. Para ajustar a taxa de crescimento simulada à realidade usa-se o parâmetro λ (*lambda*), de modo que o resultado possa ser associado a uma unidade de tempo discreta conhecida. Por exemplo, é possível se fazer com que cada iteração corresponda ao intervalo aproximado de 1 ano. Esse parâmetro, como visto na equação 4.4, é um coeficiente exponencial que é capaz de alterar a intensidade do crescimento, tanto interno, quanto externo.

4.2.3 Tensões difusas replicando a lógica produtiva das periferias urbanas

A distribuição das tensões que agem no modelo cria diferenciações de centralidades celulares, que, por sua vez, geram o potencial de crescimento celular. As tensões buscam replicar processos de produção urbana e, dentre os cinco tipos implantados no *CityCell*, dois deles, denominados tensões difusas, são entendidos como associados à lógica da produção de periferias urbanas. Diferentemente das outras tensões, as difusas são distribuídas de forma dispersa e semialeatória, ou seja, a partir de um sorteio probabilístico. Esse sorteio leva em consideração determinadas características de comportamento e

¹² Para ver o fluxograma do modelo de crescimento urbano SACI e da regra *Threshold Potential*, consultar adaptação no Anexo B ou original em Polidori (2004, p. 75-77).

morfologia das células do sistema: células com comportamento de resistências e suas medidas de centralidade celular.

A probabilidade de uma célula receber uma fração de tensão difusa do tipo 1 está enunciada na equação 4.5, sendo diretamente proporcional a baixos valores de centralidade e baixas resistências. Sendo assim, esse tipo de tensão difusa busca representar a produção imobiliária formal do espaço urbano, consumida pelas populações de classes econômicas superiores, tais como as urbanizações fechadas.

$$Prob_{i[Dif1]} = (1 - CentCel_i). (1 - ResistMedCel_i). random$$

Onde:

Prob_{i[Dif1]}: probabilidade da célula *i* receber fração de tensão difusa do tipo 1

CentCel_i: centralidade celular da célula *i*

ResistMedCel_i: média aritmética das resistências da célula *i*

random: número de células do sistema possíveis de receber tensões difusas do tipo 1

Equação 4.5: Probabilidade da célula receber tensões difusas do tipo 1. Fonte: Saraiva *et al.* (2011).

A produção imobiliária informal do espaço urbano, que é consumida pelas populações de classes econômicas inferiores, está representada no modelo pela tensão difusa do tipo 2. A probabilidade de uma célula receber uma fração desse tipo de tensão é diretamente proporcional a baixos valores de centralidade e altas resistências, conforme enunciado na equação 4.6.

$$Prob_{i[Dif2]} = (1 - CentCel_i). (ResistMedCel_i). random$$

Onde:

Prob_{i[Dif2]}: probabilidade da célula *i* receber fração de tensão difusa do tipo 2

CentCel_i: centralidade celular da célula *i*

ResistMedCel_i: média aritmética das resistências da célula *i*

random: número de células do sistema possíveis de receber tensões difusas do tipo 2

Equação 4.6: Probabilidade da célula receber tensões difusas do tipo 2. Fonte: Saraiva *et al.* (2011).

Após a definição das probabilidades de cada célula receber fração de tensão difusa, o sorteio probabilístico, implementado no modelo, ocorre da seguinte maneira: 1) as probabilidades são normalizadas para que o somatório do sistema seja igual a 1; 2) são definidos intervalos numéricos que representem as probabilidades normalizadas; 3) é gerado um número aleatório entre zero e 1; 4) é extraída uma célula do intervalo numérico do qual fizer parte o número aleatório. Todavia, a distribuição de tensões difusas (e polares, axiais, axiais de *buffer*) não determinará o crescimento urbano, pois esse depende das diferenças de centralidade entre uma célula e sua vizinhança e consequente processo de cálculo que gera a dinâmica de crescimento urbano no modelo.

4.2.4 Dados de saída

O *CityCell* possibilita dois tipos de produtos finais (*outputs*) para os resultados das simulações: a) dados gráficos, na forma de *grids*, para diversas medidas calculadas pelo modelo, permitindo análises qualitativas e quantitativas; b) dados tabulares, no formato de tabelas, apresentando dados estatísticos e medidas descritoras dos resultados, sendo acompanhadas de gráficos, facilitando sua visualização. Ainda que a simples visualização dos resultados possa ser suficiente, a interpretação dos *outputs* gerados por modelos é muitas vezes complicada (Clarke, 2004). De modo a auxiliar na interpretação dos resultados, são descritos a seguir os principais *outputs* originais do *CityCell*.

Os *outputs* gráficos auxiliam na visualização e no entendimento da dinâmica de mudanças espaciais. A Figura 4.4 exemplifica alguns *outputs* do *CityCell*, a partir de uma simulação de crescimento urbano exploratória para a cidade de Arroio Grande, RS¹³, cujos resultados apresentados usam paleta de cores hierárquica, com cores mais escuras indicando os maiores valores ou maiores intensidades das medidas e cores mais claras indicando o oposto:

- Células urbanas (*cell type*) (fig. 4.4): é uma variável do tipo qualitativa e que indica as células onde há predomínio de fatores urbanos sobre fatores naturais.



Figura 4.4: Exemplos de *outputs* de células urbanas (*cell type*), representando as iterações 1, 13, 26 e 40, para simulação de crescimento urbano da cidade de Arroio Grande, RS.

- Carregamentos urbanos (*urban load*) (fig. 4.5): é uma variável quantitativa que indica a quantidade de fatores urbanos que desempenham o papel de atração para urbanização, normalmente representando a intensidade de uso do solo.



Figura 4.5: Exemplos de *outputs* de carregamentos urbanos (*urban load*), representando as iterações 1, 13, 26 e 40, para simulação de crescimento urbano da cidade de Arroio Grande, RS.

¹³ Arroio Grande é uma cidade de pequeno porte localizada na região sul do Rio Grande do Sul, dentro do recorte espacial da pesquisa, tendo sido utilizada nos testes iniciais com o *CityCell*, em função da menor área de estudo e consequente menor quantidade de células no sistema e maior rapidez de processamento de cálculos.

- Resistências naturais (*environmental resistance*) (fig. 4.6): é uma variável quali-quantitativa que indica a intensidade de fatores naturais que se opõem à urbanização e que necessitam ser modificados para que haja crescimento urbano.

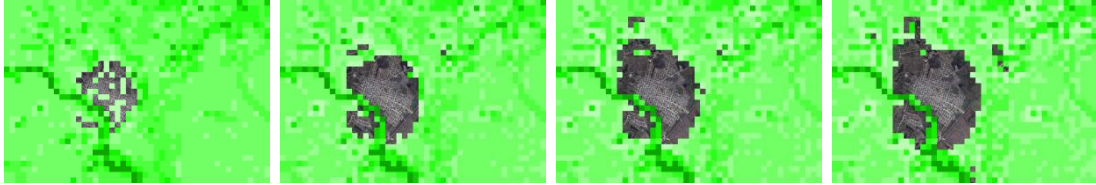


Figura 4.6: Exemplos de *outputs* de resistências naturais (*environmental resistance*), representando as iterações 1, 13, 26 e 40, para simulação de crescimento urbano da cidade de Arroio Grande, RS.

- Centralidade celular absoluta (*absolute cellular centrality*) (fig. 4.7): é uma variável quantitativa que mostra o somatório da distribuição de todos os tipos de tensões que incidem sobre as células a cada iteração.



Figura 4.7: Exemplos de *outputs* de centralidade celular absoluta (*absolute cellular centrality*), representando as iterações 1, 13, 26 e 40, para simulação de crescimento urbano da cidade de Arroio Grande, RS.

- Centralidades celulares relativas (*cellular centrality R1* e *cellular centrality R2*): são variáveis quantitativas derivadas do resultado de centralidade celular absoluta. A centralidade celular R1 (fig. 4.8A) é uma transformação vetorial por normalização, cujo resultado é um percentual do total absorvida pelas células, destacando os menores valores da medida. A centralidade celular R2 (fig. 4.8B) é uma transformação escalar logarítmica, que diminui o distanciamento entre os valores absolutos, destacando os maiores valores da medida.

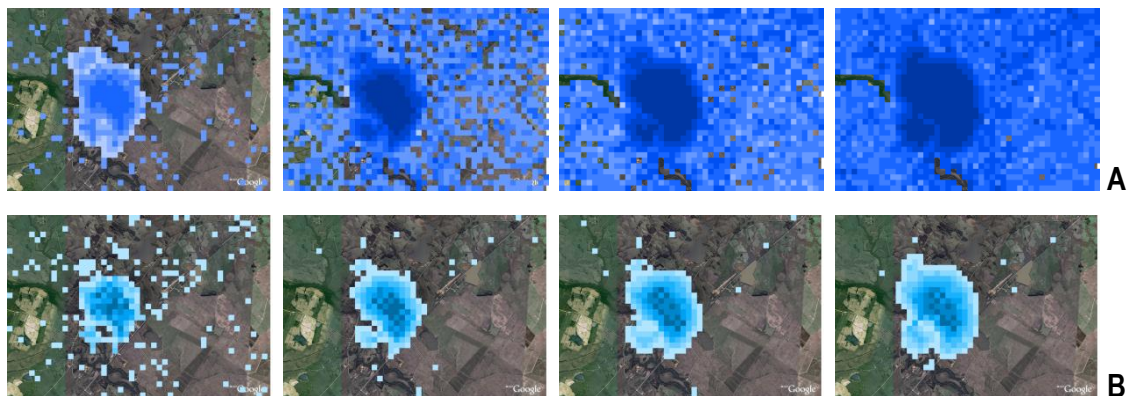


Figura 4.8: Exemplos de *outputs* de centralidades celulares relativas, representando as iterações 1, 13, 26 e 40, para simulação de crescimento urbano da cidade de Arroio Grande, RS: A) centralidade celular R1 (*cellular centrality R1*); B) centralidade celular R2 (*cellular centrality R2*).

- Potencial de crescimento celular (*cellular potential*) (fig. 4.9): é uma variável quantitativa que representa a capacidade de transformação das entidades espaciais, referente à diferença entre a centralidade celular de cada célula e a centralidade celular máxima das células da vizinhança imediata.



Figura 4.9: Exemplos de *outputs* de potencial de crescimento celular (*cellular potential*), representando as iterações 1, 13, 26 e 40, para simulação de crescimento urbano da cidade de Arroio Grande, RS.

Os *outputs* tabulares, correspondentes à regra de transição Potencial de Crescimento com Limiar, são tabelas e gráficos que sintetizam os registros de cada iteração através de diferentes estatísticas referentes à simulação:

- Estatísticas sobre o crescimento celular (*cell statistics*): referentes à contagem das células totais, de borda, conversão do solo e percentual de crescimento por iteração e acumulado.
- Estatísticas sobre o potencial de crescimento celular (*cellular potential statistics*): referentes ao potencial de crescimento interno e externo, por iteração e acumulado. Também traz o registro dos problemas ambientais causados pela superação de limiares.
- Estatísticas de fragmentação e compacidade (*fragmentation/compacity*): contém cálculos de fragmentação e compacidade absolutas e relativas para o output de células urbanas. Essas medidas podem ser entendidas como descritoras de dispersão espacial, sendo a fragmentação entendida como uma medida que fornece o grau de descolamento e não-contiguidade de uma célula em relação às suas vizinhas; e a compacidade entendida como uma medida que considera a composição do conjunto, calculada a partir do quociente entre a superfície gerada pela simulação e o seu perímetro (Polidori, 2004).

Os resultados tabulares ou os mapas de *grids* também podem ser exportados do modelo, podendo ser utilizados em plataformas diferentes do *CityCell*. A possibilidade de exportação dos *outputs* dá liberdade e flexibilidade ao usuário, permitindo que sejam feitas outras análises como, por exemplo, álgebras de mapas ou correlações entre *outputs*.

4.2.5 Estudo exemplo com tensões difusas

As tensões difusas, como propostas no modelo, possibilitam uma primeira aproximação para a simulação da formação de periferias urbanas, a partir de padrões locacionais relacionados às centralidades celulares e às resistências oferecidas pelo ambiente natural. De modo a demonstrar a viabilidade metodológica e explorar as dinâmicas do crescimento periférico a partir da distribuição de tensões difusas, foi delineado esse estudo exemplo. Para isso foi concebido um sistema abstrato e simplificado, o qual está representado por um núcleo urbano homogêneo e um ambiente natural de entorno, caracterizado por diferentes restrições à urbanização.

O sistema do exemplo é composto por um *grid* celular de 70 x 40 células e 3 atributos de *input* (fig. 4.12), que podem ser descritos como: a) carregamento urbano com comportamento de atração e com peso 1, representado por um núcleo urbano localizado no centro do *grid*, com 12 células; b) resistências do ambiente natural, com 7 diferentes estratos com pesos 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7 e que aumentam de forma crescente da esquerda para direita do *grid*; c) resistências do ambiente natural, com pesos de 1 a 7, distribuídos de maneira aleatória no *grid*.

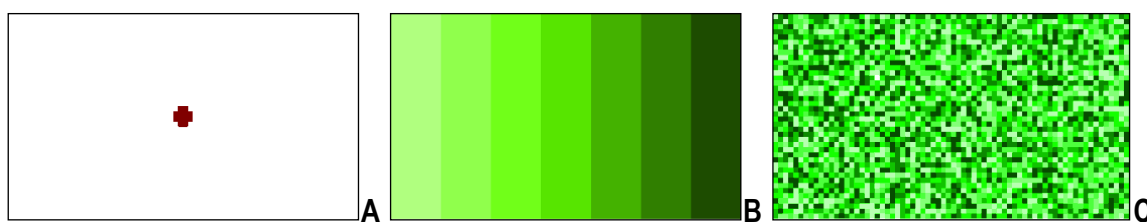


Figura 4.10: Dados de entrada no modelo para cidade abstrata: A) carregamento urbano; B) resistências do ambiente natural (em ordem crescente de tons de verde, sendo mais escuros os maiores valores); C) resistências aleatórias.

Na intenção de demonstrar o comportamento das tensões difusas isoladamente, foram simulados processos de crescimento urbano de três maneiras distintas: a) com distribuição de tensões igual a 100% para as tensões difusas do tipo 1, entendida como aquela que está associada à formação de periferias do tipo urbanizações fechadas; b) com distribuição de tensões igual a 100% para as difusa do tipo 2, entendida como a tensão relativa à produção de núcleos periféricos do tipo periferização; c) com distribuição de isotensões, ou seja, com 20% para cada uma das cinco tensões que operam no *CityCell*.

No primeiro processo, onde há 100% das tensões distribuídas para a difusa do tipo 1 (fig. 4.13), o resultado mostra um crescimento urbano cujas células vão aparecendo de forma dispersa, configurando um padrão descentralizado em relação ao núcleo central, com formas fragmentadas, mas com concentração à esquerda do *grid*, consumindo áreas com menores resistências à urbanização. Já no segundo processo, com 100% das tensões distribuídas para a difusa do tipo 2 (fig. 4.14), pode ser

observado um crescimento também disperso, mas gerando um padrão mais fragmentado que o caso anterior (gráfico 4.1), em núcleos menores e esparsos, ocorrendo em todas as áreas do *grid*, porém, principalmente, em áreas de elevadas resistências.

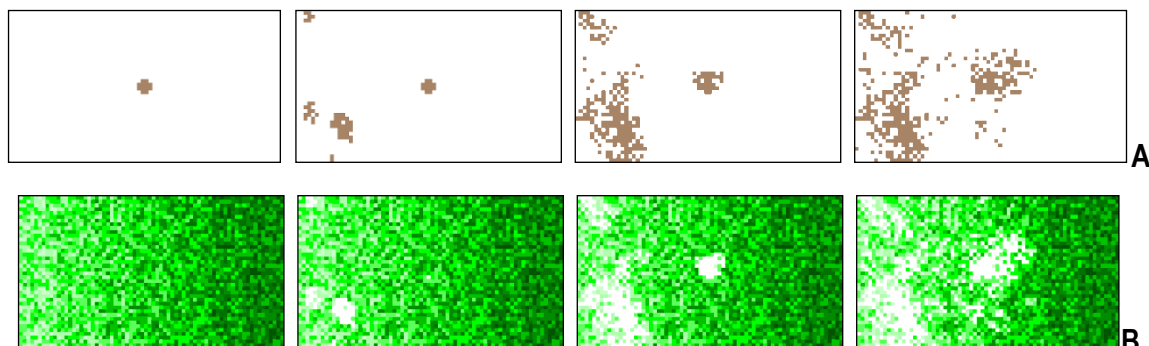


Figura 4.11: *Outputs* da simulação de crescimento urbano para cidade abstrata, com distribuição de 100% para tensões difusas tipo 1, respectivamente para as iterações 1, 13, 26 e 40: A) células urbanas; B) resistências naturais.

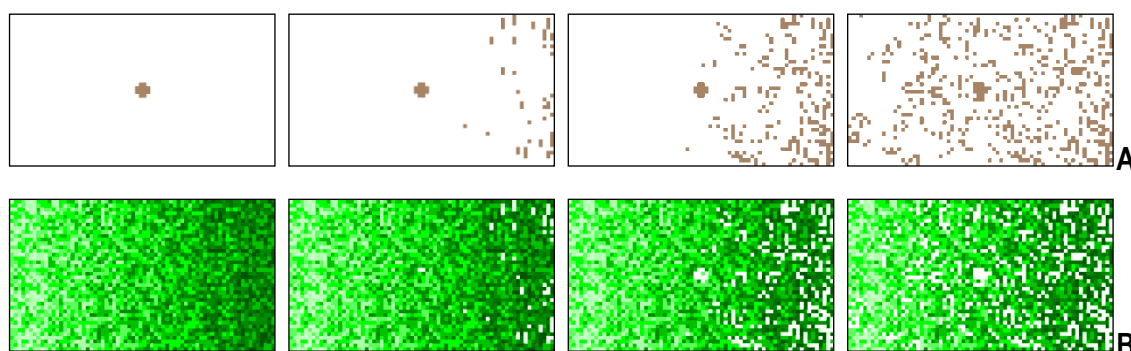


Figura 4.12: *Outputs* da simulação de crescimento urbano para cidade abstrata, com distribuição de 100% para tensões difusas tipo 2, respectivamente para as iterações 1, 13, 26 e 40: A) células urbanas; B) resistências naturais.

Esses resultados se assemelham visualmente a algumas das características morfológicas relacionadas aos dois tipos de formações periféricas, sendo fáceis de ser interpretados quando se simula o crescimento com o predomínio total de apenas uma das tensões. Todavia, na dinâmica de crescimento de uma cidade, várias ações de modificação do espaço, abstraídas para o modelo na forma de tensões, agem simultaneamente. No terceiro processo, com os cinco tipos de tensões distribuídos de maneira igual (20% para cada) (fig. 4.15 e 4.16), o resultado final¹⁴ apresenta uma morfologia com expansão ao redor do núcleo central original e com surgimento de núcleos dispersos de duas formas diferentes: maiores e mais compactos à esquerda da imagem, em áreas de menores resistências, se assemelhando às características das urbanizações fechadas; menores e mais fragmentados à direita da imagem, em áreas de maiores restrições, semelhante às características da periferização.

¹⁴ São apresentados apenas os *outputs* relativos ao crescimento de células urbanas e às hipóteses de pesquisa: características do ambiente natural (resistências naturais); concentração de estoques construídos (carregamentos urbanos); e concentração de facilidades urbanas (centralidades celulares).

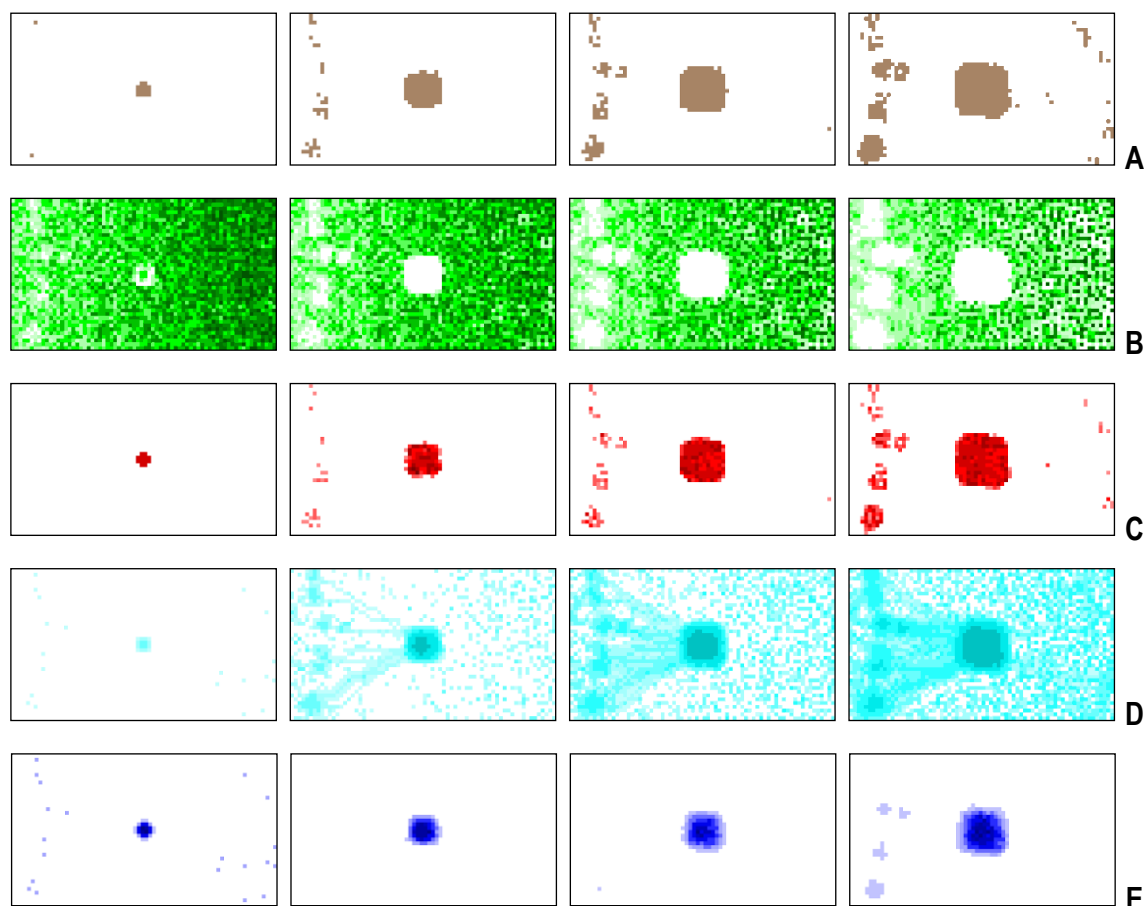


Figura 4.13: *Outputs* da simulação de crescimento urbano para cidade abstrata, com distribuição isotensões, respectivamente para as iterações 1, 13, 26 e 40: A) células urbanas; B) resistências naturais; C) carregamentos urbanos; D) centralidades celulares R1; E) centralidades celulares R2.

Conforme o estudo, pode ser notado que as tensões difusas, isoladamente, geram morfologias que atendem às hipóteses de pesquisa. Quando usadas todas as tensões do modelo, torna-se difícil a identificação das células correspondentes aos dois tipos de periferias. Sendo assim, torna-se necessária a formulação de procedimentos e descritores que não se limitem à simples análise visual, principalmente para casos reais, onde a maior heterogeneidade ou especificidade do sistema podem gerar dificuldade de interpretação dos resultados.

4.3 Contribuições ao método e modelo

O modelo SACI, elaborado por Polidori (2004), foi construído com o objetivo experimental de simular crescimento urbano de modo genérico, não especificamente para o caso do crescimento periférico. A lógica da formação de periferias a partir das tensões difusas é uma possibilidade oferecida pelo modelo, na qual são encontradas algumas limitações, tais como a identificação dos tipos de periferias nos resultados gerados. Nesse sentido, um dos objetivos específicos do presente trabalho é contribuir com

o modelo, propondo procedimentos efetivos para a modelagem e simulação do crescimento periférico das cidades e para identificação das periferias e da dinâmica de sua formação, bem como para avaliação dos resultados.

Operações com álgebra de mapas em ambiente SIG, a partir dos *outputs* do modelo, são indicadas por Polidori (2004) como procedimento metodológico a ser explorado. Partindo dessa sugestão, esses procedimentos serão apresentados no próximo capítulo e demonstrados através de um estudo de caso para uma cidade do sul do Rio Grande do Sul. Complementando a proposta de Polidori, após os estudos com álgebras de mapas, também serão efetuados testes que considerem as relações de vizinhança a partir das periferias preexistentes. Para avaliar os resultados dos dois estudos, em adição à análise visual, os estudos serão avaliados pela proporção de concordância celular e por medidas de manchas, que serão apresentadas a seguir.

4.4 Validação dos estudos: descritores morfológicos

O modelo escolhido para realização dessa pesquisa possui uma lógica de procedimentos que o torna capaz de realizar a modelagem e simulação do crescimento urbano. Entretanto, possui uma limitação na interpretação dos resultados, quando há necessidade de identificar tipologias específicas nos *outputs* gerados. Considerando a possibilidade de desagregação dos resultados das simulações e identificação dos tipos que se deseja encontrar, a partir de métodos que incorporem suas características morfológicas, são necessários descritores que permitam avaliar as formas resultantes desse procedimento.

Os mais importantes produtos finais do modelo do *CityCell*, e dos procedimentos propostos para simulação do crescimento periférico, são *outputs* booleanos. Ou seja, *outputs* cujas células indicam apenas duas informações: presença ou ausência de cidade, presença ou ausência de periferização, presença ou ausência de urbanizações fechadas. Diante disso, uma primeira avaliação dos resultados pode ser feita através de análise visual. Trata-se de um procedimento importante, pois, ainda que não tenha a acurácia estatística, considera o conhecimento empírico e teórico do avaliador.

Somando-se à análise visual, de modo a diminuir as limitações estatísticas, os dados booleanos das morfologias simuladas podem ser avaliados por descritores que utilizem cálculos matemáticos e confirmem maior precisão para as análises. Pascual *et al.* (2011) cita que a comparação estatística entre mapas de resultados simulados com a realidade pode ser feita pela similaridade na localização geométrica dos elementos ou pela semelhança na estrutura formal da paisagem. Seguindo esse cami-

nho, nesse trabalho são utilizados métodos dedicados à avaliação locacional e à avaliação formal dos resultados simulados.

Para avaliação locacional, é feita comparação da posição geométrica célula a célula, considerando apenas células novas, ou seja, a totalidade de células que mudaram de estado nos dois cenários. Assim, é calculado o percentual de células do cenário simulado que coincidem no espaço com as células do cenário de controle (situação real ou ideal com a qual os resultados simulados serão comparados). Essa operação é aqui chamada de proporção de concordância celular e será efetuada para avaliação da simulação de células urbanas e, também, para células de periferização e células de urbanizações fechadas.

Entretanto, as probabilidades de acerto na localização tendem a ser bastante reduzidas. Modelos de CA, visando à produção de resultados mais realísticos, possuem fatores ou parâmetros aleatórios que incorporam ao modelo a incerteza típica dos sistemas complexos e dos processos urbanos (García *et al.*, 2011). Além disso, em função da grande quantidade celular que a área de estudo pode ter, são muitas as possibilidades de células onde poderá ocorrer determinada variação de estado, principalmente em processos com pouca mudança em relação ao total (Pascual *et al.*, 2011). Com isso, a parcela de aleatoriedade inerente ao modelo, aliada a grande quantidade de células da área de trabalho, é capaz de interferir na escolha de uma entre duas células com as mesmas características ou semelhantes, gerando um erro locacional quando comparada a simulação com a realidade. Pode, inclusive, na simulação ser escolhida uma célula vizinha àquela presente no cenário real e, ainda assim, será considerado erro locacional. Esse erro tornará menor a proporção de concordância celular, ou seja, menor a proximidade do acerto na localização espacial correta, ainda que a escolha feita pelo modelo tenha sido coerente com a hipótese de cálculo que o rege. Dessa maneira, é importante que a análise de resultados não se dê apenas quanto à similaridade na localização geométrica das células, sendo necessário o uso de método complementar que avalie outros critérios de semelhança.

Pascual *et al.* (2011) sugere o uso de medidas da ecologia da paisagem, como uma maneira de comparar mapas a partir da configuração espacial de suas formas. A ecologia da paisagem é um ramo da ciência que estuda a distribuição de sistemas dentro de um determinado espaço (Perlman e Milder, 2004), investigando a relação entre padrões espaciais e processos ecológicos (Peng *et al.*, 2010). Análogo à modelagem urbana, de modo a simplificar a realidade através de elementos estruturadores, para ecologia da paisagem o espaço é representado como um mosaico composto por manchas, corredores e matrizes. Para o caso do crescimento periférico, interessa particularmente a definição de manchas, que são conceituadas por Forman (1995, p. 39) como “áreas relativamente homogêneas e não lineares, com características que as diferem do seu entorno”. Esse conceito pode ser apli-

cado à cidade em relação com o ambiente natural envolvente, como também aos núcleos de alta e baixa renda, que conformam manchas com características próprias, como os *neighborhoods* de Lynch (1960).

Para analisar os elementos estruturantes que compõem uma paisagem, e as relações entre eles, diversas medidas podem ser extraídas de manchas, corredores e matrizes, e ser usadas como descritores de suas formas. O *software ArcGIS 9.3* possui uma extensão chamada *Patch Analyst*, que permite a elaboração de estatísticas espaciais baseadas em medidas de manchas extraídas de mapas vetoriais ou de *grids*. No caso de medidas extraídas de *grids*, a extensão incorpora o *Fragstats*, que é um conjunto de equações para a avaliação quantitativa da distribuição de manchas em uma paisagem, propostos por McGarigal e Marks (1994). São equações que quantificam as relações das manchas com a paisagem quanto as suas formas, tamanhos, bordas, diversidade, densidade. Quando comparadas as medidas extraídas do resultado simulado com a realidade modelada, os valores das estatísticas não são capazes de descrever se há ou não acerto locacional, mas permitem verificar semelhanças morfológicas.

As medidas de manchas que compõem o *Fragstats* são utilizadas, portanto, como descritoras da estrutura espacial das formas simuladas no estudo de caso. A partir delas, comparando realidade e simulação, é possível verificar o índice de erro formal, complementando a análise visual dos resultados gráficos e a análise locacional. A equação 4.7 mostra o cálculo do índice de erro formal, entendendo que quanto menor for o erro, mais próximo o resultado simulado estará do acerto formal. Nesse trabalho, por opção heurística, são considerados bons resultados quando os valores estiverem entre zero e 0,3; e resultados medianos quando os valores estiverem entre 0,3 e 0,7; valores acima de 0,7 são considerados resultados ruins.

$$E_{\text{formal}} = \left| \frac{mm_{CC} - mm_{CS}}{mm_{CC}} \right|$$

Onde:

E_{formal} : índice de erro formal

mm_{CC} : medida de mancha do cenário de controle

mm_{CS} : medida de mancha do cenário simulado

Equação 4.7: Índice de erro formal a partir das medidas de manchas da paisagem. Fonte: do autor.

Entendendo paisagem como a área de estudo, as medidas selecionadas estão relacionadas com a forma, tamanho, bordas e diversidade, a saber:

- Índice da maior mancha (*largest patch index* - LPI): é considerada uma medida básica do *Fragstats* e consiste no percentual ocupado pela maior mancha em relação ao total da paisagem.
- Borda total (*total edge* - TE): é a soma do perímetro de todas as manchas.

- Densidade da borda (*edge density* - ED): é a relação entre o perímetro total das manchas e a área da paisagem.
- Índice de forma da paisagem (*landscape shape index* - LSI): é um índice relacionado às bordas. Consiste na soma dos perímetros fechados e de todos os segmentos de borda (no caso de estarem localizados na borda da área de trabalho) de determinada mancha dentro dos limites da paisagem, dividida pela raiz quadrada da área total da paisagem e ajustado por uma constante para padrão quadrado do formato das células do *grid*. Aumentará quanto maior for a irregularidade das formas das manchas.
- Índice de forma média ponderado pela área (*area weighted mean shape index* - AWMSI): é uma medida de irregularidade da forma. Possui cálculo semelhante ao LSI, mas com uma ponderação pela área das manchas. Terá índice 1 quando todas as manchas tiverem formato quadrado e aumentará de valor quanto maior for a irregularidade das formas.
- Índice de média da forma (*mean shape index* - MSI): é outra medida de irregularidade da forma. Consiste no somatório dos perímetros das manchas, ajustado por um padrão quadrado para *grids* e dividido pela raiz quadrada da área de manchas de determinado tipo, dividido ainda pelo número de manchas. Também será 1 quando todas as manchas tiverem formato quadrado e aumentará de valor conforme irregularidade das formas.
- Índice de proximidade média (*mean proximity index* - MPI): é uma medida do grau de isolamento. Corresponde ao somatório das áreas das manchas divididas pelo quadrado da distância para a mancha vizinha mais próxima, dividido ainda pelo número de manchas. Quanto maior o valor encontrado, mais próximas estão as manchas, havendo menor isolamento e menor fragmentação.
- Distância média da vizinhança mais próxima (*mean nearest neighbor distance* - MNN): também é uma medida de isolamento das manchas. Consiste na média das menores distâncias entre uma mancha e sua vizinha mais próxima.
- Tamanho médio das manchas (*mean patch size* - MPS): é a média do tamanho das manchas.
- Número de manchas (*number of patches* - NUMP): é a quantidade de manchas de um determinado tipo na paisagem.
- Desvio padrão do tamanho das manchas (*patch size standard deviation* - PSSD): mede a variabilidade do tamanho das manchas em torno da média. O desvio padrão será menor quanto menor forem as diferenças de tamanho entre as manchas e será maior no caso oposto.

- Coeficiente de variação do tamanho das manchas (*patch size coefficient of variance* - PSCOV): é também uma medida de diversidade do tamanho das manchas e consiste na razão entre o desvio padrão e a média do tamanho das manchas.

As medidas de manchas usadas para avaliação das simulações, suas equações e interpretações estão apresentadas no Anexo A.

4.5 Epílogo do Capítulo 4

Nesse capítulo, dedicado ao método de pesquisa e ao modelo a ser usado para investigação, foram apresentadas as etapas para a construção de modelos e os passos metodológicos para o estudo proposto para o caso do crescimento periférico urbano em cidades do sul do Rio Grande do Sul. Também foi apresentado o modelo de crescimento urbano SACI, baseado em autômatos celulares e implementado em um *software* chamado *CityCell*.

O modelo apresentado considera tanto atributos urbanos, quanto atributos do ambiente natural, que são importantes para a dinâmica do crescimento periférico, visto que esse é um fenômeno urbano e que ocorre na interface cidade-natureza. Esses atributos podem gerar tensões entre células do sistema, que influenciam na dinâmica do crescimento da cidade simulada. Tensões são abstrações que visam replicar processos de produção urbana e duas delas, chamadas tensões difusas, foram implantadas de maneira a simular a lógica da produção de periferias urbanas, tanto as urbanizações fechadas quanto a periferação. Todavia, o modelo não foi construído especificamente para o crescimento periférico e possui limitações. Diante das limitações encontradas no SACI e considerando que um dos objetivos do trabalho é o desenvolvimento de um processo ou instrumento novo para modelagem urbana, estão propostas contribuições para o próprio modelo, dedicadas ao crescimento periférico urbano.

Sendo assim, a busca por procedimentos capazes de modelar e simular a formação de periferias urbanas está baseada nas hipóteses de pesquisa enunciadas no início da dissertação. No próximo capítulo será visto que essa busca parte da exploração das possibilidades oferecidas pela estrutura original do SACI, em conjunto com rotinas de álgebra de mapas. Após, serão incluídas as periferias preexistentes e consideradas suas relações de vizinhança, inexistentes no SACI original. O capítulo 5, portanto, será um complemento do capítulo 4, trazendo os procedimentos para a modelagem do crescimento periférico, demonstrados a partir do estudo de caso para uma cidade do recorte espacial adotado: Pelotas, RS.

Capítulo 5. PROCEDIMENTOS PROPOSTOS PARA MODELAGEM DA FORMAÇÃO DE PERIFERIAS URBANAS: O CASO DE PELOTAS

Nos capítulos anteriores foi visto que o crescimento periférico pode ser entendido como expansões de tecido urbano para uso residencial, que ocorrem nas bordas da cidade, num processo dinâmico, no qual participam tanto fatores urbanos quanto elementos da paisagem natural. Dois tipos de formações periféricas são destacados, a periferização e as urbanizações fechadas, relacionados à segregação do espaço urbano, em função dos padrões de renda da população predominante. Modelagem urbana com autômatos celulares possibilita simular a dinâmica urbana a partir de uma abordagem morfológica, podendo ser aplicada para estudos sobre crescimento urbano e também para o crescimento periférico. Além disso, foi visto que o SACI (Polidori, 2004) foi escolhido como base metodológica e instrumental para a investigação. Nesse caminho, no capítulo 5 estão apresentados os procedimentos dedicados à modelagem do crescimento periférico urbano. De modo a facilitar a compreensão do trabalho, o desenvolvimento dos procedimentos ocorre conjuntamente com o estudo de caso exploratório, aplicado ao caso de Pelotas, uma cidade de médio porte da região sul do Rio Grande do Sul. Os procedimentos e estudo de caso exploram as hipóteses de pesquisa, buscando simular padrões de forma e localização de periferias, segundo dois métodos, os quais serão vistos a seguir.

5.1 Delineamento experimental

A partir do estudo de caso, o delineamento experimental passa a ser dividido em três etapas. A primeira é a calibração dos parâmetros do modelo, principalmente das tensões de crescimento urbano, sendo importante para que as demais etapas sigam um mesmo padrão de forma urbana, semelhante ao observado na realidade, dentro do recorte de tempo escolhido. As outras duas etapas são dedicadas à simulação do crescimento periférico e à identificação das periferias, segundo dois métodos.

O primeiro método utiliza simplesmente operações de álgebra de mapas com os *outputs* extraídos do *CityCell*, simulando o crescimento urbano com a regra *Threshold Potential*. Os *outputs* selecio-

nados são entendidos como variáveis que estão relacionadas às hipóteses de pesquisa: centralidades celulares relacionadas à concentração de facilidades urbanas; carregamentos urbanos às densidades edificadas; resistências naturais às características do ambiente natural. As três álgebras propostas para periferização e para urbanizações fechadas combinam as três variáveis duas a duas. Os resultados são comparados com a realidade e avaliados quanto à localização e à forma das periferias identificadas, segundo análise visual, proporção de concordância celular e medidas de manchas.

O segundo método passa a incluir a quarta hipótese de pesquisa, referente à similaridade socioeconômica de vizinhança, através da determinação das periferias preexistentes no *input*. Diferente do método anterior, para que o modelo considere as preexistências e suas vizinhanças, são necessárias rotinas de programação, conduzindo a formulação de um protótipo para uma nova regra de transição. A regra, chamada Tendência de Crescimento Periférico (TCP), considera dois tipos de tendências para a simulação da formação dos dois tipos de periferias: a tendência difusa, que assume o melhor resultado observado nas álgebras de mapas como indicador para o surgimento de núcleos novos; a tendência de vizinhança, que considera as preexistências propriamente ditas e suas expansões por similaridade. Para as tendências de vizinhança, também são usados *outputs* do *CityCell*, assumindo apenas as variáveis usadas na álgebra de melhor resultado e que são entendidas como diretamente proporcionais ao tipo de periferia: carregamentos urbanos para periferização; centralidades celulares para urbanizações fechadas. Os procedimentos também consideram o fenômeno da segregação socioespacial, relatado nos primeiros capítulos da dissertação. Assim como no método anterior, os resultados são avaliados pelos mesmos descritores e, por fim, comparados com os resultados do método anterior.

5.2 Base espacial e calibração do crescimento urbano

Percorridas as bases empíricas e teóricas, e complementando a base metodológica, a investigação é conduzida para sua etapa experimental. Com recorte espacial focado para o sul do Rio Grande do Sul (fig. 1.3B), foi escolhida uma das cidades dessa região para ser utilizada como estudo de caso e, assim, testar as hipóteses de pesquisa e os procedimentos propostos para modelagem do crescimento periférico. Na seleção do caso, um aspecto essencial é que a cidade apresente o fenômeno estudado. Isso possibilita o exercício de verificação da capacidade do modelo em replicá-lo, por padrões de forma e localização, através da comparação entre os resultados das simulações e a realidade observada.

Pelotas (fig. 5.1) é a maior cidade da região sul do Rio Grande do Sul. O município possui 327.778 habitantes (segundo Censo de 2010 do IBGE), sendo que 93% do total vivem em área urbana. Como em todas as cidades da região, existem diversos núcleos de baixa renda localizados nas bordas

da área efetivamente urbanizada (AEU) de Pelotas (fig. 1.4H). Quanto à localização espacial da população de alta renda, conforme apresentado nas observações empíricas (item 1.2), ainda que mantenha o padrão centro-periferia típico das cidades latino-americanas, é uma das cidades onde também são encontrados núcleos descentralizados. Isso indica que Pelotas é uma cidade onde já foi iniciado o processo de movimento das elites do centro para as periferias. A existência de periferização e urbanizações fechadas, portanto, reforça a escolha de Pelotas como estudo de caso¹⁵.



Figura 5.1: Localização da cidade de Pelotas no estado do Rio Grande do Sul. Fonte: desenho do autor sobre imagem Google Earth, 2012.

Considerando que morfologias do passado ressoam e influenciam em morfologias do presente, as quais podem influenciar em padrões para cenários de futuro (Sheldrake, 2009; Liu, 2009), estudos de modelagem com casos reais podem ser avaliados a partir da comparação entre, no mínimo, dois intervalos de tempo. O recorte temporal para os estudos com Pelotas se situa dentro de um intervalo de 25 anos, entre 1985 e 2010. O estado inicial, 1985, marca aproximadamente o final do programa nacional de habitação da época da ditadura militar brasileira¹⁶. Já o ano de 2010 está relacionado ao tempo atual, marcando a data de início da pesquisa que origina essa dissertação. Os atributos da paisagem natural e urbana, que serão descritos a seguir, foram representados em ambiente computacional com base em imagens de satélites correspondentes aos dois estados no tempo. Para o ano inicial foi utilizada como base uma imagem do satélite *Landsat 5 TM*, do dia 6 de fevereiro de 1985 (disponível no catálogo de imagens do site do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)). Para 2010,

¹⁵ Além de ser a maior cidade do recorte espacial e apresentar a existência de periferização e de urbanizações fechadas, Pelotas é a cidade onde está localizado o curso de mestrado, facilitando o levantamento de dados em bases existentes ou por conhecimento empírico acumulado.

¹⁶ O programa nacional de habitação do SFH/BNH foi encerrado em 1986, como visto no item 2.2. Todavia, o recorte temporal para as simulações é iniciado no ano de 1985 em função da data da imagem de satélite mais próxima ao ano de 1986 que está disponibilizada para download no site do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE): <<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>>.

considerado o cenário de controle do estudo, foi utilizada uma imagem do início do ano posterior, capturada do *software Google Earth*, com data de 18 de março de 2011.

5.2.1 Dados de entrada

O recorte espacial modelado para o estudo está delimitado incluindo a AEU da cidade e seu entorno natural (e rural), de modo a permitir que o modelo simule a expansão urbana considerando também os atributos da paisagem. A área de trabalho possui 33,02 km na direção leste-oeste e 19,14 km na direção norte-sul, e está delimitada pelas seguintes coordenadas geográficas (em UTM, *datum* WGS 1984, para o fuso 22 sul): 6.500.195,75 limite norte; 6.481.668,97 limite sul; 393.807,48 limite leste; 360.802,84 limite oeste. O *grid* resultante da desagregação espacial possui 96 linhas por 165 colunas, com 15.840 células de 200m x 200m¹⁷. Para descrever a área de estudo foram utilizados três grupos de atributos, correspondentes aos dados de entrada no sistema e relacionados aos condicionantes urbanos, naturais e institucionais para o crescimento urbano. Esses condicionantes foram inicialmente representados vetorialmente no *software AutoCAD 2009*, a partir da visualização das imagens *Landsat 5 TM* e *Google Earth*, confrontada com dados de levantamento efetuados em 2006 para o projeto PROEXT¹⁸. Após, em ambiente SIG do *software ArcGIS 9.3*, foram convertidos em *shapes* e, em seguida, em *grids*. Por fim, os *grids* foram importados pelo *CityCell*, onde receberam pesos e outros parâmetros. Os atributos utilizados no trabalho são os seguintes:

- a) atributos urbanos (fig. 5.2): correspondem à área efetivamente urbanizada de Pelotas;
- b) atributos naturais (fig. 5.3, 5.4 e 5.5): sistema de águas superficiais (laguna, águas lótic, águas lânticas, linhas de drenagem); cobertura do solo (banhados, praias e dunas, matas nativas, campos e matas plantadas); e um fator de aleatoriedade;
- c) atributos institucionais: representando impedimentos de urbanização nas áreas referentes à Laguna dos Patos (fig. 5.3A e 5.3B), cujas células recebem característica do estado “congelado” (*freezing*).

¹⁷ A desagregação de 200m x 200m possibilita que o tempo de processamento do modelo seja menor, adequado às possibilidades de trabalho, sem perda de qualidade na representação da morfologia de *input* e *output* na tela de um computador. Existe uma relação entre o tamanho das células do *grid*, o tempo de processamento e o tipo de resultado: células maiores geram menor tempo de processamento, mas menor a precisão dos resultados; células menores geram maior precisão dos resultados, mas também maior tempo de processamento.

¹⁸ O PROEXT é um programa do governo brasileiro que concede recursos financeiros para projetos de extensão. Em 2006 o Laboratório de Urbanismo (na época chamado Laboratório de Geoprocessamento), da Universidade Federal de Pelotas, recebeu recursos para elaborar um SIG em escala regional, no qual podem ser encontrados dados sobre Pelotas (e região). Dados relativos ao mosaico do ambiental foram utilizados para descrição do ambiente natural, sendo sobrepostos à imagem *Landsat* de 1985 e alterados em locais onde foram encontradas diferenças entre as duas datas.

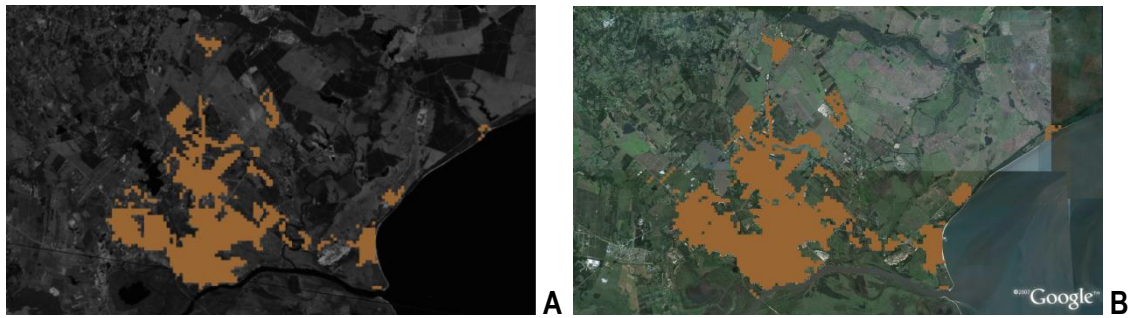


Figura 5.2: Atributos urbanos para Pelotas, RS, respectivamente em 1985 (sobre imagem Landsat 5 TM) e 2010 (sobre imagem Google Earth): área efetivamente urbanizada.

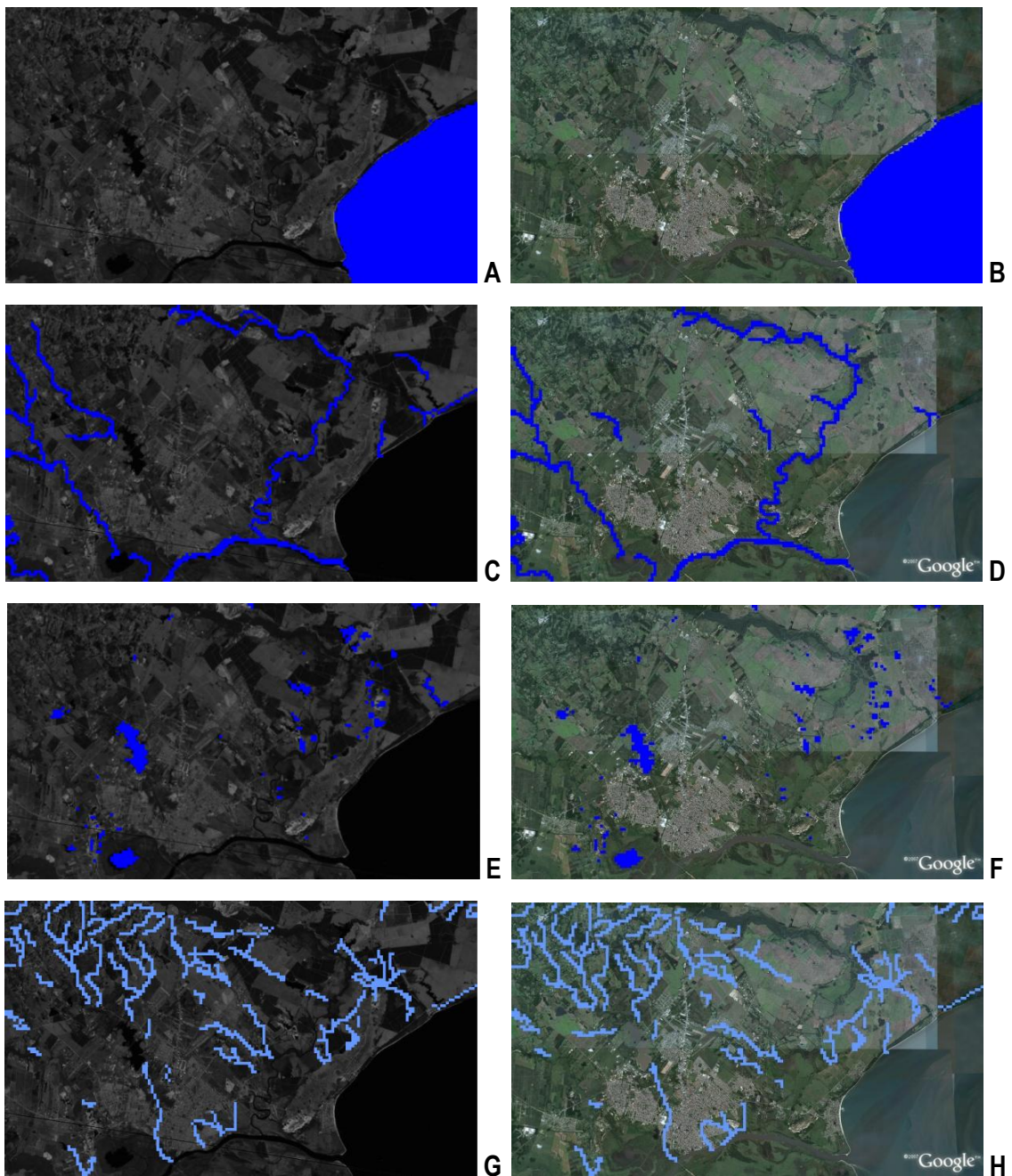


Figura 5.3: Atributos naturais para Pelotas, RS, respectivamente em 1985 e 2010: A e B) laguna (Laguna dos Patos); C e D) águas lânticas; E e F) águas lóicas; G e H) linhas de drenagem.

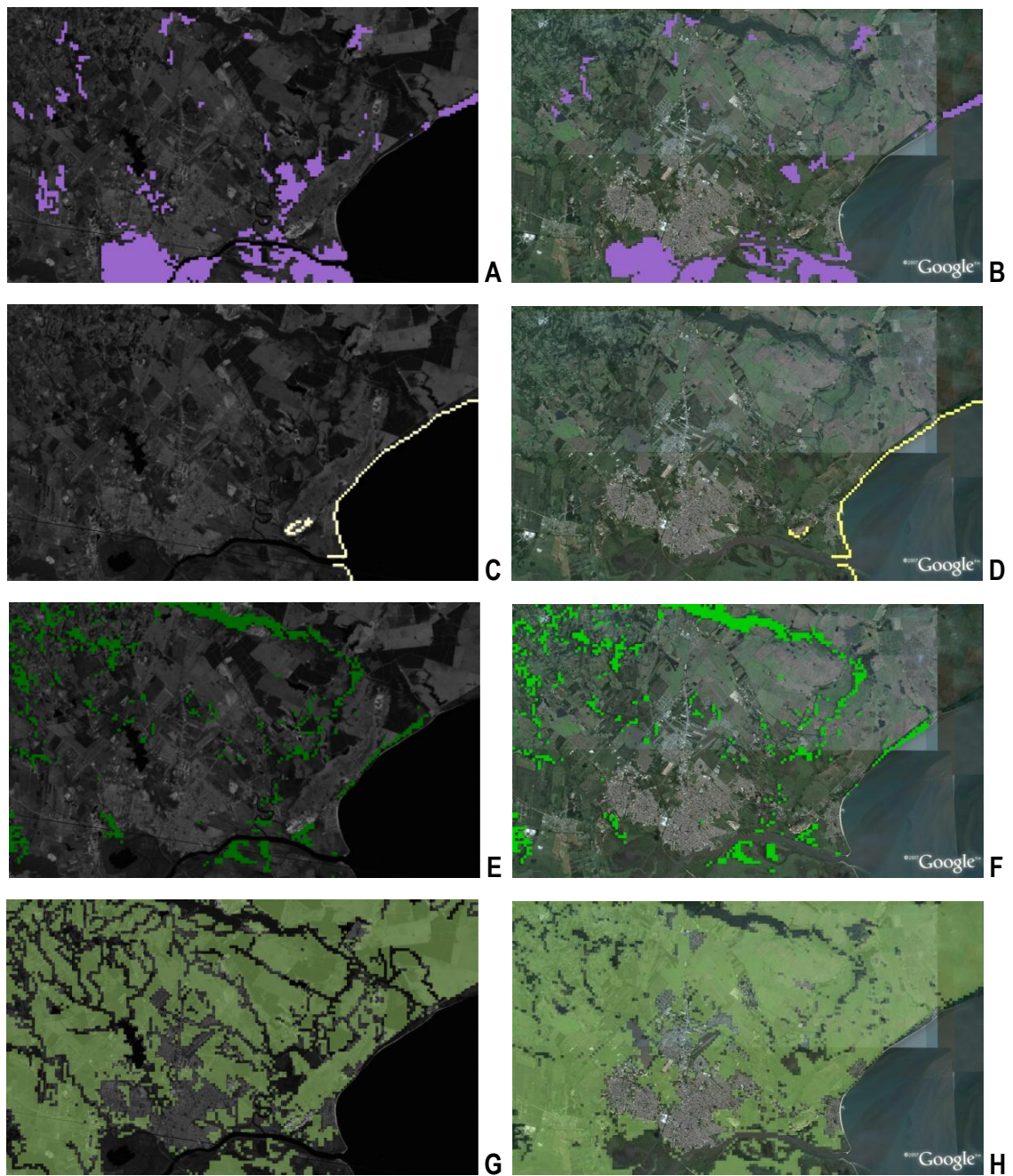


Figura 5.4: Atributos naturais para Pelotas, RS, respectivamente em 1985 e 2010: A e B) banhados; C e D) praias e dunas; E e F) matas nativas; G e H) campos e matas plantadas.

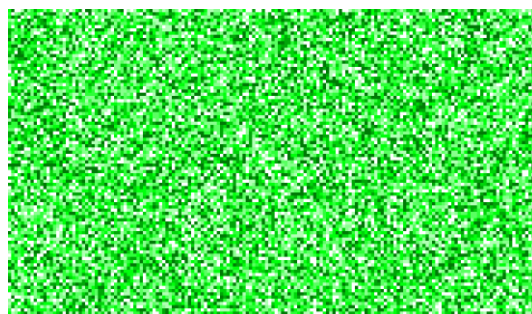


Figura 5.5: Atributos naturais para Pelotas, RS: fator aleatório.

Os pesos atribuídos aos atributos e demais características de parametrização estão sintetizados na tabela 5.1. A determinação de pesos foi adaptada das sugestões de Polidori (2004), as quais buscam reconhecer diferentes graus de influência no processo de crescimento da cidade através da diferenciação e valorização das estruturas naturais e subsistemas urbanos. As características de estado indicam se o atributo pode ou não mudar sua característica de tipo (natural para urbano) durante o processo de crescimento urbano, ou seja, é mutável quando passível de mudança e congelado quando impedido de urbanização.

Atributos e parâmetros para Pelotas, RS					
Nome	Descrição	Tipo	Comportamento	Peso	Estado
AEU	área efetivamente urbanizada de Pelotas, RS	urbano	atração	1,00	mutável
laguna	área relativa à Laguna dos Patos	natural	resistência	1,00	congelado
águas lânticas	lagoas, lagos, açudes, internos à área de estudo	natural	resistência	1,00	mutável
águas lólicas	rios, riachos, córregos, arroios, internos à área de estudo	natural	resistência	1,00	mutável
linhas de drenagem	canais de drenagem naturais	natural	resistência	0,50	mutável
banhados	banhados	natural	resistência	1,00	mutável
matas nativas	matas nativas com vegetação de grande porte	natural	resistência	1,00	congelado
praias e dunas	faixas litorâneas de praia e dunas	natural	resistência	1,00	mutável
campos e matas plantadas	campos abertos, áreas agrícolas e matas cultivadas	natural	resistência	0,50	mutável
fator aleatório	grid aleatório, com mínimo de 0,7 e máximo de 1,0	natural	resistência	variável	mutável

Tabela 5.1: Resumo dos atributos utilizados para a simulação de crescimento urbano de Pelotas, RS.

Para o *input* de 2010, também foram incluídos outros 2 atributos urbanos, relativos aos núcleos de baixa renda e aos núcleos de alta renda. Entretanto, esses atributos têm o comportamento chamado de “máscara” e não possuem pesos. Inicialmente, para as rotinas com álgebra de mapas, as máscaras são utilizadas apenas para a comparação com os resultados em testes de validação. Para o segundo estudo as máscaras possuem outra função, o que será visto no item 5.3.

A delimitação de AEIS (áreas de especial interesse social) é utilizada como instrumento legal e de planejamento, relacionados à regularização fundiária. Essas áreas são entendidas como áreas urbanas, públicas ou particulares, ocupadas por população de baixa renda e também caracterizadas por

ausência de regularização jurídica e carência de infraestrutura, equipamentos comunitários e qualidade habitacional (Medvedovski *et al.*, 2007). Sendo assim, foram consideradas áreas de periferização, para fins de *input* da máscara para o modelo, as AEIS delimitadas pelo III Plano Diretor de Pelotas, correspondendo ao total de 371 células (23,56% das células urbanas de 2010) (fig. 5.6A).

Não existindo um mapeamento específico da localização de núcleos para população de alta renda na estrutura urbana de Pelotas, os dados necessários para a confecção do *input* da máscara de urbanizações fechadas foram obtidos a partir do conhecimento empírico de corretores imobiliários e pesquisadores urbanos locais¹⁹. As localizações indicadas pelos entrevistados estão relacionadas aos loteamentos da cidade, já mapeados em SIG construído para estudo de evolução urbana de Pelotas (Silva e Polidori, 2004). Os núcleos indicados correspondem ao total de 98 células (6,22% das células urbanas de 2010) (fig. 5.6B).



Figura 5.6: Máscaras dos tipos periféricos para Pelotas, RS, em 2010: A) periferização; B) urbanizações fechadas.

5.2.2 Aproximação morfológica do crescimento urbano entre 1985-2010

Passadas as etapas de determinação dos estados temporais e do recorte da área de trabalho, e de descrição espacial e parametrização dos atributos de *input*, é feita a calibração do modelo para o crescimento urbano. Assim, são feitos testes com variação da distribuição dos cinco tipos de tensões, visando aproximar os resultados das simulações da morfologia esperada para o estado final. Estão testadas quatro diferentes distribuições: sem predomínio (ou isotensões); predomínio axial; predomínio polar; predomínio difuso. O predomínio é entendido como a distribuição de 50% para respectivo tipo de tensão²⁰. Nessa etapa de calibração também é ajustado o parâmetro λ (lambda), que é responsável pela intensidade de crescimento e está relacionado à taxa de crescimento anual esperada, fazendo com que cada iteração corresponda ao intervalo de, aproximadamente, 1 ano.

¹⁹ Foram realizadas 5 entrevistas, sendo 3 com corretores imobiliários e 2 com professores-pesquisadores que trabalham com temáticas relacionadas ao urbanismo. Os entrevistados foram questionados sobre a localização de núcleos residenciais destinados à população de alta renda, marcando em um mapa da cidade o perímetro dos respectivos núcleos.

²⁰ Para as tensões axiais e difusas, que possuem 2 tipos em cada, o predomínio acontece com a soma de 25% para cada tipo, totalizando 50%.

A tabela 5.2 mostra o resumo dos testes de calibração e aproximação morfológica do crescimento urbano de Pelotas no intervalo entre 1985 e 2010. A indicação dos melhores resultados é realizada a partir da maior proximidade de acerto (menor erro) em relação aos seguintes descritores, respectivamente: proporção de concordância celular, quantidade de células de borda, quantidade total de células. Os *outputs* de células urbanas para a iteração 25 dos melhores resultados para cada tipo de crescimento estão apresentados na figura 5.7.

Resumo dos melhores resultados para a calibração do crescimento urbano de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010																		
input				taxa de crescimento (%)	tipo de crescimento	distribuição de tensões (%)					melhores resultados para células urbanas (em uma série de 12 simulações)							
1985		2010				axial	axial de buffer	polar	difusa 1	difusa 2	lambda	taxa de crescimento (%)	total de células (iteração 25)	erro (%)	células de borda (iteração 25)	erro (%)	prop. de concord. celular média (%)	melhor prop. de concord. celular (%)
total de células	células de borda	total de células	células de borda															
1196	728	1575	730	1,01	sem predomínio	20	20	20	20	20	2,1	1,02	1541	2,16	663	9,18	71,63	72,48
					pred. axial	25	25	20	15	15	2,1	1,05	1553	1,40	665	8,90	71,80	72,38
					pred. polar	10	10	50	15	15	2,5	1,02	1542	2,10	718	1,64	72,44	72,82
					pred. difuso	15	15	20	25	25	2,2	1,07	1559	1,02	665	8,90	71,98	72,33

Tabela 5.2: Resumo dos melhores resultados para a calibração do crescimento urbano de Pelotas, RS, no recorte temporal entre 1985 e 2010. Melhor resultado destacado em vermelho.

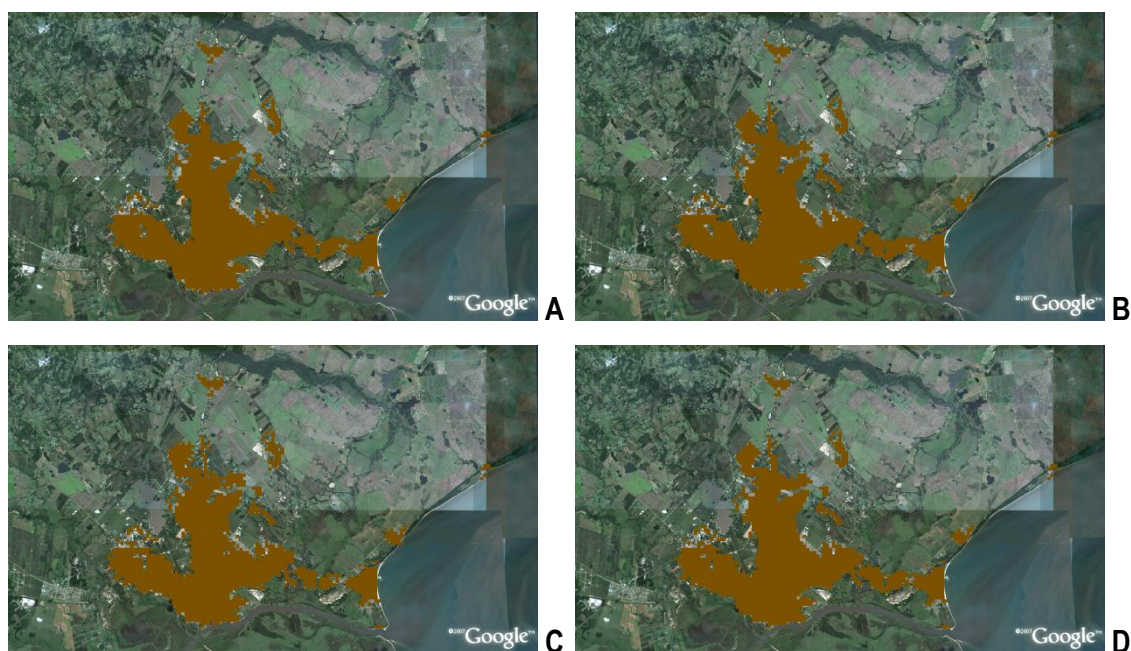


Figura 5.7: *Outputs* de células urbanas para o estudo de calibração do crescimento urbano para Pelotas, RS. Melhores resultados encontrados na iteração 25 dos tipos de crescimento: A) sem predomínio; B) predomínio axial; C) predomínio polar; D) predomínio difuso.

Todas as simulações realizadas para todos os diferentes tipos de crescimento apresentaram valores de proporção de concordância celular muito próximos. Ainda assim, o melhor resultado para o predomínio polar obteve um valor levemente superior aos demais tipos. Além disso, a proporção de concordância celular média de todas as simulações realizadas para esse predomínio também possui valor levemente superior à média encontrada nos outros tipos de crescimento. O total de células geradas também apresenta valores e percentuais de acerto muito semelhantes, sendo que o melhor resultado, entre os melhores resultados, foi encontrado para o predomínio difuso. Todavia, ainda que o resultado apresentado na tabela 5.2 para predomínio polar seja inferior ao difuso (e também ao axial), nas outras simulações com os mesmos parâmetros foram encontrados resultados superiores. Isso pode estar relacionado à parcela de aleatoriedade intrínseca ao modelo, que proporciona a existência de leves variações entre os resultados com parametrização idêntica.

Na quantidade de células de borda são encontradas as maiores diferenças entre os tipos de crescimento. Apenas o melhor resultado para o predomínio polar se aproxima do cenário de controle, o *input* de 2010, com percentual de acerto próximo de 100%. Todas as outras simulações realizadas com predomínio polar também apresentaram resultados superiores a todas as outras simulações com os demais tipos de crescimento. Isso se deve a maior quantidade de núcleos fragmentados encontrados na forma urbana gerada por esse tipo de predomínio (fig. 5.7C), aproximando-se da forma urbana existente para 2010. Entendendo que o crescimento urbano de Pelotas, entre 1985 e 2010, pode ser calibrado usando a distribuição de tensões com predomínio polar e o λ com valor de 2,5, os próximos estudos, focados em rotinas dedicadas ao crescimento periférico, seguem essa parametrização.

5.3 Álgebras de mapas em ambiente SIG

O estudo exemplo, apresentado no item 4.3, demonstrou que as tensões difusas existentes no modelo SACI são capazes de gerar resultados que guardam semelhança com as características morfológicas das periferias urbanas. Entretanto, quando todas as cinco tensões foram envolvidas no processo de crescimento urbano, não foi possível a identificação das formações periféricas no resultado simulado, pois o *CityCell* não possui um *output* específico para isso.

De modo a superar essa limitação, está proposta aqui que a identificação das periferias simuladas possa ser feita com o uso de outras medidas extraídas do próprio modelo, conferindo assim maior acurácia no procedimento. Para isso, conforme sugerido por Polidori (2004), é usada a técnica de álgebra de mapas, que é o uso de operações matemáticas aplicadas a mapas com informações numéricas. Por exemplo, para um mapa de *grids*, a soma entre 2 mapas, “A” e “B”, corresponde a soma dos valo-

res das células que possuem a mesma localização espacial, correspondentes a cada um dos mapas. Ou seja, a célula do canto superior esquerdo do mapa de resultado dessa álgebra será o valor da célula do canto superior esquerdo do mapa “A” somado com o valor da célula do canto superior esquerdo do mapa “B”. O procedimento de álgebra pode ser aplicado a 1 ou diversos mapas e a mesma lógica é usada com outras operações matemáticas, sendo as principais as operações de subtração, multiplicação, divisão, exponencial e logaritmo.

Para os estudos a seguir, as operações propostas são entendidas como testes de hipóteses, posto que as lógicas por trás das equações seguem as hipóteses de pesquisa. Relembrando, na “hipótese 2” (item 1.4), foi traçado que a captura das periferias urbanas pode ser obtida considerando que: *a) periferias de baixa renda estão relacionadas à rarefação de facilidades urbanas, concentração de densidades construídas, restrições do ambiente natural à urbanização e exercem atração para similaridade de vizinhança; b) periferias de alta renda também estão associadas à atração para vizinhanças similares, mas possuem repulsa às vizinhanças de baixa renda, ocorrem em áreas com menores restrições de conversão do ambiente natural, menores densidades construídas e com melhor dotação de facilidades urbanas (embora em menor concentração que os centros das cidades).*

Num primeiro momento, sendo as álgebras de mapas operações matemáticas relativas à célula enquanto unidade espacial, não são exploradas as relações de vizinhança. As álgebras propostas a ser testadas, portanto, operam com as variáveis indicadoras de facilidades urbanas, densidades construídas e restrições do ambiente natural. Essas variáveis estão, respectivamente, relacionadas às medidas de centralidades celulares, carregamentos urbanos e resistências naturais, que são *outputs* do *CityCell*.

Usando a plataforma SIG do *software ArcGIS 9.3*, foram realizadas 3 combinações de variáveis indicadoras: centralidades celulares e carregamentos urbanos; centralidades celulares e resistências naturais; e carregamentos urbanos e resistências naturais. As combinações utilizam operações de divisão e multiplicação, sob a lógica de relações de proporcionalidade para encontrar tendências de conversão espacial orientadas para os tipos periféricos. Nas equações propostas, quando as variáveis são diretamente proporcionais à tendência a ser calculada, elas aparecem como numerador; quando inversamente proporcionais, aparecem no denominador. Para demonstrar e avaliar as álgebras e, consequentemente, as hipóteses, foram efetuadas simulações de crescimento urbano, utilizando a regra *Threshold Potential*. A figuras 5.8 até 5.12 mostram os *outputs* da simulação que apresentou o melhor resultado para a proporção de concordância celular com núcleos de periferização e urbanizações fe-

chadas (será visto na tab. 5.3, adiante)²¹, a partir das operações com álgebras de mapas que serão apresentadas a seguir.

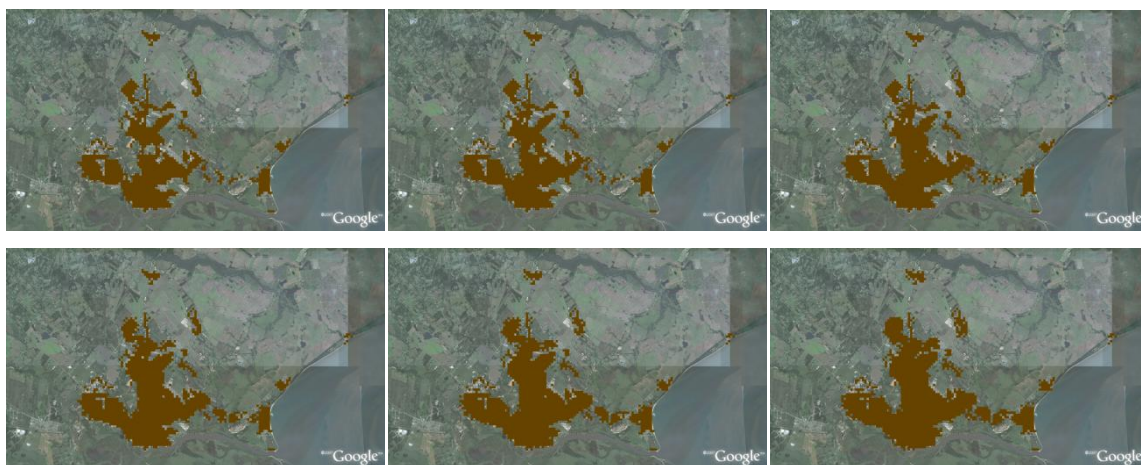


Figura 5.8: *Outputs* de células urbanas para o estudo com álgebra de mapas, para simulação do crescimento urbano de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010. Respectivamente iterações 1, 5, 10, 15, 20 e 25. Simulação disponível em: http://www.4shared.com/photo/kaeGKv5S/Pelotas_P13-pr_polar-CellType.html.

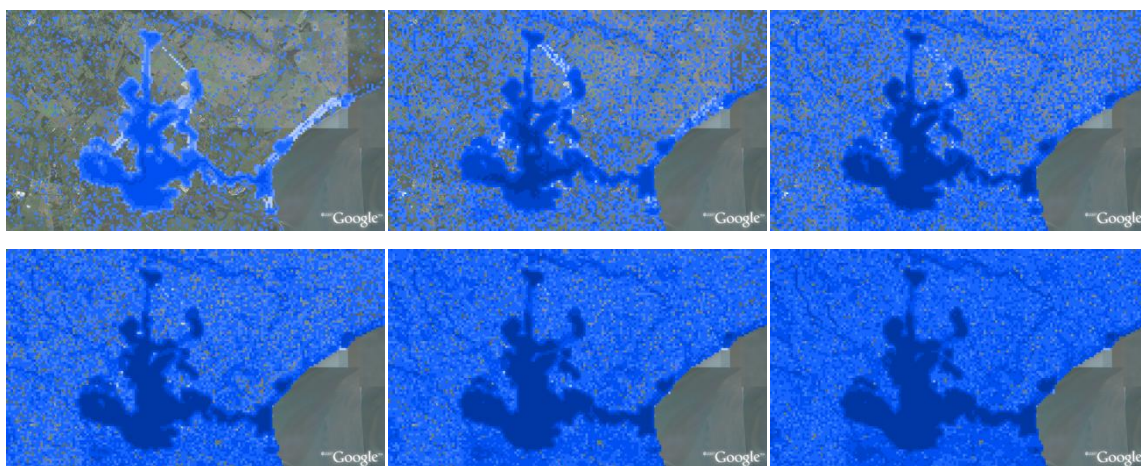


Figura 5.9: *Outputs* de centralidades celulares R1 para o estudo com álgebra de mapas, para simulação do crescimento urbano de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010. Respectivamente iterações 1, 5, 10, 15, 20 e 25. Simulação disponível em: http://www.4shared.com/photo/TMdoz1eQ/Pelotas_P13-pr_polar-CentR1.html.

²¹ Foram realizadas 3 simulações de crescimento urbano para Pelotas, com a regra *Threshold Potential*. As operações com álgebra de mapas, que serão apresentadas nas próximas páginas, foram aplicadas às 3 simulações e avaliadas visualmente, a partir de proporção de concordância celular e por medidas de manchas, como será visto no item 5.2.4. A simulação de melhor resultado para concordância celular é a que se refere às figuras 5.8 até 5.12. As figuras que ilustram os itens 5.2.1, 5.2.2 e 5.2.3 também são resultados das álgebras de mapas para a simulação de melhor concordância celular.



Figura 5.10: *Outputs* de centralidades celulares R2 para o estudo com álgebra de mapas, para simulação do crescimento urbano de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010. Respectivamente iterações 1, 5, 10, 15, 20 e 25. Simulação disponível em: <http://www.4shared.com/photo/BodgovvN/Pelotas_P13-pr_polar-CentR2.html>.



Figura 5.11: *Outputs* de carregamentos urbanos para o estudo com álgebra de mapas, para simulação do crescimento urbano de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010. Respectivamente iterações 1, 5, 10, 15, 20 e 25. Simulação disponível em: <http://www.4shared.com/photo/tMTVOp9n/Pelotas_P13-pr_polar-ULoad.html>.

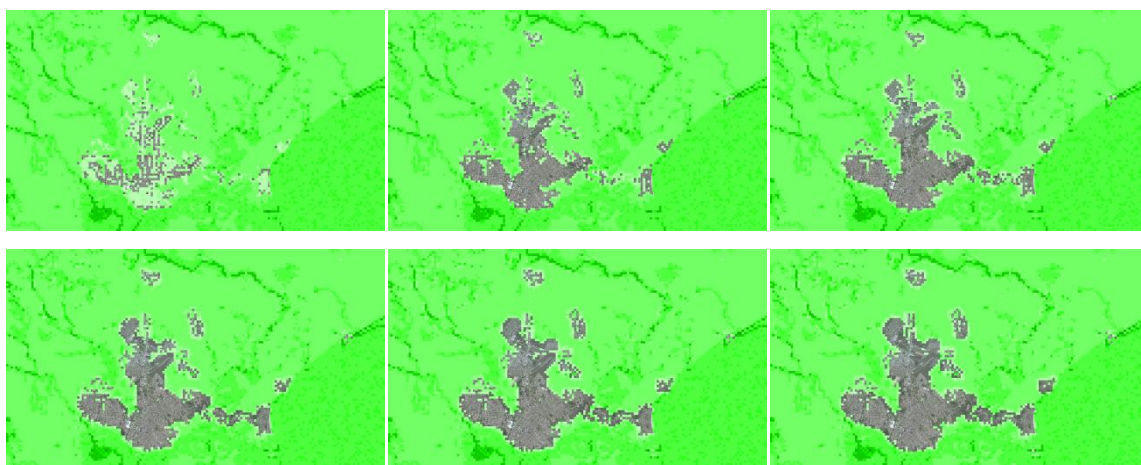


Figura 5.12: *Outputs* de resistências naturais para o estudo com álgebra de mapas, para simulação do crescimento urbano de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010. Respectivamente iterações 1, 5, 10, 15, 20 e 25. Simulação disponível em: <http://www.4shared.com/photo/aD3disY1/Pelotas_P13-pr_polar-ResistE.html>.

5.3.1 Centralidades celulares e carregamentos urbanos

Observações empíricas e referências bibliográficas indicam que núcleos de periferização são caracterizados por concentração de pessoas e edificações e por menor oferta de infraestrutura, equipamentos e serviços urbanos. Sendo assim, espera-se que esses núcleos tendam ser encontrados em células com maiores valores de carregamentos urbanos e baixa centralidade celular, podendo ser utilizada a medida de centralidade celular relativa R1, que destaca os menores valores da medida.

Já as urbanizações fechadas possuem associação com menores densidades populacionais e habitações com baixas taxas de ocupação do solo e por atendimento e boa qualidade de facilidades urbanas. Com isso, é esperado que esses núcleos possam ser encontrados em células com menores valores de carregamentos urbanos e maiores valores de centralidades (comparados aos núcleos de periferização), podendo ser utilizada a centralidade celular relativa R2, que destaca os valores superiores da medida. Seguindo essa lógica, são enunciadas equações que visam identificar na simulação as células que possuam tendência a conversões do solo orientadas para formações do tipo periferização (equação 5.1) e do tipo urbanizações fechadas (equação 5.2).

$$Periph_i = \frac{ULoad_i}{CentR2_i}$$

Onde:

Periph_i: tendência de formação de núcleos de periferização (*peripherization*) da célula *i*

ULoad_i: carregamentos urbanos (*urban load*) da célula *i*, normalizado pelo valor máximo, com valores variando de 0-1

CentR2_i: centralidade celular da célula *i*, normalizada a partir do logaritmo de base 10 (*centrality R2*), variação de 0-1

Equação 5.1: Tendência de conversão urbana orientada para populações de estratos socioeconômicos inferiores, a partir das medidas de centralidades celulares e carregamentos urbanos. Fonte: adaptado de Polidori *et al.* (2011, p. 57).

As duas medidas que fazem parte da equação 5.1, referentes a *outputs* do modelo, possuem valores variando entre zero e um. Sendo assim, as células nas quais a simulação apresenta carregamentos urbanos inferiores (locais com menores densidades) são responsáveis por reduzir a tendência de ocorrência de periferização e, por outro lado, as células que apresentam centralidades celulares inferiores (menor quantidade facilidades urbanas) são responsáveis por aumentar a tendência da formação de periferização.

$$Clurb_i = \frac{CentR1_i}{ULoad_i}$$

Onde:

Clurb_i: tendência de formação de urbanizações fechadas (*closed urbanizations*) da célula *i*

CentR1_i: centralidade celular normalizada da célula *i* a partir do valor máximo (*centrality R1*), variação de 0-1

ULoad_i: carregamentos urbanos (*urban load*) da célula *i*, normalizado pelo valor máximo, com valores variando de 0-1

Equação 5.2: Tendência de conversão urbana orientada para populações de estratos socioeconômicos superiores, a partir das medidas de centralidades celulares e carregamentos urbanos. Fonte: adaptado de Polidori *et al.* (2011, p. 55).

De maneira semelhante ao cálculo enunciado para tendência de conversão do solo para periferação, a equação 5.2 também é formada por medidas cujos valores variam entre zero e um. Portanto, as células com valores de carregamentos urbanos inferiores (menores densidades) são responsáveis por aumentar a tendência de ocorrência de periferação e, oposto a isso, as células com localização de centralidades celulares inferiores (locais com menor quantidade facilidades urbanas) são responsáveis por reduzir a tendência de formações do tipo urbanizações fechadas.

As equações 5.1 e 5.2 calculam, portanto, as tendências locais de conversão para os tipos de periferias em cada iteração. Por ser calculadas externamente ao *CityCell*, a tendência de uma iteração não é dependente da tendência da iteração anterior. Ainda que as equações propostas sejam compostas por variáveis dinâmicas, ou seja, variáveis que dependem de estados anteriores do sistema e são alteradas com o passar das iterações, os resultados gerados não representam um processo dinâmico e sim uma sequência de resultados estáticos. De modo a tornar dinâmica essa sequência estática, está proposto que os resultados finais das simulações para o crescimento periférico são as tendências acumuladas de conversão urbana orientadas para um determinado tipo de periferia. Em outras palavras, os resultados finais correspondem ao somatório das tendências encontradas nas iterações anteriores, de maneira a considerá-las como componentes de um processo de mudança, conforme equações 5.3 e 5.4.

$$\sum \text{Periph}_i = \text{Periph}_{i1} + \text{Periph}_{i2} + \dots + \text{Periph}_{iN}$$

Onde:

$\sum \text{Periph}_i$: somatório das tendências de formação de núcleos de periferação (peripherization) na célula i
 Periph_{i1} : tendências de formação de núcleos de periferação da célula i na iteração 1
 Periph_{i2} : tendências de formação de núcleos de periferação da célula i na iteração 2
 Periph_{iN} : tendências de formação de núcleos de periferação da célula i na iteração N

Equação 5.3: Tendência acumulada de conversão urbana orientada para populações de estratos socioeconômicos inferiores. Fonte: do autor.

$$\sum \text{Clurb}_i = \text{Clurb}_{i1} + \text{Clurb}_{i2} + \dots + \text{Clurb}_{iN}$$

Onde:

$\sum \text{Clurb}_i$: somatório das tendências de formação de núcleos de urbanizações fechadas (closed urbanizations) na célula i
 Clurb_{i1} : tendências de formação de núcleos de urbanizações fechadas da célula i na iteração 1
 Clurb_{i2} : tendências de formação de núcleos de urbanizações fechadas da célula i na iteração 2
 Clurb_{iN} : tendências de formação de núcleos de urbanizações fechadas da célula i na iteração N

Equação 5.4: Tendência acumulada de conversão urbana orientada para populações de estratos socioeconômicos superiores. Fonte: do autor.

Aplicadas à simulação para o caso de Pelotas, apresentada nas figuras 5.8 a 5.12, as álgebras com as medidas de centralidades celulares e carregamentos urbanos geraram os seguintes resultados²² para periferização (fig. 5.13 e 5.15A) e urbanizações fechadas (fig. 5.14 e 5.15B):

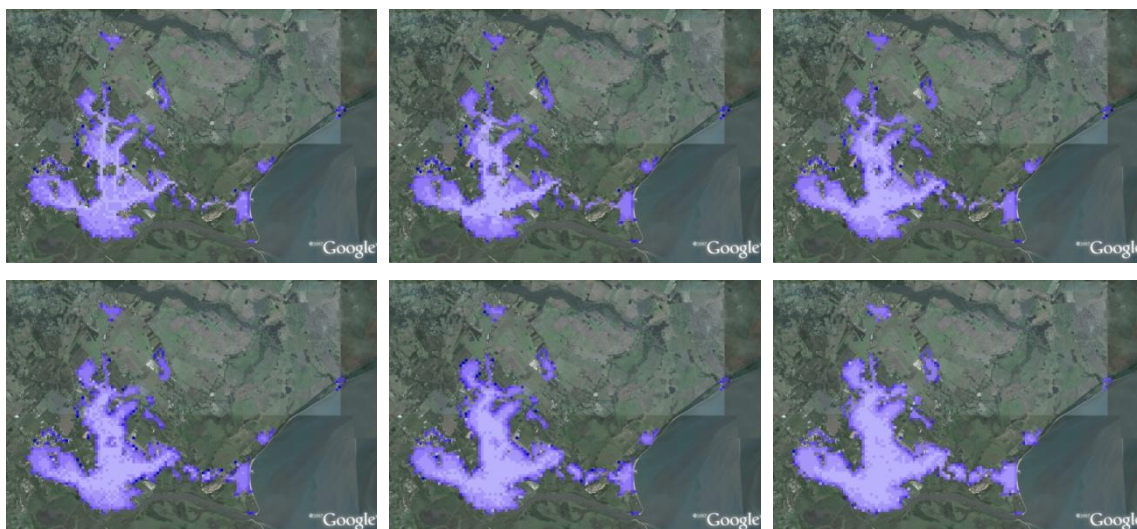


Figura 5.13: Resultados gráficos da álgebra de mapas com centralidades celulares e carregamentos urbanos, indicando tendências de conversão orientadas para periferização na cidade de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010. Respectivamente iterações 1, 5, 10, 15, 20 e 25.

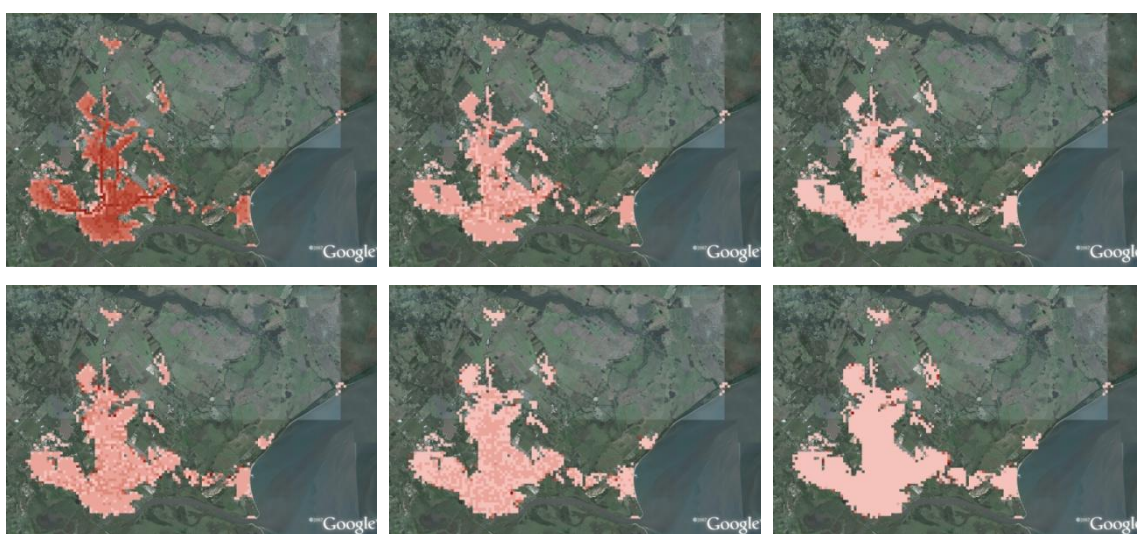


Figura 5.14: Resultados gráficos da álgebra de mapas com centralidades celulares e carregamentos urbanos, indicando tendências de conversão orientadas para urbanizações fechadas na cidade de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010. Respectivamente iterações 1, 5, 10, 15, 20 e 25.

²² Os resultados gráficos para as álgebras de mapas dos itens 5.2.1, 5.2.2 e 5.2.3 estão classificados em *natural breaks*, com 9 classes, mostrando as 8 classes superiores e usando paleta de cores hierárquica, com as cores mais escuras indicando os maiores valores ou intensidades das tendências, e cores mais claras indicando o oposto.

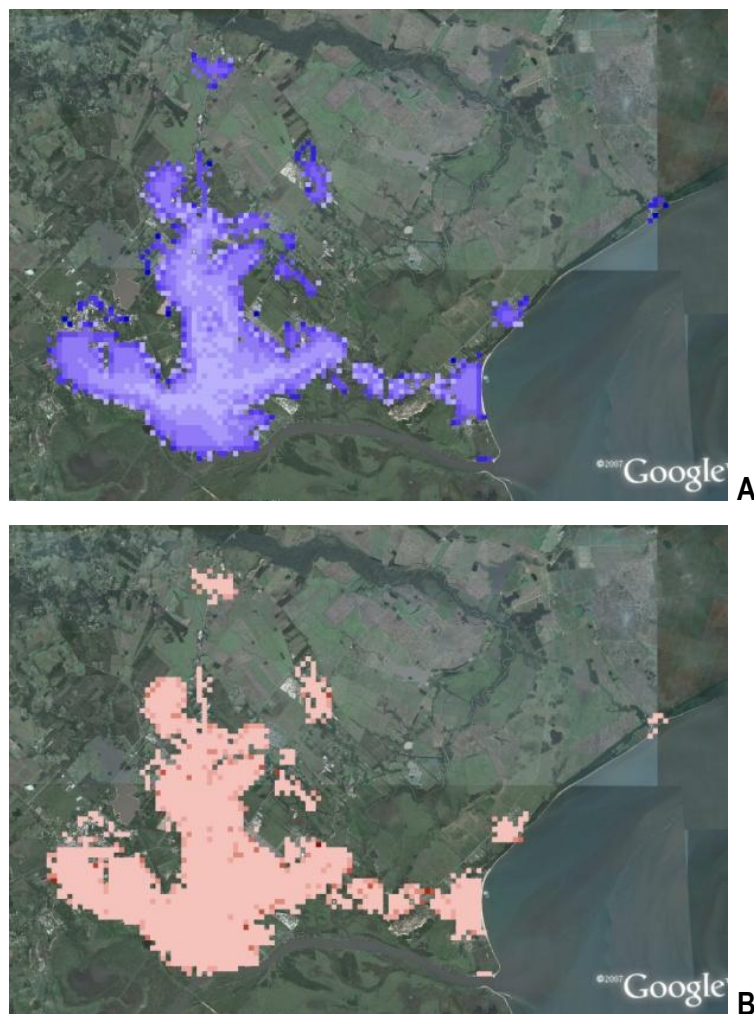


Figura 5.15: Resultados gráficos da álgebra de mapas com centralidades celulares e carregamentos urbanos, indicando tendências finais (acumuladas) de conversão orientadas para a formação de periferias na cidade de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010: A) periferização; B) urbanizações fechadas.

Os resultados para periferização (fig. 5.13 e 5.15A) mostram maiores tendências ocorrendo nas bordas da mancha gerada, com menores tendências na área central da cidade. Para urbanizações fechadas, as iterações iniciais (iteração 1, na fig. 5.14) mostram forte associação com as centralidades celulares calculadas. Ao passar das iterações (fig. 5.14 e 5.15B), as tendências maiores passam a aparecer nas bordas, em menor proporção que a periferização e sem conformar núcleos com várias células.

5.3.2 Centralidades celulares e resistências naturais

Semelhante à lógica usada no item anterior, partindo de observações empíricas e referências bibliográficas, além das características de carências de facilidades urbanas, núcleos de periferização (principalmente quando são assentamentos espontâneos) são caracterizados por estar localizados em áreas

com maiores restrições à urbanização. Seguindo essas hipóteses, é esperado que os núcleos de periferização possuam tendência maior de ser encontrados em células com baixa centralidade celular (centralidade celular relativa R1, que destaca os menores valores da medida) e maiores valores de resistências naturais.

Quanto às urbanizações fechadas, além do melhor atendimento e qualidade de facilidades urbanas, tendem a se localizar em áreas com maior qualidade do ambiente natural, em função de sua capacidade diferenciada de consumo do espaço por razões financeiras. Todavia, os atributos naturais utilizados como *input* do modelo (fig. 5.3 e 5.4) estão relacionados aos componentes físicos da paisagem (cursos d'água, matas, dunas, etc.), não tendo sido representados por sua qualidade ambiental. Sendo assim, é assumida aqui a hipótese de que núcleos com populações de maior renda possuam associação com áreas de menores restrições à urbanização, semelhante à lógica das tensões difusas do tipo 1. É esperado que esses núcleos apresentem maiores tendências de conversão do solo em células com maiores valores de centralidades celulares (centralidade celular relativa R2, que destaca os valores superiores da medida) e menores valores de resistências naturais.

Com base na lógica descrita, são enunciadas outras 2 equações para a tendência de conversões do solo em periferização (equação 5.5) e do tipo urbanizações fechadas (equação 5.6). Assim como nas álgebras com centralidades celulares e carregamentos urbanos, essas equações possuem operações de divisão, sugerindo relações de “diretamente proporcional” para as medidas usadas no numerador, e relações de “inversamente proporcional” para medidas usadas no denominador.

O *output* de células urbanas funciona como uma máscara, agindo como multiplicador, de modo a eliminar do resultado as células que não sejam urbanas e que possam possuir valores de centralidade celular. O uso da máscara é necessário, pois o modelo gera valores tanto de centralidades celulares quanto de resistências naturais em células do *grid* que não são urbanas²³. Desse modo, sendo o *output* de células urbanas constituído apenas por valores 0 (não urbano) e 1 (urbano), quando o cálculo das divisões apresentar resultado numérico em células não urbanas, será multiplicado por 0 e eliminado do resultado final.

²³ Nas equações que possuem operações com medida de carregamentos urbanos (equações 5.1, 5.2, 5.7 e 5.8), a “máscara de células urbanas” não é necessária. Isso acontece devido ao fato dos valores de carregamentos urbanos, conforme lógica de cálculo do SACI, serem gerados apenas em células urbanas.

$$Periph_i = \left(\frac{EResist_{i0}}{CentR2_i} \right) UCell_i$$

Onde:

Periph_i: tendência de formação de núcleos de periferização (peripherization) da célula *i*

EResist_{i0}: resistências naturais (environmental resistance) da célula *i* na iteração 0

CentR2_i: centralidade celular da célula *i*, normalizada a partir do logaritmo de base 10 (centrality R2), variação de 0-1

UCell_i: células urbanas (celltype) geradas na iteração

Equação 5.5: Tendência de conversão urbana orientada para populações de estratos socioeconômicos inferiores, a partir das medidas de centralidades celulares e resistências naturais. Fonte: do autor.

$$Clurb_i = \left(\frac{CentR1_i}{EResist_{i0}} \right) UCell_i$$

Onde:

Clurb_i: tendência de formação de urbanizações fechadas (closed urbanizations) da célula *i*

CentR1_i: centralidade celular normalizada da célula *i* a partir do valor máximo (centrality R1), variação de 0-1

EResist_{i0}: resistências naturais (environmental resistance) da célula *i* na iteração 0

UCell_i: células urbanas (celltype) geradas na iteração

Equação 5.6: Tendência de conversão urbana orientada para populações de estratos socioeconômicos superiores, a partir das medidas de centralidades celulares e resistências naturais. Fonte: do autor.

Partindo dos resultados obtidos com as equações 5.5 e 5.6, para o cálculo das tendências finais de conversão em periferização e urbanizações fechadas também são utilizados os somatório das tendências de cada iteração, conforme as equações 5.3 e 5.4. As figuras 5.16, 5.17 e 5.18 apresentam os resultados gráficos das operações de álgebra de mapas com centralidades celulares e resistências naturais, aplicadas ao caso de Pelotas.

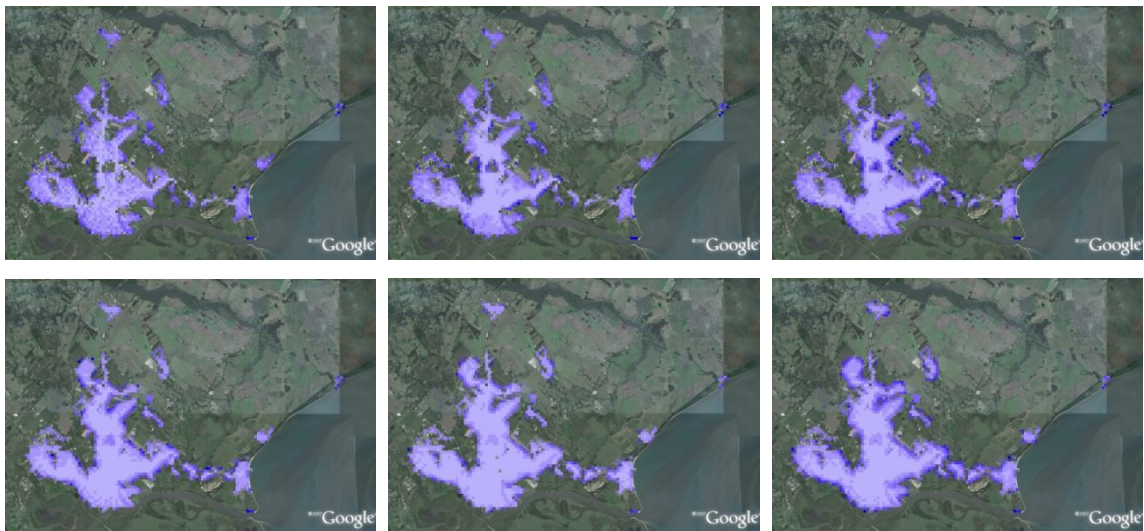


Figura 5.16: Resultados gráficos da álgebra de mapas com centralidades celulares e resistências naturais, indicando tendências de conversão orientadas para periferização na cidade de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010. Respective-mente iterações 1, 5, 10, 15, 20 e 25.



Figura 5.17: Resultados gráficos da álgebra de mapas com centralidades celulares e resistências naturais, indicando tendências de conversão orientadas para urbanizações fechadas na cidade de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010. Respectivamente iterações 1, 5, 10, 15, 20 e 25.

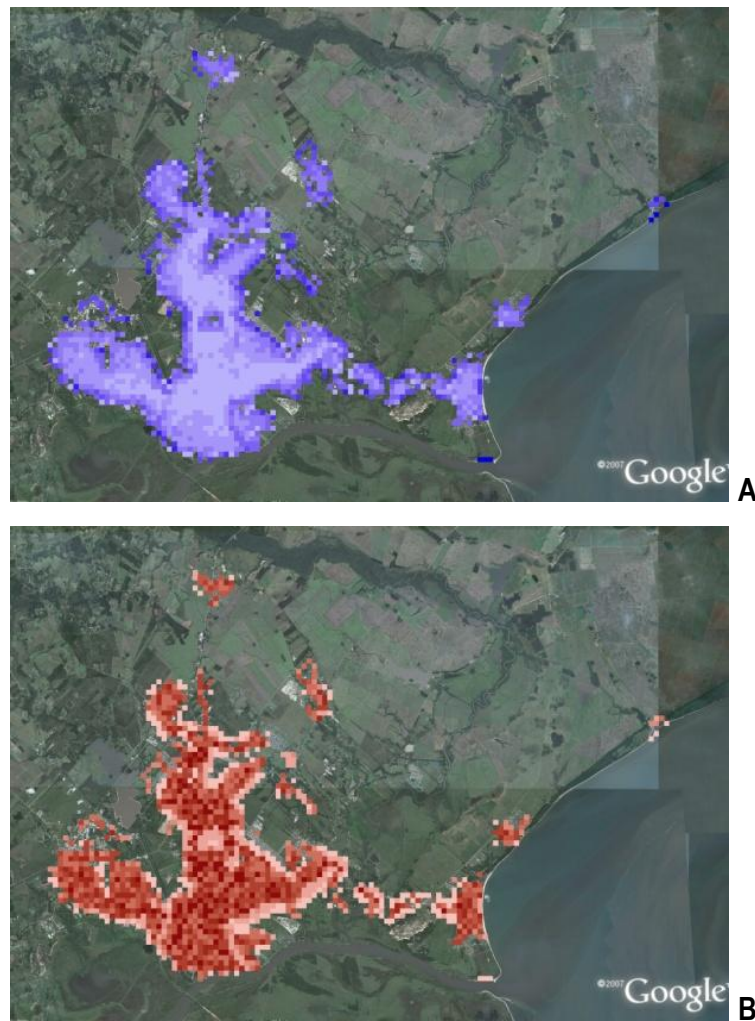


Figura 5.18: Resultados gráficos da álgebra de mapas com centralidades celulares e resistências naturais, indicando tendências finais (acumuladas) de conversão orientadas para a formação de periferias na cidade de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010: A) periferização; B) urbanizações fechadas.

Os resultados encontrados para formação de núcleos do tipo periferização (fig. 5.16 e 5.18A) apresentam células com maiores tendências localizadas nas bordas da mancha urbana, com diminuição das tendências em direção à área central da cidade. Quanto às tendências para conversão em urbanizações fechadas (fig. 5.17 e 5.18B), de maneira inversa à periferização, os resultados mostram menores tendências nas bordas. Além disso, nota-se a conformação de várias pequenas nucleações do tipo urbanizações fechadas, com mais de 1 célula, em diversos lugares da mancha, inclusive na área central.

5.3.3 Carregamentos urbanos e resistências naturais

A terceira combinação de *outputs*, através de operações com álgebra de mapas, visa testar a hipótese de associação dos tipos de periferias com as variáveis indicadoras da densidade construída e das restrições à urbanização impostas pelo ambiente natural. Como visto nas 2 combinações anteriores, os núcleos de periferização são caracterizados por maior concentração de edificações e pessoas, bem como por estar localizados em áreas com maiores restrições à urbanização. As urbanizações fechadas, por sua vez, possuem características inversas a essas, com menores densidades e localização em áreas de menores restrições.

As equações 5.7 e 5.8 seguem a lógica da junção dos fatores carregamentos urbanos e resistências naturais nas mesmas células. Assim, células que apresentem valores altos de resistências naturais e que também possuam valores altos de carregamentos urbanos potencializam as tendências de periferização. Em oposição, essa mesma junção de fatores minimiza as tendências orientadas para urbanizações fechadas.

$$Periph_i = ULoad_i \times EResist_{i0}$$

Onde:

Periph_i: tendência de formação de núcleos de periferização (*peripherization*) da célula *i*

ULoad_i: carregamentos urbanos (*urban load*) da célula *i*, normalizado pelo valor máximo, com valores variando de 0-1

EResist_{i0}: resistências naturais (*environmental resistance*) da célula *i* na iteração 0

Equação 5.7: Tendência de conversão urbana orientada para populações de estratos socioeconômicos inferiores, a partir das medidas de carregamentos urbanos e resistências naturais. Fonte: do autor.

$$Clurb_i = \frac{1}{ULoad_i \times EResist_{i0}}$$

Onde:

Clurb_i: tendência de formação de urbanizações fechadas (*closed urbanizations*) da célula *i*

ULoad_i: carregamentos urbanos (*urban load*) da célula *i*, normalizado pelo valor máximo, com valores variando de 0-1

EResist_{i0}: resistências naturais (*environmental resistance*) da célula *i* na iteração 0

Equação 5.8: Tendência de conversão urbana orientada para populações de estratos socioeconômicos superiores, a partir das medidas de carregamentos urbanos e resistências naturais. Fonte: do autor.

As tendências finais também são calculadas a partir do somatório das tendências de cada iteração (equações 5.3 e 5.4) e os resultados obtidos com as operações de álgebra de mapas com carregamentos urbanos e resistências naturais, aplicadas ao caso de Pelotas, são os seguintes (fig. 5.19, 5.20 e 5.21):

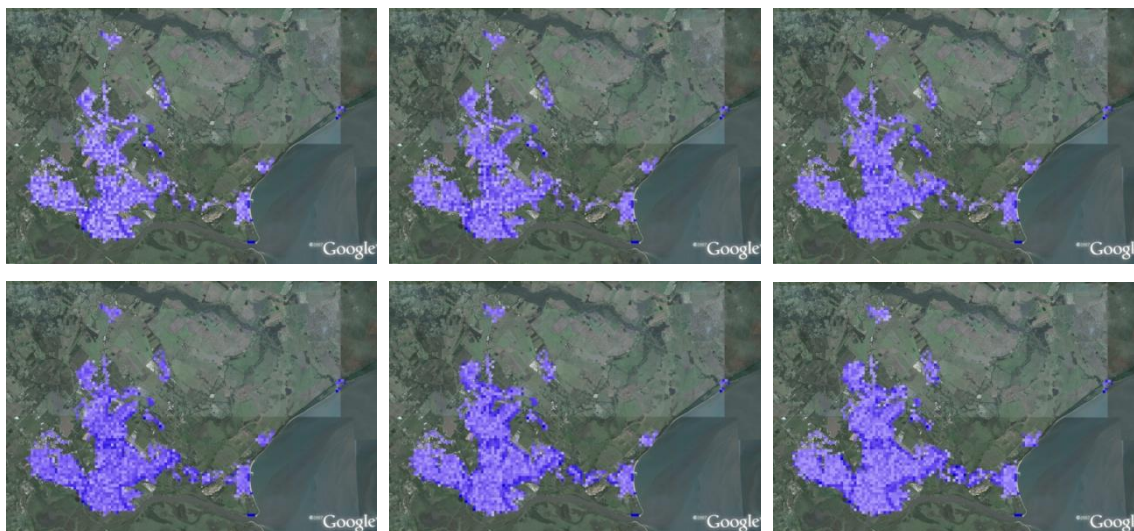


Figura 5.19: Resultados gráficos da álgebra de mapas com carregamentos urbanos e resistências naturais, indicando tendências de conversão orientadas para periferação na cidade de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010. Respectivamente iterações 1, 5, 10, 15, 20 e 25.

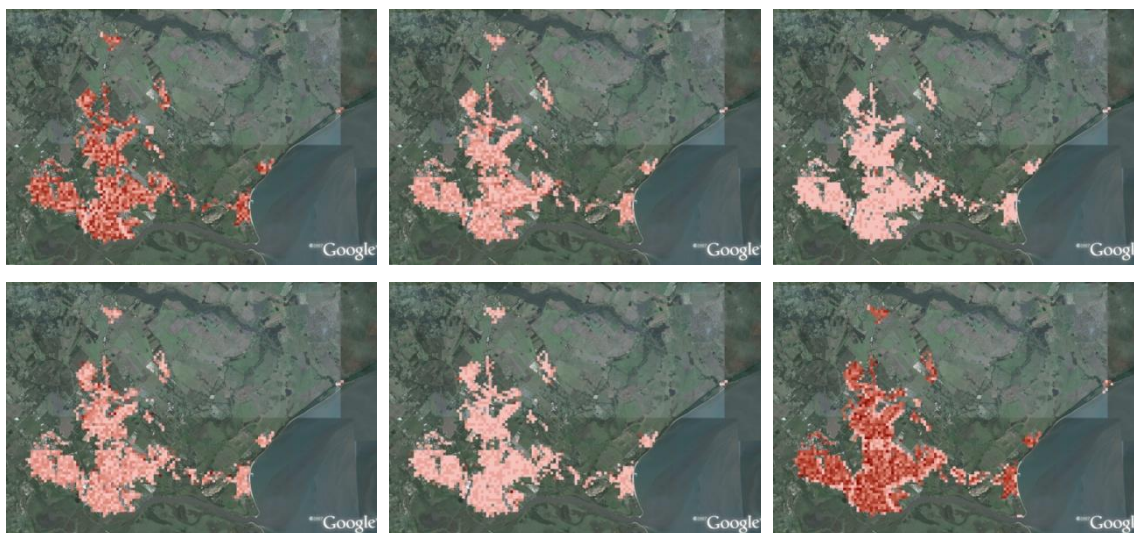


Figura 5.20: Resultados gráficos da álgebra de mapas com carregamentos urbanos e resistências naturais, indicando tendências de conversão orientadas para urbanizações fechadas na cidade de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010. Respectivamente iterações 1, 5, 10, 15, 20 e 25.

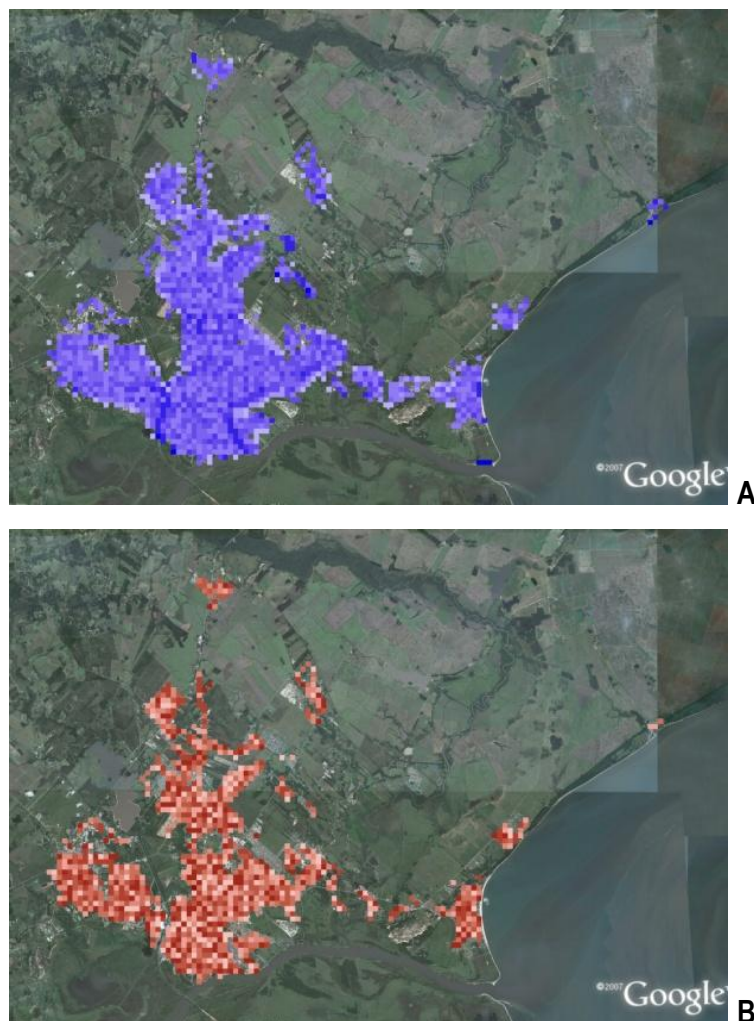


Figura 5.21: Resultados gráficos da álgebra de mapas com carregamentos urbanos e resistências naturais, indicando tendências finais (acumuladas) de conversão orientadas para a formação de periferias na cidade de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010: A) periferização; B) urbanizações fechadas.

Quanto às formações do tipo periferização (fig. 5.19 e 5.21A), os resultados encontrados mostram um padrão diferente das álgebras anteriores, com maiores tendências sendo geradas em áreas internas da mancha urbana. Com relação às tendências para conversão em urbanizações fechadas (fig. 5.20 e 5.21B), os resultados apresentam maior aleatoriedade nas localizações. Em algumas iterações (iterações 1 e 25, na fig. 5.20) são encontradas maiores tendências espalhadas pela mancha urbana e conformando pequenas nucleações com mais de 1 célula. Em outras iterações (iterações 5, 10, 15 e 20, na fig. 5.20) as maiores tendências são encontradas em poucas células das bordas da mancha.

5.3.4 Validação das operações com álgebras de mapas

As operações com álgebras de mapas estão propostas de modo a testar as hipóteses de pesquisa e contribuir para o modelo do *CityCell*, permitindo encontrar a localização dos tipos periféricos na morfologia gerada pelo crescimento urbano simulado. Ainda que alguns resultados visualmente aparentem ser semelhantes, a aplicação das álgebras gera resultados diferentes, que necessitam ser comparados entre si e validados com o cenário de controle. Desse modo, está efetuada a verificação dos resultados obtidos a partir da verificação da proporção de concordância celular para as tendências finais de cada álgebra, em relação às máscaras dos tipos periféricos em 2010 (fig. 5.6).

Para efetuar a proporção de concordância celular, os resultados de tendências finais são transformados, sendo selecionadas apenas as células com maior valor de tendência, correspondentes a quantidade de células dos tipos de periferias existentes em 2010 (371 células de periferização e 98 de urbanizações fechadas). As figuras 5.22, 5.23 e 5.24 mostram os resultados finais das álgebras de mapas, apenas com as células de maior valor de tendências de conversão em periferias de baixa renda e de alta renda.

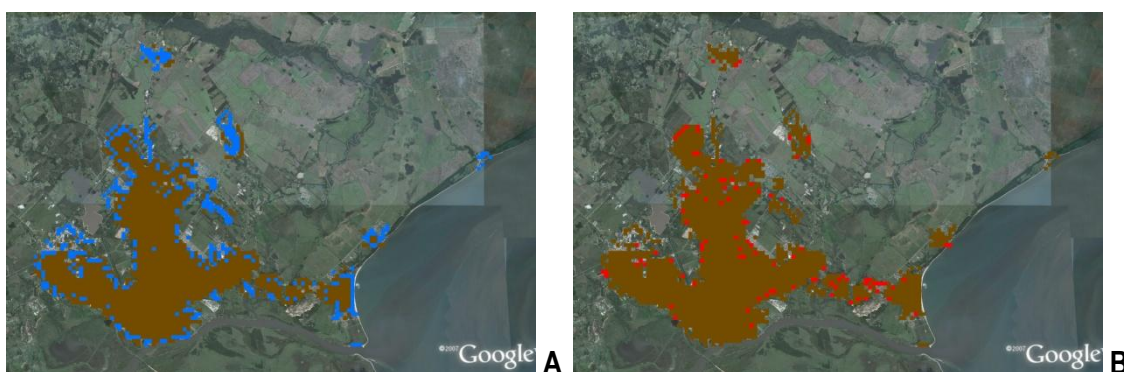


Figura 5.22: Resultados gráficos da álgebra de mapas com centralidades celulares e carregamentos urbanos, indicando tendências superiores de conversão, orientadas para a formação de periferias na cidade de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010: A) periferização; B) urbanizações fechadas.

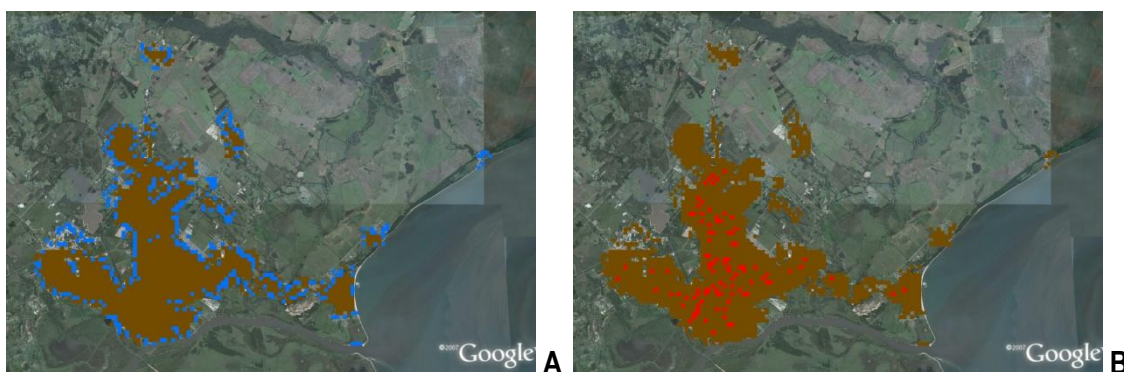


Figura 5.23: Resultados gráficos da álgebra de mapas com centralidades celulares e resistências naturais, indicando tendências superiores de conversão, orientadas para a formação de periferias na cidade de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010: A) periferização; B) urbanizações fechadas.

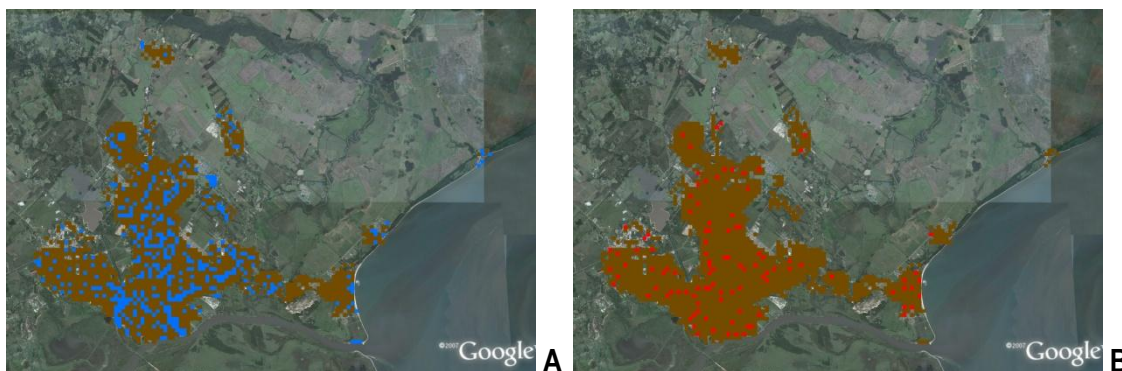


Figura 5.24: Resultados gráficos da álgebra de mapas com carregamentos urbanos e resistências naturais, indicando tendências superiores de conversão, orientadas para a formação de periferias na cidade de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010: A) periferização; B) urbanizações fechadas.

A tabela 5.3 mostra a média e o melhor resultado de proporção de concordância celular entre as simulações realizadas e o cenário de controle de 2010. Os percentuais encontrados indicam baixa semelhança e, conseqüentemente, pouco acerto locacional. Isso parece estar associado à baixa proximidade com a localização das periferias preexistentes.

Resumo dos melhores resultados para o crescimento periférico de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010, a partir de álgebras de mapas				
medidas combinadas	proporção de concordância celular (%) (em uma série de 3 simulações)			
	periferização		urbanizações fechadas	
	média	melhor resultado	média	melhor resultado
centralidades celulares e carregamentos urbanos	16,36	16,75	2,63	3,16
centralidades celulares e resistências naturais	12,88	13,11	4,52	4,95
carregamentos urbanos e resistências naturais	10,37	10,48	2,79	3,09

Tabela 5.3: Melhores resultados de proporção de concordância celular para os estudos com álgebra de mapas aplicadas ao caso do crescimento periférico de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010. Melhores resultados destacados em vermelho.

Além da proporção de concordância celular, os resultados das álgebras e as máscaras dos tipos periféricos também são comparados a partir de medidas de manchas. Como foi visto anteriormente, para análise das formas geradas é calculado o índice de erro formal (equação 4.7). Quanto mais próximo do índice zero, menor será o erro e, conseqüentemente, mais próximo estará do acerto formal. As tabelas 5.4 e 5.5 e os gráficos 5.1 e 5.2 apresentam as medidas de manchas para periferização e para urbanizações fechadas, respectivamente.

Melhores resultados para medidas de manchas de formações do tipo periferação em Pelotas, RS, entre 1985-2010, a partir de álgebras de mapas												
medidas combinadas	medidas básicas				medidas de borda				medidas de forma			
	LPI	índice de erro	LSI	índice de erro	TE	índice de erro	ED	índice de erro	AWMSI	índice de erro	MSI	índice de erro
centralidades celulares e carregamentos urbanos	19	0,54	307	0,29	2044000	0,51	323	0,51	183	0,17	133	0,15
centralidades celulares e resistências naturais	11	0,73	329	0,38	2272000	0,68	359	0,68	167	0,24	127	0,19
carregamentos urbanos e resistências naturais	30	0,27	327	0,37	2244000	0,65	354	0,65	212	0,04	122	0,22
cenário de 2010	41		238		1356000		214		220		156	

medidas combinadas	medidas de diversidade				medidas de diversidade e tamanho de manchas							
	MPI	índice de erro	MNN	índice de erro	MPS	índice de erro	NUMP	índice de erro	PSCOV	índice de erro	PSSD	índice de erro
centralidades celulares e carregamentos urbanos	810	0,29	31216	0,62	1697	0,52	91	1,46	12598	0,19	2138	0,61
centralidades celulares e resistências naturais	726	0,15	23187	0,72	1200	0,66	125	2,38	10465	0,33	1256	0,77
carregamentos urbanos e resistências naturais	1543	1,45	27283	0,67	1275	0,64	123	2,32	19373	0,25	2470	0,55
cenário de 2010	630		81615		3514		37		15543		5461	

Tabela 5.4: Melhores resultados das medidas de manchas para os estudos com álgebra de mapas aplicadas ao caso do crescimento periférico de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010: periferação. Melhores resultados destacados: bons em vermelho; medianos em azul.

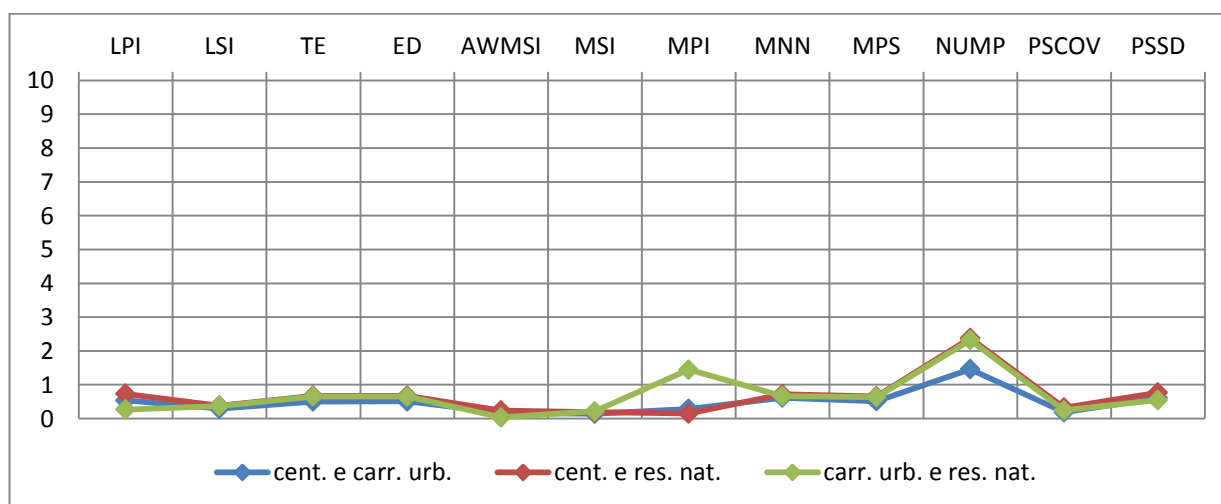


Gráfico 5.1: Comparação entre os melhores resultados das medidas de manchas para os estudos com álgebras de mapas aplicadas ao caso do crescimento periférico de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010: periferação.

Legenda: LPI – índice da maior mancha; LSI – índice de forma da paisagem; TE – borda total; ED – densidade da borda; AWMSI – índice de forma média ponderado pela área; MSI – índice de forma média; MPI – índice de forma média; MNN – distância média da vizinhança mais próxima; MPS – tamanho médio das manchas; NUMP – número de manchas; PSCOV – coeficiente de variação do tamanho das manchas; PSSD – desvio padrão do tamanho das manchas.

Melhores resultados para medidas de manchas de formações do tipo urbanizações fechadas em Pelotas, RS, entre 1985-2010, a partir de álgebras de mapas												
medidas combinadas	medidas básicas				medidas de borda				medidas de forma			
	LPI	índice de erro	LSI	índice de erro	TE	índice de erro	ED	índice de erro	AWMSI	índice de erro	MSI	índice de erro
centralidades celulares e carregamentos urbanos	5	0,78	175	0,30	720000	1,25	114	1,24	123	0,29	109	0,23
centralidades celulares e resistências naturais	4	0,83	171	0,27	680000	1,13	107	1,10	139	0,20	117	0,18
carregamentos urbanos e resistências naturais	3	0,87	183	0,36	800000	1,50	126	1,47	114	0,34	106	0,25
cenário de 2010	23		135		320000		51		174		142	

medidas combinadas	medidas de diversidade				medidas de diversidade e tamanho de manchas							
	MPI	índice de erro	MNN	índice de erro	MPS	índice de erro	NUMP	índice de erro	PSCOV	índice de erro	PSSD	índice de erro
centralidades celulares e carregamentos urbanos	152	0,81	47986	0,24	591	0,88	67	7,38	7147	0,19	422	0,90
centralidades celulares e resistências naturais	460	0,42	30121	0,22	754	0,84	52	5,50	8037	0,09	606	0,86
carregamentos urbanos e resistências naturais	170	0,79	35434	0,09	490	0,90	84	9,50	4598	0,48	226	0,95
cenário de 2010	797		38842		4850		8		8829		4282	

Tabela 5.5: Melhores resultados das medidas de manchas para os estudos com álgebra de mapas aplicadas ao caso do crescimento periférico de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010: urbanizações fechadas. Melhores resultados destacados: bons em vermelho; medianos em azul.

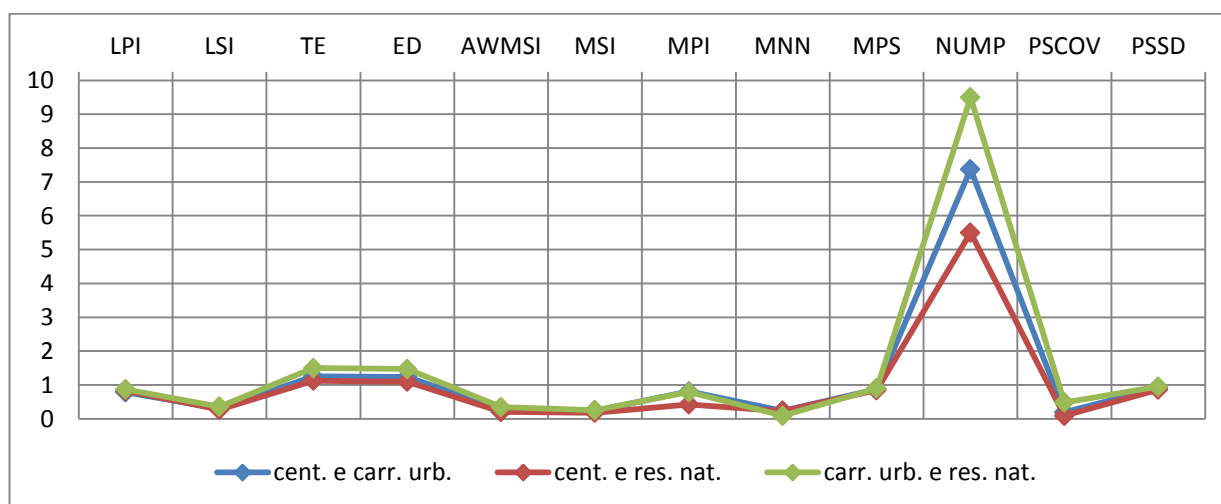


Gráfico 5.2: Comparação entre os melhores resultados das medidas de manchas para os estudos com álgebras de mapas aplicadas ao caso do crescimento periférico de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010: urbanizações fechadas.

Legenda: LPI – índice da maior mancha; LSI – índice de forma da paisagem; TE – borda total; ED – densidade da borda; AWMSI – índice de forma média ponderado pela área; MSI – índice de forma média; MPI – índice de forma média; MNN – distância média da vizinhança mais próxima; MPS – tamanho médio das manchas; NUMP – número de manchas; PSCOV – coeficiente de variação do tamanho das manchas; PSSD – desvio padrão do tamanho das manchas.

Para periferização, nenhuma das álgebras possui melhor resultado que as demais em todas as medidas. Com resultados em maioria medianos, a álgebra com as medidas de centralidade celular e carregamentos urbanos é a que mais se aproxima de um conjunto que possa ser classificado como o melhor resultado. As principais deficiências são que ela gera formas em maior quantidade (NUMP) e perímetro (TE e ED) e, conseqüentemente, com tamanhos menores que o cenário da realidade (LPI e MPS). Além disso, as diferenças entre o mínimo e máximo tamanho de manchas é menor na simulação que na realidade (PSSD).

Com relação às urbanizações fechadas, os índices de erro formal são, em geral, altos. Comparando as operações entre si, assim como nas proporções de concordância celular, a álgebra com as medidas de centralidade celular e resistências naturais é que possui maior aproximação dos melhores resultados. Também pode ser visto que a álgebra com as medidas de centralidade celular e carregamentos urbanos, ainda que não tenha os melhores resultados, apresenta resultados muito próximos aos da melhor álgebra, nas medidas em que ela se destaca. As principais deficiências das duas álgebras também são semelhantes, sendo as mesmas encontradas para a melhor álgebra quanto à periferização.

Todavia, quando realizada a análise visual, é possível perceber as principais diferenças entre as duas melhores álgebras. Nos resultados gráficos pode ser visto que a primeira combinação de *outputs* (fig. 5.22B) apresenta células com localização mais periférica, nas bordas urbanas. Ainda que as proporções de concordância celular apontem erro na localização, o padrão periférico se aproxima mais da realidade observada e pode indicar potencial para simular a formação de novos núcleos. Já a segunda álgebra (fig. 5.23B) mostra o inverso, com padrão de localizações mais central, aparentando potencial para encontrar os núcleos preexistentes, embora também com fraca concordância celular.

Tanto as álgebras para periferização quanto para urbanizações fechadas não apresentam resultados bons o suficiente para confirmar a hipótese quanto à forma ou à localização das periferias urbanas. As fracas proporções de concordância celular parecem estar associadas à ausência das periferias preexistentes no *input* do modelo. Segundo Constantinou (2007), a tendência de alocação espacial futura de determinado uso do solo depende de seu estado presente. Assim, torna-se importante que, para maior precisão na simulação do crescimento periférico, o modelo considere em seu *input* as periferias existentes no estado inicial da simulação, tornando possível elaborar rotinas que considerem as relações de similaridade de vizinhança.

Mesmo com resultados insuficientes para validação das hipóteses, as álgebras com as medidas de centralidade celular e carregamentos urbanos mostram formas nas bordas da mancha urbana que, aparentemente, podem estar associadas à formação de novos núcleos. Devido a essa possibilida-

de, as álgebras com essas medidas são mantidas e, conjuntamente com a inclusão da similaridade de vizinhança, usadas na sequência de experimentos.

5.4 Inclusão das preexistências e suas relações de vizinhança

Dando sequência aos experimentos, para a modelagem da formação de periferias urbanas, estão propostos procedimentos que assumem os melhores resultados dos estudos com álgebra de mapas e incluem as relações de similaridade de vizinhança. De modo a eliminar a passagem pelo *ArcGIS* e automatizar os cálculos, esses procedimentos foram implementados no *CityCell* e funcionam como uma espécie de protótipo de uma nova regra de crescimento para o modelo SACI. Esse protótipo, a partir daqui chamado de Tendência de Crescimento Periférico (TCP), atua em conjunto com a regra Potencial de Crescimento com Limiar (*Threshold Potencial* – TP) e é dividida em 2 etapas: a simulação do crescimento urbano e a simulação da formação de periferias de baixa renda e de alta renda.

Para simulação do crescimento urbano, são incorporados todos os passos da TP, seguindo a mesma lógica, com as mesmas medidas e parâmetros. Os novos procedimentos, para o crescimento periférico, estão automatizados no modelo e agem, a cada iteração, após calculadas as variáveis necessárias para simulação do crescimento urbano e o crescimento urbano propriamente dito. A figura 5.25 mostra um fluxograma geral, simplificado, do funcionamento conjunto entre a TP (à esquerda) e o delineamento proposto para a TCP (à direita). O fluxograma detalhado está apresentado no Anexo B.

Como pode ser visto, para a simulação do crescimento periférico com a regra proposta, é necessário ter simulado o crescimento espacial anteriormente, pois possibilita a identificação das novas células urbanas geradas na iteração²⁴. Além do crescimento espacial, são necessárias outras 3 informações, relacionadas com as hipóteses de pesquisa: as medidas de centralidade celular e de carregamentos urbanos e a máscara das periferias preexistentes. As medidas de centralidade celular e de carregamentos urbanos são variáveis obtidas durante o processo de crescimento urbano e, conforme já dito anteriormente, estão associadas à concentração de facilidades urbanas e de estoques construídos. As máscaras de periferias, que já foram apresentadas (no item 5.1.1) como elementos para a comparação dos resultados simulados com a realidade, para a TCP assumem outra função.

²⁴ No *software*, o parâmetro inicial proposto para o funcionamento da TCP é a escolha do comportamento da regra, podendo o usuário decidir se os procedimentos atuarão somente nas novas células urbanas geradas pelo crescimento espacial ou se em todas as células urbanas. A opção de atuar na totalidade de células abre a possibilidade de investigar os processos de recontextualização (Barros, 2004), ou seja, de alteração do perfil socioeconômico, de baixa para média renda, de média para alta renda, ou no sentido oposto. Esses processos não serão abordados nessa dissertação, cujo foco está nas expansões do tecido urbano e não nas modificações intraurbanas.

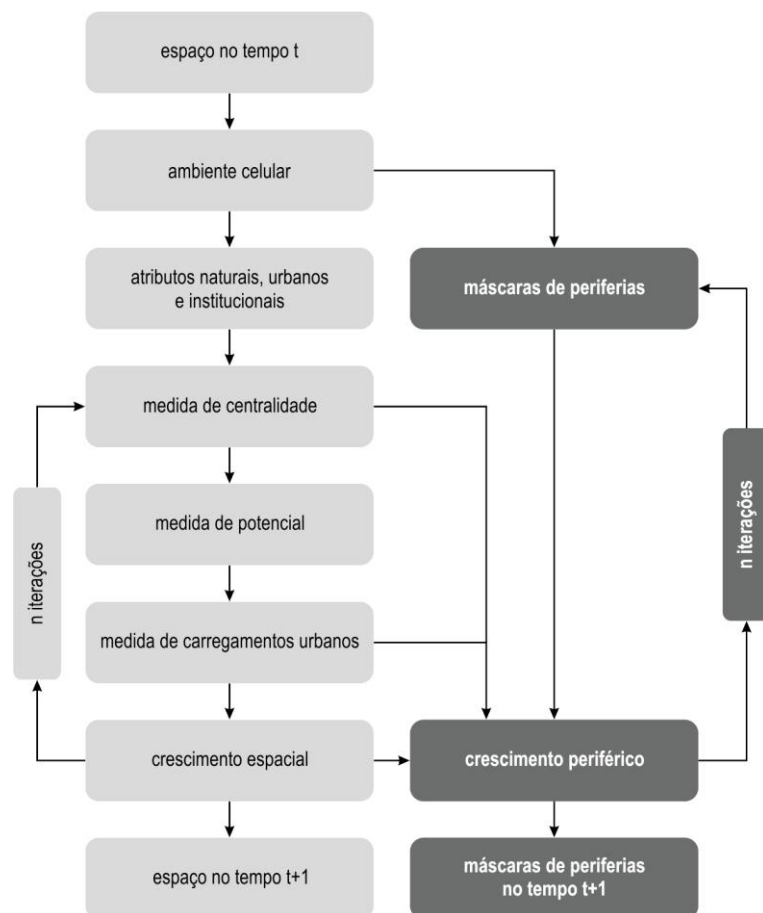


Figura 5.25: Fluxograma geral da TCP, mostrando a atuação conjunta com a regra Potencial de Crescimento com Limiar (*Threshold Potential* - TP). Em cinza claro, a TP, adaptado de Polidori (2004, p. 75); em cinza escuro, a TCP.

As máscaras são usadas como dados de *input* e possibilitam a inclusão das relações de similaridade de vizinhança a partir das preexistências. A partir das 2 medidas e das máscaras, são calculadas então as tendências para o crescimento periférico nas novas células geradas (fig. 5.26). Inicialmente, são calculadas 2 tendências, chamadas de tendências difusas e tendências de vizinhança. Elas seguem a ideia de que, ao se instalar um núcleo residencial periférico para população de baixa ou alta renda, é gerado um círculo de *feedback* positivo e novos núcleos ou acréscimos dos existentes surgirão nas adjacências ou proximidades. Ao mesmo tempo, também seguem a ideia da possibilidade de inovação no mercado imobiliário capitalista, com a “invenção” de novas localizações atrativas; ou o surgimento de contingências que abram espaço para produção do tecido urbano informal.

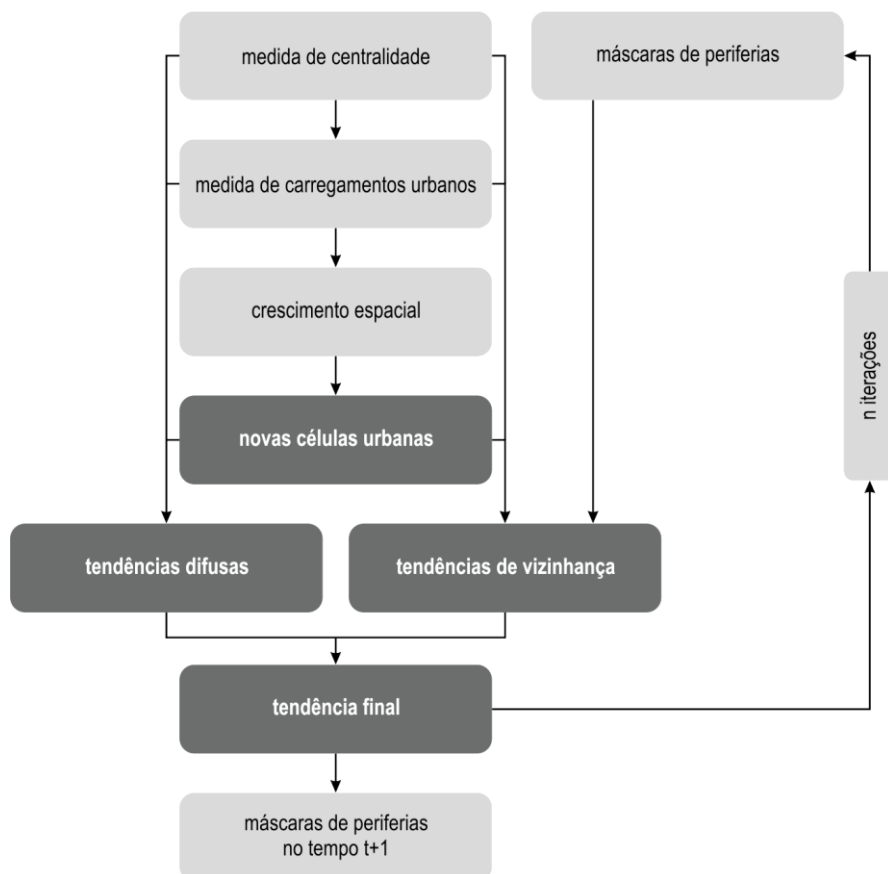


Figura 5.26: Esquema simplificado das tendências que compõem o crescimento periférico na TCP. Em cinza claro, rotinas para simulação da formação de periferias, destacadas do fluxograma básico adaptado da regra Potencial de Crescimento com Limiar; em cinza escuro, etapas que compõem o crescimento periférico.

A tendência difusa (*diffuse tendency*) é aquela que explora a possibilidade da inovação, com a simulação da formação de novos núcleos. Como fora especulado no final do item anterior, ela é obtida a partir de álgebra de mapas com *outputs* da simulação de crescimento urbano. Segundo melhores resultados obtidos nos estudos com as álgebras, para o cálculo desse tipo de tendência são utilizadas as equações que operam com as medidas de centralidades celulares e carregamentos urbanos. Para núcleos de periferização é usada a equação 5.9, e para urbanizações fechadas a equação 5.10²⁵.

$$DTPeriph_i = \frac{ULoad_i}{CentR2_i}$$

Onde:

DTPeriph_i: tendência difusa de formação de núcleos de periferização (*peripherization*) da célula *i*

ULoad_i: carregamentos urbanos (*urban load*) da célula *i*, normalizado pelo valor máximo, com valores variando de 0-1
CentR2_i: centralidade celular normalizada da célula *i* a partir do logaritmo de base 10 (*cellular centrality R2*), variação de 0-1

Equação 5.9: Tendência difusa para conversão urbana orientada para populações de estratos socioeconômicos inferiores.
 Fonte: adaptado de Polidori *et al.* (2011, p. 57).

²⁵ As equações 5.9 e 5.10 são iguais às equações 5.1 e 5.2, apresentadas no item 5.2.1, posto que foram assumidas como sendo os melhores resultados dos testes com álgebras de mapas.

$$DTClurb_i = \frac{CentR1_i}{ULoad_i}$$

Onde:

DTClurb_i: tendência difusa de formação de urbanizações fechadas (closed urbanizations) da célula *i*
CentR1_i: centralidade celular normalizada da célula *i* a partir do valor máximo (cellular centrality R1), variação de 0-1
ULoad_i: carregamentos urbanos (urban load) da célula *i*, normalizado pelo valor máximo, com valores variando de 0-1

Equação 5.10: Tendência difusa para conversão urbana orientada para populações de estratos socioeconômicos superiores. Fonte: adaptado de Polidori *et al.* (2011, p. 55).

A tendência de vizinhança (*neighborhood tendency*) é, complementarmente, aquela que explora o *feedback* positivo para expansão das periferias preexistentes. Para isso, é necessária a elaboração de máscaras com as preexistências no *input* do modelo, uma para os núcleos de periferação e outra para urbanizações fechadas. Com as máscaras o modelo consegue identificar as células vizinhas às periferias, sejam adjacentes ou em raios de abrangência.

Para periferação (equação 5.11), será maior a tendência nas células vizinhas que, na iteração, possuírem os maiores valores de carregamentos urbanos. Essa variável denota locais de maior intensidade de construção e elevada densificação. Para esse tipo de periferias, ela pode estar associada à ocupação contínua e ao menor grão das unidades residenciais, respectivamente. No caso das urbanizações fechadas (equação 5.12), a tendência será maior nas células vizinhas com maiores valores de centralidade celular. A variável denota, além da concentração de facilidades urbanas, locais de maior valorização do custo do solo e maior poder de lucro dos empreendedores imobiliários.

$$NTPeriph_i = \frac{ULoad_i}{(r + 1) \times decay}$$

Onde:

NTPeriph_i: tendência de vizinhança para formação de núcleos de periferação (peripherization) da célula *i*
ULoad_i: carregamentos urbanos (urban load) da célula *i*, normalizado pelo valor máximo, com valores variando de 0-1
r: raio ou quantidade de células entre a borda da máscara e a célula *i*
decay: constante de decaimento ou enfraquecimento conforme a distância (distance-decay)

Equação 5.11: Tendência de vizinhança para conversão urbana orientada para populações de estratos socioeconômicos inferiores. Fonte: do autor.

$$NTClurb_i = \frac{CentR1_i}{(r + 1) \times decay}$$

Onde:

NTClurb_i: tendência de vizinhança para formação de urbanizações fechadas (closed urbanizations) da célula *i*
CentR1_i: centralidade celular normalizada da célula *i* a partir do valor máximo (cellular centrality R1), variação de 0-1
r: raio ou quantidade de células entre a borda da máscara e a célula *i*
decay: constante de decaimento ou enfraquecimento conforme a distância (distance-decay)

Equação 5.12: Tendência de vizinhança para conversão urbana orientada para populações de estratos socioeconômicos superiores. Fonte: do autor.

As tendências de vizinhança não são calculadas apenas nas células adjacentes, pois é entendido que a influência da similaridade nas periferias não acontece apenas na vizinhança imediata. De modo a considerar ações na distância, comuns em modelos de CA, está implementado um efeito de enfraquecimento conforme afastamento (*distance-decay*). O efeito é representado pelo raio (ou quantidade de células entre a borda da máscara e a célula calculada) e pelo parâmetro *decay*. Conforme a desagregação espacial, ou seja, o tamanho da célula usada, o *decay* pode variar, aumentando ou diminuindo a proporção da progressão aritmética e, conseqüentemente, o efeito de enfraquecimento.

Conquanto, o surgimento de um dado tipo de periferia não gera apenas *feedback* positivo para expansões de mesmo tipo. Como visto nas observações empíricas e na revisão teórica, núcleos de alta renda buscam não se instalar próximos de periferização. Assim, pode ser entendido que a periferização exerce um *feedback* negativo para a formação de urbanizações fechadas. O efeito negativo pode acontecer também na situação inversa, com a valorização das proximidades de núcleos de alta renda inviabilizando a ocupação por baixa renda. Para replicar esse efeito de segregação no processo de crescimento periférico, está incluído o parâmetro chamado raio de repulsa (*repel radius*), que é um *buffer* onde as tendências (difusas e de vizinhança) para o tipo oposto de periferia serão zeradas.

A tendência final (*final tendency*) de conversão celular nos dois tipos periféricos é gerada a partir de uma operação de álgebra de mapas entre os resultados das tendências difusas e das tendências de vizinhança. De modo possibilitar a simulação do surgimento de núcleos por inovação e também por acréscimo de preexistências, a tendência final de uma dada célula será o maior (ou máximo) valor entre os resultados das outras duas tendências. O cálculo para periferização e para urbanizações fechadas está demonstrado nas equações 5.13 e 5.14, respectivamente.

$$FTPeriph_i = \max(DTPeriph_i; NTPeriph_i)$$

Onde:

FTPeriph_i: tendência final para formação de núcleos de periferização (*peripherization*) da célula *i*

max: máximo valor entre valores de um conjunto

DTPeriph_i: tendência difusa para formação de núcleos de periferização da célula *i*

NTPeriph_i: tendência de vizinhança para formação de núcleos de periferização da célula *i*

Equação 5.13: Tendência final para conversão urbana orientada para populações de estratos socioeconômicos inferiores.

Fonte: do autor.

$$FTClurb_i = \max(DTClurb_i; NTClurb_i)$$

Onde:

FTClurb_i: tendência final para formação de núcleos de periferização (*peripherization*) da célula *i*

max: máximo valor entre valores de um conjunto

DTClurb_i: tendência difusa para formação de núcleos de periferização da célula *i*

NTClurb_i: tendência de vizinhança para formação de núcleos de periferização da célula *i*

Equação 5.14: Tendência de vizinhança para conversão urbana orientada para populações de estratos socioeconômicos superiores. Fonte: do autor.

A partir da quantidade de células de cada máscara, é possível calcular a relação percentual entre cada tipo de periferia e o total de células urbanas. Ou seja, é possível saber qual o percentual de área efetivamente urbanizada é ocupado por núcleos para população de baixa renda e também para população de maior renda. Como o crescimento urbano gera aumento celular a cada iteração, é esperado que a quantidade de células dos tipos de periferias também aumente.

A TCP possui um parâmetro, chamado percentual da estrutura social (*social structure percent*), que permite que o usuário possa definir se deseja que o crescimento periférico mantenha o percentual calculado no *input* (baseado na máscara - *based on mask*), ou que atinja um percentual diferente (definido pelo usuário - *user defined*). O ajuste desse parâmetro possibilita simular a manutenção, o aumento ou a diminuição da formação de periferias, seja para as rotinas de validação com um cenário de controle, ou para exploração de cenários de futuro. Com base nesse percentual, de *input* ou modificado, as máscaras são atualizadas a cada iteração. São convertidas em novas células aquelas de maior tendência final, correspondentes ao percentual de cada tipo, retroalimentando o sistema para os cálculos de tendências na iteração seguinte.

5.4.1 Aplicação da inclusão de preexistências e vizinhanças

Para testar a regra protótipo TCP com o caso de Pelotas, no recorte temporal proposto, inicialmente é necessário incluir nos dados de entrada as periferias preexistentes em 1985. A partir de conhecimento empírico, foi assumido que não houve alteração substancial na localização espacial das periferias no intervalo de 25 anos²⁶. Sendo assim, a partir de uma operação de superposição de mapas (*overlay*), foram retiradas das máscaras de periferias para 2010 aquelas células que em 1985 não estavam urbanizadas. Os *grids* correspondentes às máscaras de periferização e de urbanizações fechadas estão apresentados, respectivamente, nas figuras 5.27A e 5.27B. Os núcleos de baixa renda, em 1985, correspondem ao total de 154 células (12,88% das células urbanas), enquanto os núcleos de alta renda ocupam 70 células (5,85% das células urbanas).

²⁶ Entenda-se como alteração substancial o processo de recontextualização (Barros, 2004), ou seja, o aumento ou diminuição do padrão de renda da população residente, capaz de mudar a classe socioeconômica do local.

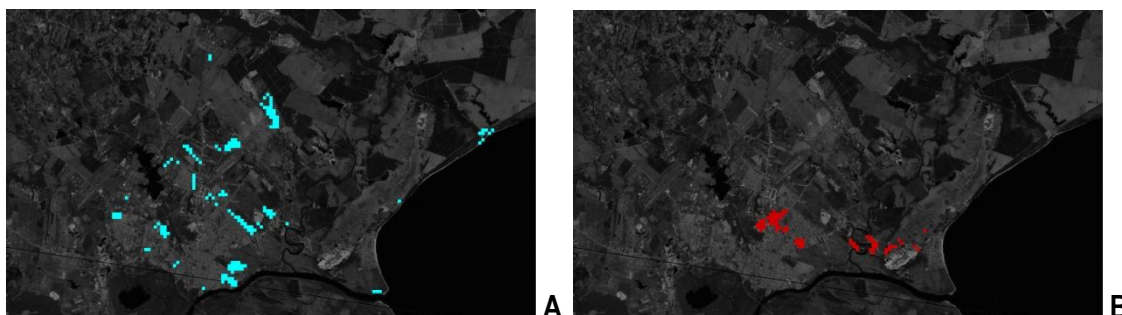


Figura 5.27: Máscaras dos tipos periféricos para Pelotas, RS, em 1985: A) periferização; B) urbanizações fechadas.

Os parâmetros relativos à regra TP seguem os mesmos, conforme estudo de aproximação morfológica. Os testes com a TCP estão parametrizados da seguinte maneira:

- *Decay*: a constante usada é o valor “1”, de modo a testar o enfraquecimento na distância com uma progressão aritmética em função apenas do aumento do raio celular.
- Percentual de tecido urbano ocupado por núcleos de baixa renda: está ajustado como definido pelo usuário, com o valor de 24%, devido o aumento do percentual entre 1985 e 2010.
- Percentual de tecido urbano ocupado por núcleos de alta renda: está ajustado para 6%, para simular o leve aumento do percentual entre os dois períodos.
- Raio de repulsa: estão testadas variações de segregação com raios 0, 1, 2 e 3 células (representando 0, 200, 400 e 600 m), sempre iguais para os dois tipos de periferias.

O único parâmetro cuja sensibilidade será testada, como visto, é o raio de repulsa. A variação é importante para permitir verificar a tendência de mistura ou segregação de um tipo de periferia em relação ao outro. Seguem os *outputs* da simulação de melhor resultado (com raio de repulsa 2):

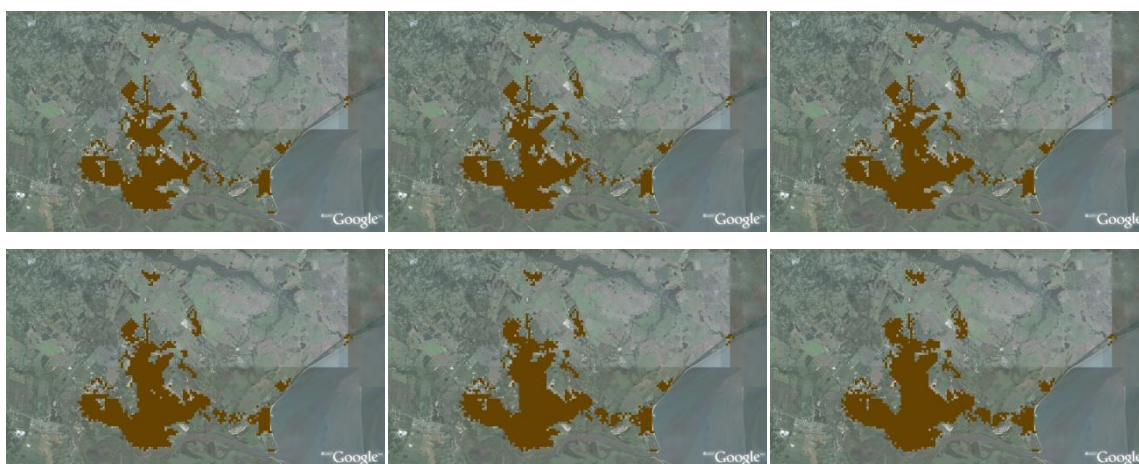


Figura 5.28: *Outputs* de células urbanas do estudo com a TCP, para simulação do crescimento urbano de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010. Respectivamente iterações 1, 5, 10, 15, 20 e 25. Simulação disponível em: http://www.4shared.com/photo/9VaMbkk0/Pelotas_P12-TCP-CellType.html.

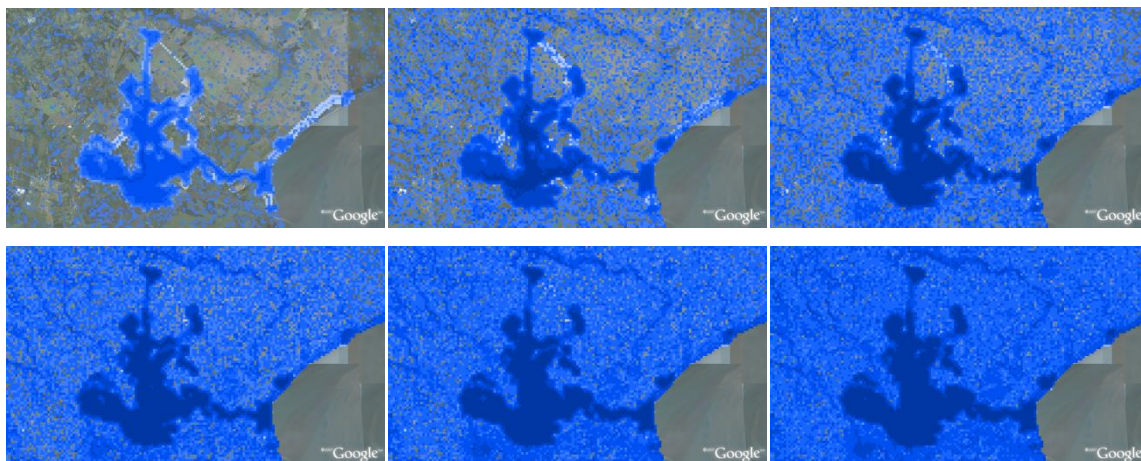


Figura 5.29: *Outputs* de centralidades celulares R1 do estudo com a TCP, para simulação do crescimento urbano de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010. Respetivamente iterações 1, 5, 10, 15, 20 e 25. Simulação disponível em: http://www.4shared.com/photo/WdXwnJgh/Pelotas_P12-TCP-CentR1.html.

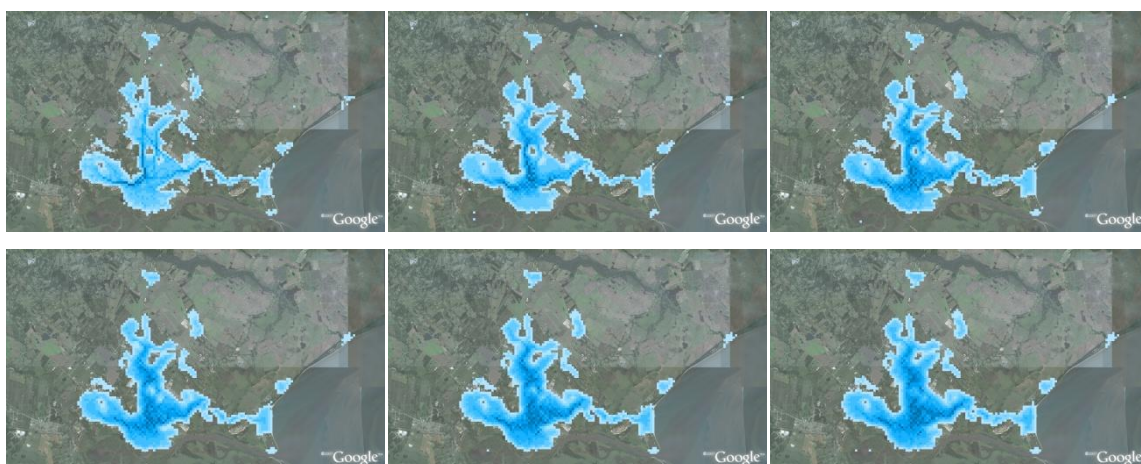


Figura 5.30: *Outputs* de centralidades celulares R2 do estudo com a TCP, para simulação do crescimento urbano de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010. Respetivamente iterações 1, 5, 10, 15, 20 e 25. Simulação disponível em: http://www.4shared.com/photo/OzQzHnhS/Pelotas_P12-TCP-CentR2.html.



Figura 5.31: *Outputs* de carregamentos urbanos do estudo com a TCP, para simulação do crescimento urbano de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010. Respetivamente iterações 1, 5, 10, 15, 20 e 25. Simulação disponível em: http://www.4shared.com/photo/1xKPFIRI/Pelotas_P12-TCP-ULoad.html.

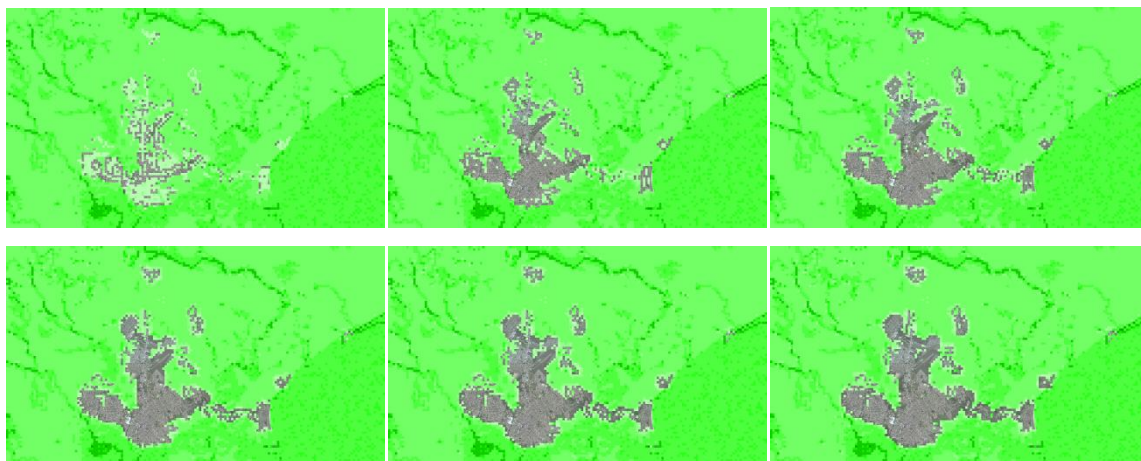


Figura 5.32: *Outputs* de resistências naturais do estudo com a TCP, para simulação do crescimento urbano de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010. Respectivamente iterações 1, 5, 10, 15, 20 e 25. Simulação disponível em: http://www.4shared.com/photo/i8sKp3Ph/Pelotas_P12-TCP-ResistE.html.



Figura 5.33: *Outputs* de tendências difusas acumuladas para periferização, com a TCP, para simulação do crescimento urbano de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010. Respectivamente iterações 1, 5, 10, 15, 20 e 25. Simulação disponível e não acumulada em: http://www.4shared.com/photo/auwQuu7y/Pelotas_P12-TCP-periph-diffuse.html.



Figura 5.34: *Outputs* de tendências de vizinhança acumuladas para periferização, com a TCP, para simulação do crescimento urbano de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010. Respectivamente iterações 1, 5, 10, 15, 20 e 25. Simulação disponível e não acumulada em: http://www.4shared.com/photo/ydUEtEO4/Pelotas_P12-TCP-periph-neighbo.html.



Figura 5.35: *Outputs* de tendências finais acumuladas para periferização, com a TCP, para simulação do crescimento urbano de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010. Respectivamente iterações 1, 5, 10, 15, 20 e 25. Simulação disponível e não acumulada em: <http://www.4shared.com/photo/ECfndaKu/Pelotas_P12-TCP-periph-final_t.html>.

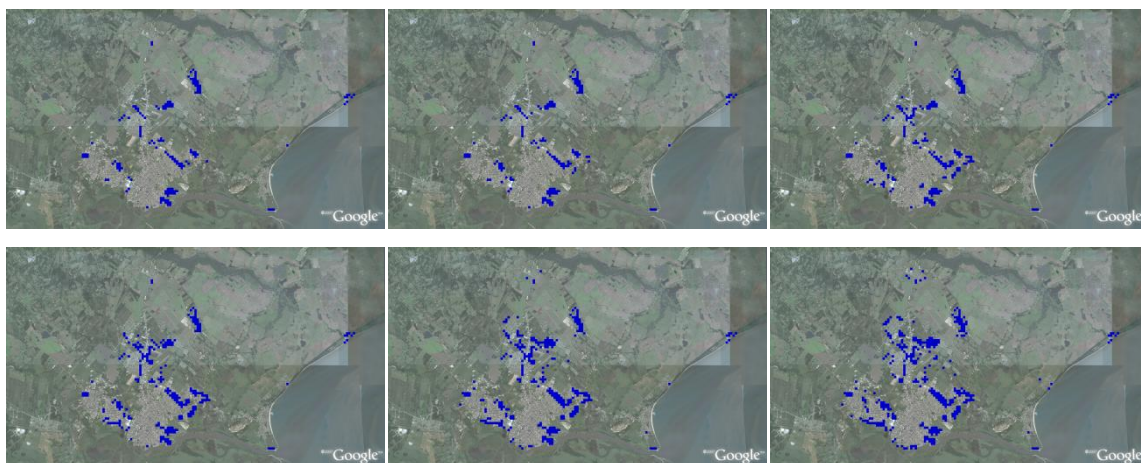


Figura 5.36: *Outputs* de máscaras para periferização, no estudo com a TCP, para simulação do crescimento urbano de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010. Respectivamente iterações 1, 5, 10, 15, 20 e 25. Simulação disponível em: <http://www.4shared.com/photo/fu457qVI/Pelotas_P12-TCP-periph-final_m.html>.

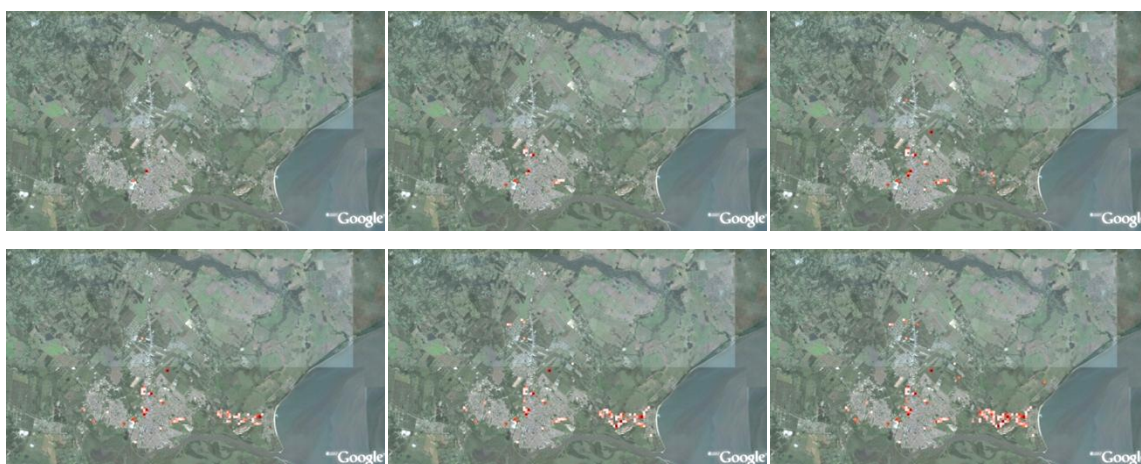


Figura 5.37: *Outputs* de tendências difusas acumuladas para urbanizações fechadas, com a TCP, para simulação do crescimento urbano de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010. Respectivamente iterações 1, 5, 10, 15, 20 e 25. Simulação disponível e não acumulada em: <http://www.4shared.com/photo/ImK_oRqh/Pelotas_P12-TCP-clurb-diffuse_.html>.

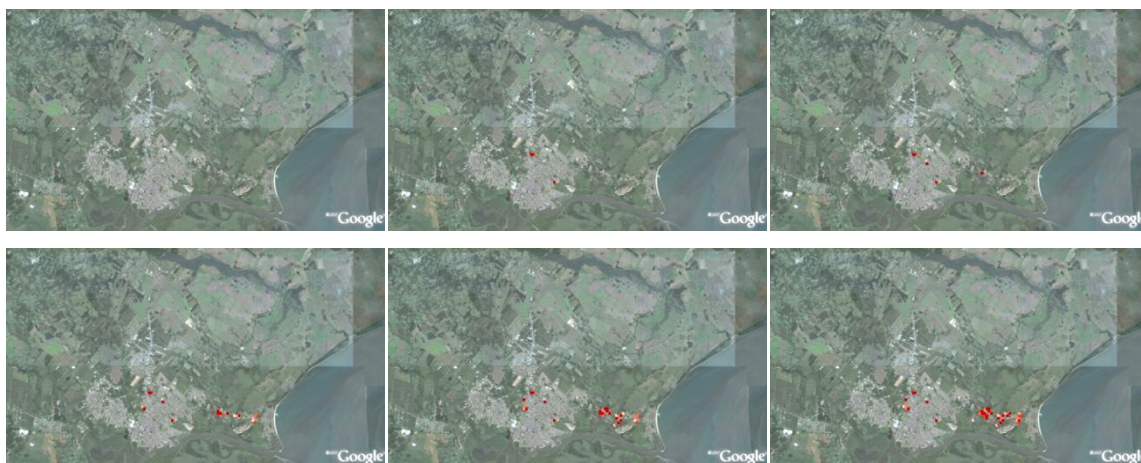


Figura 5.38: *Outputs* de tendências de vizinhança acumuladas para urbanizações fechadas, com a TCP, para simulação do crescimento urbano de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010. Respectivamente iterações 1, 5, 10, 15, 20 e 25. Simulação disponível e não acumulada em: <http://www.4shared.com/photo/l5zoUuuF/Pelotas_P12-TCP-clurb-neighbor.html>.

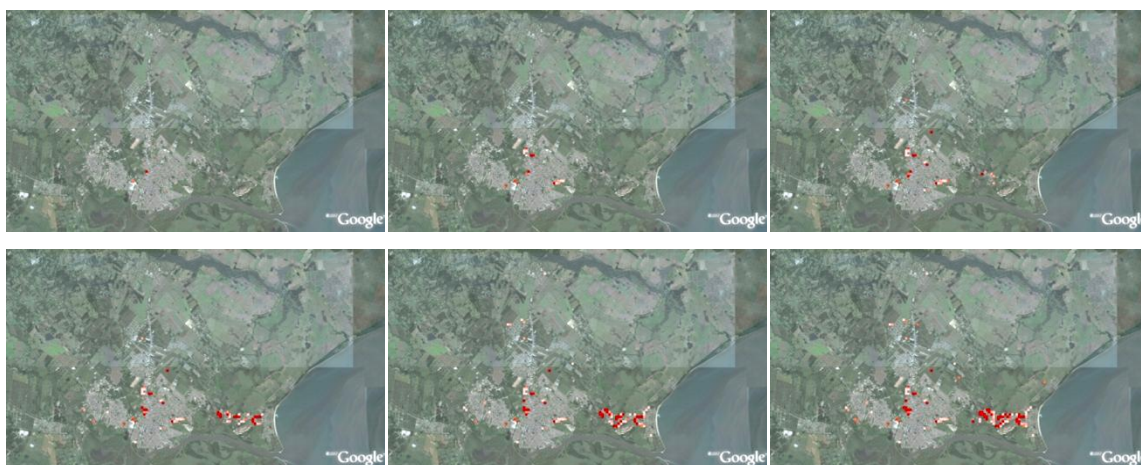


Figura 5.39: *Outputs* de tendências finais acumuladas para urbanizações fechadas, com a TCP, para simulação do crescimento urbano de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010. Respectivamente iterações 1, 5, 10, 15, 20 e 25. Simulação disponível e não acumulada em: <http://www.4shared.com/photo/7WyptKKy/Pelotas_P12-TCP-clurb-final_te.html>.



Figura 5.40: *Outputs* de máscaras para urbanizações fechadas, no estudo com a TCP, para simulação do crescimento urbano de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010. Respectivamente iterações 1, 5, 10, 15, 20 e 25. Simulação disponível em: <http://www.4shared.com/photo/VgZvYowa/Pelotas_P12-TCP-clurb-final_ma.html>.

Estando a TCP aplicada apenas nas novas células que surgem a cada iteração, e em função do tamanho delas em relação à área de trabalho, os resultados gráficos são de difícil visualização. De maneira a auxiliar na visualização dos *outputs* impressos nessa dissertação, estão apresentadas as tendências difusas, de vizinhança e finais acumuladas (fig. 5.33, 5.34, 5.35, 5.37, 5.38 e 5.39). Elas representam as células com presença de tendências que surgiram até a iteração da respectiva imagem, sendo aplicadas para esse artifício as equações 5.3 e 5.4.

5.4.2 Validação dos estudos com a inclusão de preexistências e vizinhanças

De maneira semelhante ao aplicado para os estudos apenas com as operações de álgebras de mapas, as rotinas de validação da TCP também utilizam a proporção de concordância celular, medidas de manchas e análise visual. Para isso, são comparados os resultados finais das simulações (para a simulação de melhor resultado, fig. 5.36 e 5.40, na iteração 25) entre si e com as máscaras elaboradas a partir das periferias existentes em 2010 (fig. 5.6). As comparações são feitas também entre as variações do parâmetro raio de repulsa, de modo a representar a segregação socioespacial. A tabela 5.6 mostra o resultado a verificação da proporção de concordância celular.

Resumo dos melhores resultados para o crescimento periférico de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010, a partir de álgebras de mapas				
raio de repulsa	proporção de concordância celular (%) (em uma série de 12 simulações)			
	periferização		urbanizações fechadas	
	média	melhor resultado	média	melhor resultado
0	5,62	5,53	9,40	12,77
1	6,99	6,93	9,51	13,95
2	8,08	9,32	10,97	13,04
3	8,30	9,32	10,97	14,29

Tabela 5.6: Melhores resultados de proporção de concordância celular para os estudos com álgebra de mapas aplicadas ao caso do crescimento periférico de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010. Melhores resultados destacados em vermelho.

Na média das simulações realizadas, ainda que com valores muito próximos, os melhores resultados foram encontrados com o parâmetro raio de repulsa ajustado para 3 células. As proporções de concordância celular calculadas para todas as simulações são consideradas baixas, denotando haver muitas diferenças locais em relação à realidade. Comparados com os estudos com operações de álgebras de mapas, cujos resultados também apresentaram proporções de concordância celular baixas (tab. 5.3), houve menor proximidade de acerto locacional para periferização e maior para urbanizações

fechadas. As rotinas que consideram as vizinhanças das periferias preexistentes, na média das proporções de concordância celular para periferização, mostram uma diminuição de 16,36% para 8,30%. Para urbanizações fechadas, há aumento é de 2,63%²⁷ para 10,97%.

A simulação de melhor resultado apresentada na tabela 5.6 (correspondente também às figuras 5.28 a 5.40) é aquela com a proporção de concordância celular de maior valor dentro da melhor média. São encontrados resultados semelhantes com outros raios para outras simulações, principalmente com raio 2, com proporção levemente inferior no melhor resultado para urbanizações fechadas.

Quanto à forma das periferias simuladas, nas tabelas 5.7 e 5.8 e nos gráficos 5.3 e 5.4 estão comparados os melhores resultados para cada raio, com base em medidas de manchas.

²⁷ A melhor média de proporção de concordância celular nas álgebras de mapas para núcleos de alta renda foi encontrada nas operações com as medidas de centralidades celulares e resistências naturais, com 4,52%. Todavia, com base na análise visual dos resultados, as operações com centralidades celulares e carregamentos urbanos foram consideradas melhores resultados.

Melhores resultados para medidas de manchas de formações do tipo periferização em Pelotas, RS, entre 1985-2010, a partir da TCP												
raio de repulsa	medidas básicas				medidas de borda				medidas de forma			
	LPI (%)	índice de erro	LSI (un)	índice de erro	TE (m)	índice de erro	ED (m/ha)	índice de erro	AWMSI (un)	índice de erro	MSI (un)	índice de erro
0	23	0,44	281	0,18	1788000	0,32	282	0,32	201	0,09	139	0,11
1	35	0,15	261	0,10	1584000	0,17	250	0,17	230	0,05	143	0,08
2	46	0,12	260	0,09	1576000	0,16	249	0,16	275	0,25	145	0,07
3	21	0,49	265	0,11	1628000	0,20	257	0,20	193	0,12	132	0,15
cenário de 2010	41		238		1356000		214		220		156	

raio de repulsa	medidas de diversidade				medidas de diversidade e tamanho de manchas							
	MPI (un)	índice de erro	MNN (%)	índice de erro	MPS (ha)	índice de erro	NUMP (un)	índice de erro	PSCOV (%)	índice de erro	PSSD (ha)	índice de erro
0	1047	0,66	32661	0,60	2209	0,37	67	0,81	14129	0,09	3121	0,43
1	1363	1,16	50044	0,39	2784	0,21	51	0,38	16581	0,07	4617	0,15
2	1398	1,22	35175	0,57	3164	0,10	45	0,22	19038	0,22	6024	0,10
3	1119	0,78	33073	0,59	2265	0,36	65	0,76	15030	0,03	3404	0,38
cenário de 2010	630		81615		3514		37		15543		5461	

Tabela 5.7: Melhores resultados das medidas de manchas para os estudos com a TCP aplicadas ao caso do crescimento periférico de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010: periferização. Melhores resultados destacados: bons em vermelho; medianos em azul.

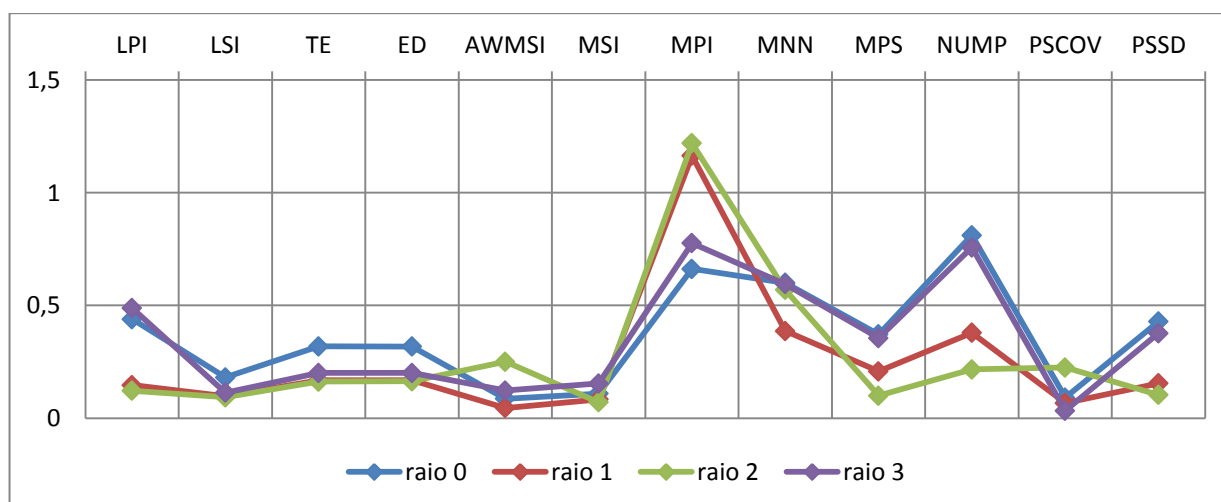


Gráfico 5.3: Comparação entre os melhores resultados das medidas de manchas com a TCP aplicadas ao caso do crescimento periférico de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010: periferização.

Legenda: LPI – índice da maior mancha; LSI – índice de forma da paisagem; TE – borda total; ED – densidade da borda; AWMSI – índice de forma média ponderado pela área; MSI – índice de forma média; MPI – índice de forma média; MNN – distância média da vizinhança mais próxima; MPS – tamanho médio das manchas; NUMP – número de manchas; PSCOV – coeficiente de variação do tamanho das manchas; PSSD – desvio padrão do tamanho das manchas.

Melhores resultados para medidas de manchas de formações do tipo urbanizações fechadas em Pelotas, RS, entre 1985-2010, a partir da TCP												
raio de repulsa	medidas básicas				medidas de borda				medidas de forma			
	LPI (%)	índice de erro	LSI (un)	índice de erro	TE (m)	índice de erro	ED (m/ha)	índice de erro	AWMSI (un)	índice de erro	MSI (un)	índice de erro
0	23	0,00	140	0,04	368000	0,15	58	0,14	178	0,02	131	0,08
1	24	0,04	136	0,01	324000	0,01	51	0,00	175	0,01	128	0,10
2	25	0,09	140	0,04	368000	0,15	58	0,14	208	0,20	157	0,11
3	25	0,09	136	0,01	328000	0,03	52	0,02	183	0,05	140	0,01
cenário de 2010	23		135		320000		51		174		142	

raio de repulsa	medidas de diversidade				medidas de diversidade e tamanho de manchas							
	MPI (un)	índice de erro	MNN (%)	índice de erro	MPS (ha)	índice de erro	NUMP (un)	índice de erro	PSCOV (%)	índice de erro	PSSD (ha)	índice de erro
0	331	0,58	94983	1,45	2686	0,45	14	0,75	14078	0,59	3781	0,12
1	571	0,28	45059	0,16	3000	0,38	12	0,50	14252	0,61	4276	0,00
2	659	0,17	43429	0,12	4133	0,15	9	0,13	11212	0,27	4634	0,08
3	820	0,03	54916	0,41	4311	0,11	9	0,13	11132	0,26	4799	0,12
cenário de 2010	797		38842		4850		8		8829		4282	

Tabela 5.8: Melhores resultados das medidas de manchas para os estudos com a TCP aplicadas ao caso do crescimento periférico de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010: urbanizações fechadas. Melhores resultados destacados: bons em vermelho; medianos em azul.

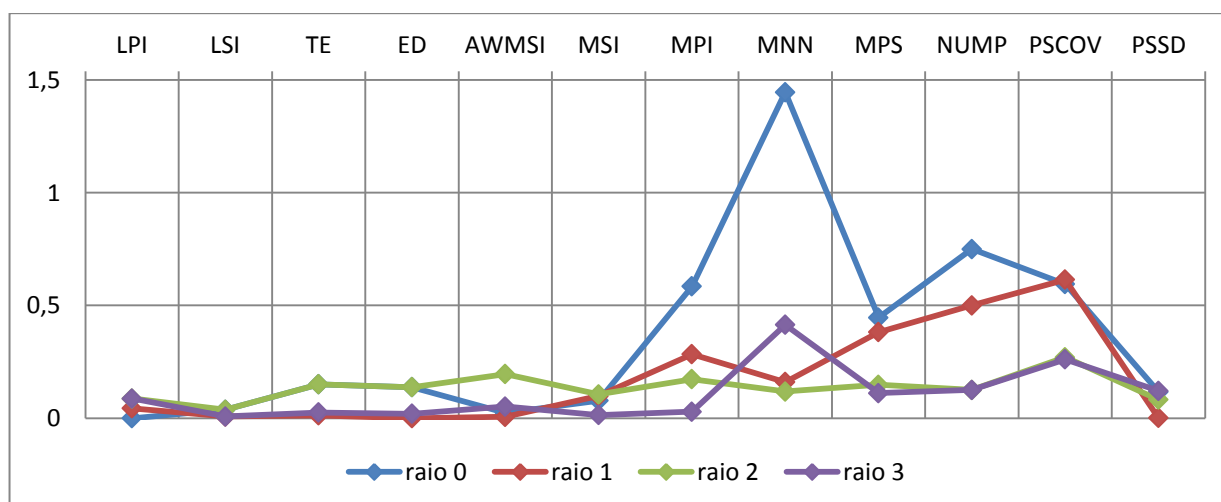


Gráfico 5.4: Comparação entre os melhores resultados das medidas de manchas com a TCP aplicadas ao caso do crescimento periférico de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010: urbanizações fechadas.

Legenda: LPI – índice da maior mancha; LSI – índice de forma da paisagem; TE – borda total; ED – densidade da borda; AWMSI – índice de forma média ponderado pela área; MSI – índice de forma média; MPI – índice de forma média; MNN – distância média da vizinhança mais próxima; MPS – tamanho médio das manchas; NUMP – número de manchas; PSCOV – coeficiente de variação do tamanho das manchas; PSSD – desvio padrão do tamanho das manchas.

No caso da periferização, a maioria dos melhores resultados de índice de erro com as medidas de manchas (tab. 5.7) é encontrada com o raio de repulsa 2 exercido pelas urbanizações fechadas. Todavia, diferente do resultado fraco encontrado na proporção de concordância celular, as manchas apresentaram erro próximo à zero em quase todas as medidas usadas. As principais deficiências estão no menor isolamento das manchas, em função da menor distância média entre elas. Com resultados medianos, isso é observado com o índice de proximidade média (MPI) e na distância média para a vizinha mais próxima (MNN).

Para urbanizações fechadas, diferente da proporção de concordância celular, o melhor resultado é encontrado com raio de repulsa 3 das periferias de baixa renda (tab. 5.8). A principal deficiência está na maior distância média para a vizinha mais próxima (MNN), possivelmente em função de erro locacional no surgimento de novas nucleações isoladas.

Ainda que fracas, a pequena diferença entre os resultados das proporções de concordância celular poderia indicar que o modelo não é sensível ao efeito de segregação simulado pelo raio de repulsa. Entretanto, a partir da análise visual dos resultados, é possível verificar a presença de periferização nas adjacências de urbanizações fechadas, e vice-versa, com raio 0 (fig. 5.41A). Com raio 1 (fig. 5.41B) é percebida principalmente a presença de periferização nas vizinhanças de núcleos de alta renda. A forte mistura entre os tipos de periferias na morfologia resultante das simulações não é observada na realidade (fig. 5.42).

Visualmente também é observado que o erro locacional das urbanizações fechadas ocorre, principalmente, em células muito próximas ou adjacentes às células que correspondem ao cenário real. O resultado simulado mostra crescimento dos grandes núcleos e surgimento de novos núcleos menores, em local errado, mas com tamanho semelhante à realidade. Quanto à periferização, o erro locacional é grande, gerando grande parte das células em locais distantes do observado no cenário de controle. Conquanto, o padrão formal simulado apresenta acerto nas 3 formas encontradas na realidade: núcleos com grande área; núcleos com formato linear; e pequenos núcleos de poucas células, espalhados pelas bordas urbanas.

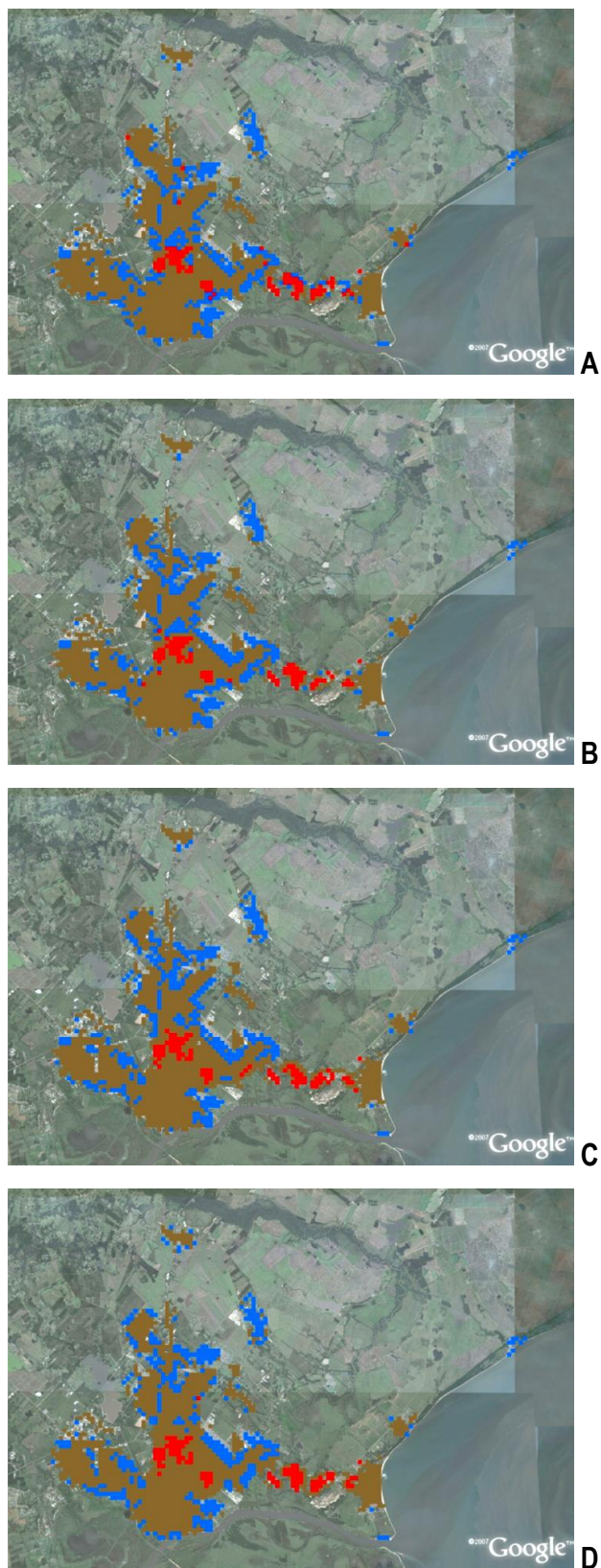


Figura 5.41: Síntese dos melhores resultados finais das 4 variações de raio de repulsa com a TCP, na iteração 25, para a formação de periferias na cidade de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010: A) raio 0; B) raio 1; C) raio 2; D) raio 3. Células urbanas em marrom, periferização em azul e urbanizações fechadas em vermelho.

Simulações disponíveis em: A) http://www.4shared.com/photo/vxA0RyTE/Pelotas_P02-TCP-periphclurb-fi.html; B) http://www.4shared.com/photo/fnn0t1JO/Pelotas_P05-TCP-periphclurb-fi.html; C) http://www.4shared.com/photo/qRY4NIU9/Pelotas_P08-TCP-periphclurb-fi.html; D) http://www.4shared.com/photo/9bOgZAf/Pelotas_P12-TCP-periphclurb-fi.html.



Figura 5.42: Síntese do cenário de controle, em 2010, para o estudo de caso da formação de periferias na cidade de Pelotas, RS. Células urbanas em marrom, periferização em azul e urbanizações fechadas em vermelho.

Baseado nos descritores de manchas e na análise visual das figuras 5.41 e 5.42, e havendo fraca proporção de concordância celular, o raio 2 é considerado o melhor resultado para periferização. Quanto às urbanizações fechadas, é entendido como melhor resultado morfológico e espacial o raio 3 para urbanizações fechadas, a partir das medidas de manchas. No item a seguir são comparados os melhores resultados entre os dois métodos utilizados.

5.5 Comparação entre métodos

De modo a observar as diferenças entre os resultados obtidos com as álgebras de mapas e com a regra TCP, os melhores resultados extraídos das simulações de crescimento periférico são comparados a partir de suas proporções de concordância celular (tabela 5.9) e suas medidas de manchas (tabelas 5.10 e 5.11 e gráficos 5.5 e 5.6).

Comparação entre melhores resultados da álgebra de mapas e da TCP				
para proporção de concordância celular no caso de Pelotas, RS, entre 1985-2010				
método	melhores resultados para			
	proporção de concordância celular (%)			
	periferização		urbanizações fechadas	
	média	melhor resultado	média	melhor resultado
centralidades celulares e carregamentos urbanos	16,36	16,75	2,63	3,16
TCP com raios de repulsa 2 e 3*	8,30	9,32	10,97	14,29

* raio 2 para periferização e 3 para urbanizações fechadas

Tabela 5.9: Comparação entre os melhores resultados das proporções de concordância celular para os estudos com álgebras de mapas e com a TCP aplicadas ao caso do crescimento periférico de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010.

Comparação entre melhores resultados da álgebra de mapas e da TCP para medidas de manchas de formações do tipo periferização em Pelotas, RS, entre 1985-2010												
método	medidas básicas				medidas de borda				medidas de forma			
	LPI (%)	índice de erro	LSI (un)	índice de erro	TE (m)	índice de erro	ED (m/ha)	índice de erro	AWMSI (un)	índice de erro	MSI (un)	índice de erro
álgebra com centralidades celulares e carregamentos urbanos	19	0,54	307	0,29	2044000	0,51	323	0,51	183	0,17	133	0,15
TCP com raio de repulsa 2	46	0,12	260	0,09	1576000	0,16	249	0,16	275	0,25	145	0,07
cenário de 2010	41		238		1356000		214		220		156	

método	medidas de diversidade				medidas de diversidade e tamanho de manchas							
	MPI (un)	índice de erro	MNN (%)	índice de erro	MPS (ha)	índice de erro	NUMP (un)	índice de erro	PSCOV (%)	índice de erro	PSSD (ha)	índice de erro
álgebra com centralidades celulares e carregamentos urbanos	810	0,29	31216	0,62	1697	0,52	91	1,46	12598	0,19	2138	0,61
TCP com raio de repulsa 2	1398	1,22	35175	0,57	3164	0,10	45	0,22	19038	0,22	6024	0,10
cenário de 2010	630		81615		3514		37		15543		5461	

Tabela 5.10: Comparação entre os melhores resultados das medidas de manchas para os estudos com álgebras de mapas e com a TCP aplicadas ao caso do crescimento periférico de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010: periferização. Melhores resultados destacados: bons em vermelho; medianos em azul.

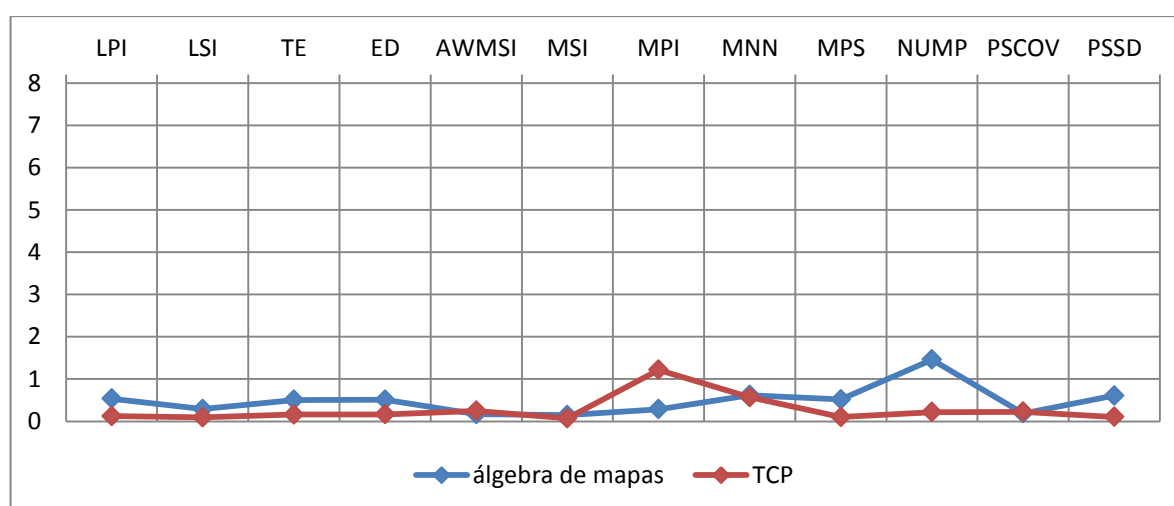


Gráfico 5.5: Comparação entre os melhores resultados das medidas de manchas para os estudos com álgebras de mapas (linha azul) e com a TCP (linha vermelha) aplicadas ao caso do crescimento periférico de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010: periferização.

Legenda: LPI – índice da maior mancha; LSI – índice de forma da paisagem; TE – borda total; ED – densidade da borda; AWMSI – índice de forma média ponderado pela área; MSI – índice de forma média; MPI – índice de forma média; MNN – distância média da vizinhança mais próxima; MPS – tamanho médio das manchas; NUMP – número de manchas; PSCOV – coeficiente de variação do tamanho das manchas; PSSD – desvio padrão do tamanho das manchas.

Comparação entre melhores resultados da álgebra de mapas e da TCP para medidas de manchas de formações do tipo urbanizações fechadas em Pelotas, RS, entre 1985-2010												
método	medidas básicas				medidas de borda				medidas de forma			
	LPI (%)	índice de erro	LSI (un)	índice de erro	TE (m)	índice de erro	ED (m/ha)	índice de erro	AWMSI (un)	índice de erro	MSI (un)	índice de erro
álgebra com centralidades celulares e carregamentos urbanos	5	0,78	175	0,30	720000	1,25	114	1,24	123	0,29	109	0,23
TCP com raio de repulsa 3	25	0,09	136	0,01	328000	0,03	52	0,02	183	0,05	140	0,01
cenário de 2010	23		135		320000		51		174		142	

método	medidas de diversidade				medidas de diversidade e tamanho de manchas							
	MPI (un)	índice de erro	MNN (%)	índice de erro	MPS (ha)	índice de erro	NUMP (un)	índice de erro	PSCOV (%)	índice de erro	PSSD (ha)	índice de erro
álgebra com centralidades celulares e carregamentos urbanos	152	0,81	47986	0,24	591	0,88	67	7,38	7147	0,19	422	0,90
TCP com raio de repulsa 3	820	0,03	54916	0,41	4311	0,11	9	0,13	11132	0,26	4799	0,12
cenário de 2010	797		38842		4850		8		8829		4282	

Tabela 5.11: Comparação entre os melhores resultados das medidas de manchas para os estudos com álgebras de mapas e com a TCP aplicadas ao caso do crescimento periférico de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010: urbanizações fechadas. Melhores resultados destacados: bons em vermelho; medianos em azul.

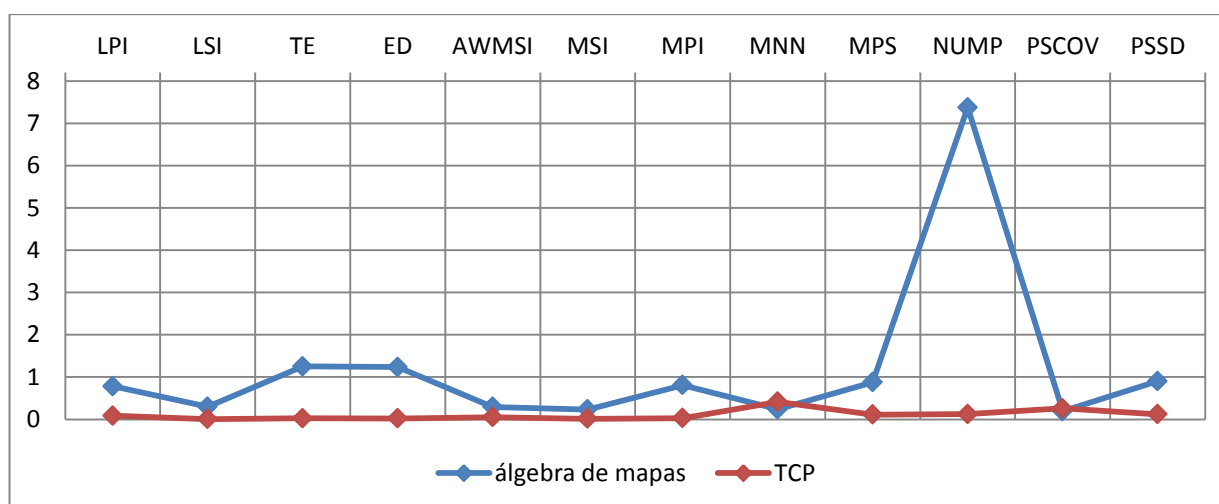


Gráfico 5.6: Comparação entre os melhores resultados das medidas de manchas para os estudos com álgebras de mapas (linha azul) e com a TCP (linha vermelha) aplicadas ao caso do crescimento periférico de Pelotas, RS, entre 1985 e 2010: urbanizações fechadas.

Legenda: LPI – índice da maior mancha; LSI – índice de forma da paisagem; TE – borda total; ED – densidade da borda; AWMSI – índice de forma média ponderado pela área; MSI – índice de forma média; MPI – índice de forma média; MNN – distância média da vizinhança mais próxima; MPS – tamanho médio das manchas; NUMP – número de manchas; PSCOV – coeficiente de variação do tamanho das manchas; PSSD – desvio padrão do tamanho das manchas.

Como pode ser visto as concordâncias celulares são baixas nos 2 métodos, indicando resultados insatisfatórios para simulação da formação de periferias quanto à sua localização na estrutura urbana. Por outro lado, quanto as formas das periferias, são encontrados menores índices de erro na maioria das medidas de manchas quando usada a TCP, tanto para periferização quanto para urbanizações fechadas. Isso demonstra que a inclusão das preexistências e, por consequência, do teste da hipótese de similaridade socioeconômica de vizinhança, gera resultados simulados mais próximos da morfologia real observada para o caso de Pelotas.

5.6 Considerações finais sobre o estudo de caso

Os experimentos apresentados ao longo do capítulo 5, demonstrados com o caso de Pelotas, testam as hipóteses de pesquisa, partindo de um modelo de crescimento urbano baseado em CA, com objetivo de simular a formação de periferias. Os resultados encontrados nos estudos permitem as seguintes conclusões gerais:

- O resultado da calibração das tensões aponta maior acerto com a distribuição de predomínio polar, se diferenciando das demais distribuições devido à quantidade de células de borda simuladas. O predomínio polar pode estar associado a um possível processo dinâmico de alternância entre fragmentação e compactação da área efetivamente urbanizada de Pelotas no período de 1985 a 2010.
- O uso de operações com álgebra de mapas a partir de *outputs* do SACI, como método para identificação das periferias urbanas nos resultados gráficos do modelo, foi capaz de capturar padrões morfológicos do processo de crescimento urbano. Todavia, as combinações estudadas não apresentaram resultados suficientes, tanto em localização quanto em forma, passíveis de legitimar o uso somente desse método.
- Os procedimentos de álgebra de mapas realizadas no *ArcGIS* são lentos e trabalhosos, tendo havido ganhos em eficácia quando automatizados no *CityCell*, como no cálculo das tendências difusas da regra TCP. Mesmo assim, a automatização dos cálculos exige esforços de programação computacional que também são lentos e trabalhosos.
- A inclusão das periferias preexistentes e suas relações de vizinhanças conferem ganhos ao método, principalmente na simulação dos padrões de forma dos tipos periféricos. A partir dos resultados das medidas de manchas, é possível considerar que há legitimação morfológica dos conceitos propostos para construção do protótipo de uma nova regra e sua dinâmica. São eles: a) as chamadas tendências de vizinhança possibilitam a simulação do processo de expansão

nas proximidades das preexistências, replicando o padrão formal de núcleos de tamanho maior; b) as chamadas tendências difusas possibilitam a simulação do surgimento de novos núcleos periféricos, replicando o padrão formal de núcleos menores nas bordas da cidade; c) a retroalimentação das máscaras possibilita que os novos núcleos se insiram no processo dinâmico, podendo vir a ser expandidos nas suas vizinhanças; d) o parâmetro raio de repulsa possibilita simular a segregação socioespacial.

- As baixas proporções de concordância celular, com os dois métodos utilizados, não permitem legitimar os procedimentos para simulação de padrões locacionais. Especificidades ou contingências da propriedade do solo, que possam contribuir para a alocação de estoques construídos e para a formação de periferias em determinados locais (tais como dívidas, falências, heranças, especulações, parcelamento do solo, condicionantes legais), são de baixa previsibilidade no fenômeno urbano e de difícil inclusão como *input* de um modelo em CA.
- O parâmetro *decay* permite a simulação do enfraquecimento da tendência de expansão exercida pelas periferias preexistentes com o aumento da distância. A variação da constante de depreciação conforme o afastamento não foi testada nos estudos, sendo indicada para continuidade dos trabalhos, testando-a segundo o tipo de periferia, a variável envolvida e o tamanho da célula.
- A parametrização do percentual de tecido urbano ocupado pelos núcleos periféricos se constitui em um parâmetro determinístico para a conversão de solo urbano em periferia. Para simulações de futuro, o parâmetro permite a criação de cenários de aumento, diminuição ou manutenção dos percentuais da máscara de *input*, mas não possibilita a criação de um cenário de livre dependência das variáveis.
- A hipótese de associação dos tipos periféricos com as características do ambiente natural, ainda que não apareça diretamente nas equações formuladas para a regra protótipo, está presente indiretamente no processo de simulação do crescimento urbano, através do cálculo das tensões difusas de tipo 1 e 2. A presença indireta pode estar associada ao fato dos condicionantes naturais possuírem menor relevância em relação aos fatores intrínsecos à realidade urbana para as decisões sobre a produção do tecido das cidades da região sul do Rio Grande do Sul, principalmente no que tange a expansão dos núcleos.
- O uso de medidas de manchas possibilita melhoria na avaliação dos resultados, no que tange à descrição das formas dos arranjos celulares simulados, sendo uma contribuição para os estudos com o modelo do *CityCell*.

- Os resultados gráficos das tendências de formação de periferias apresentam limitações de visualização, em função do tamanho da célula em relação à área de trabalho do estudo. O tamanho da área de trabalho se deve ao porte da cidade e os problemas de visualização serão majorados quanto maior for a cidade ou mais fragmentados forem seus núcleos no território do município. A desagregação em células de maior tamanho poderia melhorar a visualização, mas poderia não corresponder à escala do fenômeno estudado, diminuindo a precisão dos resultados. Sendo assim, é recomendável que na continuidade dos trabalhos sejam realizados esforços no campo da visualização gráfica.

5.7 Epílogo do Capítulo 5

No capítulo 5 foram realizados estudos de calibração do SACI e delineados experimentos que testaram a viabilidade do modelo para a modelagem e simulação do crescimento periférico urbano. Os dois estudos principais, um utilizando apenas com álgebra de mapas e outro com a inclusão das preexistências e relações de vizinhanças, foram aplicados ao caso da cidade de Pelotas, RS, com o recorte temporal entre 1985 e 2010. Os resultados encontrados mostram baixo acerto locacional nos dois estudos, mas alta proximidade de acerto formal em relação à realidade quando incluídas as periferias preexistentes e testada a hipótese de similaridade socioeconômica de vizinhança. Frente aos resultados, no próximo capítulo são retomadas as hipóteses e alguns conceitos abordados na revisão teórica, abrindo espaço para as conclusões dos estudos sobre do fenômeno do crescimento periférico urbano em cidades do sul do Rio Grande do Sul.

Capítulo 6. CONCLUSÕES

Ao longo da investigação, a temática do crescimento periférico foi estudada a partir de observações empíricas e de uma revisão teórica, com as quais se buscou contextualizar o problema e os aspectos morfológicos que caracterizam a formação das periferias urbanas para populações dos dois extremos socioeconômicos. Também foi feita revisão teórica com foco na abordagem metodológica, tratando, principalmente, sobre a técnica de autômatos celulares para modelagem urbana, abrindo caminho para apresentação do método, do delineamento experimental e do modelo implementado no *software CityCell*. A partir das bases empírica, teórica, metodológica e instrumental, foi possível realizar o estudo de caso experimental, focado no crescimento periférico e aplicado ao caso da cidade de Pelotas, RS. No estudo, apresentado no capítulo anterior, foram testadas as hipóteses de pesquisa (e as contribuições propostas para o modelo) e avaliados os resultados encontrados. Passadas as partes que compõem o desenvolvimento do trabalho, a seguir estão resgatados os objetivos, questionamentos e hipóteses levantados na introdução da dissertação, de modo a apresentar as conclusões referentes a eles, bem como as observações e questionamentos encontrados durante a investigação, as limitações e as propostas de continuidade dos estudos.

6.1 Alcance dos objetivos

A escolha da abordagem morfológica para o estudo do fenômeno do crescimento periférico considera como um pressuposto a inter-relação entre espaço e sociedade. Populações de estratos econômicos extremos, os pobres e os ricos, parecem ocupar espaços urbanos com características morfológicas próprias, aqui tratadas como padrões de forma e de localização. A captura desses padrões, relacionados à formação do tecido urbano das periferias em cidades do sul do Rio Grande do Sul, tem grande importância para o trabalho, pois, a partir deles, estão lançadas as hipóteses que norteiam a investigação e que visam responder a questão principal de pesquisa. Assim, está colocado que o objetivo principal da investigação é *identificar relações entre morfologia urbana e dinâmicas do crescimento perifé-*

rico, capturando padrões de forma e localização relativos à produção das periferias em cidades do sul do Rio Grande do Sul, considerando a integração entre aspectos da cidade e do ambiente natural.

Com a combinação das relações identificadas por observações empíricas no Capítulo 1 e daquelas oriundas da revisão de literatura no Capítulo 2, foi possível elencar padrões, que reforçam as hipóteses traçadas e testadas pelo modelo de CA com o caso da cidade de Pelotas. Os resultados encontrados para o estudo de caso demonstram alta proximidade de acerto na replicação formal das periferias urbanas em ambiente computacional, todavia com baixo acerto locacional. Sendo assim, conclui-se que as relações identificadas não foram suficientes e o objetivo geral foi atendido parcialmente.

Os objetivos específicos podem ser entendidos como desdobramentos teóricos, metodológicos e empíricos do objetivo principal. Dois desses três objetivos foram atingidos ao longo do desenvolvimento do trabalho: 1) *desenvolver um processo ou instrumento novo no campo da modelagem urbana, através de autômatos celulares, dedicado ao caso da formação de periferias, considerando características de vizinhanças e do ambiente natural*; 2) *simular o fenômeno do crescimento periférico em uma cidade de médio porte do sul do estado do Rio Grande do Sul*. O outro objetivo específico - *construir interpretação teórica sobre o crescimento periférico urbano, com ênfase nas cidades do sul brasileiro, contribuindo para o avanço na área de estudos da morfologia urbana* - de cunho teórico, teve alcance a partir das observações e das conclusões parciais da revisão sobre o fenômeno e do estudo de caso, sendo sintetizado no item a seguir.

6.2 Validade das hipóteses e resposta aos questionamentos

Relacionadas aos objetivos geral e específicos da investigação, no Capítulo 1 foram elaboradas quatro perguntas. Todas elas possuem como respostas provisórias hipóteses de pesquisa, lançadas a partir do que fora possível observar empiricamente sobre o fenômeno do crescimento periférico nas cidades do sul do Rio Grande do Sul. Também a partir do conhecimento prévio de possibilidades de abordagem, as quais podem ser entendidas como premissas metodológicas associadas às hipóteses. No decorrer do desenvolvimento do trabalho, revisões baseadas em bibliografia foram efetuadas, dados foram levantados e sistematizados, hipóteses foram testadas e novas observações foram realizadas. Tudo isso possibilitou reformular as respostas e concluir sobre os questionamentos propostos. Na sequência, estão reapresentadas as perguntas de pesquisa, acompanhadas de avaliação sobre a validade das hipóteses lançadas e de conclusões possíveis a partir dos resultados encontrados no trabalho.

1) Conclusões que visam responder a Questão principal

Quais padrões espaciais de forma e localização na estrutura urbana estão associados às periferias no processo de crescimento urbano das cidades do sul do Rio Grande do Sul?

Para nortear a busca pela resposta da principal pergunta da investigação e atender ao objetivo geral da pesquisa, foi formulada a hipótese que versa que *os padrões espaciais de forma e localização das periferias urbanas estão associadas à concentração de facilidades urbanas, concentração de estoques construídos, características do ambiente natural e relações de vizinhança*. Evidências empíricas e bibliográficas, apresentadas principalmente ao longo do Capítulo 2, sustentam essa hipótese, apontando características morfológicas dos tipos periféricos que são recorrentes não somente para as cidades do sul do Rio Grande do Sul, como também para cidades de outras regiões brasileiras e de outras partes do planeta.

Como foi visto com o estudo de caso, alguns dos padrões emergentes do processo dinâmico de crescimento urbano e relativos à produção de periferias, lançados como hipóteses e análogos às variáveis dos cálculos propostos, não geraram resultados positivos quando avaliados pelos descritores escolhidos. Foi o caso, principalmente, das características do ambiente natural, cuja variável no *CityCell* é associada à resistência que a natureza oferece à urbanização e obtida através da descrição física desse ambiente no *input* do modelo.

No modelo SACI (Polidori, 2004), assim como no *CityCell*, as resistências do ambiente natural aparecem como a variável que representa um campo de irregularidades que, conjuntamente com condicionantes urbanos e institucionais, interfere nas dinâmicas do crescimento urbano. As resistências naturais, além servir para simular as dificuldades impostas ao crescimento urbano, são usadas para o cálculo do sorteio probabilístico das tensões difusas dos tipos 1 e 2, as quais estão associadas com a formação dos núcleos para populações de alta e baixa renda. Essa lógica de cálculo foi mantida, entendendo que, para a simulação do crescimento urbano genérico, houve validação do modelo proposto por Polidori.

Além do cálculo das tensões difusas, a variável de resistências do ambiente natural também foi utilizada nos estudos com álgebras de mapas apresentados aqui. As álgebras de que utilizaram essa variável foram aquelas que apresentaram os resultados com menor acerto, quando comparados com a realidade. Isso leva a especular duas possíveis conclusões: 1) a maneira com que o ambiente natural é descrito no *software* não é capaz de exprimir as características desse ambiente que sejam relevantes para a modelagem do fenômeno estudado; 2) as características do ambiente natural são um padrão de

menor importância para o processo dinâmico de formação de periferias nas cidades do sul do Rio Grande do Sul.

Possivelmente as duas conclusões são verdadeiras. No *CityCell* o ambiente natural é descrito pela desagregação dos elementos da natureza que o compõem: cursos d'água, banhados, matas, dunas, campos, entre outros, com pesos conforme sua maior propensão de restringir ou dificultar a urbanização (ou atrair, se for o caso). Porém, a característica apontada como diferenciadora dos núcleos de periferização e urbanizações fechadas depende também de "externalidades" que qualifiquem os locais de maior restrição. Seria importante, portanto, que, no *input* do modelo, o ambiente natural tivesse sido descrito qualitativamente pelo seu estado de degradação ou não, além do oferecimento de maior ou menor restrição à formação de tecido urbano.

Ao mesmo tempo, quando observada a localização das periferias preexistentes no caso da cidade de Pelotas (usadas na descrição das máscaras para a regra TCP), tanto de baixa renda quanto de alta renda, algumas não parecem estar relacionadas com características da natureza. No caso da periferização, são encontrados núcleos, aparentemente de formação espontânea, que aparecem em enclaves da cidade e parecem estar associados a restrições oferecidas pelo próprio ambiente já urbanizado, tais como leitos ferroviários abandonados. Também há periferização em conjuntos e loteamentos de interesse social, produzidos formalmente sem a consideração de restrições do ambiente natural ou urbano, mas sim em virtude do possível baixo interesse econômico da área para a alta renda. Quanto aos núcleos de alta renda preexistentes, alguns aparentam estar relacionados a maior valorização de determinadas áreas urbanas que um dia foram localizações periféricas, diferenciadas talvez em função de facilidades de acesso. Há também a possibilidade de serem áreas que sofreram recontextualização, não tendo sido urbanizadas originalmente para alta renda, mas ocupadas pelos mais ricos em seu movimento do centro para as periferias, antes do recorte inicial para o estudo de caso, o ano de 1985.

A associação das periferias com características do ambiente natural aparece em diversas evidências, teóricas ou observadas empiricamente. Conquanto, para o caso estudado, sua importância enquanto padrão aparenta ser menor, visto que são encontrados núcleos cujas formações parecem depender muito mais de características restritoras e qualificadoras do meio urbanizado. Além disso, após o surgimento inicial de um núcleo periférico, sua expansão também parece ser dependente de uma característica do meio urbano: o próprio núcleo periférico. Ou seja, o surgimento de uma periferia ressoa em seu entorno, na sua vizinhança, de modo a gerar um *feedback* positivo para a emergência de expansões com características morfológicas similares (bem como um *feedback* negativo para a formação de núcleos com características díspares). Periferizações tendem a apresentar como caracte-

rísticas a carência de facilidades urbanas e uma maior concentração de estoques construídos. Urbanizações fechadas tendem a ter maior concentração de facilidades urbanas, mas menor densidade de construções. Esses padrões compõem a hipótese para a Questão 3, como será visto mais adiante.

Os experimentos realizados, utilizando os padrões propostos na hipótese, não conseguiram replicar satisfatoriamente a localização dos dois tipos periféricos no caso estudado, todavia conseguiram obter ótimo acerto formal, que pôde ser verificado através das medidas de manchas. Os arranjos de formas observados no cenário de controle, e que conseguiram ser simulados pela regra TCP, também podem se constituir como padrões ou tipos morfológicos emergentes das periferias urbanas das cidades do sul do Rio Grande do Sul. Urbanizações fechadas parecem possuir dois principais tipos formais: 1) pequenos núcleos, possivelmente oriundos da exploração de pequenas glebas em áreas valorizadas da cidade; 2) grandes núcleos com forma compacta, por vezes formados pelo agrupamento de mais de um loteamento com características socioeconômicas similares. Periferizações tendem a apresentar três principais tipos formais: 1) pequenos núcleos, possivelmente formados por ocupação espontânea, podendo ser um núcleo encravado em área residual do tecido urbano consolidado, ou a origem de uma nova nucleação nas bordas entre a cidade e o ambiente natural ou rural; 2) grandes núcleos de formato linear, alongados, também possivelmente gerados por ocupações espontâneas e associados a características urbanas do espaço ocupado (como a linearidade de leitos abandonados de ferrovias, margens de canais de drenagens, ou ainda em função das dimensões do parcelamento do solo de um terreno ocioso) ou naturais (margem de rios, lagoas e similares); 3) grandes núcleos com forma compacta, possivelmente formados por expansão de assentamentos espontâneos localizados nas bordas da cidade ou quando são oriundos de conjuntos e loteamentos de interesse social.

2) Conclusões que visam responder a Questão 1

Como abordar o fenômeno do crescimento periférico, a partir dos padrões de forma e localização, de modo a permitir a compreensão da dinâmica socioespacial das periferias urbanas?

A hipótese formulada como resposta provisória para essa pergunta aponta que *o crescimento periférico ocorre nas bordas de interface entre a cidade e o ambiente não urbanizado e, sendo assim, o fenômeno pode ser abordado através sua morfologia (seus padrões de forma e localização das periferias) e considerando integradamente aspectos urbanos e elementos da paisagem natural, e suas inter-relações*. Os padrões de forma e localização das periferias foram percorridos ao longo da dissertação, iniciando com as observações empíricas (que auxiliaram na construção das hipóteses), passando pela

revisão teórica e aparecendo na construção do método, na realização do estudo de caso e na avaliação por descritores desses dois tipos de padrões morfológicos. Também a abordagem não isotrópica, integrando características da cidade e da natureza, foi seguida ao longo do trabalho e considerada essencial para os resultados alcançados, permitindo validar essa hipótese. Entretanto, com relação a delimitação espacial do fenômeno, com base no que foi concluído para a questão anterior, é possível reescrever a resposta, sem invalidá-la.

As cidades, quando crescem, tendem a expandir sua área urbanizada, para além de suas bordas exteriores da cidade consolidada, com formação de novas urbanizações contíguas ou dispersas, consumindo dinamicamente solo natural ou rural. Todavia a formação de periferias, de baixa e alta renda, pode ocorrer em vazios residuais dentro da cidade consolidada, como fora antecipado na definição do recorte espacial, no item 1.2 da dissertação. O crescimento periférico é um fenômeno que ocorre não somente nas bordas externas entre cidade e natureza, mas também pode ocorrer nas bordas internas entre a cidade e seus vazios. Sendo assim, a resposta para essa Questão 1 pode ser reescrita da seguinte maneira: *o crescimento periférico ocorre nas bordas internas de interface entre a cidade seus vazios e nas bordas externas de interface entre a cidade e o ambiente natural (ou rural), sendo um fenômeno que pode ser abordado através sua morfologia (seus padrões de forma e localização das periferias) e considerando integradamente aspectos urbanos e elementos da paisagem natural, e suas inter-relações.*

3) Conclusões que visam responder a Questão 2

Como capturar e simular a formação de periferias urbanas em ambiente computacional?

Essa pergunta está relacionada às duas questões anteriores e também com a abordagem metodológica do estudo. Na primeira parte da sua hipótese, estão apresentados os padrões listados na hipótese da questão principal, desagregados e detalhados para os dois tipos de periferias estudados, lançando que *a formação de periferias urbanas pode ser capturada e simulada considerando que: a) periferias de baixa renda estão relacionadas à rarefação de facilidades urbanas, maiores densidades construídas, maiores restrições do ambiente natural à urbanização e exercem atração para similaridade de vizinhança; b) periferias de alta renda também estão associadas à atração para vizinhanças similares, mas possuem repulsa às vizinhanças de baixa renda, ocorrem em áreas com menores restrições de conversão do ambiente natural, menores densidades construídas e com melhor dotação de facilidades urbanas (embora em menor concentração que os centros das cidades).*

As características morfológicas que compõem essa hipótese encontram sustentação nas bases bibliográficas percorridas nos capítulos iniciais. O ambiente natural tem sua importância para a replicação dos processos de difusão do tecido urbano, inseridos no contexto atual de fragmentação da cidade contemporânea. Por outro lado, nos resultados encontrados para o estudo de caso, sintetizados nas conclusões para a principal pergunta de pesquisa, foi visto que as características do ambiente natural aparentam possuir menor relevância para a captura das periferias e para o processo dinâmico de crescimento delas na região sul do Rio Grande do Sul.

A concentração ou rarefação de facilidades urbanas e as maiores ou menores densidades de estoques construídos, análogas respectivamente às medidas de centralidades celulares e carregamentos urbanos, se mostraram como variáveis importantes tanto para modelagem do crescimento urbano quanto para captura e simulação da dinâmica do crescimento periférico. A combinação dessas duas variáveis, que caracterizam morfológicamente o ambiente urbanizado, apresentaram melhores resultados para identificação de periferias na estrutura urbana. Embora o baixo acerto na localização exata das células, permitiram observar que a dinâmica de formação das periferias aparenta se dar de duas formas distintas: 1) por difusão, nas bordas da cidade; 2) por vizinhanças, no entorno de preexistências.

A emergência de núcleos periféricos por difusão está relacionada às possibilidades de inovação na produção da cidade, como também às possibilidades de descontinuidade espacial por fragmentação do tecido urbano, se aproximando o modelo da realidade observada atualmente, principalmente nas cidades de porte médio e grande. Já a formação por vizinhanças está relacionada aos círculos de *feedback* característicos de sistemas complexos e auto-organizados, e são exercidos, no caso, pelas periferias preexistentes.

Os núcleos de periferização e urbanizações fechadas preexistentes exercem *feedback* positivo para núcleos com mesmas características socioeconômicas e *feedback* negativo para aqueles com características opostas. Esse item da hipótese é chamado de similaridade socioeconômica de vizinhança e está relacionada com a segregação socioespacial existente nas cidades brasileiras. A inclusão das preexistências nas rotinas de modelagem e da formação por vizinhanças, através da regra TCP, trouxe melhora nos resultados encontrados, aproximando a simulação da realidade, no que tange a estrutura formal.

Todavia, as instabilidades espaciais, entre o crescimento mais lento intraurbano e mais rápido nas bordas das cidades, dificultam a predição da alocação de estoques construídos (Polidori, 2004). Essa difícil previsibilidade é outro fator que auxilia na diminuição das chances de acerto locacional, principalmente para a simulação da dinâmica de formação de núcleos de periferização, que usa a vari-

ável carregamentos urbanos como indicadora das tendências de conversão do solo para esse tipo periférico. Assim, é entendido que a hipótese formulada para a Questão 3 está validada parcialmente.

Além das características morfológicas, a resposta provisória para essa pergunta de pesquisa traz, complementarmente à sua hipótese, a premissa metodológica da técnica utilizada para o desenvolvimento do trabalho: *é utilizada a técnica de autômatos celulares, que é baseada nas relações de vizinhança celular e permite a modelagem e simulação de processos dinâmicos, como o caso do fenômeno do crescimento periférico*. A técnica de CA tem sido amplamente usada para estudos morfológicos sobre fenômenos dinâmicos em sistemas complexos e auto-organizados, como o caso das cidades. As simulações resultantes de modelos com CA tendem a ter maior acerto em sua estrutura formal e menor acerto na localização, quando comparados com a realidade (Pascual *et al.*, 2011). No desenvolvimento do trabalho, o *CityCell* e as rotinas dedicadas ao caso do crescimento periférico urbano se mostraram capazes de simular o fenômeno, encontrando realmente melhores resultados na replicação das formas das periferias e menor previsibilidade para o acerto locacional delas. Dessa maneira, a premissa metodológica é válida e indicada para estudos sobre a formação de periferias, todavia com a indicação da necessidade de avanços que possam contribuir para a melhoria no acerto da localização espacial.

4) Conclusões que visam responder a Questão 3

É possível explicar o crescimento periférico a partir das localização e arranjos formais das periferias urbanas em cenários de futuro para as cidades do extremo sul do Brasil?

A Questão 3 está relacionada com um desdobramento empírico dos objetivos da investigação. Implicitamente, também com o desdobramento metodológico, enquanto possibilidades de aplicação instrumental, ainda que especulativa, do modelo dedicado ao crescimento periférico para o planejamento urbano das cidades da região estudada. Sua hipótese mantém a coerência com as hipóteses anteriores e também traz associada uma premissa metodológica, a saber: *a localização e a forma das periferias urbanas podem ser explicadas a partir da concentração de facilidades urbanas, da concentração de estoques construídos, de características do ambiente natural que restrinjam a urbanização e de suas relações de similaridade de vizinhança; e podem ser mensuradas com uso de modelagem urbana e SIG, bem como por descritores de sua morfologia*.

As conclusões para as questões anteriores abordaram explicações sobre a validade e relevância das características do ambiente natural e das características do ambiente urbano, relacionadas às

concentrações de facilidades urbanas e densidades de estoques construídos. Também abordaram a importância das relações de vizinhança para o entendimento e para a modelagem do crescimento periférico em cidades da região estudada. Esses quatro fatores, com menor ou maior relevância, fazem parte das rotinas do *CityCell*, dedicadas ao crescimento urbano (com a regra *threshold potential*) e ao crescimento periférico (com a regra TCP), e permitiram modelar o fenômeno com alto índice de acerto formal. Conquanto, como já visto, os resultados encontrados nos estudos mostraram baixa proporção de concordância celular entre as simulações e a realidade, não invalidando as hipóteses, mas sem legitimar os procedimentos de modelagem para explicação locacional do fenômeno.

É importante salientar que modelos urbanos que simulam comportamentos complexos, emergentes e de auto-organização não são indicados para fazer previsões, mas sim para informar e auxiliar a aumentar o conhecimento sobre os mecanismos e comportamentos relacionados aos sistemas (Sobreira, 2003). Dessa maneira, também devido aos resultados, não é aconselhável a aplicação dos procedimentos propostos para estudos com cenários de futuro, caso haja interesse na previsão de locais onde poderá haver conversão de solo para formação de núcleos periféricos. Entretanto, há potencial para uso especulativo em estudos teóricos sobre as formas dos dois tipos de periferias ou para um planejamento urbano que busque considerar a estrutura formal deles na concepção da cidade do amanhã.

6.3 Outras observações registradas durante a investigação

Durante o desenvolvimento do trabalho, diversas observações não programadas foram realizadas. Elas se formaram no enfrentamento da temática do crescimento periférico, diante do contexto local, da abordagem teórica e metodológica e da construção do modelo e dos resultados obtidos com as simulações. Algumas dessas observações, tais como a descrição do ambiente natural no *CityCell* e a relevância das características desse ambiente para a dinâmica da formação de periferias, entendidas como conclusões da pesquisa, já foram apresentadas nos itens anteriores. A seguir, então, estão apresentadas aquelas observações que também são entendidas como conclusões, mas não estão inseridas nas respostas às quatro perguntas de pesquisa.

a) Sobre o crescimento espacial e populacional das cidades

No início do trabalho foi abordado o crescimento espacial das cidades, mostrando dados censitários sobre a região sul do Rio Grande do Sul, onde está sendo percebida uma diminuição populacional em

diversos municípios. Na literatura urbana existe um fenômeno chamado *shrinking cities* (cidades em encolhimento), relativo às cidades que sofrem decréscimo populacional, podendo estar associadas a perda de população de centros urbanos e consequente suburbanização pela formação de nucleações periféricas (Peres, 2010). Trata-se de um fenômeno que tem sido percebido nos últimos 60 anos, principalmente na Europa Ocidental e Estados Unidos e, com mais ênfase desde os anos 1990, também em outras regiões do planeta, como o leste europeu, Japão e África do Sul (Oswalt, 2006). Poderiam ser chamadas de *shrinking cities* algumas cidades do sul do Rio Grande do Sul?

Por exemplo, nos municípios de Cristal e São José do Norte houve diminuição do percentual de população urbana, mas a quantidade absoluta de habitantes aumentou nos últimos 10 anos, podendo indicar uma descentralização das sedes dos municípios, com fragmentação em novos núcleos ou aumento de algum núcleo rural. O caso de Candiota parece ser o que mais se aproxima da definição de *shrinking city*, com diminuição da população municipal e também urbana. Por outro lado, Candiota apresenta uma das maiores taxas de crescimento do número de domicílios na região. Além disso, é um município com uma morfologia urbana peculiar, polinucleada, apresentando vários núcleos de porte semelhante e sendo apenas um deles considerado núcleo urbano. Todavia, em grande parte da região, conforme apresentado no item 2.1 do Capítulo 2, houve diminuição na população municipal (tabela 2.2), mas aumento da população urbana (tabela 2.3) no período entre censos de 2000 e 2010, podendo indicar uma dinâmica de migração campo-cidade, em um movimento contrário ao fenômeno de encolhimento.

Sendo assim, aparentemente a região não apresenta ainda o fenômeno das *shrinking cities*. Havendo manutenção da queda na taxa de crescimento populacional, com decréscimo tanto municipal quanto urbano, talvez possa se perceber o encolhimento das cidades da região em cenários de futuro para médio e longo prazos.

b) Sobre os portes das cidades, o padrão centro-periferia e o movimento das elites para as periferias

Nas observações empíricas (item 1.2), através de mapas de renda média dos setores censitários de algumas cidades da região sul do Rio Grande do Sul (fig. 1.4), foi observado que, salvo pequenas diferenças na forma da cidade, elas apresentam o chamado padrão socioeconômico centro-periferia. Há concentração da população de maior renda no centro e dispersão da população de menor renda predominantemente nas bordas periféricas da cidade, lembrando o modelo de cidade concêntrica de Burgess (fig. 3.1A) ou setorizada de Hoyt (fig. 3.2A). Todavia, em Pelotas, Rio Grande e Bagé, as três maiores cidades da região, existem nucleações com população de estratos socioeconômicos superio-

res fragmentadas e distantes dos centros tradicionais (fig. 1.5), indicando o movimento das elites para as periferias (Barros, 2004), o que não foi percebido nas demais cidades.

Os fatos observados parecem indicar que esse movimento das elites para as periferias pode estar relacionado com o porte ou, em outras palavras, com o estágio de evolução das cidades, como no modelo da cidade fragmentada de Janoschka (fig. 3.3B). Cidades menores, em estágios menos avançados de evolução da estrutura urbana, aparentam não apresentar indícios de descontinuidade espacial relacionada a formação de nucleações com populações de extratos socioeconômicos superiores fragmentadas e distantes dos centros tradicionais, tendo predominância apenas de formações do tipo periferização em suas dinâmicas de crescimento periférico. Cidades maiores, em estágios mais avançados, ou aquelas em processo de evolução de estágio, parecem apresentar, em sua dinâmica de crescimento, processos de fragmentação, com formação de núcleos tanto de periferização quanto do tipo urbanizações fechadas em suas periferias.

c) Sobre as características morfológicas das periferias em Pelotas, RS

Para a montagem do *input* de máscaras do *CityCell*, para aplicação da regra TCP, foram levantados dados sobre a localização das periferias preexistentes do caso da cidade de Pelotas. Confrontando os dados socioeconômicos e locais levantados com as características do ambiente urbano e natural, puderam ser feitas algumas observações, sendo que algumas já foram relatadas na resposta à questão principal de pesquisa. De maneira sintética, para o caso de Pelotas, também foram feitas as seguintes observações:

- Existem áreas com maior densidade edificada (em função do menor grão de parcelamento do solo) que correspondem às ocupações irregulares, como também aos conjuntos habitacionais e aos loteamentos formais. Ou seja, há população de baixa renda tanto em núcleos formais quanto em informais.
- Há população de baixa renda em áreas de baixa altitude²⁸ e alagáveis, como também em áreas de médias altitudes, de melhor qualidade e menor risco.
- As ocupações irregulares parecem estar, em maioria, nas áreas baixas, enquanto os conjuntos e loteamentos estão em áreas de média altitude.

²⁸ O atributo altitudes está considerado nas observações, mas não foi considerado no *input* do modelo por dois motivos: 1) seus dados foram obtidos após os demais atributos já terem sido modelados; 2) diante das observações realizadas, e apresentadas aqui nas conclusões, parece ser um atributo de menor relevância para caracterização, diferenciação e identificação das periferias nas simulações.

- Existem ocupações irregulares que estão em áreas de maior altitude, junto ao leito de trilhos ferroviários não mais utilizados, parecendo não considerar características do ambiente natural para a sua formação.
- Populações de alta renda também são encontradas tanto em áreas baixas quanto médias, sem um padrão para o caso de Pelotas. Também são encontradas tanto nas proximidades de externalidades privilegiadas pela presença de elementos da paisagem natural, tais como praias, dunas, cursos d'água e matas, quanto em áreas distantes desses atributos naturais.

Essas observações permitem concluir que, para o caso estudado, existe a consideração das características do ambiente natural nas decisões locais dos núcleos periféricos, porém parecem possuir menor relevância que outros fatores, relacionados principalmente ao próprio ambiente urbano.

d) Sobre as centralidades celulares

A medida de centralidade, ao longo do trabalho, foi utilizada como variável para simulação da formação de periferias, tanto para populações de baixa quanto de alta renda. Núcleos de baixa renda estão associados aos menores valores de centralidades celulares e núcleos de alta renda com valores mais altos, embora, por estar localizados nas bordas periféricas e distantes dos centros, tendem a não ser os mais altos valores da medida. Sem negar a afirmação conceitual da medida, *altos valores de centralidade celular denotam áreas de convergência de interesse, movimento e valor urbano, enquanto baixos valores denotam o oposto*, apresentada no item 4.3.2, parece que, para o caso das nucleações periféricas, a convergência de interesse locacional se constitui como uma exceção. Considerando todo o conjunto de células urbanas do sistema, essa convergência parece não acontecer nos maiores valores de centralidade celular, mas em valores inferiores. Por outro lado, se forem consideradas apenas as células da borda, talvez a afirmação conceitual seja confirmada, havendo convergência nos maiores valores de centralidades celulares de borda.

e) Sobre as tensões de crescimento urbano e o predomínio polar

Na etapa de calibração das tensões e da taxa de crescimento urbano, foi verificado que a distribuição que melhor se aproximou da morfologia real, para o caso de Pelotas, entre 1985 e 2010, foi aquela com predominância polar (tab. 5.2). Isso não significa haja uma tendência de crescimento concêntrico. Também não significa que não haja crescimento axial ou difuso. É possível especular que, no recorte temporal de estudo, a área urbanizada gerada possa ter sofrido uma dinâmica de fragmentação e com-

pactação simultâneas. Em outras palavras, ao se expandir e conformar um novo tecido, descontínuo em relação ao núcleo principal, esse núcleo passa também a se expandir em seu entorno e acontece uma aproximação de ambos. Essa possibilidade especulada vai ao encontro das conclusões do estudo de Silva e Polidori (2008) para a evolução urbana de Pelotas entre 1815 e 2002, que indicam alternância de estados de maior e menor fragmentação da área urbanizada da cidade.

f) Sobre o parâmetro raios de repulsa

Como visto no item 5.4.2, tanto para o descritor de proporção de concordância celular (tab. 5.6) quanto para os descritores de manchas (tab. 5.7 e 5.8), as variações do parâmetro raio de repulsa entre os tipos periféricos apresentaram pequenas diferenças nas medidas calculadas. Entretanto, é possível verificar visualmente que os raios de repulsa geram mapas de resultados diferentes (fig. 5.41 e 5.42), com maior mistura entre tipos de periferias díspares nos menores raios e maior segregação nos maiores raios. Dessa maneira, o uso do parâmetro conduziu a replicação com maior aproximação da segregação socioespacial verificada na realidade, podendo indicar que a repulsa é um fator presente no processo de formação das periferias urbanas.

6.4 Limitações e continuidades

Durante o enfrentamento da abordagem do tema através da morfologia e modelagem urbana, com o uso de um modelo de CA e a construção de uma regra protótipo e da aplicação em um caso de uma cidade real, surgiram algumas limitações aos estudos. A superação das limitações pode ser considerada a primeira indicação de continuidade dos estudos. Algumas das principais limitações foram explicitadas nas considerações finais sobre o estudo de caso e, juntamente com outras relacionadas ao conjunto do trabalho, encontram-se sintetizadas a seguir:

a) esforços de formulação matemática, lógica algorítmica e programação computacional

Essa limitação não está inserida no contexto exclusivo da dissertação, mas no contexto da formação básica de arquitetos e urbanistas e demais pesquisadores das áreas sociais. São áreas de formação que normalmente não contemplam conhecimentos mais avançados de matemática ou mesmo conhecimentos básicos de lógica algorítmica e de programação computacional. Isso gera limitações no aprofundamento dos estudos e demanda a necessidade de acompanhamento de um profissional programador, capaz de traduzir as ideias e cálculos da pesquisa para a linguagem computacional, além do

apoio externo em matemática. São necessidades que tornam o processo de investigação trabalhoso e lento.

b) descrição do ambiente natural

Como já citado tanto nas considerações finais do estudo de caso quanto nas conclusões para as perguntas de pesquisa, a descrição do ambiente natural no *input* do *CityCell* não contribuiu para o tipo de diferenciação espacial que parece estar relacionado às relações entre periferias e natureza. Para o crescimento periférico, parece que a simples descrição física da natureza (matas, banhados, laguna etc.), ainda que use pesos para diferenciar suas capacidades restritivas, não é capaz de conferir relevância às características do ambiente natural para a lógica da dinâmica de formação de periferias urbanas. A descrição qualitativa da natureza, diferenciando o ambiente natural pelo seu estado de degradação, poderia auxiliar no desenvolvimento do trabalho. Todavia, a partir de técnicas de classificação supervisionada de imagens, a montagem de um *input* do ambiente natural com esse tipo de descrição não é simples, necessitando suporte em mapeamentos preexistentes, que não existem para Pelotas e região, ou levantamentos in loco, os quais podem ser inviáveis em função do tempo de um mesurado e do tamanho da área de trabalho.

Além das limitações impostas pelo tipo de descrição do ambiente natural no *input*, também existe incipiência quanto à representação dinâmica desse ambiente. Nas regras de crescimento usadas (Potencial de Crescimento com Limiar e Tendência de Crescimento Periférico), o modelo trata a natureza como um substrato estático, simulando apenas o consumo dele pelo crescimento urbano, sem representar processos dinâmicos que aconteçam na paisagem natural, como, por exemplo: a exploração rural; o crescimento natural em áreas de baixa exploração humana; e a recomposição de matas e dunas. Testes que explorem esses recursos de modelagem da dinâmica do ambiente natural podem ser insuficientes para auxiliar no caso do crescimento periférico, mas podem contribuir para estudos que busquem a compreensão de outros fenômenos.

c) descrição de especificidades da realidade urbana

Semelhante ao citado para a descrição do ambiente natural, parece que a descrição do ambiente urbanizado também carece de desagregação que possibilite diferenciar áreas: com maior ou menor degradação ou abandono; maior ou menor valorização do custo do solo; propriedades públicas; parcelamento do solo; condicionantes legais. O *CityCell* permite que em seus *inputs* sejam adicionados atributos urbanos restritivos ou atributos institucionais, os quais não foram testados durante o desenvolvimento da investigação e podem vir a ser incluídos em novos testes com o modelo.

d) descrição da localização das periferias preexistentes

A descrição espacial das áreas com periferias já existentes, para a montagem das máscaras para a regra TCP e sua retroalimentação, encontrou dois tipos de limitações. A primeira limitação foi encontrada no levantamento de dados para a descrição locacional das periferias para o cenário de controle do ano de 2010. Para os núcleos de periferização, foi considerado o mapeamento das AEIS (áreas de especial interesse social) do Plano Diretor do município. Já para as urbanizações fechadas não foi encontrado nenhum mapeamento oficial ou de algum estudo que os localizasse na cidade, necessitando assim usar de entrevistas para construção de um mapa específico para o trabalho, correndo o risco de haver falhas na construção desse mapa. A descrição locacional das periferizações teve origem em um zoneamento institucional e as urbanizações fechadas em conhecimento empírico, gerando dois mapas de *input* que não foram originalmente modelados em função da morfologia dos tipos periféricos. Essa origem não morfológica dos dados de *input*, quando usada para comparação com os resultados encontrados no estudo de caso, pode também estar associada ao baixo acerto locacional das simulações.

A segunda limitação aconteceu na descrição das periferias para o cenário inicial de simulação do ano de 1985. Devido a falta de dados sobre a localização de núcleos de baixa renda e, principalmente, de alta renda nessa data, amparado no conhecimento empírico de entrevistados, foi assumido que não houve recontextualização, ou seja, não houve mudança de perfil socioeconômico nas periferias durante o intervalo entre 1985 e 2010. Dessa maneira, as máscaras das preexistências do cenário inicial foram construídas apenas com a supressão das células das periferias de 2010 que eram inexistentes em 1985, também sob o risco da existência de inverdades no procedimento.

e) intensidade de tendências de urbanização periférica

As rotinas de cálculo para a simulação da dinâmica periférica, com a regra TCP, consideraram três tendências: difusa, de vizinhança e final. A difusa e a de vizinhança possuem a intenção de simular dois processos diferenciados que acontecem na dinâmica de formação de periferias, enquanto a tendência final conjuga as tendências anteriores em um único resultado. Os resultados das três tendências apresentam gradações que indicam diferentes intensidades de chances de conversão de área não urbanizada em periferia a cada iteração, as quais são perdidas quando as tendências superiores são transformadas nas máscaras que retroalimentam o sistema para a próxima iteração, gerando resultados booleanos. De modo positivo, a transformação em máscaras booleanas auxilia na validação, para a comparação com os mapas celulares também booleanos do cenário de controle e, principalmente, para o uso das medidas de manchas.

Conquanto, já que as simulações consideraram apenas a formação de periferias em novas células urbanas, os *outputs* de tendências finais (e das tendências difusas e de vizinhança), que guardam as diferenças de intensidades, apresentam valores em poucas células do sistema. Como será visto a seguir, arranjos de poucas células geram dificuldade de visualização e apresentação dos resultados. Para compensar essa limitação, foi necessário passar por etapas lentas de somas de mapas de resultados para calcular tendências acumuladas, em *ArcGIS* 9.3, de modo a melhorar a leitura visual da apresentação de resultados gráficos (fig. 5.33, 5.34, 5.35, 5.37, 5.38 e 5.39).

f) recursos de visualização

Uma das principais limitações encontradas no trabalho está relacionada com a visualização dos resultados (e do *input*) e sua apresentação enquanto plotagem no formato da dissertação. Interferem na visualização, principalmente, dois fatores: o tamanho da área de trabalho e o tamanho das células que a compõe. Quanto maior for a área de trabalho necessária para representar a cidade e natureza envolvente e menor for o tamanho das células necessárias para representar com melhor precisão o fenômeno estudado, mais difícil será a visualização de formas com poucas células no conjunto.

Na tela de um computador, o uso de ferramentas de *zoom* auxilia a visualizar todos os detalhes dos *inputs* e *outputs* gerados. Mas, para situações nas quais não há recursos de *zoom*, são necessários esforços que minimizem essa limitação, sem perda da precisão dos resultados. Já antecipando propostas de continuidade, é sugerido avançar em testes com representações tridimensionais e infografia, que podem ser auxiliados pela diferenciação de intensidade das urbanizações periféricas.

g) proporção de concordância celular

Conforme enunciado no item 4.5, sobre os descritores morfológicos usados para avaliação das simulação, a probabilidade de acerto locacional a partir do cálculo da proporção de concordância celular seria reduzida. Entre outros motivos, o descritor considera acerto apenas quando a conversão ocorre na célula exata. Porém, a partir da análise visual dos resultados simulados, foi verificado que algumas células convertidas em periferias de baixa e de alta renda não aconteceram na célula correta do cenário de controle, mas em adjacências. Diante do exposto, é entendida como uma limitação da investigação a ausência de um descritor que considere como acerto a conversão que ocorra nas células adjacentes ou em um determinado raio de vizinhança.

Segundo Barros (2004), modelos exploratórios têm potencial para gerar novas hipóteses empíricas. Novas hipóteses que podem oferecer, aos trabalhos na área, novos estudos, em prol da evolução dos modelos e da compreensão dos fenômenos da realidade que motivaram suas concepções. A

seguir estão apresentadas algumas indicações de continuidades dos estudos, sendo algumas entendidas como novas hipóteses empíricas e metodológicas para a pesquisa.

a) repetitividade e testes com outras cidades

A aplicação dos procedimentos propostos para a modelagem e simulação da produção de periferias, sintetizados na regra PGT, foram restritos ao estudo de caso com a cidade de Pelotas. É indicado que os procedimentos sejam repetidos através da aplicação em estudos de casos exploratórios para outras cidades, em especial da região estudada, com porte semelhante, como Rio Grande e Bagé. Após, aplicados em cidades de outros portes e outras regiões. Dessa maneira será possível avaliar os resultados positivos e negativos e aprimorar as conclusões teóricas sobre o fenômeno.

b) integração entre autômatos celulares e análise multicriterial

Para testar a viabilidade da descrição qualitativa do ambiente natural e do ambiente urbano, nos *inputs* do modelo, é indicada a integração da técnica de CA com a técnica de análise multicriterial. É possível que o uso da análise multicriterial, além de auxiliar a construir um *input* com atributos descritos de maneira mais relevante para o caso do crescimento periférico, possa fornecer um refinamento das hipóteses originais da pesquisa.

c) dedicação às dinâmicas de borda

Os estudos aplicados simularam as tendências de conversão do solo em tecido periférico apenas em novas células urbanas do sistema, podendo ocorrer em fragmentos descolados das manchas urbanas ou nas bordas periféricas exteriores ou internas (em vazios urbanos). Como continuidade, são indicados estudos dedicados às dinâmicas de urbanização que ocorram nas bordas periféricas, mas não somente restritas a formação de periferias de baixa e alta renda, de modo a capturar padrões relacionados a outros usos do solo como, por exemplo, a industrialização, os núcleos para rendas intermediárias e as formações rururbanas. Também estudos relacionados às medidas morfológicas, como a centralidade celular, o potencial celular, os carregamentos urbanos e as relações deles com as resistências do ambiente natural adjacente.

d) dinâmica morfológica intraurbana

Como explicitado anteriormente, o modelo foi parametrizado para a conversão apenas nas novas células urbanas surgidas a cada iteração. Dessa maneira, os estudos não consideraram as possibilidades de surgimento de áreas com predominância de população de baixa renda ou de alta renda no tecido

consolidado. Ou seja, é considerado que os núcleos são concebidos com um padrão socioeconômico e que ele não é alterado com o passar do tempo, assemelhando-se ao fenômeno chamado de consolidação.

As dinâmicas intraurbanas de alteração do padrão socioeconômico de determinadas áreas são chamadas por Barros (2004) de recontextualização e podem acontecer por gentrificação (valorização urbana com expulsão da população de baixa renda) ou decadência (abandono de áreas pelas populações mais abastadas, com desvalorização urbana). A regra PGT permite que a conversão ocorra em todas as células, inclusive aquelas já urbanizadas e que não estejam classificadas como sendo algum dos tipos de periferias, podendo ser efetuados testes com essa parametrização. Todavia, para a simulação do fenômeno da recontextualização, é necessário que seja possível que um tipo de periferia possa suprimir o outro.

e) efeito de decaimento na distância

O parâmetro *decay* representa o efeito de enfraquecimento aplicado no cálculo das tendências de vizinhanças, conforme o afastamento das células em relação à preexistência. Esse parâmetro foi conceituado e lançado nas equações (equações 5.11 e 5.12), mas não foi testado para o caso de Pelotas, sendo indicados estudos com a variação dele e verificação se há alterações nos resultados gerados.

f) percentuais de tecido urbano ocupados pelos núcleos periféricos

Outro parâmetro lançado para a regra PGT é o percentual de células, em relação ao total de células urbanas, que é ocupado pelas populações de cada estrato socioeconômico. Como visto, esse parâmetro pode manter as proporções calculadas para as máscaras de *input* ou ser alterado para um percentual definido pelo usuário, de maneira determinística. Como continuidade, é indicado que sejam feitos esforços para que possa se explorar cenários livres de determinação, sendo incluída a possibilidade de não antecipar algum percentual e, assim, permitir que a conversão aconteça apenas pela combinação de variáveis adotadas.

6.5 Epílogo do Capítulo 6

O capítulo 6 encerrou a dissertação com a apresentação das conclusões finais da pesquisa, verificando o alcance dos objetivos e as respostas aos questionamentos lançados no capítulo de introdução. Também foram sistematizadas as principais observações realizadas ao longo do enfrentamento do trabalho, culminando com a apresentação das limitações encontradas e das propostas de continuidade. Do con-

teúdo apresentado ao longo da pesquisa, podem ser destacadas como principais contribuições: a revisão teórica e empírica, com abordagem morfológica, sobre as periferias nas cidades do sul do Rio Grande do Sul, principalmente para o caso de Pelotas; o desenvolvimento metodológico de procedimentos em CA que consideram as periferias preexistentes e suas vizinhanças como fatores participantes da dinâmica do crescimento periférico urbano; o uso de descritores da forma urbana, oriundos da ecologia da paisagem, aplicados para avaliação de resultados de simulações urbanas com o SACI-*CityCell*.

Mesmo que os estudos não permitam fazer previsões locacionais das formações periféricas para cenários de futuro, eles possibilitam especular sobre os arranjos formais das periferias na estrutura urbana das cidades do sul brasileiro, podendo contribuir em sistemas de tomada de decisão para o planejamento urbano. A pesquisa também tem importância para potencializar a discussão em prol da compreensão teórica sobre o fenômeno do crescimento periférico e para contribuir com o desenvolvimento de modelos urbanos com autômatos celulares. Concluída a investigação, na sequência serão mostradas as referências e os anexos do trabalho.

REFERÊNCIAS

- ABRAMO, P. **A cidade caleidoscópica**: coordenação espacial e convenção urbana: uma perspectiva heterodoxa para economia urbana. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2007.
- ABRAMO, P. **Mercado e ordem urbana**: do caos à teoria da localização residencial. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, FAPERJ, 2001.
- AGUILAR, A. G.; ESCAMILLA, I. (coord.). **Periferia urbana**: deterioro ambiental y reestructuración metropolitana. Cidade do México: Miguel Ángel Porrúa, 2009.
- ALMEIDA, C. M.; MONTEIRO, A. M. V.; CÂMARA, G. **Perspectiva histórica de modelos de dinâmicas urbanas e regionais**. In: ALMEIDA, C. M.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V. (orgs.). Geoinformação em urbanismo: cidade real x cidade virtual. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. p. 254-285.
- BARROS, J. X.. **Urban growth in latin american cities**: exploring urban dynamics through agent-based simulation. Tese (Doutorado em Urban Planning) – University of London. Londres: UCL, 2004.
- BARROS, J.; SOBREIRA, F. **City of slums**: self-organisation across scales. In: Working paper series. Paper 55. Londres: CASA, UCL, 2002. Disponível em: <<http://www.casa.ucl.ac.uk/publications/workingPaperDetail.asp?ID=55>> Acesso em: 15 nov. 2010.
- BATTY, M. **Cities and complexity**: understanding cities with cellular automata, agent-based models, and fractals. Cambridge: The MIT Press, 2005.
- BATTY, M. **Cities as complex systems**: scaling, interactions, networks, dynamics and urban morphologies. In: Working paper series. Paper 131. Londres: CASA, UCL, 2008. Disponível em: <<http://www.bartlett.ucl.ac.uk/casa/publications/working-paper-131>> Acesso em: 15 mai. 2012.
- BATTY, M. **Geoinformação em estudos urbanos e regionais**. In: ALMEIDA, C. M.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V. (orgs.). Geoinformação em urbanismo: cidade real x cidade virtual. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. p. 8-10.
- BATTY, M. **Urban modelling**: algorithms, calibrations, predictions. In: Cambridge urban & architectural studies. vol. 3. Cambridge: Cambridge University Press, 1976.
- BATTY, M. **Urban modelling**. In: KITCHIN, R.; THIRFT, N. (eds.). International encyclopedia of human geography. [s.l.: Elsevier], 2009. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.145.5025&rep=rep1&type=pdf>> Acesso em: 23 nov. 2010.
- BENENSON, I.; TORRENS, P. M. **Geosimulation**: automata-based modelling of urban phenomena. Nova York: Wiley, 2004.
- BENEVOLO, L.; MELOGRANI, C.; LONGO, T. G. **Projectar a cidade moderna**. 2ª edição. Lisboa: Presença, 1987.
- BONDUKI, N. G. **Origens da habitação social no Brasil**. In: Análise Social, vol. XXIX. [s.l.: s.n.], 1994. p. 711-732. Disponível em: <<http://www.ufpel.edu.br/faurb/prograu/documentos/artigo1-habitacaosocial.pdf>> Acesso em: 7 ago. 2010.

- BRAKARZ, J. **Ciudades para todos: la experiencia reciente en programas de mejoramiento de barrios**. Washington: Banco Interamericano de Desarrollo, 2002. Disponível em: <<http://idbdocs.iadb.org/wsdocs/getdocument.aspx?docnum=419412>> Acesso em: 31 mai. 2010.
- BUZAI, G. D. **Mapas sociales urbanos**. Buenos Aires: Lugar Editorial, 2003.
- BUZAI, G. D., MARCOS, M. **The social map of Greater Buenos Aires as empirical evidence of urban models**. In: Journal of Latin American Geography, vol. 11, n. 1, 2012, Conference of Latin Americanist Geographers. [s.l.: s.n.], 2012. p. 67-78.
- BUZAI, G. D.; ROBINSON, D. J. **Geographical Information Systems (GIS) Latin America, 1987-2010: a preliminary overview**. In: Journal of Latin America Geography, vol. 9, n. 3. Baltimore, EUA: The John Hopkins University Press, 2010. Disponível em: <http://muse.jhu.edu/journals/journal_of_latian_american_geography/v009/9.3.buzai.pdf> Acesso em: 15 out. 2010.
- CÂMARA, G. et al. **Análise espacial e geoprocessamento**. INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, SP: INPE, 2002. Disponível em: <<http://mtc-m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2004/10.07.14.45/doc/cap1-intro.pdf>> Acesso em: 30 mar. 2007.
- CARUSO, G. et al. **Spatial configurations in a periurban city: a cellular automata-based microeconomic model**. In: Regional Science and Urban Economics. N. 37. [s.l.]: Elsevier, 2008. p. 542-567. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2007.01.005>>. Acesso em 30 jul. 2012.
- CLARKE, K. C. **The limits of simplicity: toward geocomputational honesty in urban modeling**. In: ATKINSON, P. et al. (eds.). GeoDynamics. Florida: CRC Press, 2004. Disponível em: <http://ucsb.academia.edu/KeithClarke/Papers/1055043/The_limits_of_simplicity_toward_geocomputational_honesty_in_urban_modeling>. Acesso em: 05 mar. 2012.
- CONSTANTINOU, E. **Dinâmica intra-urbana: aleatoriedade e emergência de padrões espaço-temporais**. Tese (Doutorado em Planejamento Urbano e Regional) – Universidade Federal de do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: UFRGS-PROPUR, 2007.
- CZAMANSKI, D. et al. **Urban sprawl and ecosystems: can nature survive?** In: International review of environmental and resource economics. [s.l.: s.n.], 2008. p. 321-366. Disponível em: <<http://www.irere.net/journal.aspx?product=IRERE&doi=101.00000019>> Acesso em: 13 mar. 2011.
- DAVIS, M. **Planeta favela**. São Paulo: Boitempo, 2006.
- DIESTEL, R. **Graph theory**. Nova York: Springer-Verlag Heidelberg, 2005.
- DOMINGUES, Â. **(Sub)úrbios e (sub)urbanos: o mal estar das periferias ou a mistificação dos conceitos**. In: Revista da Faculdade de Letras – Geografia. I Série. Vol. X/XI. Porto, Portugal: [s.n.], 1995. p. 5-18.
- ECHENIQUE, M. (comp.). **Modelos matemáticos de la estructura espacial urbana: aplicaciones em América Latina**. Buenos Aires: SIAP, 1975.
- ENGELS, F. **A situação da classe operária na Inglaterra**. Porto, Portugal: Afrontamento, 1975.
- FERRARI, C. **Curso de planejamento municipal integrado: urbanismo**. 2ª edição. São Paulo: Livraria Pioneira, 1979.
- FORMAN, R. T. T. **Land mosaics: the ecology of landscapes and regions**. Nova Iorque; Melbourne: Cambridge University Press, 1995.
- FURTADO, B. A.; VAN DELDEN, H. **Modelagem urbana e regional com autômatos celulares e agentes: panorama teórico, aplicações e política pública**. Texto para discussão, n. 1576. [Brasília]: IPEA, 2011. Disponível em: <<http://www.ipea.gov.br/082/08201007.jsp>>. Acesso em: 23 mar. 2011.
- GARCÍA, A. M. et al. **An analysis of the effect of the stochastic component of urban cellular automata models**. In: Computer, Environment and Urban Systems. N. 35. [s.l.]: Elsevier, 2011. p. 289-296. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S019897151000102X>> Acesso em: 24 abr. 2012.

- GHENO, P. Z. **Indicador de desempenho urbano**: metodologia e perspectiva de integração. Dissertação (Mestrado em Planejamento Urbano e Regional) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: UFRGS-PROPUR, 2009.
- GRANERO, J. C.; POLIDORI, M. C. **Simulador da dinâmica espacial com representação em um ambiente SIG**. In: IV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOINFORMÁTICA. Anais GeoInfo 2002. Caxambu, MG: GeoInfo, 2002. p. 17-23. Disponível em: <www.geoinfo.info/geoinfo2002/papers/Granero.pdf>. Acesso em: 26 abr. 2010.
- GREMONINI, L.; VICENTINI, E. **Autômatos celulares**: revisão bibliográfica e exemplos de implementações. In: Revista Eletrônica Latu Sensu. Ed. 6. Ano 2008. Curitiba: UNICENTRO, 2008. Disponível em: <http://web03.unicentro.br/especializacao/Revista_Pos/Lato_Sensu.htm>. Acesso em: 15 mai. 2011.
- HARVEY, D. **The urbanization of capital**. Oxford: Blackwells, 1985.
- IBGE. **Primeiros dados do Censo 2010**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2010. Disponível em: <http://www.censo2010.ibge.gov.br/primeiros_dados_divulgados/index.php>. Acesso em: 4 jan. 2011.
- IBGE. **Primeiros resultados definitivos do Censo 2010**: população do Brasil é de 190.755.799 pessoas. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2011. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/noticia_visualiza.php?id_noticia=1866&id_pagina=1>. Acesso em: 23 jul. 2011.
- JAKOB, A. A. E. **Urban sprawl**: custos, benefícios e o futuro de um modelo de desenvolvimento do uso da terra. In: Anais do XIII Encontro da Associação Brasileira de Estudos Populacionais. Ouro Preto: [ABEP], 2002. Disponível em: <http://www.abep.org.br/usuario/GerenciaNavegacao.php?caderno_id=136&nivel=2>. Acesso em: 30 mai. 2011.
- JOHNSON, S. **De onde vêm as boas ideias**. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed., 2011.
- JOHNSON, S. **Emergência**: a vida integrada de formigas, cérebros, cidades e softwares. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed., 2003.
- KRAFTA, R. **Modelling intraurban configurational development**. In: Environment and planning B: planning and desing. Vol. 21. Londres: Pion, 1994.
- KRAFTA, R. **Numerópolis**: mapeamento do desempenho urbano. Projeto de pesquisa (Grupo de Pesquisa "Sistemas Configuracionais Urbanos") – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: UFRGS-PROPUR, 2008.
- KRAFTA, R. **Urban centrality**: a fully configurational model of a self-organizing process. In: III International Symposium on Space Syntax. Proceedings. Atlanta, EUA: [s.n.], 2001. p. 35.1-35.12.
- KRAFTA, R. **Urban configurational complexity, definition and measurement**. In: Space Syntax First International Symposium. Proceedings, Vol. I, Comparative Cities. Londres: [s.n.], 1997. p. 05.1-05.12.
- KRAFTA, R. **Urban convergence**: morphology and attraction. In: Environment and planning B: planning and desing. Vol. 23. Londres: Pion, 1997.
- LAMAS, José P. G. **Morfologia urbana e desenho da cidade**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbentian, Junta de Investigação Científica e Tecnológica, 1992.
- LI, X. **Emergence of bottom-up models as a tool for landscape simulation and planning**. In: Landscape and Urban Planning, n. 100. [Amsterdam]: Elsevier, 2011. p. 393-395. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169204610003117>>. Acesso em: 30 mai. 2011.
- LIU, Y. **Modelling urban development with geographical information systems and cellular automata**. Boca Raton, EUA: CRC Press, 2009.
- LYNCH, K. **The image of the city**. Cambridge: The MIT Press, 1960.

- MCGARIGAL, K.; MARKS, B. J. **Fragstats**: spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure. Version 2.0. [s.l.: s.n.], 1994. Disponível em: <<http://www.umass.edu/landeco/pubs/mcgarigal.marks.1995.pdf>>. Acesso em: 22 mai. 2012.
- MAHANY, A. S.; GHOLAMALIFARD, M. **Dynamic spatial modeling of urban growth through cellular automata in GIS environment**. In: UNIVERSITY OF TEHRAN. International Journal of Environmental Research. v. 1, n. 3. Teerã: IJER, 2007. p. 272-279. Disponível em: <<http://www.bioline.org.br/pdf?er07036>>. Acesso em: 5 dez. 2010.
- MAMMARELLA, R. **O estado do Rio Grande do Sul e sua região metropolitana no Censo 2010**. [Porto Alegre: Observatório das Metrôpoles, FEE, ILEA, 2011]. Disponível em: <http://web.observatoriodasmetrôpoles.net/download/DEMOGRAFIA_RGS_E_RMPA%202000_2010.pdf>. Acesso em: 2 ago. 2011.
- MARICATO, E. **Brasil, cidades**: alternativas para a crise urbana. Petrópolis, RS: Vozes, 2001.
- MEDVEDOVSKI, N. S. et al. **Áreas Especiais de Interesse Social**: a universidade como parceira na definição das políticas municipais de habitação social no contexto do PDP – Plano Diretor Participativo. Relatório do grupo de trabalho. Prefeitura Municipal de Pelotas; Universidade Federal de Pelotas: Pelotas, 2007.
- MOUDON, A. V. **Urban morphology as an emerging interdisciplinary field**. In: Urban Morphology. [s.l.: s.n.], 1997. Disponível em: <http://urbanmorphology.org/online_public/index.shtml>. Acesso em: 30 dez. 2010.
- NETTO, V. de M.; KRAFTA, R. **Segregação dinâmica**: modelagem e mensuração. In: Revista Brasileira de Estudos Urbanos 1, Vol.1, p.133-152. Campinas: ANPUR, Unicamp, 1999. Disponível em: <<http://urbanismo.org.br>>. Acesso em: 13 set. 2010.
- NORMAN, L. M. **Alternative scenario developments on the US-Mexico border**. [Washington, EUA: s.n.], 2012. Disponível em: <http://geography.wr.usgs.gov/science/us_mexicoBorder.html>. Acesso em: 28 dez. 2012.
- OSWALT, P. (ed.) **Shrinking cities**: complete works 1. [Leipzig: Aachen], 2006. Disponível em: <<http://www.shrinkingcities.com/downloads1.0.html?&L=1>>. Acesso em: 20 set. 2012.
- PASCUAL, V. et al. **Métodos de comparación de mapas simulados del crecimiento urbano con los mapas reales**. In: XII CONFIBSIG - Conferencia Iberoamericana en Sistemas de Información Geográfica, 2011, Toluca, México: Instituto Literario de la Universidad Autónoma del Estado de México, 2011.
- PENG, J. et al. **Evaluating the effectiveness of landscape metrics in quantifying spatial patterns**. In: Ecological Indicators, n. 10. [Amsterdam]: Elsevier, 2010. p. 217-223. Disponível em: <<http://crs.itb.ac.id/media/Jurnal/Refs/Draft/Printed/LandscapeMetrix/sdarticle-8.pdf>>. Acesso em: 16 mar. 2012.
- PERES, O. M. **Crescimento urbano e hidrografia**: dinâmicas morfológicas e articulação à paisagem natural. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal de Pelotas. Pelotas: UFPel-PROGRAU, 2010.
- PERLMAN, D. L.; MILDRE, J. C. **Practical ecology for planners, developers, and citizens**. Washington, EUA: Island Press., 2004.
- POLIDORI, M. C. et al. **Atualização do modelo de crescimento urbano e emergência de padrões sócio-espaciais urbanos**. Relatório de pesquisa. Universidade Federal de Pelotas. Pelotas: 2011.
- POLIDORI, M. C. **Crescimento urbano e ambiente**: um estudo exploratório sobre as transformações e o futuro da cidade. Tese (Doutorado em Ecologia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: UFRGS-PPGECO, 2004.
- POLIDORI, M. C. et al. **Crescimento urbano, formação de periferias e modelagem urbana com autômatos celulares**. In: PLURIS. Actas do 4º Congresso Luso-Brasileiro para o Planejamento Urbano, Regional, Integrado, Sustentável, paper 457. Braga, Portugal: Universidade do Minho; PLURIS, 2010. Disponível em: <http://pluris2010.civil.uminho.pt/congresso_actas_ID.html>. Acesso em: 05 dez. 2010.

- POLIDORI, M. C.; KRAFTA, R. **Simulando crescimento urbano com integração de fatores naturais, urbanos e institucionais**. In: GeoFocus (Artículos), nº 5. Madri: [s.n.], 2005. Disponível em: <http://geofocus.rediris.es/2005/Articulo9_2005.pdf> Acesso em: 21 set. 2006.
- PORTUGALI, J. **Self-organization and the city**. Berlim: Springer, 2000.
- RAMOS, F. R.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V. **Territórios digitais urbanos**. In: ALMEIDA, C. M.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V. (orgs.). Geoinformação em urbanismo: cidade real x cidade virtual. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. p. 34-53.
- REIF, B. **Modelos em la planificación de ciudades y regiones**. Madri: Instituto de Estudios de Administracion Local, 1978.
- ROLNIK, R. **Exclusão territorial e violência: o caso de São Paulo, Brasil**. In: FERNANDES, E.; VALENÇA, M. (org.). Brasil Urbano. Rio de Janeiro: Mauad Editora, 2004. p. 100-180.
- ROLNIK, R.; NAKANO, K. **As armadilhas do pacote habitacional**. São Paulo: [s.n., 2009]. Disponível em: <http://www.usp.br/srhousing/rr/docs/As_armadilhas_do_pacote_habitacional.pdf> Acesso em: 7 ago. 2010.
- ROLNIK, R.; CYMBALISTA, R.; NAKANO, K. **Solo urbano e habitação de interesse social: a questão fundiária na política habitacional e urbana do país**. [São Paulo: s.n., 2008] Disponível em: <http://www.usp.br/srhousing/rr/docs/solo_urbano_e_habitacao_de_interesse_social.pdf> Acesso em: 7 ago. 2010.
- SARAIVA, M. V. P. et al. **CityCell: Urban Growth Simulator [software]**. Pelotas: Laboratório de Urbanismo; FAUrb; UFPel, 2011.
- SHELDRAKE, R. **Morphic resonance: the nature of formative causation**. 4ª ed. Rochester, EUA: Park Street Press, [2009].
- SILVA, A. N. R. da et al. **SIG: uma plataforma para introdução de técnicas emergentes no planejamento urbano, regional e de transportes: uma ferramenta 3D para análise ambiental urbana, avaliação multicritério, redes neurais artificiais**. São Carlos, Brasil: Ed. dos Autores, 2004.
- SILVA, J. G.; POLIDORI, M. C. **Evolução urbana e parcelamento do solo em Pelotas, RS** [mídia digital]. Pelotas: UFPel-FAUrb, 2004.
- SILVA, J. G.; POLIDORI, M. C. **Evolução urbana, parcelamento do solo e fragmentação**. In: Projectare: revista de arquitetura e urbanismo, n. 2. Pelotas: PET-FAUrb-UFPel, 2008. p. 88-98.
- SOBREIRA, F. J. A. **A lógica da diversidade: complexidade e dinâmica em assentamentos espontâneos**. Tese (Doutorado em Desenvolvimento Urbano) – Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2003.
- SOBREIRA, F. J. A.; GOMES, M. **The geometry of slums: boundaries, packing and diversity**. Paper 27. Londres: CASA, UCL, 2001. Disponível em: <<http://www.casa.ucl.ac.uk/publications/workingPaperDetail.asp?ID=30>>. Acesso em: 13 nov. 2009.
- SOJA, E. W. **Geografias pós-modernas: a reafirmação do espaço na teoria social crítica**. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed., 1993.
- SOUZA, M. L. de. **ABC do desenvolvimento urbano**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2003.
- SPOSITO, E. S. **Redes e cidades**. São Paulo: Ed. UNESP, 2008.
- SPOSITO, M. E. B. **A cidade dentro da cidade: uma edge city em São José do Rio Preto**. In: Scripta Nova. Revista electrónica de Geografía y Ciencias Sociales, vol. VII, núm. 146 (045). Barcelona: Universidad de Barcelona, 2005. Disponível em: <[http://www.ub.es/geocrit/sn/sn-146\(045\).htm](http://www.ub.es/geocrit/sn/sn-146(045).htm)> Acesso em: 8 fev. 2010.
- TORRENS, P. M. **How cellular models of urban systems work** (1. theory). In: Working paper series. Paper 28. Londres: CASA, UCL, 2000. Disponível em: <<http://www.casa.ucl.ac.uk/publications/workingPaperDetail.asp?ID=28>> Acesso em: 4 nov. 2010.

- TORRENS, P. M. **Process models and next-generation geographic information technology**. In: ESRI. ArcNews online, summer 2009. [S.l.: s.n.], 2009. Disponível em: <<http://www.esri.com/news/arcnews/summer09articles/process-models.html>>. Acesso em: 21 nov. 2010.
- TORRENS, P. M. **Simulating sprawl**. In: ASSOCIATION OF AMERICAN GEOGRAPHERS. Annals of the Association of American Geographers, n. 96. [Washington: AAG], 2006. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.167.6172&rep=rep1&type=pdf>> Acesso em: 21 nov. 2010.
- TORRENS, P. M.; ALBERTI, M. **Measuring sprawl**. In: Working paper series. Paper 27. Londres: CASA, UCL, 2000. Disponível em: <<http://www.casa.ucl.ac.uk/publications/workingPaperDetail.asp?ID=27>> Acesso em: 17 nov. 2010.
- TORRES, H. da G. **Social and environmental aspects of peri-urban growth in latin american megacities**. Nova York: [United Nations Secretariat], 2007. Disponível em: <http://www.un.org/esa/population/meetings/EGM_PopDist/P10_Torres.pdf>. Acesso em: 21 fev. 2011.
- TORRES, H. da G. **Peri-urban growth in latin american megacities**. [s.l.]: [CEBRAP], 2007a. Disponível em: <http://www.un.org/esa/population/meetings/EGM_PopDist/da_Gama_Torres.pdf>. Acesso em: 17 fev. 2011.
- UN-HABITAT. **State of the world's cities 2008/2009**: harmonious cities. Londres: Earthscan, 2008. Disponível em: <<http://www.unhabitat.org/pmss/getElectronicVersion.aspx?nr=2562&alt=1>> Acesso em: 28 nov. 2010.
- UN-HABITAT. **Estado das cidades do mundo 2010/2011**: unindo o urbano dividido. Resumo e principais constatações. [Brasília]: IPEA, 2010. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/100408_cidadesdomundo_portugues.pdf> Acesso em: 31 mai. 2010.
- VAN DELDEN, H. et al. **Comparison of scale and scaling issues in integrated land-use models for policy support**. In: Agriculture, Ecosystems and Environment. [Amsterdam]: Elsevier, 2011. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167880911000892>>. Acesso em: 29 nov. 2011.
- VILLAÇA, F. **Espaço intra-urbano no Brasil**. São Paulo: Studio Nobel, FAPESP, Lincoln Institute, 2001.
- VILLAÇA, F. **Reflexões sobre as cidades brasileiras**. São Paulo: Studio Nobel, 2012.
- WEGENER, M. **Operational urban models**: state of the art. In: AMERICAN PLANNING ASSOCIATION. Journal of the American Planning Association, v. 60, n. 1. Chicago: APA, 1994. p. 17-29.
- XIE, Y.; SUN, Z. **Dynamic Urban Evolution Model based on cellular automata**. Ypsilanti, EUA: Igre, 2000.

ANEXO A: EQUAÇÕES DAS MEDIDAS DE MANCHAS

Índice da maior mancha (*largest patch index* - LPI):

$$LPI = \frac{\max_{j=1}^n (a_{ij})}{A} (100)$$

Onde:

LPI: índice da maior mancha (%)

n : número (quantidade) de manchas na paisagem da classe i

a_{ij} : área da mancha ij (m^2)

A : área total da paisagem (m^2)

Índice da maior mancha. Fonte: McGarigal e Marks (1995, p. 90).

Índice de forma da paisagem (*landscape shape index* - LSI):

$$LSI = \frac{0,25 \sum_{k=1}^m e'_{ik}}{\sqrt{A}}$$

Onde:

LSI: índice de forma da paisagem (un.)

m : número (quantidade) de classes de manchas presentes na paisagem, excluindo as bordas limites da paisagem

e'_{ik} : comprimento total de bordas na paisagem entre as manchas das classes i e k , incluindo todos os contornos e segmentos das bordas de limite da paisagem que envolvam a mancha i , independente de representar sua borda real (m)

A : área total da paisagem (m^2)

Índice de forma da paisagem. Fonte: McGarigal e Marks (1995, p. 98).

Borda total (*total edge* - TE):

$$TE = \sum_{k=1}^{m'} e_{ik}$$

Onde:

TE: borda total (m)

m' : número (quantidade) de classes de manchas presentes na paisagem, incluindo as bordas limites da paisagem

k : classes de manchas

e_{ik} : comprimento total de bordas na paisagem entre as manchas das classes i e k , incluindo segmentos de contorno da paisagem que representam os limites verdadeiros que envolvem a mancha i (m)

Borda total. Fonte: McGarigal e Marks (1995, p. 93).

Densidade da borda (*edge density* - ED):

$$ED = \frac{\sum_{k=1}^{m'} e_{ik}}{A} (10000)$$

Onde:

ED: densidade da borda (m/ha)

m' : número (quantidade) de classes de manchas presentes na paisagem, incluindo as bordas limites da paisagem

k : classes de manchas

e_{ik} : comprimento total de bordas na paisagem entre as manchas das classes i e k , incluindo segmentos de contorno da paisagem que representam os limites verdadeiros que envolvem a mancha i (m)

A : área total da paisagem (m^2)

Densidade da borda. Fonte: McGarigal e Marks (1995, p. 93).

Índice de forma média ponderado pela área (*area weighted mean shape index* - AWMSI):

$$AWMSI = \sum_{j=1}^n \left[\left(\frac{0,25p_{ij}}{\sqrt{a_{ij}}} \right) \left(\frac{a_{ij}}{\sum_{j=1}^n a_{ij}} \right) \right]$$

Onde:

AWMSI: índice de forma média ponderado pela área (un.)

n : número (quantidade) de manchas na paisagem da classe i

j : classe da mancha

a_{ij} : área da mancha ij (m^2)

p_{ij} : perímetro da mancha ij (m)

Índice de forma média ponderado pela área. Fonte: McGarigal e Marks (1995, p. 99).

Índice de média da forma (*mean shape index* - MSI):

$$MSI = \frac{\sum_{j=1}^n \left(\frac{0,25p_{ij}}{\sqrt{a_{ij}}} \right)}{n_i}$$

Onde:

MSI: índice de média da forma (un.)

n : número (quantidade) de manchas na paisagem da classe i

j : classe da mancha

a_{ij} : área da mancha ij (m^2)

p_{ij} : perímetro da mancha ij (m)

n_i : número (quantidade) de manchas na paisagem da classe i

Índice de média da forma. Fonte: McGarigal e Marks (1995, p. 98).

Índice de proximidade média (*mean proximity index* - MPI):

$$MPI = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{s=1}^n \frac{a_{ijs}}{h_{ijs}^2}}{n_i}$$

Onde:

MPI: índice de proximidade média (un.)

n : número (quantidade) de manchas na paisagem da classe i

j : classe da mancha

s : classe de mancha dentro de uma vizinhança especificada

a_{ijs} : área da mancha ijs dentro de uma vizinhança especificada da mancha ij (m^2)

h_{ijs} : distância entre a mancha ijs (localizada dentro de uma vizinhança com distância especificada para a mancha ij) e a mancha ij (m)

n_i : número (quantidade) de manchas na paisagem da classe i

Índice de proximidade média. Fonte: McGarigal e Marks (1995, p. 109).

Distância média da vizinhança mais próxima (*mean nearest neighbor distance* - MNN):

$$MNN = \frac{\sum_{j=1}^{n'} h_{ij}}{n'_i}$$

Onde:

MNN: distância média da vizinhança mais próxima (%)

n' : número (quantidade) de manchas na paisagem da classe i que têm vizinhos mais próximos

j : classe da mancha

h_{ij} : distância da mancha ij para a mancha vizinha mais próxima de mesmo tipo

n'_i : número (quantidade) de manchas na paisagem da classe i que têm vizinhos mais próximos

Distância média da vizinhança mais próxima. Fonte: McGarigal e Marks (1995, p. 109).

Tamanho médio das manchas (*mean patch size* - MPS):

$$MPS = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{n_i} \left(\frac{1}{10000} \right)$$

Onde:

MPS: tamanho médio das manchas (ha)

n : número (quantidade) de manchas na paisagem da classe i

j : classe da mancha

a_{ij} : área da mancha ij (m^2)

n_i : número (quantidade) de manchas na paisagem da classe i

Tamanho médio das manchas. Fonte: McGarigal e Marks (1995, p. 91).

Número de manchas (*number of patches* - NUMP):

$$NP = n_i$$

Onde:

NUMP: número de manchas (un.)

n_i : número (quantidade) de manchas na paisagem da classe i

Número de manchas. Fonte: McGarigal e Marks (1995, p. 91).

Coeficiente de variação do tamanho das manchas (*patch size coefficient of variance* - PSCOV):

$$PSCOV = \frac{PSSD}{MPS} (100)$$

Onde:

PSCOV: coeficiente de variação do tamanho das manchas (%)

PSSD: desvio padrão do tamanho das manchas

MPS: tamanho médio das manchas

Coeficiente de variação do tamanho das manchas. Fonte: McGarigal e Marks (1995, p. 92).

Desvio padrão do tamanho das manchas (*patch size standard deviation* - PSSD):

$$PSSD = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n \left[a_{ij} - \left(\frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{n_i} \right) \right]^2}{n_i}} \left(\frac{1}{10000} \right)$$

Onde:

PSSD: desvio padrão do tamanho das manchas (ha)

n: número (quantidade) de manchas na paisagem da classe *i*

j: classe da mancha

a_{ij}: área da mancha *ij* (m²)

n_i: número (quantidade) de manchas na paisagem da classe *i*

Desvio padrão do tamanho das manchas. Fonte: McGarigal e Marks (1995, p. 92).

ANEXO B: FLUXOGRAMA DO REGRA TCP

O fluxograma apresentado nas próximas páginas mostra a estrutura da regra de transição Tendência de Crescimento Periférico (TCP), em cinza escuro, conjuntamente com a estrutura básica do modelo SACI, implementada no *software CityCell*, em cinza claro. Dessa maneira, é possível verificar a inserção da regra no modelo através de seus dados necessários para *input*, seus parâmetros, suas rotinas de cálculo e sua relação com a regra Potencial de Crescimento com Limiar, e seus dados de *output*.

