

Crescimento urbano simulado de Torres.RS: uma ferramenta aplicada ao planejamento urbano e ambiental.

OTÁVIO M. PERES¹; MARCUS V. SARAIVA²; MAURICIO C. POLIDORI³

Universidade Federal de Pelotas- Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Rua Benjamin Constant, 1359. Sala 107. CEP. 96010-020; Pelotas-RS, Brasil. ¹otmperes@gmail.com; ²marcus.saraiva@gmail.com; ³mauricio.polidori@terra.com.br

RESUMO Sistemas de suporte a tomada de decisão que possibilitem abordagens integradas entre cidade e ambiente têm sido ferramentas essenciais para apoiar os processos de planejamento urbano contemporâneos. Este trabalho apresenta um conjunto de simulações de crescimento urbano para a cidade de Torres, Rio Grande do Sul, utilizando o modelo e software SACI – Simulador do Ambiente da Cidade, para construir cenários dinâmicos de crescimento em um horizonte temporal de 40 anos. Simulações de caráter exploratório são utilizadas de modo a identificar vetores de crescimento, simular políticas urbanas e capturar pressões sobre o ambiente natural, com o objetivo de apoiar ações de planejamento urbano atuais, que poderão desembocar em um novo Plano Diretor. O trabalho apresenta as principais ideias e o funcionamento do modelo, os experimentos realizados e as interpretações realizadas pela equipe de trabalho.

Palavras chave: modelagem urbana; crescimento urbano, planejamento urbano.

Urban Growth Simulation Torres-RS: a tool applied in urban planning.

ABSTRACT

Decisions support systems to enable integrated approaches between the city and environment has been essential tools to support the decision making processes in contemporary urban planning. This work presents a set of urban growth simulations for the city of Torres, Rio Grande do Sul, at a time horizon of 40 years, dedicated to identify growth vectors, simulate urban politics and capture urban form pressures over the environment. The work uses resources of urban growth simulation of the model and software SACI –City Environment Simulator, implemented in a GIS environment, allow-ing free inclusion of urban, environmental and institutional variables in the growth process. The results allow a series of thoughts about future urban growth morphologies, mainly associated to questions of concentration, dispersion, compression and urban fragmentation, considering assump-tions of urban form associated to natural environment preservation and socio-spatial segregation.

Keywords: urban modeling, urban growth, urban planning.

1. Introdução.

Estudos dedicados à dinâmica urbana consideram que a cidade está em permanente mudança, onde alteram-se conjuntamente a cidade e a paisagem, provocando uma modificação no conjunto que integra o que pode ser chamado de crescimento urbano. O processo de crescimento urbano é de difícil apreensão pela quantidade elevada de fatores presentes na cidade e na paisagem, suas discretas interinfluências e seus diferentes horizontes temporais, o que indica que estudos com este propósito tenham suporte a partir da teoria de sistemas, estudos de modelagem, teorias de complexidade e de auto-organização, direcionadas para as questões da cidade.

Entretanto, a tradição do planejamento do espaço urbano tem sido a de trabalhar com a separação entre a cidade e o ambiente natural, entre o espaço urbanizado e o não urbanizado, pois enquanto que a maioria dos estudos de urbanismo limita-se às áreas construídas, as abordagens do planejamento ambiental têm dificuldade para incluir a realidade e a influência da cidade (Santos, 2004). Embora as tradições das abordagens do espaço urbano sejam de manter separadas cidade e ambiente, abordagens integradas podem qualificar a compreensão da cidade e da paisagem, bem como melhorar conceitos e práticas de planejamento urbano e ambiental (Polidori, 2004). Descobrir interfaces entre os diversos campos do conhecimento para uma abordagem integrada urbana e ambiental pode ser considerada uma tarefa urgente, na busca de contribuir para problemas de qualidade de vida. (Santos, 2004), onde um caminho de se articular estudos de crescimento urbano e impactos nos recursos naturais é de reproduzir a cidade e a paisagem artificialmente, a partir da utilização de modelos que abordem a complexidade das interações urbano-ecológicas (Alberti, 1999).

Neste sentido, o objetivo do presente trabalho é explorar as possibilidades de abordar integradamente a dinâmica do crescimento urbano e a preservação dos recursos naturais, através do uso de modelos e simulações de crescimento urbano. A busca por uma abordagem integrada do ambiente urbano e natural passa necessariamente por estudos dos processos dinâmicos e por modelos que possibilitem a inclusão tanto de fatores urbanos quanto de fatores do ambiente natural, o que pode ser buscado através de modelos baseados em Autômatos Celulares – CA. O trabalho considera o modelo e software SACI – Simulador do Ambiente da Cidade, implementado em um ambiente SIG, como alternativa para operacionalização de simulações de crescimento urbano integradas a fatores do ambiente natural. Um conjunto de simulações de crescimento para a cidade de Torres, Rio Grande do Sul, Brasil, estão realizadas, para um horizonte temporal de 40 anos, dedicadas à identificar vetores de expansão, simular políticas públicas e capturar pressões da morfologia urbana sobre locais de fragilidade e interesse da paisagem natural.

2. Sistemas urbanos, morfologia e modelagem urbana.

Nos últimos 30 anos a ciências da complexidade tem se desenvolvido para fazer sentido aos mais diversos sistemas, auxiliar no desenvolvimento das mais variadas teorias e métodos, rapidamente tem ganhado espaço nos mais diversos campos da ciência (Batty, 2007). Com trajetórias em campos disciplinares distintos, tanto as ciências sociais quanto as ciências naturais tem adotado às ciências complexas para estudar fenômenos emergentes (Alberti et al., 2003). É a partir das bases conceituais da teoria de sistemas e das ciências complexas que o trabalho pretende abordar o fenômeno urbano integrado ao ambiente natural, mantendo suas bases teóricas principais na ciência sócio-espacial pretende avanços sobre as influências decorrentes da paisagem de suporte ao crescimento urbano.

Sob o quadro teórico conceitual da teoria de sistemas, contemporaneamente, eficazes sistemas de suporte a decisão são demandados para elaboração de políticas urbanas e políticas de gestão de recursos hídricos, os quais têm sido amplamente ofertados pelo aumento da popularidade dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Estes sistemas abrangem uma gama de possibilidades analíticas e preditivas que estão associadas a indicadores de desempenho, formação de bases de dados e ferramentas computacionais específicas para a resolução de determinados conflitos. Segundo Koomen et al (2007), atualmente muitos sistemas de tomada de decisões estão dedicados a mitigar os conflitos entre uso do solo urbano e sistemas de recursos hídricos, aplicados em: a) análises de conflitos; b) avaliação de impacto; c) especulação de cenários de futuro. O autor destaca a possibilidade de explorar cenários de futuro por seu caráter inovador, estar dedicado ao planejamento de longo prazo, envolver grande quantidade de agentes e somar graus de incertezas no processo de planejamento. A partir de diferentes cenários de futuro, análises comparadas têm sido realizadas por diversos autores possibilitando uma visão integrada e ampla dos impactos urbanos sobre a paisagem natural.

2.1 Modelagem do ambiente urbano baseada em autômatos celulares.

O uso de modelos para explorar questões urbanas e sugerir alternativas para o futuro das cidades tem encontrado progresso contemporaneamente. Nesse caminho, Axelrod (1997) e estudiosos associados vêm

argumentando que os modelos podem ser poderosas ferramentas para a ciência urbana, ao mesmo tempo que Batty (1998) e colaboradores têm apresentado inúmeras vantagens e possibilidades no uso de modelos para o estudo das cidades. Modelos urbanos podem ser entendidos como representações de uma determinada realidade, onde esta representação se faz através da expressão de certas características relevantes, que consistem nos objetos ou sistemas que existem, existiram ou podem vir a existir no ambiente urbano (Echenique, 1975). Aos estudos de crescimento urbano, interessam representar o processo de evolução urbana através das funções e processos que configuram a estrutura espacial urbana. Neste contexto, modelos são essenciais para articular o presente e o futuro das cidades e geralmente estão relacionados a programas computacionais, os quais atuam como espécie de laboratório e o fenômeno urbano, após ser capturado, pode ser reproduzido experimentalmente através de simulações (Batty, 2009).

No caminho da modelagem urbana sistêmica, dinâmica e integrada com o plano de suporte, autômatos celulares (CA – cellular automata) são procedimento que possibilitam a ciência urbana reproduzir as inúmeras interações espaço-temporais que ocorrem na realidade urbana. O ambiente de um CA é caracterizado espacialmente por um grid celular, onde o tempo é transcrito através de um procedimento iterativo. O estado do conjunto celular em um dado tempo é determinado por regras locais que dependem do seu próprio estado e do estado das células vizinhas. A dinâmica de um autômato celular é dada por múltiplas transições de fases, em um processo iterativo baseadas em regras locais, caracterizando um típico sistema complexo, de onde emergem padrões de autoorganização em escala global (Wolfram, 1984).

O uso de CA vem sido desenvolvido desde na década de 1940, desde os primeiros trabalhos de John von Neumann e Stanislaw Ullman, os quais estão ligados ao desenvolvimento da inteligência e da vida artificial na ciência da computação e na teoria dos jogos. Entretanto, a primeira aplicação importante de CA foi enunciada por John Conway no chamado Game of Life (Jogo da Vida), publicado por Gardner (1972) no periódico Scientific American, que de imediato interessa a comunidade científica baseada nas teorias da complexidade e auto-organização (Torrens, 2000). CA foram primeiramente aplicados às ciências físicas e naturais, em campos disciplinares onde já havia avanços teóricos sobre estudos dos sistemas enquanto comportamento complexo. Somente na década de 90 surgem os primeiros estudos aplicados às cidades e suas relações sócio-espaciais (Batty 1997).

De acordo com Wolfram (1984), um CA pode ser definido por cinco elementos básicos: a célula, o estado, a vizinhança, as regras de transição e a variável temporal. A partir de múltiplas combinações possíveis, são capazes de configurar arranjos emergentes à dinâmica do sistema. Na sequência são apresentadas definições de cada um destes elementos e suas possibilidades de replicar a realidade urbana:

a) a célula: é a unidade espacial básica do sistema. CA aplicados a simular crescimento e capturar morfologia urbana geralmente são representados por um grid bidimensional. Entretanto outros arranjos podem ser explorados, como o caso de grids lineares utilizados na modelagem de tráfego e grids tridimensionais utilizados na modelagem de voo de pássaros e dissipação de fumaça. Modelos CA tridimensionais são potenciais para modelar os estoques construídos das cidades, porém são poucos avanços nesse sentido;

b) o estado: define os atributos do sistema. Cada célula pode assumir apenas um estado em um dado tempo, o que tem sido traduzido na modelagem urbana a um tipo de uso do solo; determinada natureza de carregamento (se natural, urbano ou institucional em Polidori, 2004); ou diferentes padrões sociais. A modelagem urbana avança sobre a prática tradicional de CA com associação numérica ao estado de uma célula, possibilitando diferenciação por intensidades de carregamentos como diferentes densidades de urbanização;

c) a vizinhança: corresponde ao conjunto de células com as quais a célula em questão interage. CA clássicos baseiam-se em dois padrões de vizinhança: de von Neumann composta por 4 células, incluindo às células, norte, leste, sul e oeste; a vizinhança de Moore ampliada para um conjunto de 8 células, incluindo também as adjacentes a nordeste, sudeste, sudoeste e noroeste. Outros tipos de vizinhança são aplicadas a realidade urbana ampliando o raio de interação da célula;

d) as regras de transição: definem como e quando o estado da célula modifica-se em resposta ao estado da suas vizinhas. Trata-se de um elemento essencial no processo de modelagem, pois as regras representam

os processos do fenômeno em questão. Se dedicados a simular crescimento urbano, as regras devem traduzir a interação espacial e replicar as formas que ocorre o crescimento urbano;

e) o tempo: define a dimensão temporal do sistema, geralmente relacionada a intervalos temporais conhecidos. Simulações de crescimento urbano geralmente são traduzidas na variável anual, com horizontes que variam em torno de 50 anos. Embora tradicionais definições de CA estimem que todas as células interajam simultaneamente, avanços recentes indicam que CA podem operar com diferentes velocidades para diferentes células, o que aplicado a realidade urbana poderia replicar diferentes velocidades de crescimento em diferentes regiões da cidade.

Para Portugali (2000), a atratividade de modelos CA ao estudo das cidades é praticamente evidente, tanto pela similaridade entre as unidades espaciais, lotes, quarteirões e células, conforme figura 2.3a, bem como a convergência com os pixels possibilitados por imagens de satélite amplamente utilizadas por técnicas de sensoriamento remoto, conforme figura 2.3b. Para esse potencial de utilização de CA em estudos da geografia e do urbanismo, Portugali (2000) sugere a utilização da expressão Geografia Celular (Cellular Geography), ressalta o aumento de estudos que utilizam esse tipo de modelagem aplicada a ciência urbana, com destaque para a edição especial do periódico Environment and Planning B: Planning and Design 24, 1997, dedicada exclusivamente à aplicações de CA aos sistemas urbanos.



Figura 1: convergência CA e estudos urbanos:

a) pela semelhança entre unidades espaciais: quadra e célula (Barcelona, elaborada pelo autor); b) pixels disponibilizados em imagens de satélite (Pelotas-RS diferentes resoluções, Polidori, 2004).

Avançando sobre as múltiplas possibilidades de modelar crescimento urbano integrado com o ambiente natural, destaca-se ainda as possibilidades de diferenciação morfológica de cenários históricos (figura 2a), diferenciação de resistências espaciais (figura 2b) e análise de limiares ambientais (figura 2c); conceitos de interesse nos campos da morfologia urbana, ecologia da paisagem e ecologia urbana, respectivamente (Polidori, 2004; Peres e Polidori, 2009)

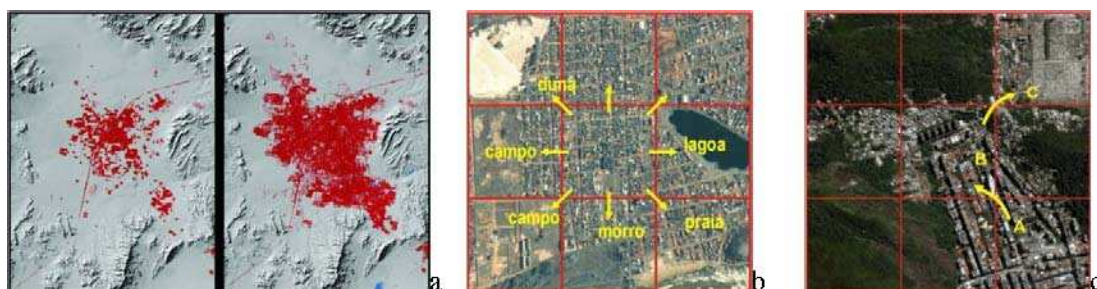


Figura 2: convergência modelagem urbana CA com análises de:

a) diferenciação morfológica (Las Vegas 1973-1992, USGS); b) resistência espacial (Torres-RS, pelo autor); c) limiares ambientais (Rio de Janeiro, pelo autor).

2.2 O Simulador do Ambiente da Cidade - SACI

Procurando avanços sobre a configuração espacial do crescimento urbano e suas relações com a paisagem natural, Polidori (2004) propõe um modelo de simulação de crescimento urbano que confronta a paisagem de oportunidades espaciais configurado pela medida de Potencial-Centralidade, com o campo de

irregularidades e restrições ao crescimento configurado por atributos do ambiente natural.

O Simulador do Ambiente da Cidade (SACI) foi construído a partir da ideia de uso conjunto de teoria de grafos, autômato celular, geotecnologias e modelagem adaptativa (respectivamente Torrens, 2000; Buzai, 1999). O uso conjunto de grafos e autômato celular permite que o modelo explore simultaneamente relações globais e locais do sistema urbano, pois enquanto CA trabalham com as relações espaciais e suas relações de vizinhança, grafos trabalham com as conexões entre diversas unidades espaciais. Da associação entre a teoria dos grafos e CA são fundamentais técnicas de representação que associem os sistemas vetorial e raster, o implica na operacionalidade a partir de recursos de SIG. Os SIG facilitam a aquisição de informações por recursos de sensoriamento remoto, possibilitam diversas formas de ingresso e armazenamento de dados, bem como viabilizam o processamento do modelo de simulação (Longley et al., 2004).

O modelo assume como base espacial um grid bidimensional regular com células quadradas de tamanho fixo, o qual pode ser arbitrado e se dará tanto a resolução para input de variáveis (entrada dos dados), quanto o nível de resolução dos outputs do modelo (obtenção dos resultados). A partir da delimitação do grid base, o modelo permite a livre inclusão de variáveis do tipo urbano, natural ou institucional, as quais podem assumir dois diferentes papéis no processo de crescimento: a) carregamentos; b) resistências. Assim, no ambiente celular do SACI cada célula representa uma espécie de caixa que carrega atributos do ambiente urbano, natural e institucional simultaneamente, conforme ilustrado na figura 3a, a seguir. A partir das ideias de crescimento desigual (Harvey, 1985) e diferenciação espacial (Krafta, 1994), um par de células com carregamento urbano (LoadU) é capaz de gerar uma tensão espacial, de forma análoga às trocas de tensões que provocam crescimento urbano (figura 3b).

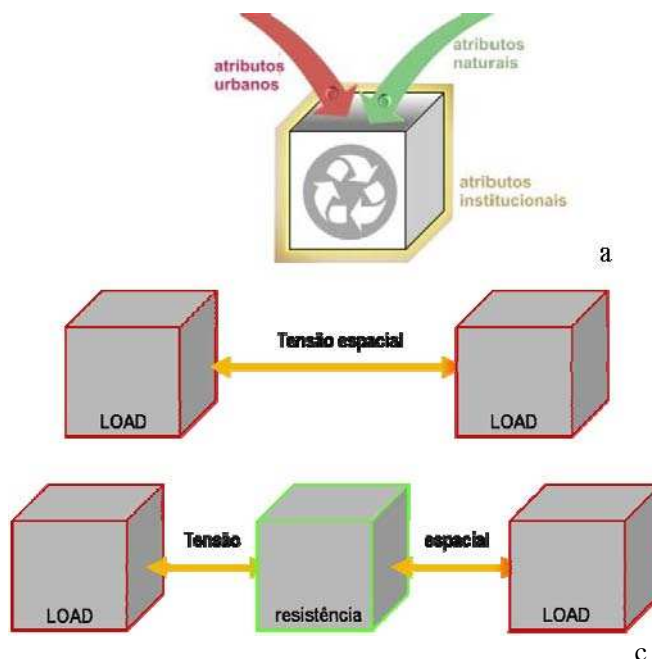


Figura 3: a) carregamento urbano e natural, simultâneos; b) tensão de crescimento; c) resistência ambiental (imagens elaboradas pelo autor).

Entretanto, no modelo o processo de troca de tensões urbanas é acrescida a ideia de resistência mínima acumulada (MCR – *minimal cumulative resistance*), originadas dos estudos de ecologia de paisagem, onde o espaço que intermedeia tensões de crescimento urbano exerce papel de restritor ao crescimento de acordo com resistência dos atributos naturais (figura 3c). No processo iterativo de simulação, os carregamentos ambientais que exercem resistência ao crescimento consomem as tensões de crescimento à medida que reduzem a sua capacidade de resistência, procedendo de forma análoga ao processo de modificação e

exploração do ambiente natural ocorrida pela ação do homem, replicando o assim o processo produção urbana e conversão do ambiente natural.

Para obtenção dos resultados e possibilitar análises espaciais, o modelo fornece uma série de resultados gráficos, numéricos e tabulares. Neste trabalho, serão apresentados basicamente dados gráficos no formato de grids, os quais estão a seguir descritos:

a) Tipo de Célula (CellType, no modelo): indica se a célula ou é ou não é urbana, de acordo com a predominância de fatores gerados pela lógica de produção espacial da cidade ou pelo nexos da natureza (fenótipo urbano ou natural, respectivamente);

b) Carregamento Urbano (LoadU, no modelo): indica a quantidade de fatores urbanos que atraem urbanização, sendo normalmente representados pelo uso do solo, tanto pela função que desempenham como por um indicador de intensidade de atividade;

c) Potencial (Potential, no modelo): representa a capacidade de transformação potencial das entidades espaciais, determinada pela diferença entre a centralidade de cada célula e a centralidade máxima das células do entorno;

d) Valor Urbano (ValueU, no modelo): representa a intensidade de fatores urbanos que incidem sobre as células, quer realizem papéis de atração ou de repulsa na dinâmica de crescimento urbano;

e) Centralidade Absoluta (CentABS, no modelo): mostra o somatório da distribuição de todos os tipos de tensões a que estão sujeitas as células a cada iteração, sem transformação escalar ou vetorial, tal como são obtidas pela interação entre os carregamentos de cada par de células geradas de tensões de crescimento;

f) Problemas Ambientais Totais (acumulados; EProbT, no modelo): referem-se aos problemas ambientais intraurbanos e são computados a cada iteração em que os limiares de urbanização são superados;

g) Resistência Natural (ResistE, no modelo): indica a intensidade de presença de fatores naturais que se opõem à urbanização, os quais precisam ser modificados para que ocorra o crescimento urbano.

3. Simulando crescimento urbano para o caso Torres [2010-2050].

3.1 Delimitação espacial, atributos espaciais e variáveis numéricas – *inputs* do modelo

O território da cidade de Torres foi delimitado por um retângulo de modo a incluir a área urbana e um entorno para expansão, resultando nas seguintes coordenadas geográficas, em UTM, para o fuso 22 sul: a) limite norte: 6.760.000; b) limite sul: 6.751.000; c) limite leste: 624.500; d) limite oeste: 615.500. A superfície é de 99 km², num retângulo de 9 km (direção norte-sul) por 11 km (direção leste-oeste), a qual foi desagregada mediante o uso de um grid regular com 45 linhas por 55 colunas, com 2.475 células quadradas de 200m, como mostra a Figura 4, a seguir.

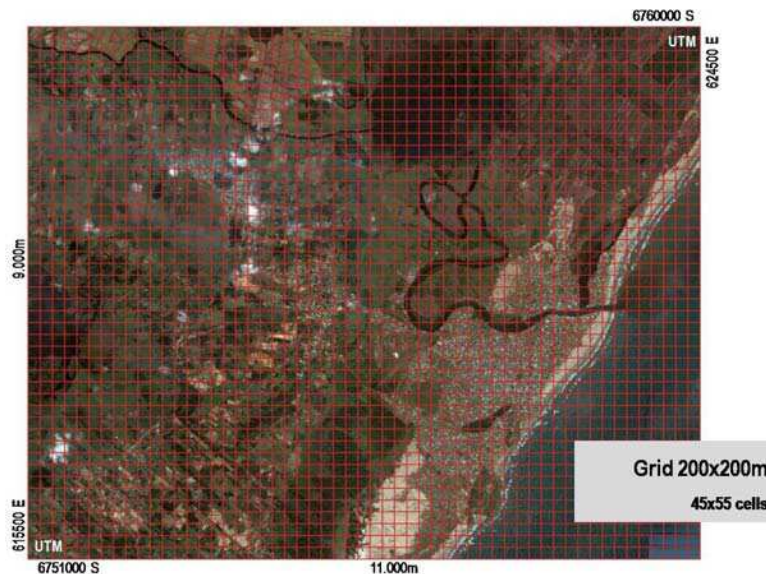


Figura 4: delimitação espacial do município de Torres-RS,
desagregação espacial em grid com células de 200m.

Para a descrição da área de estudo estão assumidos três grupos de atributos para determinar as variáveis utilizadas, considerando sua importância como condicionantes do crescimento urbano e a disponibilidade de dados:

a) atributos urbanos (figura 5, a seguir): assumidos como carregamentos que geram tensões de crescimento, estão representados na simulação pelo mapeamento de usos do solo urbano diferenciados e representados numericamente através de pesos; área efetivamente urbanizada de Torres – peso 0,5; uma área diferenciada internamente, correspondendo ao centro comercial e localidades com maiores índices construídos – peso 1,0; a área urbana de Passo de Torres.SC – peso 0,1; estra



Figura 5: atributos urbanos mapeados com pesos diferenciados.

b) atributos naturais: assumidos como resistências ao crescimento urbano, onde foram considerados os subsistemas de águas superficiais (mar, o rio Mampituba, águas lânticas e águas canalizadas), Figura 6a; de cobertura do solo (banhados, matas nativas e matas plantadas), Figura 6b; geomorfológicos (dunas, praias e altitudes), Figura 6c; está também implantado um fator aleatório

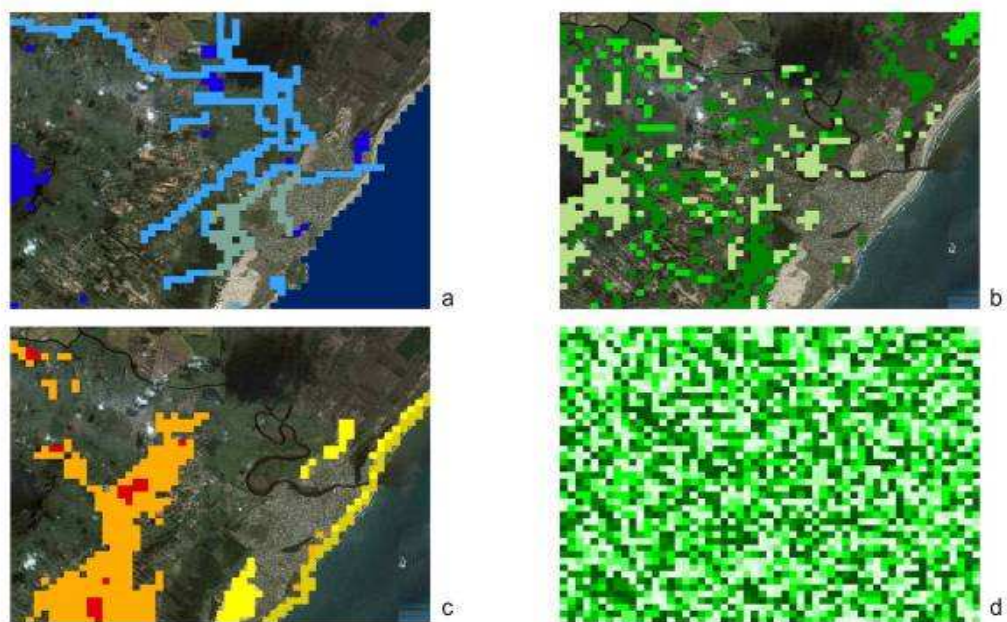


Figura 6: atributos naturais mapeados:

a) águas superficiais; b) cobertura do solo; c) geomorfologia; d) grid aleatório.

c) atributos institucionais: representados pelos mecanismos legais de preservação do ambiente assumidos como impedimentos ao crescimento urbano, referentes ao parque Itapeva e aos topos



Figura 7: Atributos institucionais mapeados:

parque Itapeva e topos dos morros, protegidos pela legislação.

O processo de calibração está realizado a partir de aproximações quantitativas e qualitativas, onde, inicialmente os resultados passam por contagem de células e verificação de taxas de crescimento; posteriormente, está feita uma análise visual e confrontação dos resultados com o conhecimento empírico da realidade local. Como os objetivos do trabalho estão relacionados à capturar vetores de crescimento, compreender a dinâmica de mudança urbana e realizar análises de diferenciação morfológica entre cenários de futuro, não são objetivos diretos das simulações cenários reais da cidade de Torres, no futuro. Neste sentido, as regulagens numéricas do modelo se limitam à velocidade de crescimento externo e aos pesos relativos dos atributos, indicados heurísticamente. Deste modo, os resultados obtidos não devem ser interpretados diretamente como preditivos para a cidade, mas sim para evidenciar nexos e relações de crescimento urbano, preservação do ambiente natural e diferenciações do crescimento interno e externo.

A taxa de crescimento foi ajustada a partir do parâmetro λ (lambda), que promove mudança exponencial na intensidade de crescimento e pode ser dirigido tanto ao crescimento interno como ao externo. As simulações foram calibradas e parametrizadas buscando a aproximação da taxa de crescimento ao valor de 2% ao ano, correspondente à média do crescimento urbano das cidades de médio porte do sul do estado do Rio Grande do Sul, onde outros experimentos vêm sendo realizados, como os casos das litorâneas do estado do Rio Grande do Sul - Pelotas, Barra do Ribeiro, São Lourenço do Sul e balneário do Hermenegildo em Santa Vitória do Palmar.

3.2 Simulações de Crescimento

A partir da delimitação espacial, definição dos atributos e calibração do modelo, estão realizadas simulações de crescimento com diferentes hipóteses de crescimento futuros. São 4 simulações com hipóteses distintas, com taxas de crescimento em torno de 2% ao ano e em um horizonte temporal de 40 anos, as quais estão descritas na sequência:

a) **Simulação 1, Crescimento Padrão (default):** simula crescimento urbano a partir dos atributos urbanos e naturais, excluindo do processo formas institucionais de proteção do ambiente natural e políticas urbanas. O resumo dos atributos e seus respectivos pesos, comportamento e categorias estão apresentados na tabela 1, a seguir.

Nome	Descrição	Categoria	Comportamento	Peso	Estado
Mar	trecho do Oceano Atlântico,	natural	resistência	1	freezing
Águas Lênticas	lagoas, lagos e espelhos d'água	natural	resistência	1	freezing
Águas Lóticas	rios, córregos sangradouros, naturais	natural	resistência	1	freezing
Canais	linhas de drenagem e rios canalizados	natural	resistência	1	mutable
Banhados	banhados e áreas alagáveis	natural	resistência	1	mutable
Matas Nativas	matas nativas e vegetação de porte	natural	resistência	1	mutable
Matas Florestadas	matas cultivadas de Eucalipto e Pinus	natural	resistência	1	mutable
Praia	linha de praia contígua ao mar	natural	resistência	1	freezing
Dunas	dunas e fragmentos de dunas	natural	resistência	1	mutable
Altitudes	altitudes em 3 classes, 2, 3 e 4	natural	resistência	1	mutable
Randômico	grid aleatório, valores entre 1 e 2	natural	resistência	1	mutable
AEU Torres	áreas urbanizadas da cidade de Torres	urbano	atração	0,5	mutable
AEU Turismo	diferenciação referente ao turismo	urbano	atração	1	mutable
AEU Passo de Torres	áreas urbana da cidade de Passo de Torres	urbano	atração	0,1	mutable
Estradas	estradas interurbanas e interestaduais	urbano	atração	0,1	mutable

Tabela 1: resumo dos atributos presentes na Simulação 1.

Essa hipótese de crescimento é entendida como a mais homogênea, onde não existem “lentes” sobre os cenários de futuro, nem incentivos e proteções institucionais sobre a dinâmica de crescimento. A partir dos resultados da Simulação 1, apresentados os outputs da área efetivamente urbanizada (Celltype) e os carregamentos urbanos (LoadU), Figura 8 na sequência, pode-se ter uma visão geral do processo de crescimento urbano, onde externamente se destaca um processo de expansão periférica da área além da BR101 (distrito São João) e internamente se destacam os carregamentos atingidos pelas áreas das praias ao Sul.

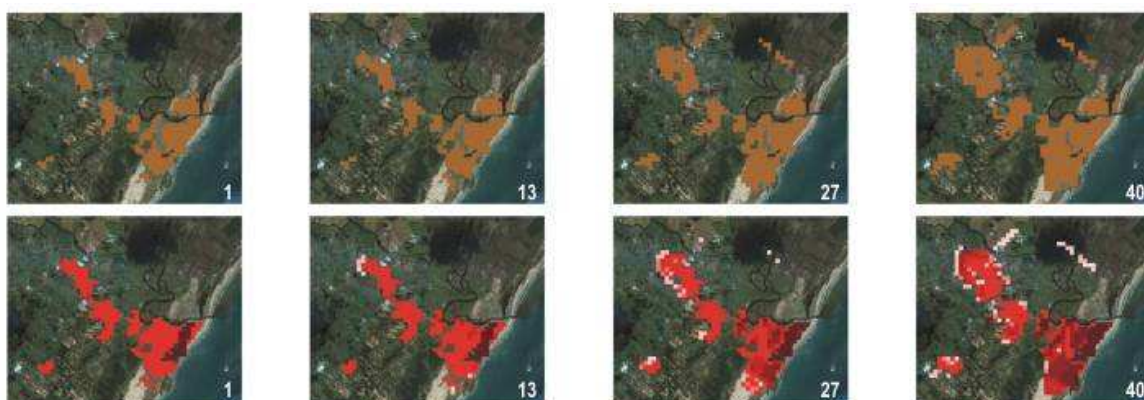


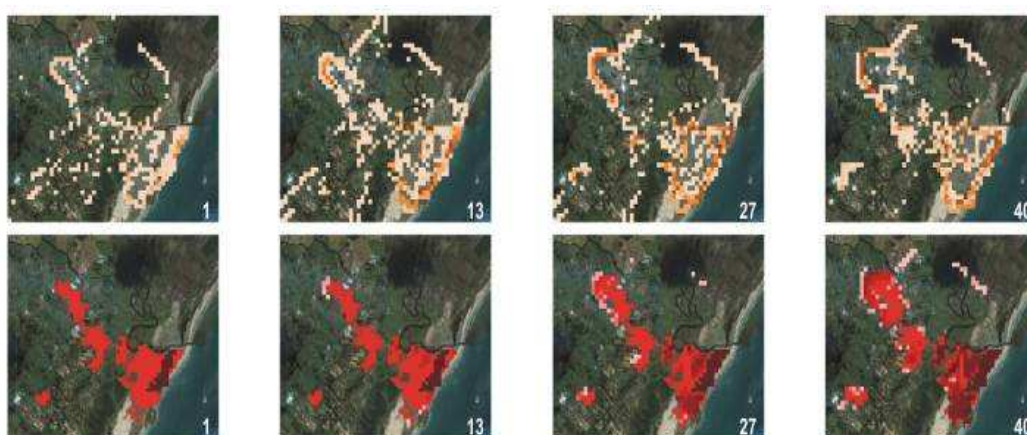
Figura 8: Celltype e LoadU da Simulação 1 para as iterações 1, 13, 27 e 40.

b) Simulação 2, Crescimento com Proteção Ambiental Legal: repete os atributos de input da Simulação 1, acrescidos das áreas de proteção ambiental institucional sobre a área do parque Itapeva e a porção dos topos dos morros, onde o crescimento urbano é impedido, conforme tabela 2. Esta hipótese de crescimento é capaz de melhor capturar as pressões sobre o ambiente natural preservado e vetores de crescimento externo.

Nome	Descrição	Categoria	Comportamento	Peso	Estado
Parque Itapeva	área de proteção ambiental do par-que Itapeva	natural	resistência	1	freezing
Topo de Morro	proteção ambiental das porções de topos de morro	natural	resistência	1	freezing

Tabela 2: atributos institucionais adicionados na Simulação 2.

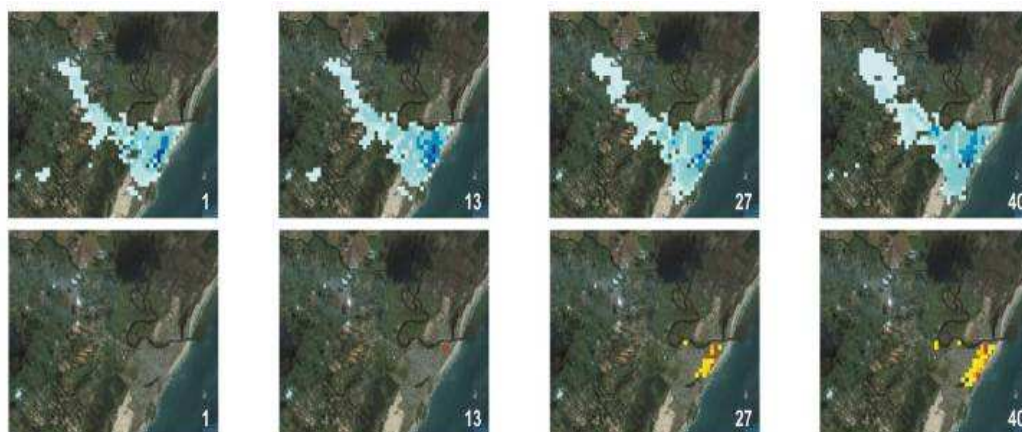
A partir dos resultados da Simulação 2, apresentados os outputs do potencial de crescimento (Potential) e os valores urbanos (ValueU), Figura 9 na seqüência, é possível identificar as áreas com maiores potenciais de mudança, mesmo sobre áreas onde o crescimento é impedido. Note-se que os potenciais tendem a se localizarem em áreas de maior contraste de intensidades de urbanização, pois o modelo SACI é capaz de capturar mecanismos econômicos de maximização dos lucros que correspondem às áreas próximas aos locais com melhores infra-estrutura, porém ainda não valorizados pelo mercado imobiliário.



c) Simulação 3, Crescimento Interno Acelerado, com limiares: simulação com crescimento interno acelerado pela diminuição do parâmetro λ (lambda) interno para 0,9. Quando atingidas altas taxas de carregamentos urbanos, o modelo registra problemas ambientais internos, o que significa que foram atingidos

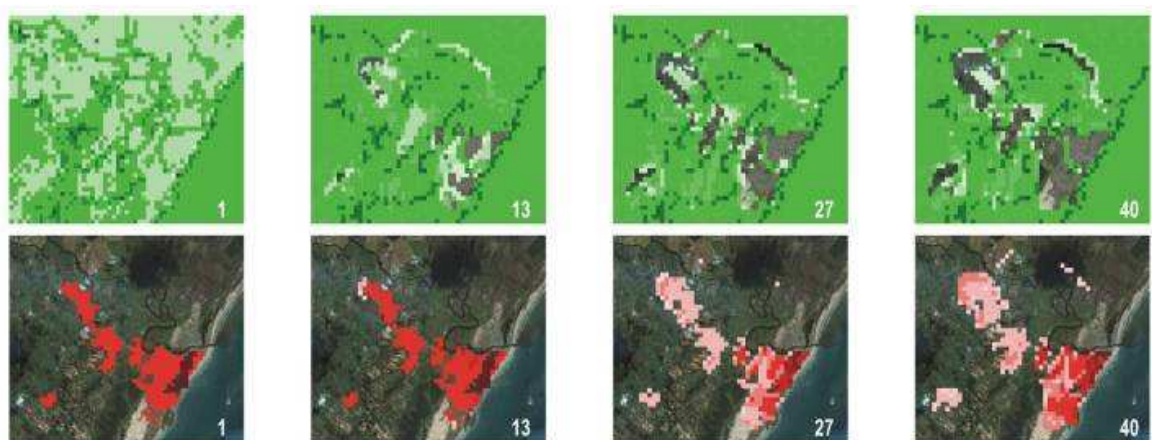
limiares de crescimento interno e carregamentos urbanos que incidem sobre células com limiares são consumidos de modo a corrigir os problemas referidos, antes de seguir com o processo de crescimento.

Os resultados da Simulação 3, onde o crescimento interno é aumentado pelo aumento atividade do turismo, indicam a tendência de concentração das facilidades urbanas próximas à praia, correspondendo à presença de centralidades urbanas; conseqüentemente, locais mais centrais são onde as taxas de crescimento interno são maiores, onde ocorrem os maiores problemas ambientais intraurbanos. Na seqüência é demonstrada a concentração das centralidades absolutas (CentrABS) e o acúmulo de problemas ambientais internos. (EProbT), Figura 10.



d) Simulação 4, Crescimento Livre: simulação com o crescimento externo não sendo limitado pelas áreas de proteção ambiental e com o crescimento interno acelerado pela atividade do turismo ($\square_{int}=0,9$) e também com o modelo regulado para não registrar os problemas ambientais internos, através da regra de crescimento “free potential”. Essa hipótese simula políticas urbanas mais liberais, com elevados investimentos em edificações e dotação de infra-estruturas urbanas internas.

Os resultados da Simulação 4 são apresentados a partir da diminuição das resistências ambientais ao longo do processo (ResistE) e pelos estoques construídos representados pelos carregamentos urbanos (LoadU), que registram tendências de concentração próximos à praia, ao mesmo tempo que aparecem fragmentos urbanos dispersos, como está na Figura 11, adiante.



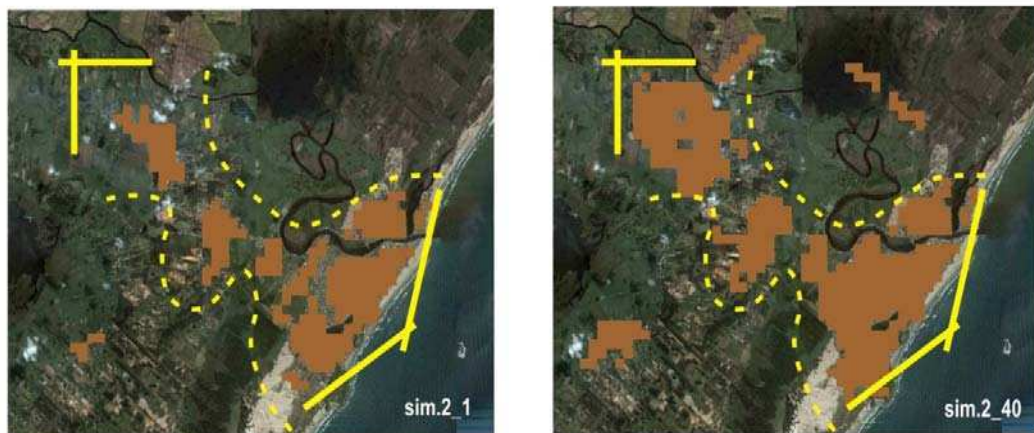
3.3 Interpretações conjuntas das simulações

Para interpretar as simulações de crescimento serão utilizadas as seguintes categorias de análise: a) localização e tendências das mudanças na área efetivamente urbanizada, pelo descritor CellType, indicando vetores de crescimento urbano; b) concentração e dispersão nos estoques construídos, pelo descritor LoadU;

c) distribuição de centralidades, pela CentCel; d) localização e concentração de potenciais de crescimento, através do descritor Potential; e) ocorrência e concentração de problemas ambientais intraurbanos, pelo descritor EProbT; f) observações sobre a morfologia urbana, observando de modo agregado o conjunto de descritores. Essas interpretações, que assumem de modo integrado o conjunto de simulações de crescimento realizado estão apontadas nos subtítulos adiante.

3.3.1 Vetores de crescimento urbano

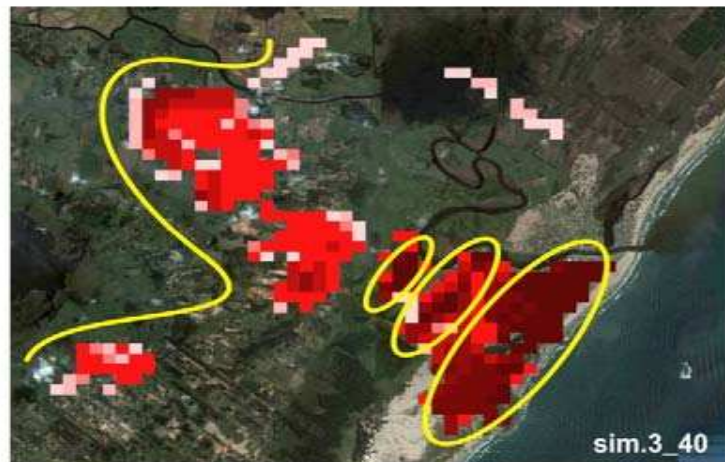
O modelo de simulação de crescimento promove crescimento interno e externo simultâneos, sendo que o primeiro se dá sobre áreas previamente urbanizadas e o segundo implica em transformação de áreas não urbanizadas, o que pode ser chamado de conversão de território. Essa conversão permite observar as tendências principais de crescimento, as quais podem ser assumidas como vetores de crescimento para o futuro. Nos experimentos realizados em Torres, dois vetores principais, em duas escalas, podem ser registrados, a saber: a) na escala de toda a área de estudo, que inclui a orla, o balneário e os núcleos mais distantes, aparece um vetor principal perpendicular à praia, formado pelo crescimento integrado das diversas nucleações urbanas apontadas como preexistências; b) na escala das nucleações, de outro modo, é possível observar uma tendência paralela à praia, com os núcleos modificando-se ao mesmo tempo de modo independente e ao mesmo tempo de modo dependente da estrutura urbana e da paisagem mais global. Noutras palavras, enquanto que na escala global os vetores de crescimento são sudeste-noroeste (perpendiculares à praia), na escala local são sudoeste-nordeste (paralelos à praia), como esta sintetizado na Figura 12 a seguir, sobre iterações 1 e 40 da Simulação 2.



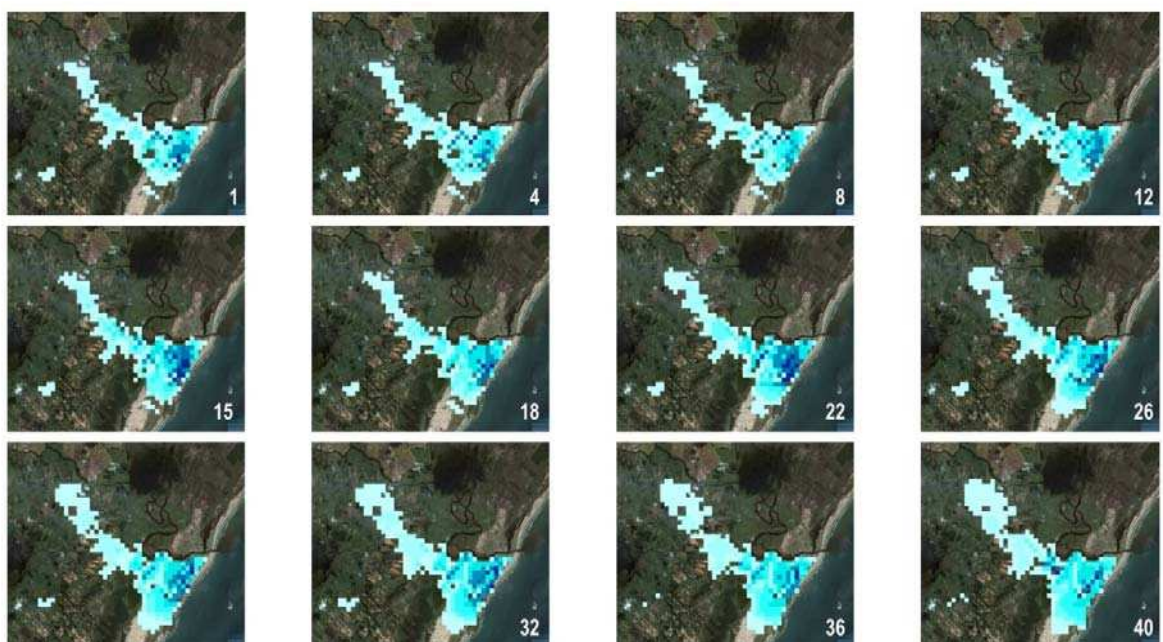
tendência sudeste-noroeste na escala global e sudoeste-nordeste na escala local.

3.3.2 Estoques construídos

Os estoques construídos, também chamados de carregamentos, foram implementados no modelo de simulação de modo a diferenciar a área efetivamente urbanizada, a área de maior densificação (reconhecida como de interesse turístico) e os acessos principais. Esses carregamentos, que são responsáveis pelas tensões que geram centralidades, cujas diferenças implicam em potenciais de crescimento, variam a cada iteração e se apresentam com três características principais: a) é recorrente nas simulações a permanência da concentração dos estoques construídos na área já densificada e nos acessos principais próximos; b) todavia, aparece uma nova área de concentração nas proximidades, cuja maior nitidez é observada no lado oposto à orla, em relação à área mais densa preexistente; c) ocorrem também concentrações de estoques construídos nas bordas da cidade, acompanhando o crescimento remoto da cidade, o que pode ser indicador de importante produção espacial em bairros periféricos, acusando um notável espraiamento da cidade, com novos parcelamentos e novas edificações periféricas. A Figura 13, a seguir, destaca essas características a partir dos carre3.3.3 Centralidades celulares

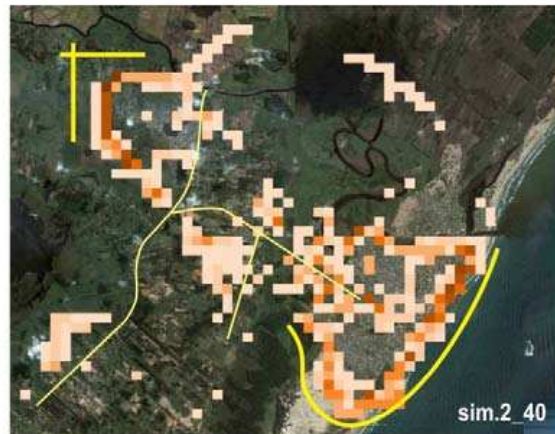


A distribuição das centralidades celulares indicou uma cidade tendencialmente mononucleada, com formação de um centro principal nas proximidades da orla e com sub-centros de fraca intensidade e com flutuações permanentes. Durante o conjunto de iterações promovidas pelo modelo de simulação, foi também possível observar a formação de novas periferias de baixa centralidade, com localização remota em relação ao centro principal e à orla, o que pode ser usado como indicador de áreas de ocorrência de ocupações de baixa renda ou com fraca dotação de facilidades urbanas. A Figura 14, a seguir, registra essas tendências em seqüência de outputs de centralidades da Simulação 3.



Os potenciais de crescimento (figura 15, acima) são determinados no modelo utilizado pela diferença de centralidade entre cada célula e suas vizinhas. O valor do potencial é transformado em carregamento urbano na próxima iteração. Portanto, essa grandeza apresenta a particularidade de indicar áreas de atratividade e concentração, locais que acumulam valores de centralidade discrepantes, o que pode ser chamado de interface. No caso das simulações de crescimento urbano de Torres, podem ser destacados os seguintes tipos de distribuição de potenciais: a) potenciais que aparecem distribuídos de modo homogêneo no tecido urbano preexistente em crescimento, caracterizando um crescimento geral na cidade; b) pontos

flutuantes de concentração de potencial, representando focos de crescimento interno e externo, que aparecem como emergências instáveis, que ocorrem numa iteração e deixam de ocorrer noutra; esses pontos ocorrem recorrentemente junto do sistema viário principal e outros locais de acessibilidade elevada; c) áreas de concentração mais estável de potencial de crescimento, o que notadamente ocorre quando áreas urbanizadas estão contíguas a áreas protegidas (freezing), no modelo; essas áreas podem ser particularmente observadas na interface da cidade com a orla e com o parque, como aparece na Figura 15, antes apresentada.



3.3.4 Problemas ambientais intraurbanos

Problemas ambientais intraurbanos são registrados no modelo como carregamentos urbanos que excedem ao valor normalizado de 1 (um), alcançados por somatório do carregamento da iteração anterior com o potencial da iteração atual, o que é assumido como uma superação de limiares de capacidade de suporte de urbanização, representando de modo agregado todo o sistema de dotação de infra-estrutura, equipamentos, tráfego, poluição e outros. No caso de Torres esse problemas foram registrados em um lugar principal e noutros secundários, a saber: a) de modo principal os problemas ambientais intraurbanos se acumularam nas áreas de maior produção de edifícios altos, com maior densidade populacional e consumo de benefícios urbanos; b) de modo secundário apareceram problemas ambientais na interface com as zonas preservadas, onde os potenciais de crescimento tendem a aumentar, sendo que esses potenciais se realizam apenas em um lado da interface entre cidade urbanizada e natureza preservada. Um terceiro tipo de superação de limiares também ocorreu de modo distribuído pelo tecido urbano, porém instável (ocorre numa iteração e deixa de ocorrer noutra) e de baixa intensidade. A Figura 16, a seguir, demonstra os problemas ambientais acumulados.

3.3.5 Morfologia urbana



Os resultados obtidos nos experimentos permitem observar características da morfologia urbana, notadamente expressas na forma da área efetivamente urbanizada e nas concentrações dos estoques construídos e da centralidade celular. Nesse caminho, podem ser assumidas as seguintes observações, a seguir descritas e representadas na Figura 17, a seguir:

a) Torres apresenta duas tendências simultâneas principais na forma da área efetivamente urbanizada, expressas pela expansão perpendicular à linha da orla e pela dispersão no território;

b) a tendência de expansão perpendicular à linha da orla é observada na escala global da área de estudo, posto que as simulações tendem a gerar conjuntos de células de tipo urbano com essa tendência dominante, nos diversos casos e suas iterações; esse resultado contraria a ideia corrente de expansão principal ao longo da orla em cidades balneárias, a qual estaria fortemente constrita pelos fatores naturais e pelo sistema de geral de acessos e nucleações preexistentes;

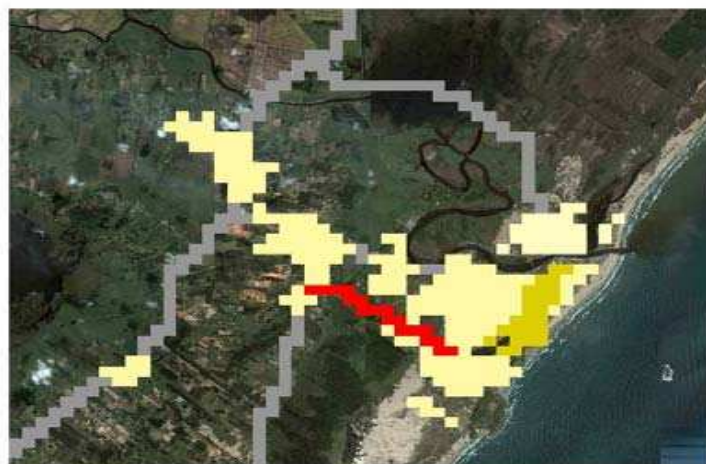
c) a dispersão no território pode ser observada em todas as simulações realizadas, sendo exceções os casos de continuidade espacial dos núcleos preexistentes; sendo assim, os experimentos sugerem que a morfologia de uma cidade dispersa possa perdurar no futuro, sendo esperada a presença de vazios urbanos e a formação de interfaces com o ambiente natural, o que aponta para a relevância do sistema de acessos e conexões, ligando esse conjunto de fragmentos urbanos.



4. Avançando sobre cenários de crescimento futuro.

Além de uma série de 4 simulações de crescimento, visando diferentes hipóteses de crescimento futuro, parametrizado o modelo de modo a ajustar o crescimento a um horizonte temporal de 40 anos e considerados válidos os resultados que puderam ser interpretados analisando de modo integrado; considera-se que o modelo esteja apto a simular determinadas situações que se queira avaliar, auxiliando assim a tomada de decisões no processo de planejamento urbano. Deste modo, o modelo é aplicado para capturar um cenário futuro caracterizado de forma conjunta por duas diferentes situações de interesse ao processo de planejamento urbano de Torres: a) construção de um novo acesso ao centro da cidade; b) captura do processo de produção de lugares novos, as quais estão a seguir descritas e os respectivos inputs construídos.

Uma questão levantada no processo de planejamento urbano para a cidade de Torres é a construção de um novo acesso à cidade, através de uma estrada paralela a Av. Castelo Branco que conectaria o centro da cidade à Estrada do Mar. Neste sentido, o modelo pode auxiliar a tomada de decisões por ser capaz de avaliar, a partir da escala global da cidade, a melhoria no sistema de acessos e maior conexão entre os fragmentos urbanos identificados nas simulações anteriores, visando assim uma melhor distribuição das facilidades urbanas. Para a simulação do novo acesso foi criado um novo atributo urbano correspondente ao traçado da nova estrada, o qual foi carregado com o mesmo peso das demais estradas (peso 0,1), caracterizando o novo acesso como um agente com ação discreta na estrutura que emerge em escala global no processo de simulação urbana. A atribuição de um peso igual às demais estradas pode ser entendido também como o ingresso na simulação apenas da estrada em si, sem nenhum acúmulo de estoques construídos ao longo da nova via no início do processo. Na figura 18, a seguir, estão sobrepostos os grids dos atributos urbanos que ingressam



Outra questão pertinente ao planejamento futuro da cidade de Torres está no recente processo de produção de lugares novos, distintos dos tradicionais empreendimentos imobiliários inseridos no tecido preexistente e localizados próximos a praia. Atualmente outros padrões imobiliários têm ocorrido na cidade de Torres, onde destacam-se os loteamentos dedicados a alta renda distantes da linha de praia; em situações ambientais diferenciadas e em locais com visuais privilegiadas, estes loteamentos buscam atrair novas economias urbanas através das atividades ligadas ao turismo. A figura 19, a seguir, apresenta uma imagem panorâmica obtida a partir de um local que têm apresentado este significativo processo de conversão urbana.



18

A partir desta assertiva, o modelo pode então ser aplicado dirigido a capturar este processo de produção de lugares novos, o que é possível através de uma sequência de simulações de crescimento, onde se alteram os pesos e comportamentos dos atributos, na busca de um cenário futuro possível. Assim, a partir do conjunto de atributos que calibrados resultam em cenários futuros possíveis, podem ser avaliadas as propriedades da paisagem que tem sido valorizada pelos agentes urbanos produtores destes novos lugares e quais os efeitos remotos que este padrão de investimento causa sobre o ambiente da cidade. A tabela 3, a seguir, descreve a combinação dos atributos, suas respectivas categorias, comportamentos, pesos e estados que melhor capturaram o processo de produção de novos loteamentos e serviram de input para o experimento da construção do novo acesso.

Nome	Descrição	Categoria	Comportamento	Peso	Estado
Altitudes resistência	altitudes restrição ao crescimento em 3 classes, 2, 3 e 4	natural	resistência	0,2	mutable
Altitudes atrator	altitudes atraindo o crescimento em 3 classes, 0, 1 e 2	natural	atrator	0,5	mutable
Topo de morro	proteção ambiental das porções de topos de morro	natural	resistência	1	freezing

Novo Acesso	traçado viário do novo acesso à Cidade de Torres	urbano	atrator	0,1	mutable
-------------	--	--------	---------	-----	---------

Tabela 3: atributos característicos do experimento 1, produção de lugares novos.

A seguir são apresentados os resultados do experimento avançado, dedicado a simular a criação de um novo acesso e capturar o processo de produção de lugares novos.



Figura 15: CellType, iterações 1, 13, 27 e 40.



Figura 16: CentrABS, iterações 1, 13, 27 e 40.



Figura 17: EProbT, iterações 1, 13, 27 e 40.



Figura 19: Potential, iterações 1, 13, 27 e 40.

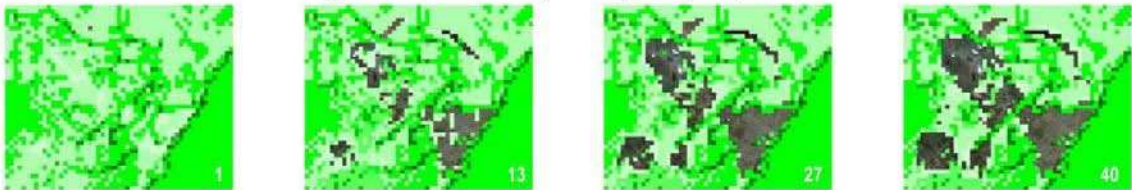


Figura 20: ResistE, iterações 1, 13, 27 e 40.

8. Conclusões

A partir do presente trabalho, a seguir uma série de conclusões podem ser indicadas; no que se refere aos estudos de modelagem e simulação de crescimento, suas possibilidades de integração com o ambiente natural e aplicação ao planejamento urbano; bem como algumas indicações sobre os cenários de futuro da cidade da Torres:

a) modelagem urbana e simulações parecem ter caminho promissor nos estudos urbanos, tanto pela premente necessidade de antecipação que os processos de planejamento exigem, como pelas possibilidades oferecidas pelas tecnologias computacionais; nessa direção, uma alternativa é o desenvolvimento de modelos com o auxílio de técnicas de autômatos celulares e o uso de geotecnologias, bem como sua aplicação a questões de interesse na área urbana e ambiental;

b) estudos urbanos com integração de fatores urbanos, naturais e institucionais podem auxiliar de modo privilegiado na compreensão dos mecanismos de mudança da cidade, posto que atuam sistemicamente, interagem de forma complexa e podem assumir processos auto-organizáveis; deste modo, simulações e estudos exploratórios podem permitir observar as mudanças laboratorialmente, realizar experimentos, estimular a criatividade e facilitar a produção de teorias;

c) para trabalhar com modelagem, simulações e integração de fatores urbanos, naturais e institucionais, interessa assumir e desenvolver novas tecnologias, destacadamente no campo da computação aplicada às ciências espaciais e ambientais, bem das possibilidades de produção de sistemas que se tornem operacionais e possam ajudar nos desafios da urbanização contemporânea;

d) crescimento interno e externo integrados: variações no crescimento interno são acompanhadas por mudanças externas na cidade e vice-versa; deste modo, ao contrário do que poderia ser esperado, estímulos à densificação em áreas internas podem gerar loteamentos remotos, bem como novos loteamentos fora da área atualmente urbanizada podem estar associados a expansões internas, num mecanismo integrado, conformando o argumentado por Polidori (2004);

e) crescimento global e local com oposição direcional: para o caso da cidade de Torres-RS, as simulações demonstram uma tendência geral de crescimento em direção perpendicular à orla, o que aparece quando é observada toda a área de estudo, com espaços urbanizados ao longo das estradas de acesso e demais núcleos urbanos preexistentes; todavia, ao observar cada núcleo separadamente, as simulações mostram uma tendência de crescimento paralela à orla, em oposição à direção do crescimento geral; esse resultado pode auxiliar nas decisões dos planos de cidade e de bairro, sendo que a cidade demanda alternativas estruturais para ordenação do conjunto e os bairros demandam alternativas de desenho para suas expansões locais e suas interfaces com o ambiente natural;

f) compactação e fragmentação sincrônicos: os experimentos mostram o aparecimento de novas células urbanizadas que preenchem vazios preexistentes e ao mesmo tempo produzem novos vazios, por urbanização remota; esse modo de crescimento indica a permanência de uma cidade com diversos núcleos que, embora se compactem individualmente, mantêm um conjunto fragmentado; essa tendência tem sido observada não só nos trabalhos em Torres, como também em outras cidades, particularmente naquelas com pólos de atração no sistema de acessos periférico, podendo vir a ser considerado um padrão atual de crescimento urbano, como sugere Polidori (2004);

g) super-concentração e periferação simultâneos: no caso de Torres, as simulações indicaram dois processos de acirramento de tipos de ocupação e densificação espacial, representados pela densificação de áreas de alto valor imobiliário e pela formação de periferias com fraca concentração de facilidades urbanas, simultaneamente; noutras palavras, enquanto é produzida uma cidade de interesse turístico e de alta lucratividade para o mercado imobiliário, destinada consumidores de alta renda, forma-se uma extensa periferia, provavelmente ocupada por moradores de baixa renda e com moradia fixa no local;

h) importância dos acessos principais: a situação de Torres parece tipicamente influenciada pelo sistema de acessos principais, com a Estrada do Mar e a BR operando como pólos de atração e de influência

no desenho da área efetivamente urbanizada; esse resultado aponta para um papel estruturante desse sistema de acessos, sendo suas melhorias e/ou suas mudanças, através de novos acessos, instrumentos poderosos na indução de processos de transformação e reestruturação urbana;

i) efeito de borba em zonas de preservação: tanto a presença o mar, como do rio, dos topos de morro e dos parques naturais mostraram aumento de potencial de urbanização quando a área efetivamente urbanizada tangencia esses locais; noutras palavras, os fatores naturais, quando pressionados pela urbanização e resistentes a ela, que por dificuldades de conversão do território (como é o caso do mar, do rio e do topo dos morros), que por ação institucional (como é o caso do parque), tendem a formar áreas de alto interesse imobiliário na transição do ocupado para o não ocupado, o que implica em valorização da borda e em necessidade de políticas e instrumentos preservacionistas consistentes, sob pena de predomínio da urbanização sobre a preservação ambiental desses lugares especiais, ou até mesmo sua degradação; esse efeito de borda confirma o indicado por Polidori (2004), ao estudar crescimento urbano relacionado com o ambiente natural e zonas de preservação urbanas;

j) feedback positivo e negativo intercalados: os experimentos confirmam a assertiva de Polidori (2004), pela qual a cidade crescerá por feedbacks positivos e negativos intercalados; noutras palavras, crescimento urbano gera mais crescimento urbano (feedback positivo), até um certo patamar ou limiar de urbanização, a partir do qual o esgotamento dos recursos urbanos e naturais exige novos investimentos ou renaturalizações, fazendo recuar o processo de urbanização (feedback negativo); esse modo decrescimento contraria os argumentos correntes em ecologia urbana e em estudos de dinâmica das cidades, que têm sugerido a vigência de um mecanismo de feedback sobre o outro.

Referências bibliográficas

ALBERTI, Marina (1999) Modeling the urban ecosystem: a conceptual framework. *Environment and Planning B – Planning and Design* v. 26. London: Pion. p. 605-630.

ALBERTI, M; Marzluff J. M; SHULENBERGER, E; BRADLEY, G; RYAN, C; ZUMBRUNNEN, C. (2003) Integrating Humans into Ecology: Opportunities and Challenges for Studying Urban Ecosystems. *BioScience* 53(12), 2003:1169–1179

AXELROD, Robert (1997). “Advancing the art of simulation in the social sciences.” *International Conference on Computer Simulation and the Social Sciences*. Cortona, Italy. 12 p. [disponível em 03 de março de 2002 em www.santafe.edu]

BATTY, Michael (1998). “Urban evolution on the desktop: simulation with the use of extended cellular automata.” *Environment and Planning A*, v. 30. p. 1943-1967.

BATTY, Michael (2007) *Complexity in City Systems: Understanding, Evolution, and Design*. CASA Working Paper 117. 36 p.

BATTY, Michael (2009) *Urban Modeling*. In: *International Encyclopedia of Human Geography*.

BUZAI, Gustavo D. (1999). “Geografía global: el paradigma geotecnológico y el espacio interdisciplinario en la interpretación del mundo del siglo XXI.” Buenos Aires: Lugar Editorial. 216 p.

ECHENIQUE, M. (1975) Modelos: una discussion. In. Martin, L.; March, L.; Echenique, M. *La Estructura del Espacio Urbano*. Barcelona: Ed. GG.

HARVEY, David. (1985) *The urbanization of capital*. Oxford: Blackwells.

HOERING, Heidi; SEASONS, Mark (2005) Understanding Indicators. In. PHILLIPS, Rhonda (ed.) *Community Indicators Measuring Systems*, p-3-32. Ashgate.

KOOMEN, E.; STILLWELL, J.; BAKEMA, A.; SCHOLTEN, H. J. (2007) *Modelling Land-Use Change: Theories and Methods*. Springer, Netherlands

KRAFTA, Romulo (1994). *Modelling Intraurban configurational development*. *Environment and Planning B*:

Planning and Design, v. 21. London: Pion. p. 67-82.

LONGLEY, Paul et al. (2004) Geographic Information Systems and Science. John Wiley & Sons, Ltd. 539 p.

PERES, Otávio ; POLIDORI, Maurício (2009) Modelagem Urbana e Cidades Visuais: fundamentos e convergências. Anais do XIII Encontro Nacional da ANPUR. Florianópolis: ANPUR. 18p.

POLIDORI, Maurício C. (2004) Crescimento urbano e ambiente: um estudo exploratório sobre as transformações e o futuro da cidade. Tese Doutorado UFRGS PPGECO. 352p.

PORTUGALI, Juval (2000) Self-organization and the city. Berlin: Springer. 352 p.

SANTOS, Rosely (2004) Planejamento Ambiental: teoria e prática. São Paulo: Oficina de Textos. 184p.

TORRENS, Paul (2000). How cellular models of urban systems work. London: Casa, UCL. 68 p. Disponível em 18.novembro.2009 em http://casa.ucl.ac.uk/working_papers.htm

WOLFRAM, Stephan (1984) Cellular automata as models of complexity. Nature. 311: 419–24.