

**SIMULAÇÃO DE CRESCIMENTO URBANO EM CERRITO E
PEDRO OSÓRIO, RS, BRASIL:
preservação ambiental, áreas de inundação e polos de atração**

**SIMULATION OF URBAN GROWTH IN CERRITO AND
PEDRO OSÓRIO, RS, BRAZIL:
environmental preservation, flood areas and attraction poles**

Maurício Polidori¹
mauricio.polidori@gmail.com

Renata Zschornack²
renata_zschornack@hotmail.com

Sarah Dorneles³
sarahjdorneles@gmail.com

Resumo: Este artigo apresenta experimentos com modelagem urbana, realizando simulações de crescimento urbano com autômatos celulares, nas cidades de Cerrito e Pedro Osório, no Estado do RS, Brasil, localizadas às margens do Rio Piratini, em área de fronteira do Brasil com o Uruguai. As simulações estão legitimadas por replicação do presente a partir de estado passado do sistema, em processo de calibração realizado entre os anos de 1985 e 2022, com 79,0% de acertos e precisão de 200m. Mediante cenários com e sem preservação ambiental, depois com a presença de polos de atração, são realizadas simulações com o modelo calibrado, verificando tendências de crescimento urbano em áreas de inundação do Rio. Os resultados sugerem que cidades à beira de rios, especialmente quando há ocupação de ambos os lados, tendem a ocupar suas áreas de inundação, com danos para o ambiente natural e riscos para a segurança urbana. Continuando, os experimentos indicam que polos de atração podem ajudar no redirecionamento do crescimento urbano, porém dependem de interação com outros fatores, como o tamanho das cidades, a morfologia das áreas urbanizadas e o traçado das vias de acesso, no encontro com as áreas ainda não urbanizadas.

Palavras-chave: crescimento urbano; áreas de inundação de rios; polos de atração.

¹ Arquiteto e urbanista, professor na FAUrb UFPel. Mestre em Planejamento Urbano e Regional. Doutor em Ciências - Ecologia.

² Arquiteta e Urbanista, Técnica em Edificações na FURG. Mestranda em Arquitetura e Urbanismo FAUrb UFPel.

³ Arquiteta e Urbanista (UFPel), servidora de carreira na Prefeitura Municipal de Cerrito - RS. Mestranda no Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo FAUrb UFPel.

Abstract: This article presents experiments with urban modeling, performing simulations of urban growth with cellular automata, in the cities of Cerrito and Pedro Osório, in the State of RS, Brazil, located on the banks of the Piratini River, in the border area between Brazil and Uruguay. The simulations are legitimized by replicating the present from the past state of the system, in a calibration process carried out between the years 1985 and 2022, with 79,0% of hits and accuracy of 200m. Through scenarios with and without environmental preservation, then with the presence of poles of attraction, simulations are carried out with the calibrated model, verifying urban growth trends in flood areas of Rio. The results suggest that cities along rivers, especially when there is occupation on both sides, tend to occupy their flood areas, with damage to the natural environment and risks to urban security. Continuing, the experiments indicate that poles of attraction can help in redirecting urban growth, but they depend on the interaction with other factors, such as the size of cities, the morphology of urbanized areas and the layout of access roads, in the encounter with areas still not urbanized.

Keywords: urban growth; river flood areas; urban attraction.

1. Apresentação

Este trabalho pretende simular crescimento urbano nas áreas urbanizadas das cidades de Cerrito e Pedro Osório, RS, Brasil, realizando exercícios de modelagem urbana com autômatos celulares, o que é alcançado utilizando o programa de computador CityCell. Essas cidades do sul do país, na faixa de fronteira do Brasil com o Uruguai, ocupam parte da área de inundação do Rio Piratini, sendo que as simulações realizadas aqui se dedicam a duas questões principais: a) considerando que as cidades vêm experimentando expansões de suas áreas urbanizadas, qual a relação dessas áreas acrescidas com as áreas de inundação? b) assumido que é importante direcionar o crescimento urbano do futuro dessas cidades para fora da área de inundação do Rio, qual pode ser a contribuição da localização de novos polos de atração em locais altos e seguros?

Para enfrentar essas duas questões, ambas vinculadas à morfologia da futura área urbanizada, são apresentados os seguintes conteúdos: a) o que são modelagem urbana, autômatos celulares e simulações; b) como funciona o programa de computador CityCell, que vai ser utilizado para realizar simulações de crescimento urbano; c) onde estão e como são as áreas urbanas das cidades de Cerrito e Pedro Osório; d) como foi feita a calibração do modelo de simulação de crescimento para o caso dessas cidades, legitimando os estudos através da replicação do modo de crescimento passado das duas cidades; e) realização de simulações de crescimento da área urbana para o futuro, com dois cenários: e.1) preservando as áreas de interesse ambiental e verificando a tendência de as cidades avançarem sobre áreas de inundação do Rio Piratini; e.2) testando a capacidade de novos polos de atração direcionarem o crescimento urbano para locais fora da área de inundação do Rio. Ao final deste artigo, de

modo encadeado com os conteúdos anteriores, aparecem as principais conclusões e as referências bibliográficas.

2. Modelagem urbana, autômatos celulares e simulações

Modelagem urbana pode ser entendida como um modo de capturar algum aspecto da realidade e replicá-la de maneira controlada, permitindo a realização de experimentos, apoiando trabalhos de pesquisa e auxiliando na tomada de decisões, incluindo aspectos teóricos, empíricos e metodológicos. Como a realização dos trabalhos de modelagem urbana normalmente ocorre com intenção de construir ou testar uma ideia, a aproximação com alguma teoria é evidente, o que aparece tanto na escolha ou produção de modelos, como no delineamento experimental. Do ponto de vista empírico, a modelagem se realiza ao escolher o local de trabalho e o modelo propriamente dito, sendo que ambos colaboram para determinar os limites e o escopo de assuntos passíveis de inclusão em cada caso. Com relação à metodologia, embora seja conhecida a aproximação entre a modelagem urbana e a pesquisa científica tradicional, pode ser sugerido que a modelagem urbana é também um exercício de criatividade, invenção e abstração.

A criatividade pode aparecer em dois momentos diferentes: na produção de modelos e no seu uso. A produção de modelos parece demandar capacidade de sintetizar e recriar a realidade, numa delicada união com modos de ver e interpretar o mundo. Ao usar algum modelo, aparece o desafio de associar o conhecimento do usuário com o problema que será modelado, decidindo as variáveis que o constituem e os resultados que podem ser encontrados. Nesse caminho, a invenção aparece como resultado da formulação de novas perguntas e novas respostas, sugerindo possibilidades contraintuitivas e alcançando transgressões ao que é usualmente admitido. Para fazer isso, é preciso exercitar a abstração, quer pelo modo de representação que os modelos normalmente utilizam, quer pela interpretação dos resultados, ao mesmo tempo que se transcrevem dados abstratos para a realidade, dando uso aos modelos numa troca permanente entre abstração e realidade.

Modelos são representações simplificadas da realidade (Almeida, Câmara e Monteiro, 2007), sendo seu principal objetivo representar determinado sistema, de modo a incluir os aspectos principais de teorias subjacentes, auxiliando em seu entendimento e dos processos que regem sua dinâmica (Batty, 2009). Modelos têm sido usados com sucesso na

representação e simulação de sistemas complexos e dinâmicos, como é o caso das cidades (Batty, 1998), permitindo que processos urbanos sejam reproduzidos em laboratório, viabilizando a realização de experiências que seriam impossíveis na prática, dada a impossibilidade de manipular pessoas ou estruturas físicas reais (Krafta, 2009). Inicialmente entendidos como simples representações materiais da realidade, modelos obtidos através de sistemas computacionais têm possibilitado que a cidade passe a ser modelada de modo simbólico, a partir da tradução de determinadas características físicas em linguagem matemática. Nesse caminho, o uso de modelos urbanos passa a ser complementar à ideia de teoria, onde ambientes computacionais atuam como espécie de laboratório e o fenômeno urbano, depois de capturado, pode ser reproduzido experimentalmente através de simulações (Echenique, 1975; Batty, 2009). Vários autores destacam os limites dos modelos, em particular no que diz respeito às suas possibilidades de predição (Batty e Torrens, 2001). Todavia, temos indicado o uso de modelos não somente para a antecipação de cenários de futuro prováveis, mas também para a indicação de condições desejáveis para a cidade.

Autômatos celulares têm sido usados, em estudos urbanos, especialmente para simular crescimento das cidades, aproveitando sua capacidade de representar dinâmicas espaciais e processos de mudança. Eles se diferenciam de outras abordagens no estudo e no desenho da forma urbana por duas razões principais: por representarem o espaço de modo contínuo, podendo incluir fatores urbanos e naturais num mesmo conjunto; e por assumirem que as relações de proximidade e de vizinhança influenciam fortemente os estados presente e futuro do espaço. Experimentos dedicados a simular crescimento urbano têm permitido observar padrões de mudança na forma da cidade e nas relações com fatores naturais, indicando que as transformações urbanas se comportam de maneira complexa, porém passível de identificação. Simulações com autômatos celulares também vêm permitindo observar aspectos estruturais da forma do sistema urbano, relacionando crescimento urbano com zoneamento ambiental e com a influência de grandes polos de atração.

As simulações têm sido consideradas como importantes instrumentos de trabalho no campo do urbanismo, particularmente quando envolvem interação entre aspectos físicos, sociais e ambientais (Alberti, 1999). Sendo assim, elas podem oferecer aos pesquisadores cenários hipotéticos de cidades reais, estimulando a descoberta e auxiliando na formulação de teorias (Axelrod, 1997). Para isso, técnicas computacionais, que podem ser reunidas sob o

conceito de geocomputação, são crescentemente utilizadas em trabalhos de simulação e de modelagem urbana, transformando o computador em laboratório e em meio de experimentação (Burrough, 1998; Batty, 1998).

Um dos aspectos das cidades que pode ser investigado com o uso de simulações é o seu crescimento, o que inclui capturar dinâmicas de mudança, considerar o tempo e modos de representação espacial. Neste trabalho, as mudanças urbanas estão assumidas como decorrentes de interações entre a estrutura urbana, a social e o ambiente natural, utilizando modelagem computacional dinâmica com o auxílio de autômatos celulares (O'sullivan e Torrens, 2000); o tempo vai ser incorporado como uma sucessão de estados encadeados, onde mecanismos de feedback positivo e negativo interagem e influenciam estados seguintes; por fim o modo de representação adotado é o de um grid, onde células representam espaços discretos e contêm atributos físicos, naturais e institucionais (Polidori, 2005).

Esse crescimento da cidade é composto por dinâmicas internas e externas, sendo que a primeira ocorre mediante ocupação de espaços vacantes ou substituição de estoques construídos, enquanto a segunda opera por conversão de solos não urbanizados em novos espaços urbanos, caracterizando um processo complexo, auto-organizado e emergente. A ideia de complexidade advém da compreensão da cidade e de suas mudanças como algo que inclui múltiplas interferências e agentes, com diversas relações possíveis entre eles, as quais ocorrem de modo iterativo e com feedback composto, de modo a acelerar ou frear mudanças; o conceito de auto-organização está associado à ideia de ausência de um elemento controlador central do conjunto (que ditaria suas transformações), sendo o crescimento urbano decorrente de lógicas próprias da cidade, onde seus atributos, encontrados na sua forma, na sociedade e no substrato natural, encarregam-se de manter ou de dissipar mudanças; enfim a ideia de emergência aparece como a compreensão de que a transformação interativa, complexa e auto-organizada da cidade faz surgir padrões notáveis de ordenação espacial, observáveis na sua morfologia e nas transformações das preexistências urbanas e naturais (Portugali, 1997; Johnson, 2003; Polidori, 2003).

Neste artigo, dedicado a simular crescimento urbano nas áreas urbanizadas das cidades de Cerrito e Pedro Osório, RS, Brasil, são feitos exercícios de modelagem urbana com autômatos celulares, utilizando-se o programa de computador CityCell.

3. O programa CityCell e sua possibilidade de utilização em simulações de crescimento urbano realizadas neste trabalho

Neste trabalho é utilizado o modelo de simulação de crescimento urbano originalmente elaborado por Polidori em 2005, o qual é dedicado a estudar modificações na área efetivamente urbanizada das cidades, assumindo como base espacial um ambiente com células quadradas, resolvida como um grid bidimensional de um sistema de informações geográficas – SIG, com características operacionais de um autômato celular (Batty, Couclelis e Eichen, 1997). É assumido então que entre cada par de células que possui alguma característica urbana (carregamento) desenvolve-se uma tensão, como nos modelos de Centralidade e Desempenho (Krafta, 1994), sendo essa tensão calculada através do produto do carregamento total de cada célula pelo carregamento total de cada uma das outras que lhe são alcançáveis, de modo semelhante ao que ocorre em modelos de interação espacial (WILSON, 1985; TORRENS, 2000), porém sem limitações referentes à origem e destino. Essas tensões são distribuídas de modo axial, polar e difuso, como mostra a Figura 01, adiante, sendo seu acúmulo em cada célula chamado de centralidade celular. Sequencialmente, é assumido como potencial de crescimento a diferença entre a centralidade celular máxima da vizinhança e a de cada célula, o que pode implicar em crescimento interno ou externo às células urbanas preexistentes. Desse modo, apresentam maior potencial aquelas células com menor centralidade própria, combinada com maior centralidade celular na vizinhança (Polidori, 2005).

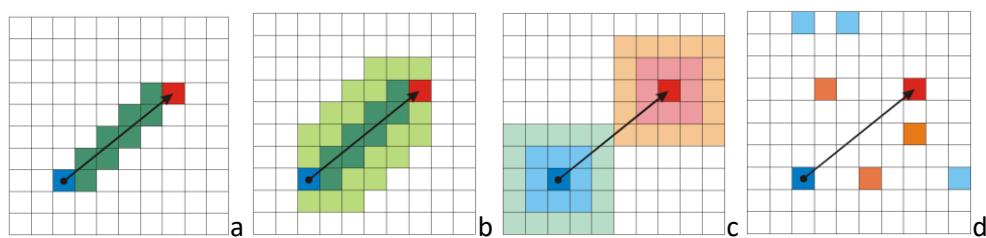


Figura 01: diagramas em formato de grids, representando: a) células incluídas na distribuição axial (verde); b) células incluídas na distribuição axial de buffer, com raio igual a uma célula (verde claro); c) células incluídas na distribuição de tensões do tipo polar, com vizinhança de raio igual a duas células (azul claro e rosa); d) hipótese de células incluídas em distribuição difusa. **Fonte:** Polidori, 2005.

Esse modelo de simulação de crescimento urbano é implementado com o uso do software CityCell (disponível em <https://wp.ufpel.edu.br/CityCell/>), desenvolvido pela equipe

do Laboratório de Urbanismo da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da UFPel. Neste trabalho, são utilizadas duas habilidades desenvolvidas no CityCell: 1^a a possibilidade de simular a existência de áreas de preservação ambiental, impedindo sua urbanização; 2^a a possibilidade de implantar novas áreas urbanizadas e testar sua capacidade de redirecionar o crescimento urbano, como aparece nos subtítulos a seguir.

4. As cidades de Cerrito e Pedro Osório, suas enchentes e o delineamento das simulações de crescimento urbano

Este trabalho tem como foco o estudo do crescimento urbano das cidades de Cerrito e Pedro Osório, que estão localizadas na metade sul do estado do Rio Grande do Sul, Brasil (31°50'23"S 52°49'11"O), em área próxima à fronteira do Brasil com o Uruguai. As duas cidades podem ser consideradas de pequeno porte, sendo que Cerrito tem 3.747 habitantes e Pedro Osório tem 7.301 habitantes, vivendo na área urbanizada (IBGE, 2012).

O povoamento da região tem início por volta de 1872 (Caldas, 1990; Bento, 2005; IBGE, 2012) e se desenvolve, simultaneamente, nas margens norte e sul do Rio Piratini, que hoje delimita a divisa entre as duas cidades. No ponto de encontro entre elas, há o deságue de um afluente do Rio Piratini, o Arroio Basílio, também conhecido como Arroio Santa Maria. A jusante do trecho que atravessa as cidades de Cerrito e Pedro Osório, o Rio Piratini segue seu curso até se conectar com o canal São Gonçalo, que estabelece a ligação entre a Lagoa Mirim e a Laguna dos Patos — vasto complexo lagunar da costa sul-rio-grandense (Figura 02, a seguir).

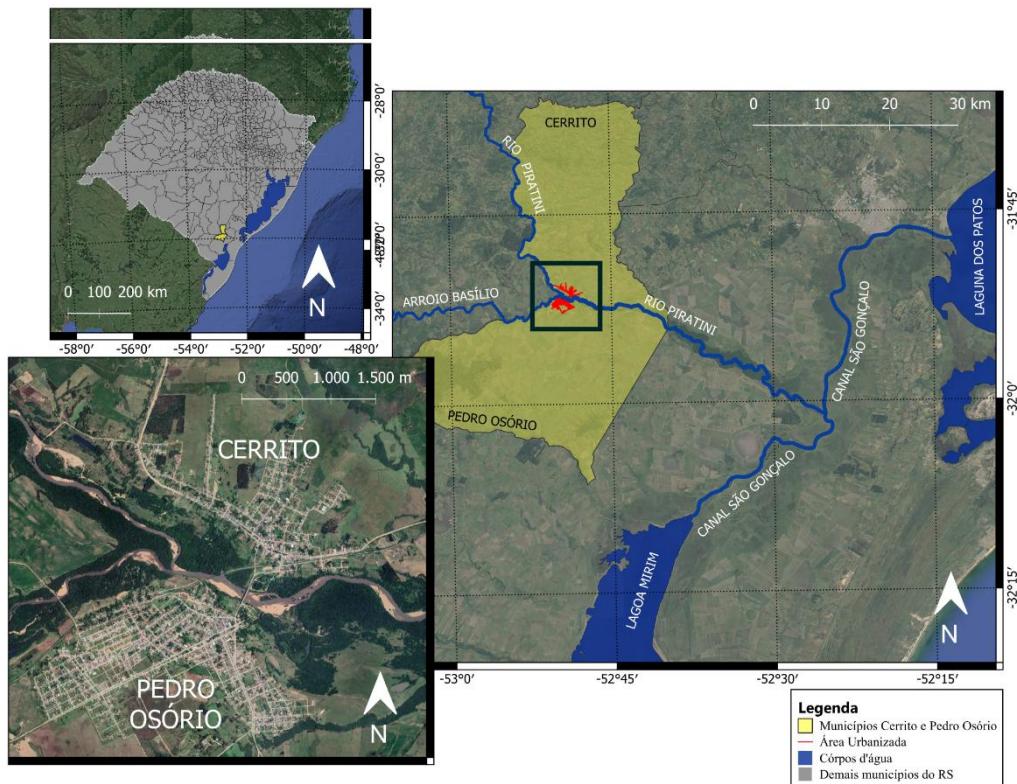


Figura 02: mapa de localização da área de estudo, as cidades de Cerrito e Pedro Osório.
Fonte: imagem de satélite da plataforma Google Earth e elementos vetoriais da base de dados do IBGE, SEMA e Fepam, em 2023.

Uma característica peculiar dessa região é que ela está localizada em uma faixa de transição topográfica, em que as altitudes se reduzem drasticamente, passando do Planalto Rebaixado Marginal para a Planície Costeira Interna (Telles, 2002), provocando modificação da dinâmica de fluxo e infiltração das águas. Além disso, a área de implantação dos dois núcleos urbanos é constituída por solo com baixíssima permeabilidade, predominantemente constituído de planossolo háplico (Cunha e Silveira, 1996). Com relação à bacia e as áreas urbanizadas, Telles destaca que no trecho em que passa pelos núcleos urbanos de Cerrito e Pedro Osório, o Rio Piratini já drenou mais de 70,0% da área total de sua bacia (Telles, 2002).

Portanto, pode-se dizer que o ponto de encontro de ambas as cidades também configura uma zona altamente suscetível a enchentes, sendo que as mais impactantes ocorreram nos anos de 1959, 1983 e 1992, sendo que nesta última, o Rio Piratini atingiu a cota de 28,62m, em Pedro Osório (Telles, 2002). Segundo as reportagens da época (RBS Documento

Especial: Pedro Osório, uma cidade arrasada, 1992), dos treze mil habitantes que residiam na cidade, dez mil foram atingidos pela enchente. Estima-se que cerca de um terço do território urbano tenha sido afetado pela inundação. Essa informação pode ser confirmada pela análise espacial da área inundável para a região. Tomando-se como base a cota de 30 metros acima do nível do mar, cerca de 27% da área urbanizada — considerando-se ambas as cidades — encontra-se em região inundável, conforme ilustrado na Figura 03. Quando analisadas individualmente, Pedro Osório conta com 30,0% de sua área urbanizada em região inundável, percentual um pouco maior que o para a cidade de Cerrito, a qual apresenta 23,0% da área urbanizada em área de risco para inundação.

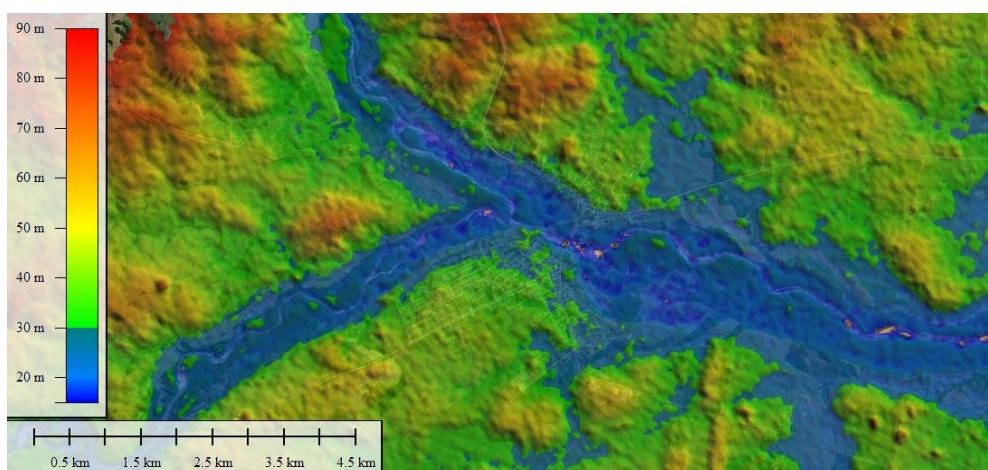


Figura 03: área de inundação à cota de 30m (em azul) e altimetria (20 à 90 m), na área de estudo. **Fonte:** base da plataforma WorldImagery (Digital Globe, 2023), com superposição de altitudes da missão SRTM (obtidas em Embrapa Territorial, 2023).

Diante desse cenário, as enchentes o Rio Piratini e seu afluente, o Arroio Basílio, em relação às possibilidades de crescimento urbano, constituem a principal questão a ser tratada neste artigo, por meio dos seguintes procedimentos:

- a. legitimação do modelo de simulação de crescimento, o que é feito mediante sua calibração, buscando replicar o presente, a partir de um estado passado;
- b. uma vez calibrado o modelo, simulação de crescimento para o futuro, verificando tendências de crescimento urbano dentro ou fora da área de inundação do Rio;

- c. implementação de polos de atração fora da área de inundação, testando sua capacidade de redirecionar o crescimento urbano para áreas seguras.

5. Legitimação das simulações pelo passado, de modo a replicar o presente

Conforme a definição de Marques et al. (2021), o crescimento urbano é resultante da interação entre diversos fatores, que afetam a dinâmica urbana em diferentes graus de intensidades. Para a execução das simulações, é necessário que esses fatores sejam reconhecidos e configurados, ajustando regras e parâmetros que regem as interações entre os componentes do sistema, legitimando a aplicabilidade e os resultados do modelo, de modo a obter sua calibração. Segundo Liu (2009), a calibração é o processo de verificar se um objeto de medição está funcionando dentro de sua precisão designada, cujo objetivo é encontrar os parâmetros que afetam o sistema estudado e os mensurar, de maneira que repliquem as dinâmicas já ocorridas no sistema. Para tanto, a calibração pode ser um processo que envolve tentativas e a execução de um modelo teste para avaliar os resultados do sistema (Liu, 2009).

Neste trabalho, o processo de legitimação foi realizado a partir de imagens de satélite, partindo de uma imagem histórica, de 1985 e de uma imagem atualizada, de 2022, para simular crescimento a partir do passado até o estado presente, ajustando os fatores interagentes e os parâmetros que implicam em sua importância no sistema. (Figura 04, a seguir).

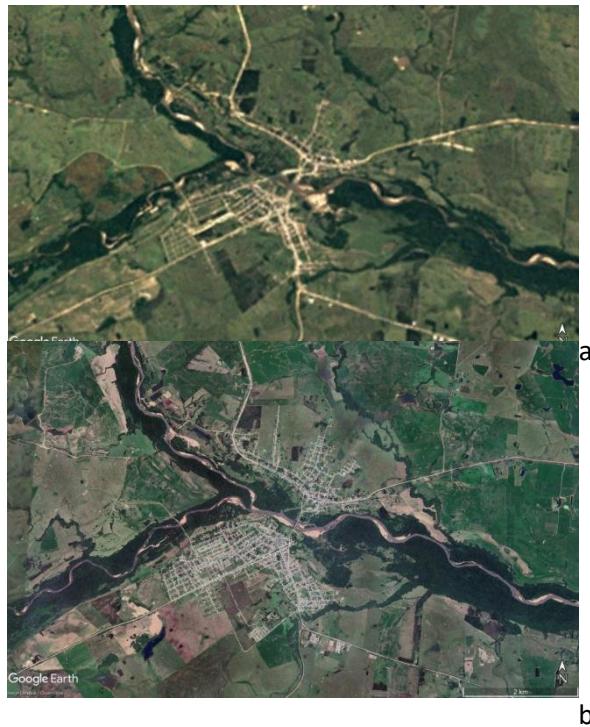


Figura 04. Imagens de satélite da área de estudo: a) em 1985; b) em 2022.

Fonte: Google Earth (Landsat/Copernicus), acessado em junho de 2023.

Sobre essas bases foi realizado o mapeamento do uso do solo na área de estudo, destacando os principais fatores a participarem das simulações: área urbanizada, rios, vias de acesso, mata nativa, mata plantada e campos (Figura 05). O mapeamento dos usos do solo está realizado sobre o grid, com células quadradas de 200m, adequadas à visualização das simulações realizadas, ao tamanho das cidades e ao tempo destinado ao processamento.

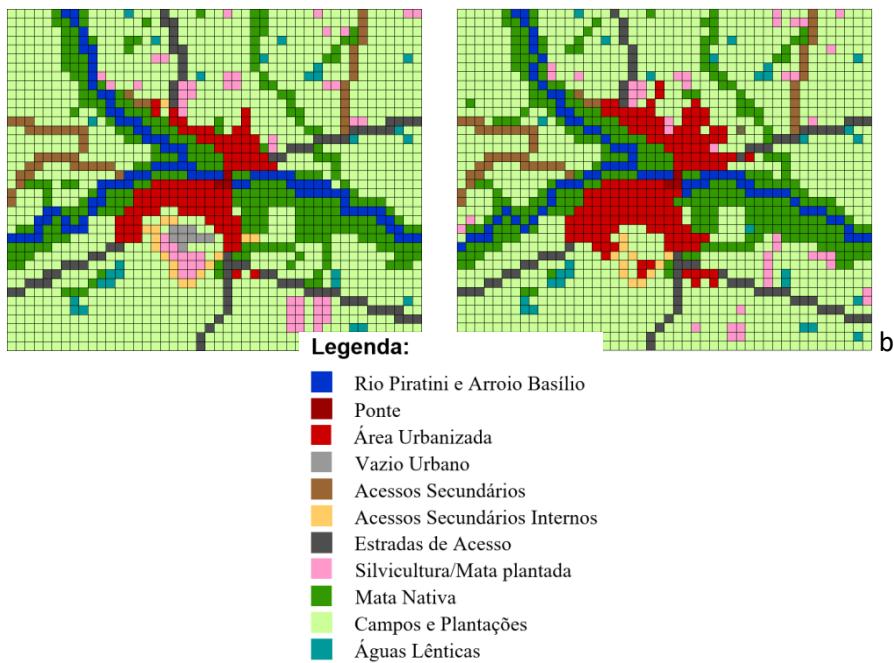
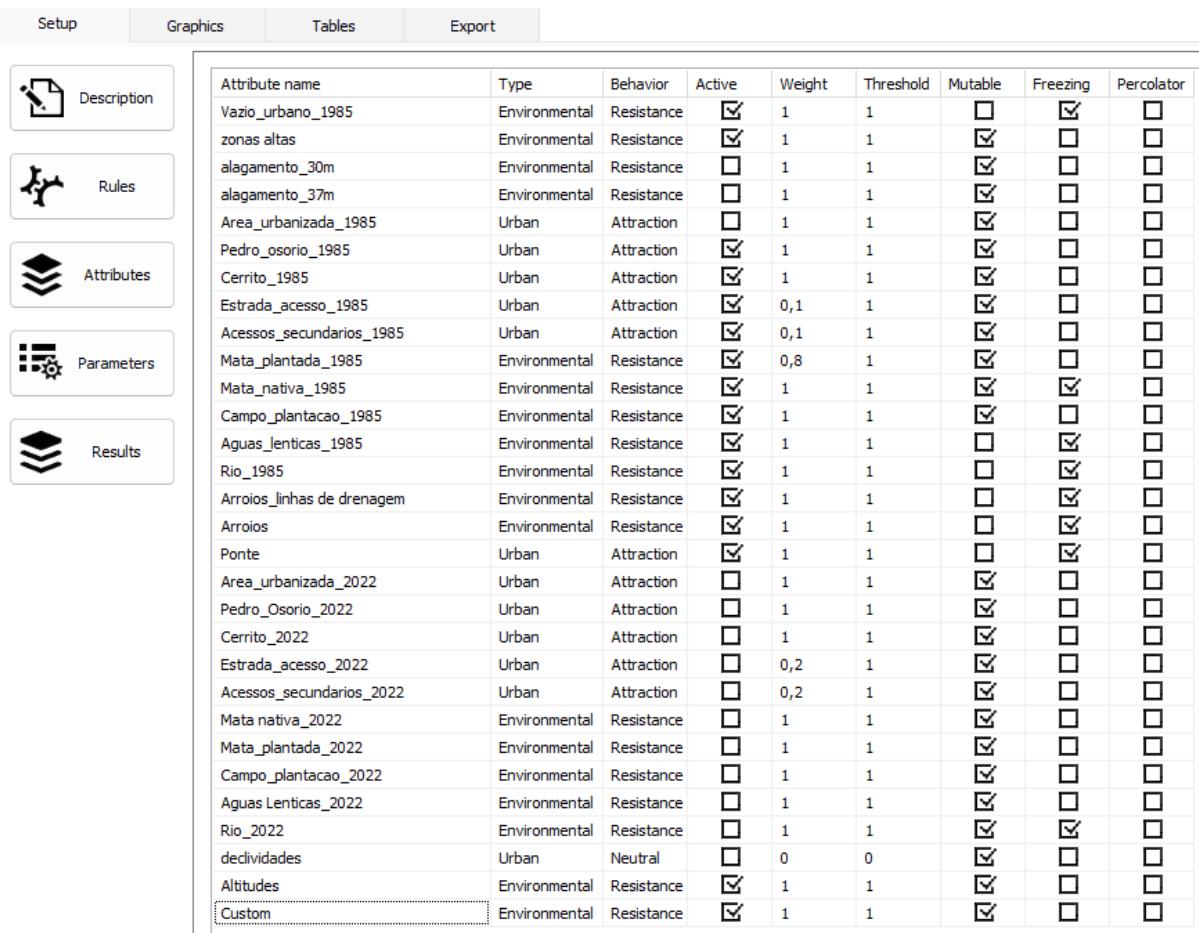


Figura 05: mapeamento do uso de solo sobre o grid de 200m, gerado no Programa CityCell, a partir de imagens de satélite da área: a) em 1985; b) em 2022. **Fonte:** executado e extraído do programa CityCell pelos autores, em 2023.

Durante a execução do mapeamento, cada atributo deve ser tipificado e configurado de acordo com o seu comportamento no contexto urbano. No programa CityCell, os comportamentos associados aos atributos podem ser de três categorias: atração, resistência ou neutra. A cada tipo de atributo está associado um comportamento específico diante das tensões espaciais ocorridas no processo de expansão urbana. Por exemplo, as áreas já urbanizadas têm tendência para atração de urbanização, já as áreas com mata nativa ou presença de água, oferecem resistência para o crescimento urbano. A partir da configuração inicial e lançamento dos atributos no sistema, são geradas as tensões espaciais gerais que simulam o crescimento urbano.

Após a etapa de mapeamento — ou lançamento dos dados — pode-se iniciar a calibração dos parâmetros da modelagem. Segundo Polidori (2005), as simulações trabalham com dois tipos de parâmetros: a) os parâmetros vinculados aos atributos, os quais buscam replicar as dinâmicas ocorridas entre os agentes do sistema e b) os parâmetros vinculados às regras de crescimento, os quais regulam os fenômenos espaciais que interferem no crescimento urbano.

Após cinco tentativas experimentais, o modelo com melhor resultado obteve 79,0% de acertos, quando comparado com a realidade em 2022, mediante taxa de crescimento média de 2,0% por iteração, correspondendo cada iteração a um ano cronológico. Os parâmetros resultantes da calibração, podem ser visualizados nas figuras 06 e 07, a seguir, mediante as telas de trabalho do CityCell.



Attribute name	Type	Behavior	Active	Weight	Threshold	Mutable	Freezing	Percolator
Vazio_urbano_1985	Environmental	Resistance	<input checked="" type="checkbox"/>	1	1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
zonas altas	Environmental	Resistance	<input checked="" type="checkbox"/>	1	1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
alagamento_30m	Environmental	Resistance	<input type="checkbox"/>	1	1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
alagamento_37m	Environmental	Resistance	<input type="checkbox"/>	1	1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Area_urbanizada_1985	Urban	Attraction	<input type="checkbox"/>	1	1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Pedro_Osorio_1985	Urban	Attraction	<input checked="" type="checkbox"/>	1	1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Cerrito_1985	Urban	Attraction	<input checked="" type="checkbox"/>	1	1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Estrada_acesso_1985	Urban	Attraction	<input checked="" type="checkbox"/>	0,1	1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Acessos_secundarios_1985	Urban	Attraction	<input checked="" type="checkbox"/>	0,1	1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Mata_plantada_1985	Environmental	Resistance	<input checked="" type="checkbox"/>	0,8	1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Mata_nativa_1985	Environmental	Resistance	<input checked="" type="checkbox"/>	1	1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Campo_plantacao_1985	Environmental	Resistance	<input checked="" type="checkbox"/>	1	1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Aguas_lenticas_1985	Environmental	Resistance	<input checked="" type="checkbox"/>	1	1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Rio_1985	Environmental	Resistance	<input checked="" type="checkbox"/>	1	1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Arroios_linhas de drenagem	Environmental	Resistance	<input checked="" type="checkbox"/>	1	1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Arroios	Environmental	Resistance	<input checked="" type="checkbox"/>	1	1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Ponte	Urban	Attraction	<input checked="" type="checkbox"/>	1	1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Area_urbanizada_2022	Urban	Attraction	<input type="checkbox"/>	1	1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Pedro_Osorio_2022	Urban	Attraction	<input type="checkbox"/>	1	1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Cerrito_2022	Urban	Attraction	<input type="checkbox"/>	1	1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Estrada_acesso_2022	Urban	Attraction	<input type="checkbox"/>	0,2	1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Acessos_secundarios_2022	Urban	Attraction	<input type="checkbox"/>	0,2	1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Mata_nativa_2022	Environmental	Resistance	<input type="checkbox"/>	1	1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Mata_plantada_2022	Environmental	Resistance	<input type="checkbox"/>	1	1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Campo_plantacao_2022	Environmental	Resistance	<input type="checkbox"/>	1	1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Aguas_Lenticas_2022	Environmental	Resistance	<input type="checkbox"/>	1	1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Rio_2022	Environmental	Resistance	<input type="checkbox"/>	1	1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
déndividades	Urban	Neutral	<input type="checkbox"/>	0	0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Altitudes	Environmental	Resistance	<input checked="" type="checkbox"/>	1	1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Custom	Environmental	Resistance	<input checked="" type="checkbox"/>	1	1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 6: fatores e parâmetros utilizados para calibração do modelo, mediante telas extraídas do CityCell. **Fonte:** executado e extraído do programa CityCell, pelos autores, em 2023.

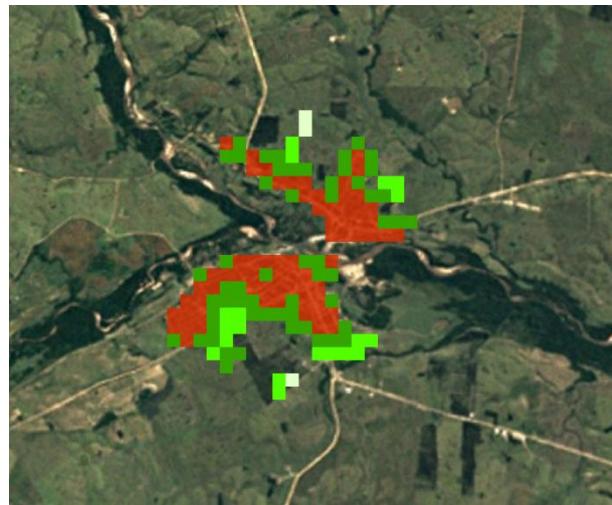


Figura 07: resultado da simulação, na iteração 37 (de 1985 até 2022), sendo que em verde escuro estão os acertos plenos, em verde médio os acertos com precisão de 200m e em verde mais claro, com mais de 200m. Em vermelho está a área urbanizada preexistente.

Fonte: executado e extraído do programa CityCell, pelos autores, em 2023.

No resultado gráfico da modelagem, observa-se que a maior parte da área coincidiu com a realidade de 2022, com menor porcentagem de acertos nas áreas periféricas da urbanização, onde aparecem loteamentos fragmentados e centrífugos às áreas preexistentes. As simulações obtiveram maior porcentagem de acertos para a área urbana de Pedro Osório, em relação ao resultado para Cerrito, sendo que o percentual final de acertos, para as duas cidades juntas, foi de 79,0%, o que pode ser considerado plenamente satisfatório, para o caso. Com o modelo calibrado desse modo, é possível simular o crescimento urbano para o futuro, bem como testar propostas de intervenção com o objetivo de modificá-lo. No caso das cidades de Cerrito e Pedro Osório, convém guiar esse crescimento para fora das áreas de risco de inundação, evitando danos ambientais e riscos para a urbanização.

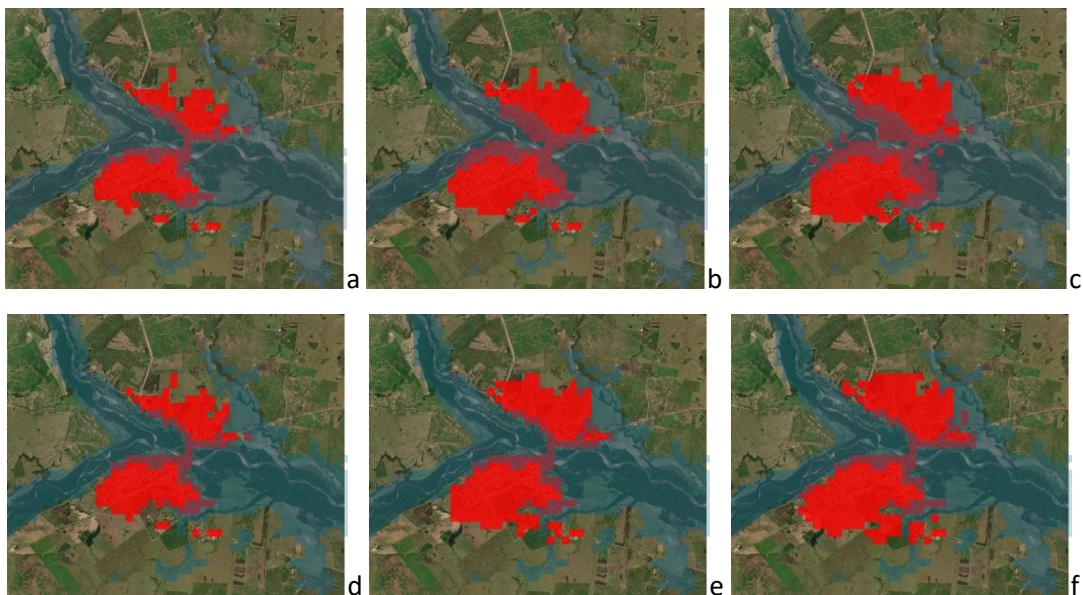
6. Simulação de futuro, preservação ambiental e áreas de inundação

A ocupação das áreas de preservação é considerada uma problemática recorrente nos dias atuais, consideradas as mudanças climáticas e a ocorrência de graves desastres ambientais nos últimos anos no Brasil. Apesar disso, a legislação que regulamenta as áreas de preservação apresenta deficiências quanto à determinação da competência das entidades

públicas para a gestão dessas áreas (Limonad e Alves, 2008), assim como as prefeituras que raramente efetivam estudos consistentes nesse assunto.

As APPs, Áreas de Preservação Permanente, estão definidas pelo Código Florestal como áreas naturais protegidas restritivamente, que têm o papel de preservar os recursos hídricos, bem como assegurar o bem-estar das populações humanas (BRASIL, lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012). Essa definição está associada ao fato de essas áreas configurarem usualmente áreas de risco de deslizamentos ou inundações, como o caso da área em estudo neste trabalho.

Ao observar a área urbanizada das cidades de Cerrito e Pedro Osório, percebe-se que a centralidade e adensamento urbano ocorre próximo ao encontro das cidades, onde também ocorre a área de várzea do Rio Piratini, a qual configura uma Área de Proteção Permanente. Com o objetivo de verificar a relevância da preservação das APPs, foram realizadas duas simulações de crescimento urbano para as cidades estudadas (Figura 08), sendo que na primeira simulação foram observadas as dinâmicas geradas a partir da simulação calibrada, modificando apenas a restrição de ocupação nas áreas de mata nativa. Na segunda simulação, foi mantida a restrição de urbanização nas áreas de mata nativa.


Legenda:

- Área Urbanizada em zona inundável
- Área Urbanizada fora da zona inundável
- Zona inundável

Figura 08: resultado da simulação de futuro, sem e com preservação das áreas de mata nativa:
 a) sem preservação, 2025; b) sem preservação, 2039; c) sem preservação, 2059; d) com preservação, 2025; e) com preservação, 2039 e f) com preservação, 2059. **Fonte:** executado e extraído do programa CityCell, pelos autores, em 2023.

A Figura 08 demonstra as simulações da área urbana para os tempos de três, dezessete e trinta e sete anos, a partir de 2022 (ano base para a situação atual). Na Figura 08, a área mapeada em azul escuro é correspondente a área de inundação, considerando como base a cota de 30 m; a simulação de crescimento urbano está demonstrada em tons de vermelho, sendo o vermelho escuro a área urbanizada situada em área alagável.

Ao simular o crescimento urbano sem restringir a urbanização nas áreas de mata nativa (Figura 8, itens “a”, “b” e “c”), o resultado sugere que o crescimento urbano tende a ocupar as áreas inundáveis, com 35,0% da cidade situada em área de inundação, no ano de 2059. Em contrapartida, ao simular a preservação das áreas de mata nativa (Figura 08, itens “d”, “e” e “f”), ocorre o desvio da urbanização para fora das áreas de risco de enchentes, com a ocorrência de 19,0% da área urbanizada em zona inundável no ano de 2059.

As simulações sugerem que há uma forte atração entre as áreas urbanas das duas cidades, provocando uma tendência para ocupação das áreas de inundação do rio Piratini, com

danos para o ambiente natural e riscos para a segurança urbana. Nesse sentido, a preservação das matas nativas, especialmente as localizadas na área de várzea do rio, auxiliam para o ordenamento do crescimento urbano.

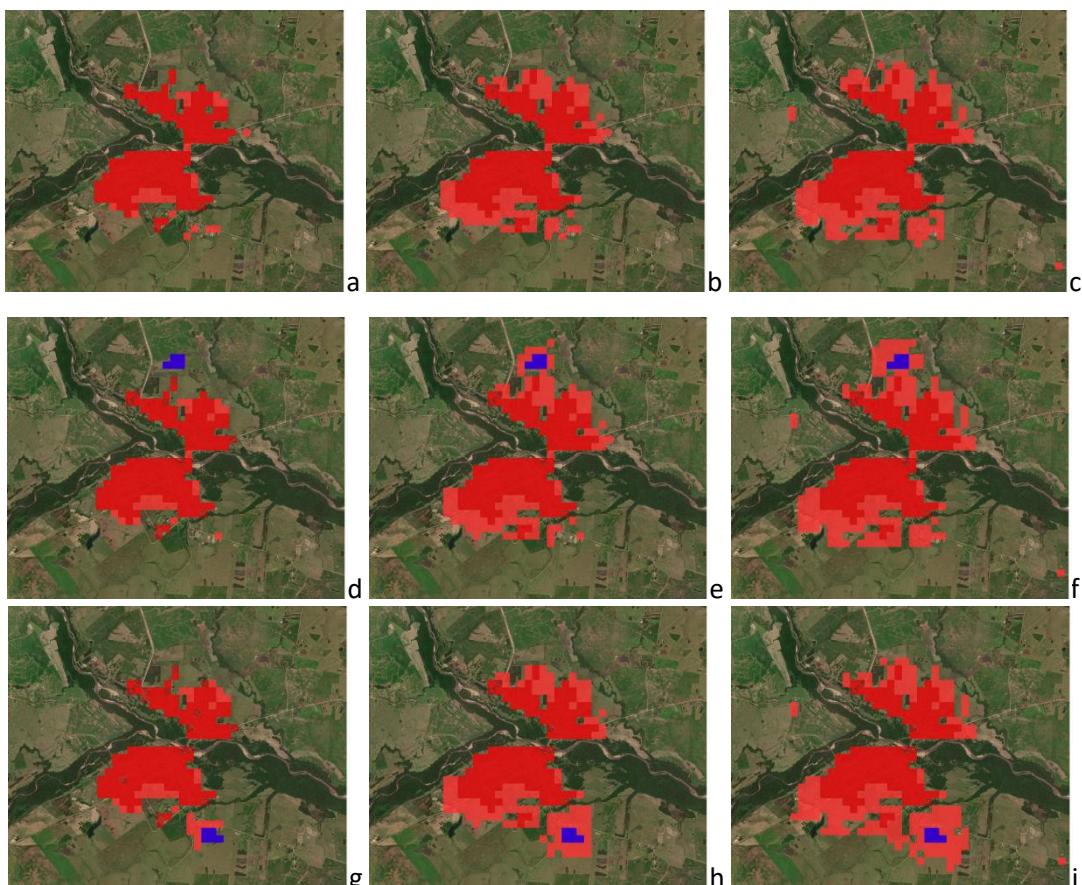
7. Simulação de futuro, polos de atração e direcionamento do crescimento urbano

A expansão do território urbano pode ocorrer devido a fatores socioeconômicos, políticos, ambientais, espaciais e tecnológicos (Alnsour, 2016). Diversos autores têm estudado os fatores que influenciam a expansão urbana, como ocorreu em Goiana, em Pernambuco, com a inserção de uma indústria automotiva. Com isso, novos empreendimentos imobiliários foram construídos, reconfigurando a expansão da cidade (Araujo et al., 2007). Na cidade de Almere, na Holanda, os planejadores urbanos direcionaram sua atenção para a implementação do conceito de "cidade-jardim", criando elementos atrativos que abrangem a vida social, a economia urbana, critérios populacionais, acessibilidade aos serviços, uma rede de transporte eficiente e a qualidade do ambiente construído. O objetivo foi promover um ambiente urbano que combine harmoniosamente aspectos naturais e urbanos, buscando proporcionar uma alta qualidade de vida para os moradores (Walaa et al., 2023).

Estes elementos, que influenciam no crescimento e desenvolvimento das cidades, podem ser considerados polos de atração, como aparecem no trabalho de Ferreira (2019), que estudou os municípios que atuam como polos de atração para a Região Nordeste do Rio Grande do Sul. A presença dos municípios de Santa Rosa, Santo Ângelo e Ijuí implica em uma (re)organização espacial significativa do território em que estão inseridos. Essas cidades desempenham funções que as caracterizam como centros polarizadores, exercendo influência sobre as áreas circundantes (Ferreira, 2019).

Diferentemente dos casos anteriores, mas na mesma lógica de atração de crescimento urbano, neste estudo foram introduzidos polos de atração intraurbanos, com o objetivo de observar seu impacto no crescimento das cidades de Cerrito e Pedro Osório, até o ano de 2059, observando sua capacidade de induzir crescimento para áreas seguras, fora das áreas de inundação do Rio Piratini. Os atributos desse experimento são os mesmos da simulação anterior, restringindo a ocupação nas áreas de mata nativa, porém adicionando um polo atrativo com o valor de peso igual a 2, ou seja, com maior influência de atração em comparação aos demais atributos, que têm peso igual a 1.

Um polo de atração foi implementado primeiramente numa cidade, depois na outra: a primeira em Cerrito, próximo à estrada RS-706, que conecta a BR-116 à BR-392; a segunda em Pedro Osório, localizado entre as estradas RS-706 e RS-704, que são as principais vias de acesso à cidade, a partir da BR-116. Essa escolha considerou a acessibilidade já existente, visando facilitar o deslocamento e a integração do novo polo com as vias de transporte importantes da região.



Legenda:

- Área urbanizada
- Crescimento urbano
- Polo de atração

Figura 09: resultado da simulação do crescimento urbano em Cerrito e Pedro Osório: a) sem polo, 2025; b) sem polo, 2039; c) sem polo, 2059; crescimento médio de 2,0%; d) polo em Cerrito, 2025; e) polo em Cerrito, 2039; f) polo em Cerrito, 2059; crescimento médio 3,4%; g) polo em Pedro Osório, 2025; h) polo em Pedro Osório, 2039; i) polo em Pedro Osório, 2059; crescimento médio 4,3%. **Fonte:** executado e extraído do programa CityCell, pelos autores, em 2023.

Ao realizar a simulação sem o polo de atração, o crescimento médio da cidade se manteve perto de 2,0%, porém quando foi inserido o polo, o crescimento aumentou consideravelmente. O polo de atração, localizado em Cerrito, conforme apresenta a Figura 09, em “d”, “e” e “f”, teve 1,3% a mais no crescimento urbano, quando comparado ao crescimento sem polo de atração, apresentado na Figura 09, em “a”, “b” e “c”. Porém, ao comparar com o crescimento quando o polo é localizado em Pedro Osório, visto na Figura 09, em “g”, “h” e “i”, essa diferença no crescimento urbano aumenta para 2,3%. Já o desenho da área urbana ficou parecido em todas as simulações, sempre mostrando que a presença do polo de atração aumenta o crescimento urbano em seu entorno.

Foi possível observar que o polo de atração provocou mudanças mais intensas quando localizado em Pedro Osório, sendo menos impactante quando posicionado em Cerrito. Isso sugere que a presença e a localização do polo de atração podem desempenhar um papel estratégico no crescimento urbano de ambas as cidades. Assim, a implantação de um novo polo em Pedro Osório — município de maior porte — tende a acirrar as diferenças entre as duas cidades, enquanto sua instalação em Cerrito pode contribuir para equilibrar suas dimensões urbanas.

8. Conclusões

Através dos resultados com as simulações de crescimento das áreas urbanizadas das cidades de Cerrito e Pedro Osório, dedicadas às questões de preservação ambiental, ocupação sobre áreas de inundação do Rio Piratini e à capacidade de novos polos de atração de direcionarem o crescimento urbano, podem ser enunciadas as seguintes conclusões:

a) há um processo de atração entre as duas cidades, que tem implicado na ocupação urbana das margens do Rio Piratini, com localização de funções dentro da área de inundação do Rio. Esse fato se comprova através dos registros das últimas grandes enchentes do Século XX, em 1959, 1983 e 1992, onde centenas de edificações foram destruídas pelas águas. Resta saber como será continuado esse processo de urbanização, o qual pode seguir provocando a ocupação de áreas próximas do Rio, ou em áreas mais distantes, mais altas e mais seguras;

b) ao realizar o experimento com simulação de crescimento urbano das duas cidades conjuntamente, foi possível replicar no computador a situação atual, a partir de 1985,

período em que foi encontrado mapeamento consistente e que inclui pelo menos uma grande enchente, em 1992. Para esse período de 37 anos, foi alcançada uma calibragem satisfatória do modelo com autômatos celulares, mediante 79,0% de acertos, com precisão de 200m. Todavia, o modelo não foi capaz de reproduzir urbanizações fragmentadas e centrífugas às cidades, com loteamentos com formas fortemente lineares e discrepantes do restante do tecido urbano. Sendo esses casos exceções no conjunto, as simulações foram legitimadas e realizadas para cenários de futuro;

c) os exercícios de simulação tendencial para o futuro, com o modelo calibrado, mostraram a importância de preservar a vegetação ciliar e de garantir que não haja urbanização em Áreas de Preservação Permanente (APPs), como definidas pela lei federal. Os experimentos demonstraram que, sem medidas de preservação, a ocupação em áreas de inundação do Rio Piratini aumentará, acirrando os problemas e riscos acumulados historicamente. De outro modo, as simulações realizadas com a preservação das APPs, impedindo sua ocupação por urbanização, mostraram que o crescimento urbano redireciona-se para áreas mais distantes, altas e seguras. Sendo assim, pode ser assumido que a preservação ambiental e a expansão fora de áreas de inundação estão associadas, com mútuo fortalecimento;

d) no caso de simulação com novos polos de atração, foi possível observar que o efeito da implantação de um novo polo em Cerrito é menor do que em Pedro Osório. Esse resultado pode estar associado a três aspectos morfológicos principais: d.1) ao tamanho das cidades, pois Cerrito é menor e alcança menos interações de curta distância, com o novo polo; d.2) A forma urbana de Cerrito é menos compacta, desenvolvendo-se de maneira mais paralela ao Rio Piratini, o que enfraquece a concentração do potencial de novas urbanizações no entorno do novo polo de atração; d.3) o sistema viário de acesso à área previamente urbanizada potencializa o efeito de crescimento em Pedro Osório, pois essa cidade apresenta vias secantes e concêntricas em relação à cidade preexistente.

Sendo desse modo, duas assertivas principais parecem advir desse trabalho:

e) cidades à beira de rios, especialmente quando há ocupação de ambos os lados, tendem a ocupar suas áreas de inundação, com danos para o ambiente natural e riscos para a segurança urbana; essa tendência demanda ações de preservação ambiental proativas, que impeçam a urbanização de áreas de interesse ambiental, na interface com os rios;

f) polos de atração podem ajudar no redirecionamento do crescimento urbano, porém dependem de interação com outros fatores, como o tamanho das cidades, a morfologia das áreas urbanizadas e o traçado das vias de acesso, no encontro com as áreas ainda não urbanizadas.

Referências

- ALBERTI, M. **Modeling the urban ecosystem: a conceptual framework.** In: Environment and Planning B – Planning and Design v. 26. London: Pion, 1999. p. 605-630.
- ALMEIDA, Cláudia Maria; CÂMARA, G. MONTEIRO, A. M. **Geoinformação em urbanismo: cidade real X cidade virtual.** São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 368 p.
- ALNSOUR, Jamal Ahmad. **Managing urban growth in the city of Amman, Jordan.** Cities, 50, 2016. p. 93-99.
- ARAUJO, Cristina Pereira De; LUNA, Alexandra Oliveira. **Goiana: Cidade Das Oportunidades?** A Produção Do Espaço Urbano Resultante Da Implantação Do Polo Industrial De Desenvolvimento Norte. Oculum Ensaios 14.3, 2017. p. 577-94.
- AXELROD, R. **Advancing the art of simulation in the social sciences.** International Conference on Computer Simulation and the Social Sciences. Cortona, Italy, 1997. 12 p.
- BATTY, Michael. **Urban evolution on the desktop: simulation with the use of extended cellular automata.** Environment and Planning A, v. 30, 1998. p. 1943-1967.
- BATTY, Michael. Urban Modeling, in N. Thrift and R. Kitchin (Editors) **International Encyclopedia of Human Geography**, Elsevier, Oxford, UK, 2009. p. 51-58.
- BATTY, Michael; COUCLELIS, EICHEN, M. **Urban system as cellular automata.** Environment and Planning B: Planning and Design 24(2). London: Pion. 1997, p. 159-164.
- BATTY, Michael; TORRENS, Paul M. **Modeling complexity: the limits to prediction.** London: Casa, UCL. 36 p, 2001. Disponível em: http://www.casa.ucl.ac.uk/working_papers/paper36.pdf. Acesso em: 17 de fev. 2007.
- BENTO, Genes Leão. **Raízes de Nossa História.** 1. ed. Pedro Osório: Secretaria Municipal de Cultura de Pedro Osório, 2005. 232 p.

BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Institui o novo código florestal brasileiro. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm. Acesso em: junho de 2023.

BURROUGH, P. A. **Geocomputation: a primer.** London: John Wiley & Sons Ltd. 1998, 30p.
CALDAS, Pedro. **Pedro Osório, sim senhor!: retrato de um município gaúcho.** 1 ed. Pelotas: Satya, 1990. 124 p.

ECHENIQUE, Marcial (Org.). **Modelos Matemáticos de La Estrutura Urbana: Aplicaciones en América Latina.** Buenos Aires: SIAP, 1975. 287 p.

FERREIRA, Lenize Rodrigues. **Notas sobre a organização da rede urbana no noroeste do rio grande do sul.** Para Onde!?, v. 12 n. 1, 2019, p. 61-80.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Demográfico, 2010.** Rio de Janeiro: IBGE, 2012.

JOHNSON, S. **Emergência: a vida integrada de formigas, cérebros, cidades, softwares.** Tradução de Maria C. P. Dias. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed, 2003. 231 p.

KRAFTA, Romulo. **Modelling Intraurban configurational development.** Environment and Planning B: Planning and Design, v. 21. London: Pion, 1994. p. 67-82.

LIMONAD, E; ALVES, J. **Áreas de Proteção Ambiental e Áreas de Preservação Permanente como instrumento legal de regulação urbano-ambiental?** In: Encontro Nacional da Anppas, 4. Brasília, jun. 2008.

LIU, Yan. **Modelling Urban Development with Geographical Information Systems and Cellular Automata.** Boca Raton, Florida: CRC Press (Taylor & Francis Group), 2009. 188 p.

MARQUES, Mara-Lúcia; MÜLLER-PESSÔA, Vinícius; CAMARGO, Danilo; CECAGNO, Camila. **Simulação de cenários urbanos por autômato celular para modelagem do crescimento de Campinas – SP, Brasil.** EURE, vol. 47, núm. 142, 2021 Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile. Disponível em: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=19668189010>. DOI: <https://doi.org/10.7764/eure.47.142.10>.

O'SULLIVAN, D.; TORRENS, M. **Cellular models of urban systems.** London: Casa, UCL, 2000. 11 p.

POLIDORI, M. **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, 2005. 328 p.

POLIDORI, M. **Simulação do Ambiente da Cidade.** Anais X Encontro Nacional da ANPUR. Belo Horizonte: ANPUR, 2003. 20 p.

PORTUGALI, J. **Self-organizing cities.** Futures, v. 29 nº 4/5. Great Britain: Elsevier Science, 1997. p. 353-380.

TELLES, Rossana Madruga. **Inundações urbanas nos Municípios de Pedro Osório e Cerrito.** Dissertação (Mestrado em Geociências) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: UFRGS, 2002. 74 p.

TORRENS, Paul. **How land-use-transportation models work.** London: Casa, UCL, 2000. 75 p. Disponível em: <https://www.ucl.ac.uk/bartlett/casa/publications/2000/apr/casa-working-paper-20>. Acesso em: junho de 2023.

WALAA, Hussien; Hisham, S. Gabr; Mohamed, A. Zayed. **Examining the Influential Factors on Urban Growth and Population Attraction: A Case Study of Almere, Netherlands.** Inf. Sci. Lett. 12, No. 5, 2023. p. 1863-1875.

WILSON. A.J. **Mathematical Methods in Human Geography and Planning.** Great Britain: John Wiley & Publishers, 1985. 404 p.

Base de dados cartográficos:

CUNHA, Noel Gomes da.; SILVEIRA, Ruy José C. **Estudo dos solos do município de Pelotas.** 1:100.000. Pelotas: EMBRAPA/CPACT, Ed. UFPEL, 1996. 50 p.

DIGITAL GLOBE. **Products. 2023.** Disponível em <https://didcovermaxar.com>. Acesso em: maio de 2023.

EMBRAPA TERRITORIAL. **Satélites de Monitoramento.** Campinas, 2018. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/satelites-de-monitoramento/missoes/srtm>> Acesso em junho de 2023.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Malha Municipal Digital da Divisão Político-Administrativa Brasileira.** Escala 1:250.000. Rio de Janeiro: IBGE, 2010.

SEMA e FEPAM – Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura/RS e Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Röessler. **Base cartográfica do estado do rio grande do sul.** Escala 1:25.000 – BCRS25 VERSÃO 1.0 – 2018 Escala 1: 25.000. Disponível em: <http://ww2.fepam.rs.gov.br/bcrs25/> 2018. Acesso: jul. 2022.

Documentos Audiovisuais:

PEDRO OSÓRIO. **Uma cidade arrasada.** RBS Documento Especial. Produção: Lize Bainy, Laura Seligman, Wilson Diniz Jr. e Valério Brito. Diretor executivo: Roberto Appel. RBS TV, 1992. 1 vídeo (42 min). Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=mrceWdnuPGY>. Acesso em: 17 jun. 2023.