

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS GRADUAÇÃO  
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO  
MESTRADO EM ARQUITETURA E URBANISMO



**SIMULAÇÕES DE CRESCIMENTO URBANO EM PLANÍCIES DE INUNDAÇÃO  
NAS CIDADES DE FRONTEIRA ENTRE BRASIL E URUGUAI**

FLÁVIO ALMANSA BAUMBACH

PELOTAS, 2020

Flávio Almansa Baumbach

**SIMULAÇÕES DE CRESCIMENTO URBANO EM PLANÍCIES DE INUNDAÇÃO  
NAS CIDADES DE FRONTEIRA ENTRE BRASIL E URUGUAI**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação  
em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de  
Pelotas como requisito parcial à obtenção de título de  
Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Área de concentração: Arquitetura, patrimônio e sistemas  
urbanos

Linha de pesquisa: Urbanismo contemporâneo

Orientador Prof. Dr. Maurício Couto Polidori  
Pelotas, 2020

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas  
Catalogação na Publicação

B111s Baumbach, Flávio Almansa

Simulações de crescimento urbano em planícies de inundação nas cidades de fronteira entre Brasil e Uruguai / Flávio Almansa Baumbach ; Maurício Couto Polidori, orientador. — Pelotas, 2020.

158 f. : il.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, 2020.

1. Expansão urbana. 2. Modelagem urbana. 3. Autômatos celulares. 4. Inundações. I. Polidori, Maurício Couto, orient. II. Título.

CDD : 711.4

Elaborada por Leda Cristina Peres CRB: 10/2064

**Flávio Almansa Baumbach**

**SIMULAÇÕES DE CRESCIMENTO URBANO EM PLANÍCIES DE INUNDAÇÃO  
NAS CIDADES DE FRONTEIRA ENTRE BRASIL E URUGUAI**

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Arquitetura e Urbanismo do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Pelotas.

Data da defesa: 23 de dezembro 2020

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. Maurício Polidori (Orientador)

Doutor em Ecologia pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

---

Prof. Dr. Eduardo Rocha (Membro Interno)

Doutor em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

---

Prof. Dr. Adriano Luis Heck Simon (Membro Externo)

Doutor em Geografia pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho

---

Dr. Marcus Saraiva (Membro Externo)

Doutor em Geographic Information Science (GIS) pela Birkbeck University of London

**Este trabalho é dedicado aos 8  
milhões de brasileiros que vivem em  
áreas de risco de inundações.**

## **AGRADECIMENTOS**

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelo fomento a esta pesquisa.

Aos professores Adriano Luís Heck Simon, Eduardo Rocha e Marcus Saraiva, por comporem a banca de avaliação desse trabalho.

Ao meu orientador, Maurício Couto Polidori, pela confiança e entusiasmo com o tema estudado.

Ao grupo de pesquisa Travessias na Fronteira, pelos dias imersos na viagem às cidades da fronteira entre Brasil e Uruguai.

À minha mãe, porto seguro, Lauriana Almansa, pelo apoio e incentivo, desde sempre, ao estudo.

À minha família e amigos, os quais amo e quero estar perto.

## RESUMO

BAUMBACH, Flávio Almansa. **Simulações de crescimento urbano em planícies de inundação nas cidades de fronteira entre Brasil e Uruguai.** 2020. 158f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, 2020.

O processo de crescimento urbano horizontal exige a modificação do ambiente natural para suportar as atividades urbanas, pois, a cidade, ao se expandir, engloba o ambiente urbanizando-o. O processo de urbanização, por sua vez, tem a característica de ignorar os cursos de água naturais e dependendo da intensidade da urbanização pode eliminar linhas de drenagem, interferindo, consequentemente, nas dinâmicas naturais. Ao mesmo tempo, cidades situadas próximas a grandes cursos de água, como rios, podem ser atingidas por eventos hidrológicos naturais, como enchentes e inundações. Esse é o caso das cidades limítrofes na fronteira entre o Brasil e o Uruguai: Jaguarão (BR) – Rio Branco (UY), Quaraí (BR) – Artigas (UY) e Barra do Quaraí (BR) – Bella Unión (UY), as quais tiveram seus núcleos originais implantados em áreas bem drenadas, mas que ao se expandirem, em seus processos de crescimento urbano, ocuparam áreas situadas em planícies de inundaçõao. Essas cidades estão classificadas com alto grau de vulnerabilidade a inundações, sendo periodicamente atingidas por elas. Com base nisso, o trabalho propôs simular a expansão urbana das cidades citadas relacionando-as com as áreas inundáveis, a fim de identificar como ocorre o processo de crescimento urbano sobre as planícies de inundaçõao. Para realizar as simulações de crescimento urbano futuro propostas, foram utilizados recursos de simulação computacional através da modelagem urbana com autômatos celulares. Para um tempo futuro de 40 anos, se não considerada a proibição de ocupação sobre as planícies de inundaçõao, os resultados indicaram que Jaguarão (BR) e Rio Branco (UY) podem ter 30% de seu crescimento urbano sobre essas áreas, Quaraí (BR) e Artigas (UY), 70% e Barra do Quaraí (BR) e Bella Unión (UY), 14%. Ainda, Jaguarão / Rio Branco e Quaraí / Artigas apresentam tendência de crescimento concêntrico, enquanto Barra do Quaraí e Bella Unión apresentam propensão de crescimento linear.

**Palavras-chave:** Expansão urbana; modelagem urbana; autômatos celulares; inundações.

## ABSTRACT

BAUMBACH, Flavio Almansa. **Urban growth simulations at floodplains in the border cities between Brazil and Uruguay.** 2020. 158f. Dissertation (Master in Architecture and Urbanism) – Graduate Course in Architecture and Urbanism, Federal University of Pelotas, 2020.

The horizontal urban growth process requires the modification of the natural environment to support urban activities since the city, when expanding, encompasses the environment by urbanizing it. The urbanization process, in its turn, has the feature of ignoring natural watercourses and depending on the intensity of urbanization, it can eliminate drainage lines, consequently interfering with natural dynamics. At the same time, cities located near to large water courses, such as rivers, can be affected by natural hydrological events, such as floods. This is the case of neighboring cities on the border between Brazil and Uruguay: Jaguarão (BR) - Rio Branco (UY), Quaraí (BR) - Artigas (UY) and Barra do Quaraí (BR) - Bella Unión (UY), cities that had their original nucleus implanted in high zones, but as they expanded - in their urban growth processes - have occupied areas located in floodplains. These cities are classified with a high degree of vulnerability to flooding, being periodically affected by them. Based on this, the work proposed to simulate the urban expansion of the cities mentioned by relating them to the flood zones, in order to identify how the urban growth process takes place on the floodplains. To perform the proposed future urban growth simulations, computer simulation resources were used through urban modeling with cellular automata. For a future time of 40 years, if not considered the prohibition of the occupation on the floodplains, the results indicate that Jaguarão (BR) e Rio Branco (UY) may have 30% of their urban growth on these areas, Quaraí (BR) e Artigas (UY), 70% and Barra do Quaraí (BR) e Bella Unión (UY), 14%. Furthermore, Jaguarão / Rio Branco and Quaraí / Artigas show a concentric growth trend, while Barra do Quaraí and Bella Unión show a tendency for linear growth.

**Keywords:** Urban growth; urban modelling; cellular automata; floods.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.1</b> – Mapa com a localização das cidades limítrofes entre Brasil e Uruguai.....	24
<b>Figura 1.2</b> – Área de recorte do trabalho para Jaguarão e Rio Branco.....	25
<b>Figura 1.3</b> – Área de recorte do trabalho para Quaraí e Artigas.....	26
<b>Figura 1.4</b> – Área de recorte do trabalho para Barra do Quaraí e Bella Unión.....	27
<b>Figura 1.5</b> – Setores de alto risco a inundações na cidade de Jaguarão.....	28
<b>Figura 1.6</b> – Setores de alto risco a inundações na cidade de Quaraí.....	29
<b>Figura 1.7</b> – Montagem sobre inundações em Quaraí.....	30
<b>Figura 1.8</b> – Inundação em Artigas.....	30
<b>Figura 1.9</b> – Zonas com risco de inundação em Bella Unión.....	31
<b>Figura 1.10</b> – Relações morfológicas para Jaguarão e rio Branco.....	33
<b>Figura 1.11</b> – Relações morfológicas para Quaraí e Artigas.....	34
<b>Figura 1.12</b> – Relações morfológicas para Barra do Quaraí e Bella Unión.....	35
<b>Figura 2.1</b> – Enchente e inundação.....	47
<b>Figura 2.2</b> – Jogo da Vida de Conway.....	63
<b>Figura 2.3</b> – Vizinhanças clássicas em AC.....	65
<b>Figura 3.1</b> – Exemplo de entrada de dados em ambiente celular.....	69
<b>Figura 3.2</b> – Exemplo de centralidade espacial conforme Krafta.....	71
<b>Figura 3.3</b> – Grafos integrado à autômatos celulares.....	72
<b>Figura 3.4</b> – Distribuição de forças de tensões em autômatos celulares.....	73
<b>Figura 3.5</b> – Output Cell Type para Arambaré.....	78
<b>Figura 4.1</b> – Mapa com localização das cidades de estudo.....	80
<b>Figura 4.2</b> – Mapa com sobreposição de tratados antigos.....	81
<b>Figura 4.3</b> – Área de estudo de Jaguarão e Rio Branco.....	84
<b>Figura 4.4</b> – Recorte espacial para Jaguarão e Rio Branco.....	85
<b>Figura 4.5</b> – Trabalhos cartográficos de referência.....	86
<b>Figura 4.6</b> – Atributos urbanos para Jaguarão e Rio Branco 1.....	87

<b>Figura 4.7</b> – Atributos urbanos para Jaguarão e Rio Branco 2.....	88
<b>Figura 4.8</b> – Atributos naturais para Jaguarão e Rio Branco 1.....	89
<b>Figura 4.9</b> – Atributos naturais para Jaguarão e Rio Branco 2.....	90
<b>Figura 4.10</b> – Mapas hipsométricos e <i>inputs</i> para Jaguarão e Rio Branco.....	91
<b>Figura 4.11</b> – Cenário modelado no <i>CityCell</i> para o ano de 1975.....	92
<b>Figura 4.12</b> – Simulação urbana de 1975 até 2015 para Jaguarão e Rio Branco.....	93
<b>Figura 4.13</b> – Análise <i>Fuzzy Comparison R3</i> para Jaguarão e Rio Branco.....	95
<b>Figura 4.14</b> – Iteração de tempo 00 para Jaguarão e Rio Branco.....	96
<b>Figura 4.15</b> – Simulação de crescimento com área alagável <i>mutable</i> .....	97
<b>Figura 4.16</b> – Simulação de crescimento com área alagável <i>freezing</i> .....	98
<b>Figura 4.17</b> – Análise da densificação urbana na zona comercial de Rio Branco.....	99
<b>Figura 4.18</b> – Crescimento para Jaguarão e Rio Branco, tempo 40.....	100
<b>Figura 4.19</b> – Área de estudo de Quaraí e Artigas.....	103
<b>Figura 4.20</b> – Recorte espacial para Quaraí e Artigas.....	104
<b>Figura 4.21</b> – Trabalhos cartográficos de referência.....	105
<b>Figura 4.22</b> – Atributos urbanos para Quaraí e Artigas 1.....	106
<b>Figura 4.23</b> – Atributos urbanos para Quaraí e Artigas 2.....	107
<b>Figura 4.24</b> – Atributos naturais para Quaraí e Artigas 1.....	108
<b>Figura 4.25</b> – Atributos naturais para Quaraí e Artigas 2.....	109
<b>Figura 4.26</b> – Mapas hipsométricos e <i>inputs</i> para Quaraí e Artigas.....	110
<b>Figura 4.27</b> – Cenário modelado no <i>CityCell</i> para o ano de 1975.....	111
<b>Figura 4.28</b> – Simulação urbana de 1975 até 2015 para Quaraí e Artigas.....	112
<b>Figura 4.29</b> – Análise <i>Fuzzy Comparison R3</i> para Quaraí e Artigas.....	113
<b>Figura 4.30</b> – Iteração de tempo 00 para Quaraí e Artigas.....	115
<b>Figura 4.31</b> – Simulação de crescimento com área alagável <i>mutable</i> .....	116
<b>Figura 4.32</b> – Simulação de crescimento com área alagável <i>freezing</i> .....	117
<b>Figura 4.33</b> – Análise da consolidação urbana de Quaraí.....	118
<b>Figura 4.34</b> – Crescimento para Quaraí e Artigas, tempo 40.....	119
<b>Figura 4.35</b> – Área de estudo de Barra do Quaraí e Bella Unión.....	121
<b>Figura 4.36</b> – Recorte espacial para Barra do Quaraí e Bella Unión.....	123
<b>Figura 4.37</b> – Trabalhos cartográficos de referência.....	124

<b>Figura 4.38</b> – Atributos urbanos para Barra do Quaraí e Bella Unión 1.....	125
<b>Figura 4.39</b> – Atributos urbanos para Barra do Quaraí e Bella Unión 2.....	126
<b>Figura 4.40</b> – Atributos naturais para Barra do Quaraí e Bella Unión 1.....	127
<b>Figura 4.41</b> – Atributos naturais para Barra do Quaraí e Bella Unión 2.....	128
<b>Figura 4.42</b> – Mapas hipsométricos e <i>inputs</i> para Barra do Quaraí e Bella Unión.....	129
<b>Figura 4.43</b> – Cenário modelado no <i>CityCell</i> para o ano de 1975.....	130
<b>Figura 4.44</b> – Simulação de 1975 até 2015 para Barra do Quaraí e Bella Unión.....	131
<b>Figura 4.45</b> – Análise <i>Fuzzy Comparison R3</i> para Barra do Quaraí e Bella Unión.....	132
<b>Figura 4.46</b> – Iteração de tempo 00 para Barra do Quaraí e Bella Unión.....	134
<b>Figura 4.47</b> – Simulação de crescimento com área alagável <i>mutable</i> .....	135
<b>Figura 4.48</b> – Simulação de crescimento com área alagável <i>freezing</i> .....	136
<b>Figura 4.49</b> – Contextualização da área de Barra do Quaraí e Bella Unión.....	137
<b>Figura 4.50</b> – Crescimento para Quaraí e Artigas, tempo 40.....	138

## **LISTA DE TABELAS**

<b>Tabela 4.1</b> – Tabela da análise <i>Fuzzy R3</i> para Jaguarão e Rio Branco.....	94
<b>Tabela 4.2</b> – Tabela da análise <i>Fuzzy R3</i> para Quaraí e Artigas.....	114
<b>Tabela 4.3</b> – Tabela da análise <i>Fuzzy R3</i> , para Barra do Quaraí e Bella Unión.....	133

## **LISTA DE EQUAÇÕES**

<b>Equação 1 – Tensão gerada entre os carregamentos de um par de células.....</b>	<b>71</b>
<b>Equação 2 – Medida de centralidade gerada entre um par de células.....</b>	<b>71</b>
<b>Equação 3 – Equação de centralidade celular.....</b>	<b>73</b>
<b>Equação 4 – Equação de potencial crescimento celular.....</b>	<b>75</b>

## LISTA DE ABREVIASÕES E SIGLAS

**AC** – Autômato Celular

**ANA** – Agência Nacional de Águas

**AR** – Argentina

**BR** – Brasil

**CBH** – Comitês de Bacias Hidrográficas

**CEMADEN** – Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais

**CENAD** – Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres

**COBRADE** – Classificação e Codificação Brasileira de Desastres

**CPRM** – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

**ECP** – Estado de Calamidade Pública

**FAUrb** – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo

**IBGE** – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

**IHP** – o *International Hydrological Programm*

**LabUrb** – Laboratório de Urbanismo

**MI** – Ministério da Integração

**ODM** – Objetivos de Desenvolvimento do Milênio

**ODS** – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

**OECD** – *Organisation for Economic Co-operation and Development*

**ONU** – Organização das Nações Unidas

**PNPDEC** – Política Nacional de Proteção e Defesa Civil

**PNRH** – Política Nacional dos Recursos Hídricos

**PPGECO** – Programa de Pós-Graduação em Ecologia

**RNH** – Rede Hidrometeorológica Nacional

**S2ID** – Sistema Integrado de Informações sobre Desastres

**SACI** – Simulador do Ambiente da Cidade

**SE** – Situação de Emergência

**SEDEC** – Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil

**SINAЕ** – *Sistema Nacional de Emergencias*

**Singreh** – Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos

**SNIRH** – Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos

**SINPDEC** – Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil

**SRTM** – *Shuttle Radar Topographic Mission*

**TGS** – Teoria Geral dos Sistemas

**UFPel** – Universidade Federal de Pelotas

**Un-Water** – *United Nations Water*

**UNESCO** – *United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*

**UFRGS** – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**UY** – Uruguai

**WWAP** – *World Water Assessment Programme*

**WWRD** – *World Water Development Report*

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>18</b>
<b>1.1 Objetivos.....</b>	<b>22</b>
1.1.1 Objetivo principal .....	22
1.1.2 Objetivos específicos.....	22
<b>1.2 Objeto de estudo.....</b>	<b>24</b>
<b>1.3 Justificativa .....</b>	<b>28</b>
<b>2. REVISÃO TEÓRICA .....</b>	<b>36</b>
<b>2.1 Cidades e ambiente hídrico.....</b>	<b>36</b>
2.1.1 Evolução da gestão das águas.....	38
2.1.2 Aspectos de gestão das águas no brasil.....	42
2.1.3 Águas urbanas e drenagem urbana.....	44
2.1.4 Planícies de inundação .....	45
2.1.5 Eventos hidrológicos e proteção civil .....	47
2.1.6 Considerações sobre urbanização e ambiente hídrico .....	51
<b>2.2 Morfologia, modelagem e dinâmicas urbanas.....</b>	<b>53</b>
2.2.1 Morfologia urbana .....	53
2.2.2 Sistemas, complexidade e urbanismo .....	58
2.2.3 Modelagem e dinâmicas urbanas.....	60
2.2.4 Autômatos celulares e modelagem urbana.....	63
<b>3. SIMULAÇÕES DE CRESCIMENTO URBANO .....</b>	<b>67</b>
<b>3.1 Plataforma <i>Citycell</i>.....</b>	<b>67</b>
3.1.1 Entrada de dados .....	68
3.1.2 Medidas de centralidade espacial e centralidade celular .....	70
3.1.3 Regra <i>Threshold Potencial</i> .....	75
3.1.4 Saída de dados.....	76
<b>EPÍLOGO DOS CAPÍTULOS 1, 2 E 3 .....</b>	<b>78</b>
<b>4. ESTUDOS DE CASO.....</b>	<b>80</b>
<b>4.1 Jaguarão (BR) – Rio Branco (UY) .....</b>	<b>83</b>
4.1.1 Recorte espacial.....	85

4.1.2 Dados de entrada.....	85
4.1.3 Calibragem .....	92
4.1.4 Simulação de crescimento futuro .....	96
4.1.5 Simulação x resultados alcançados .....	99
<b>4.2 Quaraí (BR) – Artigas (UY).....</b>	<b>101</b>
4.2.1 Recorte espacial.....	104
4.2.2 Dados de entrada.....	104
4.2.3 Calibragem .....	111
4.2.4 Simulação de crescimento futuro .....	114
4.2.5 Simulação x resultados alcançados .....	118
<b>4.3 Barra do Quaraí (BR) – Bella Unión (UY).....</b>	<b>120</b>
4.3.1 Recorte espacial.....	123
4.3.2 Dados de entrada.....	123
4.3.3 Calibragem .....	130
4.3.4 Simulação de crescimento futuro .....	133
4.3.5 Simulação x resultados alcançados .....	137
<b>5. CONCLUSÕES .....</b>	<b>139</b>
5.1 Considerações gerais .....	139
5.2 Limitações da pesquisa.....	143
5.3 Possibilidade de replicação.....	144
5.4 Contribuições da pesquisa .....	144
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>146</b>
<b>APÊNDICE.....</b>	<b>146</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O crescimento urbano é um processo contínuo pelo qual as cidades passam desde o seu surgimento, em maior ou menor intensidade, e pode ocorrer de dois modos distintos: na vertical ou na horizontal (JAPIASSÚ, 2014). O crescimento urbano vertical consiste na densificação das áreas urbanas existentes, sem aumento dos limites urbanizados. Já o crescimento horizontal implica no aumento da área efetivamente urbanizada, através da urbanização de áreas não urbanizadas.

As áreas naturais da superfície terrestre, por sua vez, são drenadas por linhas de drenagem que partem das áreas mais altas do relevo – se unem umas às outras, formando os rios – e escorrem em direção ao exutório<sup>1</sup>. Esse é um processo dinâmico que ocorre em escala global e faz parte do Ciclo Hidrológico<sup>2</sup>. Ao mesmo tempo, a modificação da superfície terrestre para o desenvolvimento das atividades humanas altera os processos e as dinâmicas naturais, sendo sobre a rede hidrográfica as maiores alterações físico-ambientais do relevo ocasionadas pelas atividades humanas (NIR, 1983).

Nesse sentido, as cidades têm relação histórica de coexistência com os rios, pois pela possibilidade de pesca, irrigação e locomoção foi perto de rios que as pessoas se aglomeraram e as cidades nasceram. O acesso à água possibilitou o desenvolvimento da agricultura em larga escala e a consolidação de pequenos núcleos urbanos em cidades (SOJA, 2000). Mas o ser humano simultaneamente explora a água dos rios e despeja neles seus rejeitos. Nos oceanos existem ilhas de lixo, formadas principalmente por plástico, que se acumulam conforme as correntes marítimas. Além disso, as condições de saneamento ainda são precárias na maior parte do mundo, com muitas pessoas sem acesso à água potável e tratamento de efluentes. Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS, 2017), mais da metade da população mundial não tem acesso ao saneamento básico, com consequências danosas à saúde humana e à natureza: o resultado é a contaminação dos cursos d'água e a degradação do meio ambiente.

---

<sup>1</sup> Em hidrologia, exutório é o ponto do curso d'água por onde se dá o escoamento superficial gerado dentro de uma bacia hidrográfica.

<sup>2</sup> Na definição de Pinto (1973) e Ward (2000), o Ciclo Hidrológico consiste na circulação contínua de toda a água existente na Terra e em todas as suas fases físicas, entre o meio terrestre, aquático e atmosférico.

Com o contínuo crescimento das cidades, em número de habitantes e em extensão territorial, existe a preocupação de melhorar a qualidade de vida do ambiente urbano. Conforme o relatório *Atlas of the Human Planet* (2016) do Centro Comum de Investigação da Comissão Europeia (Joint Research Centre – JRC), mais da metade da população mundial vive em cidades. No Brasil, segundo relatório do IBGE (2017), foi na década de 70 que a população urbana ultrapassou a população rural e, atualmente, 76% da população brasileira vive em áreas urbanas. O crescimento das áreas urbanas, porém, nem sempre ocorre com planejamento. O relatório *World Cities Report* (2016), sobre urbanização e desenvolvimento, do Programa para Assentamentos Humanos das Nações Unidas (*United Nations Human Settlements Programme* – UN-HABITAT) diagnostica que as favelas – ou assentamentos informais – continuam a crescer na Ásia, na África e na América Latina. Para Tucci (2008), os principais problemas relacionados à urbanização no Brasil e na América Latina são a urbanização espontânea e o aumento da periferia. A precariedade ou ausência de planejamento de redes de esgoto, de drenagem urbana, de tratamento de efluentes e a ocupação do leito de inundação dos rios leva à deterioração da qualidade da água, elevando problemas de abastecimento, de saúde e de integridade da população.

Além disso, há também a problemática das enchentes e inundações (processos naturais, intensificados ou não pela ação humana), os quais afetam diversas populações pelo mundo. Com relação a isso, o Brasil é indicado como um país com grande incidência desses desastres e centenas de mortes anuais em decorrência desses eventos. Enquanto esse trabalho estava sendo desenvolvido, 70 foram os mortos nas enchentes e deslizamentos que ocorreram no sudeste do Brasil em janeiro de 2020. Conforme divulgado pelo IBGE (2017), cerca de 30% dos municípios brasileiros apresentam desastres desse tipo.

A ocupação de áreas inundáveis, o alastramento de assentamentos informais, a invasão de margens, bem como a construção inadequada de aterros, pontes e travessias, também contribuem para a intensificação de inundações em áreas de várzeas de inundação junto aos rios ou em pontos baixos da malha urbana, onde há tendência de concentração da água escoada dos pontos mais altos (NAGEN, 2008). Os maiores

prejuízos econômicos, conforme Gomes (2004), são nas ocupações das áreas potencialmente inundáveis.

Frente a isso, o planejamento urbano e ambiental assume papel na elaboração e implementação de projetos que considerem maior sustentabilidade e mitigação da degradação ambiental no meio urbano. Decisões projetuais urbanas que consideram a minimização do impacto das ações humanas sobre o ambiente são estratégias na busca pela conexão entre o território, a natureza e a sociedade, devendo ser um instrumento para a melhoria da qualidade de vida e integridade das cidades.

Partindo da perspectiva de compatibilização entre crescimento urbano e ambiente natural, o sistema hídrico se transforma em elemento essencial para uma abordagem de integração entre os sistemas construídos e naturais. A busca por soluções que equacionem as cidades ao ambiente natural e à valorização dos recursos hídricos e da paisagem fluvial urbana é debatida na tentativa de encontrar alternativas para a recuperação ambiental dos rios urbanos. Além disso, o desequilíbrio hidrológico é uma problemática que afeta muitas cidades contemporâneas e desperta o interesse das agendas governamentais por ser um risco ambiental com consequências econômicas e sociais.

Nessa perspectiva de conexão entre urbanização e sistema hídrico, esse trabalho propõe analisar os processos de expansão urbana das cidades de Jaguarão (BR) – Rio Branco (UY), Quaraí (BR) – Artigas (UY) e Barra do Quaraí (BR) – Bella Unión (UY), cidades parcialmente situadas em planícies de inundação e que convivem com cheias e inundações.

Para isso foram utilizadas abordagens metodológicas distintas: em um primeiro momento, em uma análise exploratória e bibliográfica – a fim de caracterizar o objeto de análise e especificar o interesse da pesquisa – foi dado enfoque sobre a dinâmica hídrica das áreas de estudo. A evolução urbana e o sistema hídrico natural foram relacionados a partir de uma análise morfológica tradicional, com análise de mapas, documentos e dados físicos ou digitais. Portanto, nessa etapa ficaram descritos os elementos da morfologia espacial que caracterizam a área de análise; em um segundo momento, foi proposta uma análise experimental para o estudo das possibilidades de expansão urbana

das cidades de estudo. Assim, para a simulação de crescimento urbano das cidades estudadas, foi utilizada a abordagem metodológica da análise espacial, a partir de recursos de modelagem urbana para a implementação de modelos de simulação de expansão urbana.

A modelagem urbana é uma ferramenta de simulação de possibilidades através da geração de cenários, do passado para o presente, ou do presente para o futuro. Modelos urbanos para Echenique (1975) e Batty (2009) são representações do espaço da cidade onde, a partir da captura de uma determinada realidade, os fenômenos urbanos podem ser reproduzidos, controlados e explorados. Assim, os modelos são capazes de identificar lógicas dos processos inerentes à configuração espacial das cidades, revelando aspectos que influenciam no processo de produção do espaço e da morfologia urbana.

Nas últimas décadas, o avanço tecnológico permitiu o desenvolvimento da ciência da modelagem urbana a partir dos sistemas computacionais. Modelos urbanos que até então eram representações simplificadas da realidade, hoje apresentam as características físicas de uma realidade através da linguagem matemática, possibilitando a manipulação de fenômenos urbanos através de simulações e criação de cenários. Na ciência da modelagem urbana, conforme Almeida (2007), a Teoria dos Autômatos Celulares (*Cellular Automata*) tem avançado na representação temporal e espacial dos processos relativos às cidades.

Por meio da modelagem urbana em ambiente celular esse trabalho busca, enfim, a análise de possibilidades de crescimento urbano relacionados à dinâmica hídrica, indicando possíveis situações e relações morfológicas entre o crescimento urbano e o ambiente natural nas cidades objeto de estudo. Dessa forma, é possível a indicação das situações de melhor compatibilização entre as morfologias urbana e ambiental – aquelas que permitem a preservação das áreas susceptíveis a inundações naturais.

Assim, o trabalho busca contribuir para a assimilação da forma urbana que demonstre maior articulação entre o ambiente construído e a paisagem natural, esperando a mitigação dos danos ambientais no ambiente urbano e consequentemente a minimização dos danos sociais e econômicos dos eventos de cheias e inundações.

## **1.1 OBJETIVOS**

### **1.1.1 OBJETIVO PRINCIPAL**

Com base nas considerações sobre expansão urbana e hidrografia natural, são definidas questões a serem respondidas ao longo da pesquisa. O principal questionamento é como as cidades se expandem quando sobre planícies de inundação. Como objeto de estudo foram selecionadas cidades da fronteira entre o Brasil e o Uruguai as quais possuem parte de suas malhas urbanas sobre planícies de inundação, suportando, portanto, os problemas de cheias e inundações naturais dos cursos d'água adjacentes à urbanização. O principal objetivo desta pesquisa, enfim, é indicar situações de crescimento urbano sobre as planícies de inundação nas cidades de fronteira entre Brasil e Uruguai através da modelagem com Autômatos Celulares.

Para tanto, foi proposta uma pesquisa exploratória para adquirir entendimento a respeito da dinâmica hídrica, em especial o reconhecimento da poligonal alagável quando o nível hidrológico em estado normal e em período de maior cheia registrada. Com posse desses dados, então, foi possível a aplicação metodológica experimental – a partir de recursos de modelagem urbana – para a simulação de crescimento urbano para um tempo futuro.

### **1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Para o desenvolvimento do objetivo geral foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos: a) fundamentar acerca dos temas da pesquisa, como os aspectos do ambiente hídrico, da morfologia urbana e da urbanização e da modelagem urbana; b) delinear o contexto hídrico local; c) relacionar o processo de evolução urbana com o contexto hídrico e indicar os prováveis vetores de crescimento das cidades de estudo; e d) simular a expansão urbana com recursos de modelagem urbana.

A fundamentação teórica da pesquisa foi organizada em duas partes. A primeira trata sobre a relação entre urbanização e o sistema hídrico natural, sobre a evolução das cidades e o encadeamento humano nas questões sanitárias, que se refletia no modelo e organização dos núcleos populacionais, e sobre questões de gestão de recursos hídricos

e desastres hidrológicos; a segunda fala sobre morfologia urbana e modelagem com autômatos celulares para o estudo das dinâmicas de crescimento e da forma urbana. Essa revisão geral da literatura é importante para que se tenha compreensão acerca dos temas discutidos a fim de garantir o embasamento necessário para qualificação da pesquisa científica.

O delineamento do contexto hídrico local é necessário para que se estabeleçam as áreas inundáveis. Com apoio de geoprocessamento, esses dados são utilizados também como base para a criação dos dados de entrada na plataforma de simulação de crescimento urbano. A delimitação poligonal das áreas inundáveis sobreposta à malha urbana existente indica as zonas de justaposição entre o espaço efetivamente construído e as áreas inundáveis atuais. Revela, ainda, os locais de possível atrito entre as dinâmicas construída e natural: uma zona inundável, em um espaço pré-urbanizado, adjacente à malha construída existente e assim suscetível à urbanização.

O processo de evolução da mancha efetivamente urbana é relevante pois possibilita, em parte, a compreensão da relação histórica entre a forma urbana com as zonas de inundaçāo. Como as cidades foram implementadas e que relação o urbano teve com a água? Os primeiros habitantes conviviam com as inundações ou estavam em áreas não inundáveis? Peres (2010) indicou um padrão para a relação de urbanização das cidades do sul do Rio Grande do Sul – quando relacionadas ao seu contexto hídrico: seus núcleos iniciais são implantados em locais secos e bem drenados, entre linhas de drenagem de maiores dimensões, como arroios e córregos, e, à medida que a mancha cresce, tende a superar as linhas de drenagem menores, para depois urbanizá-las e muitas vezes eliminá-las. No meio desse processo, sem planejamento e às vezes até com, há a ocupação das planícies de inundaçāo.

Por fim, as simulações de expansão urbana com recursos de modelagem urbana que propõem reproduzir as dinâmicas inerentes ao processo de crescimento urbano, indicando a morfologia que a mancha efetivamente urbanizada pode tomar com relação às áreas de inundaçāo. Qual a provável forma que a cidade pode ter quando considerados ou não suas zonas de inundaçāo adjacentes? A relação das prováveis formas urbanas é o que as simulações pretendem indicar.

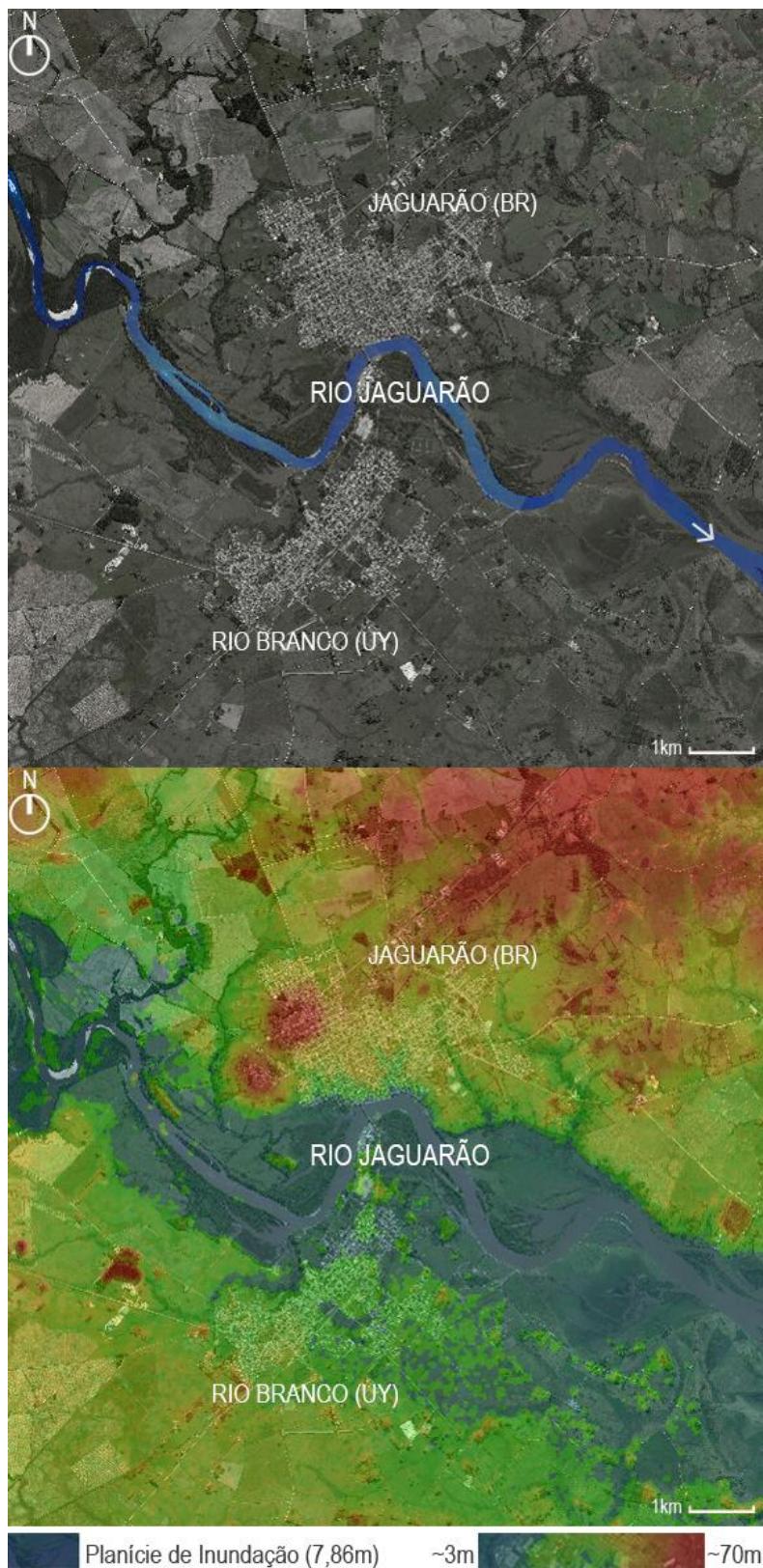
## 1.2 OBJETO DE ESTUDO

Para a realização das simulações de crescimento urbano foram escolhidas cidades limítrofes na fronteira entre Brasil e Uruguai parcialmente instaladas em planícies de inundação. Entram no estudo as cidades de: Jaguarão (BR) – Rio Branco (UY), separadas pelo Rio Jaguarão; Quaraí (BR) – Artigas (UY) e Barra do Quaraí (BR) – Bella Unión (UY), com limite político-geográfico definido pelo Rio Quaraí (Figura 1.1).

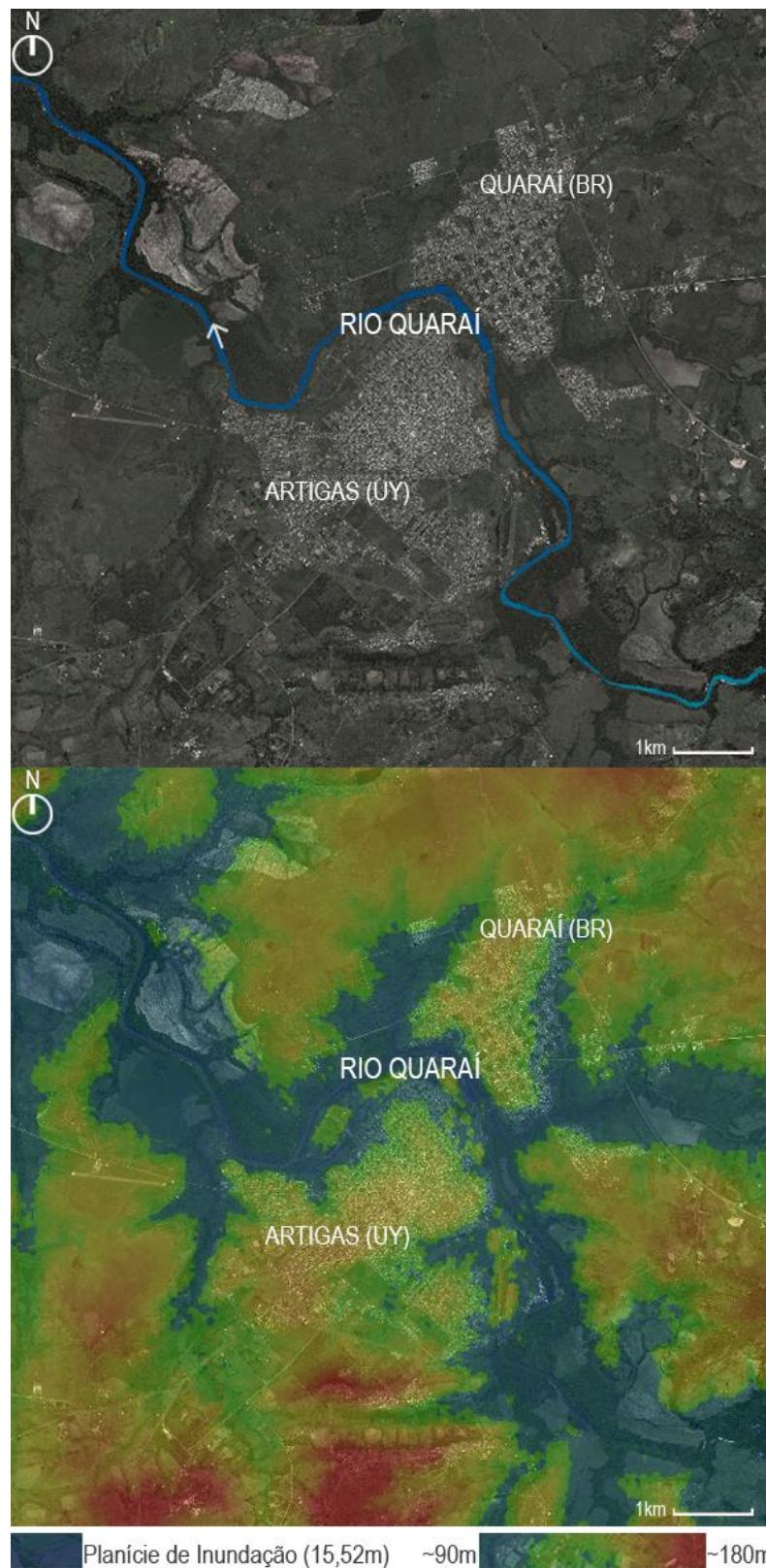


**Figura 1.1** – Esquema com localização das cidades limítrofes entre Brasil e Uruguai. Baumbach (2019).

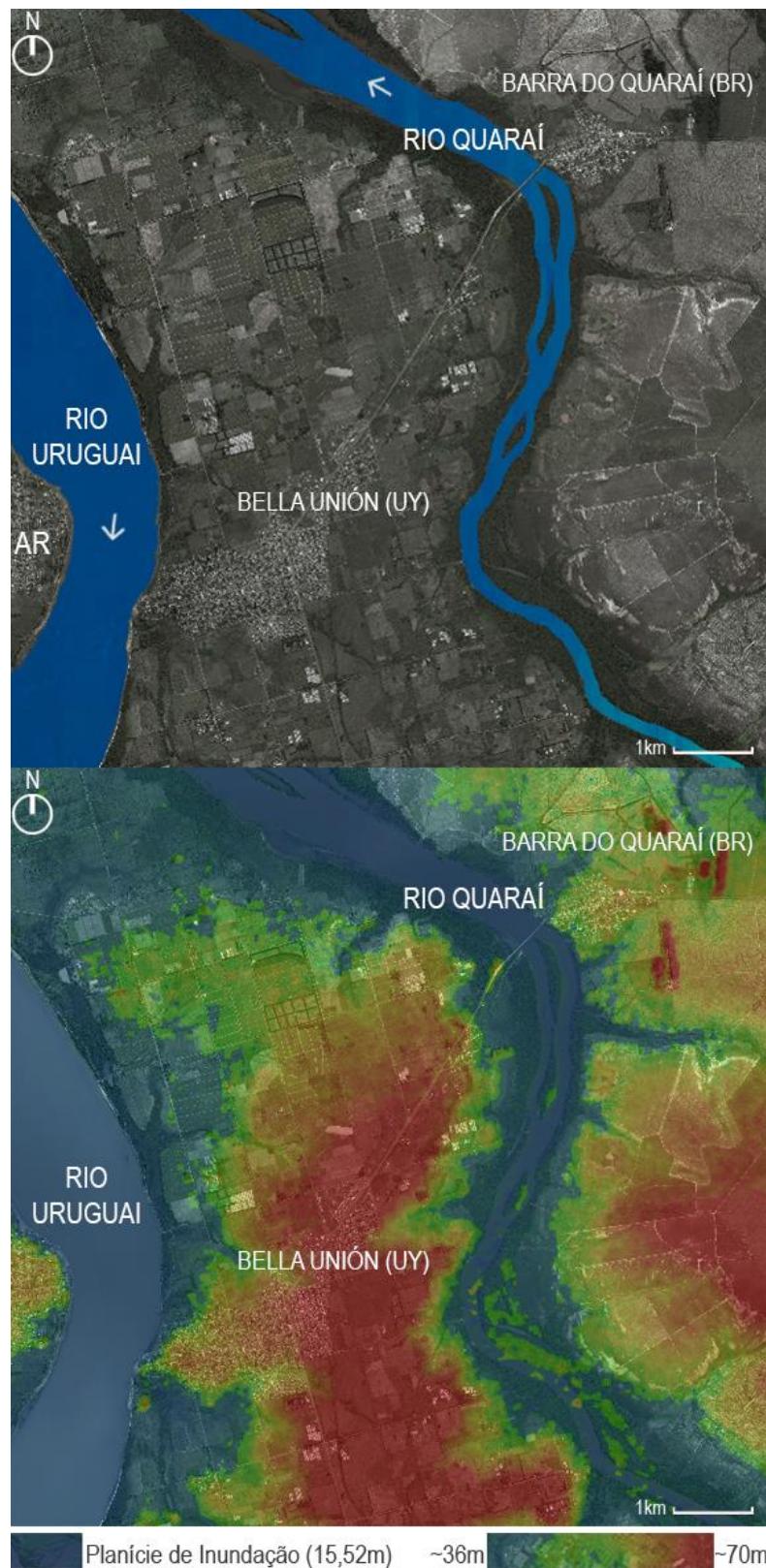
O recorte espacial do trabalho (detalhamento no capítulo 4) pode ser observado nas Figuras 1.2, 1.3 e 1.4, bem como a indicação das planícies de inundação extraídas a partir de mapa hipsométrico gerado a partir do Modelo Digital de Elevação (SRTM) através do software *GlobalMapper*. As cotas máximas de inundação foram obtidas nos dados históricos disponibilizados pela ANA (Agência Nacional de Águas).



**Figura 1.2** – Área de recorte do trabalho para Jaguarão e Rio Branco. Acima, rio que faz a divisão geopolítica; abaixo, mapa hipsométrico com a planície de inundação. Mapas elaborados através de dados do Modelo Digital de Elevação (SRTM), a partir do *GlobalMapper*. Baumbach (2019).



**Figura 1.3 –** Área de recorte do trabalho para Quaraí e Artigas. Acima, rio que faz a divisão geopolítica; abaixo, mapa hipsométrico com a planície de inundação. Mapas elaborados através de dados do Modelo Digital de Elevação (SRTM), a partir do *GlobalMapper*. Baumbach (2019).

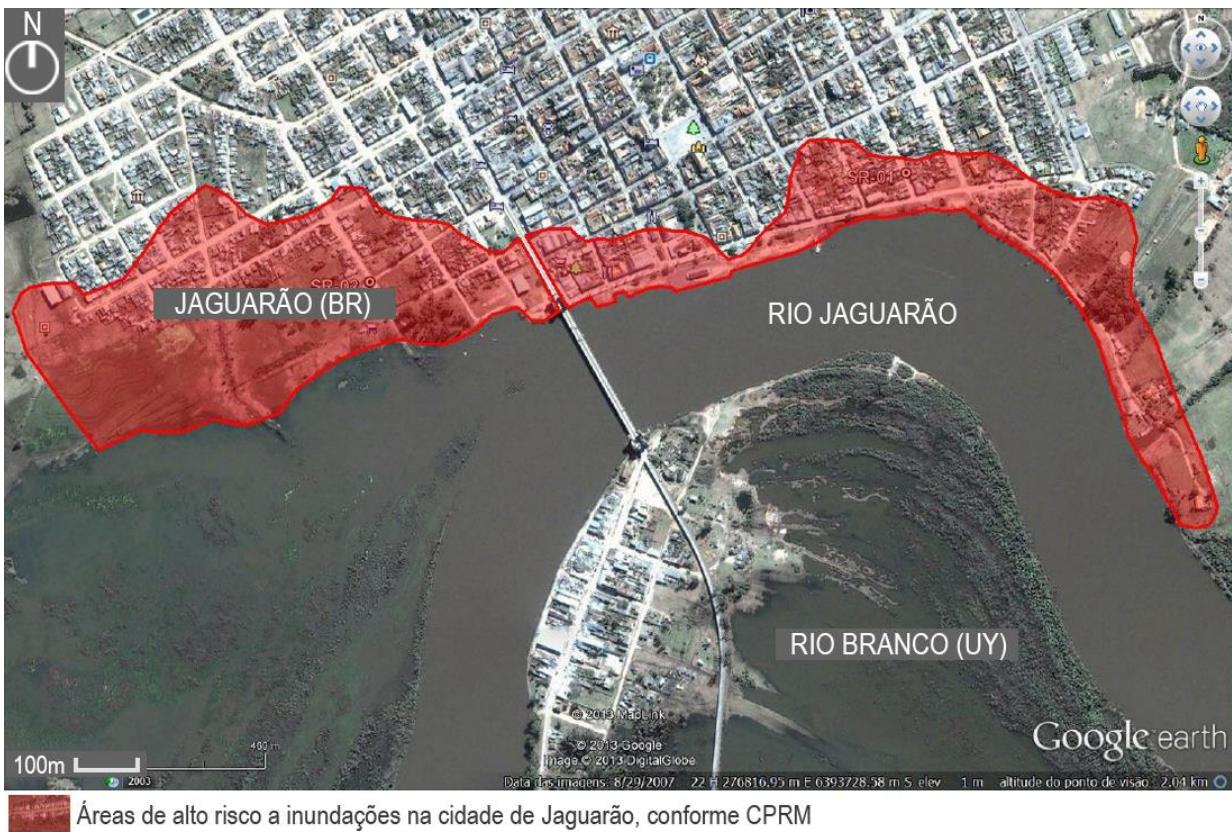


**Figura 1.4** – Área de recorte do trabalho para Barra do Quaraí e Bella Unión. Acima, rio que faz a divisão geopolítica; abaixo, mapa hipsométrico com a planície de inundação. Mapas elaborados através de dados do Modelo Digital de Elevação (SRTM), a partir do *GlobalMapper*. Baumbach (2019).

### 1.3 JUSTIFICATIVA

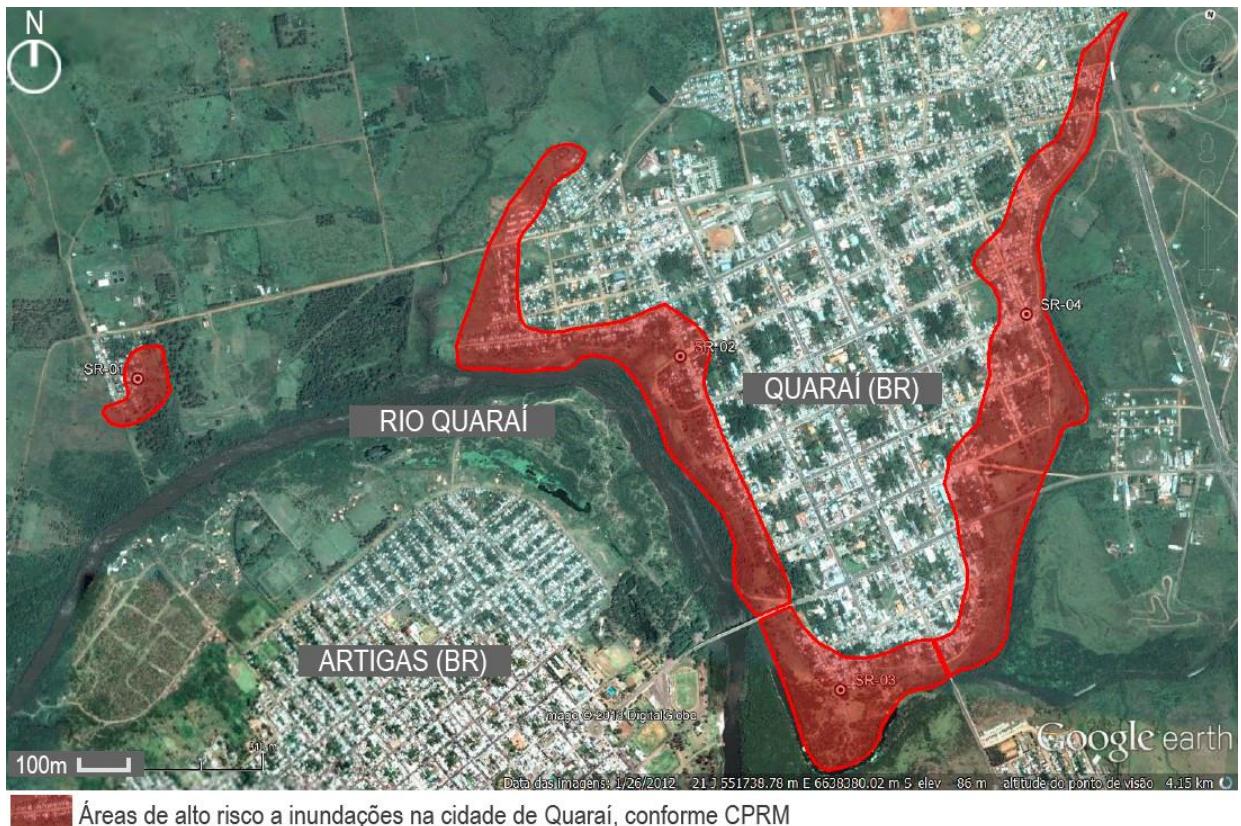
As cidades de fronteira selecionadas para o estudo são aquelas que possuem seus limites internacionais definidos por rios e, por isso, apresentam algum grau de vulnerabilidade à ocorrência de desastres hidrológicos. Conforme o Atlas de Vulnerabilidade a Inundações do Rio Grande do Sul (2012), as cidades de Jaguarão e Quaraí estão localizadas em zonas de alto grau de vulnerabilidade a inundações, com tempo de intervalo de ocorrência entre inundações de cinco anos. A cidade de Barra do Quaraí foi classificada em zona de médio grau de vulnerabilidade, com tempo de intervalo entre cinco e dez anos. Ambas as cidades apresentam risco de dano à vida, aos serviços básicos, às instalações e infraestruturas públicas e às residências.

Em agosto de 2013 foi realizada a Ação Emergencial para Delimitação de Áreas em Alto e Muito Risco a Enchentes, Inundações e Movimentos de Massa do Município de Jaguarão (Silva, 2013b), onde foram delimitados dois setores de risco (Figura 1.5), compreendendo 350 habitações e 1500 pessoas.



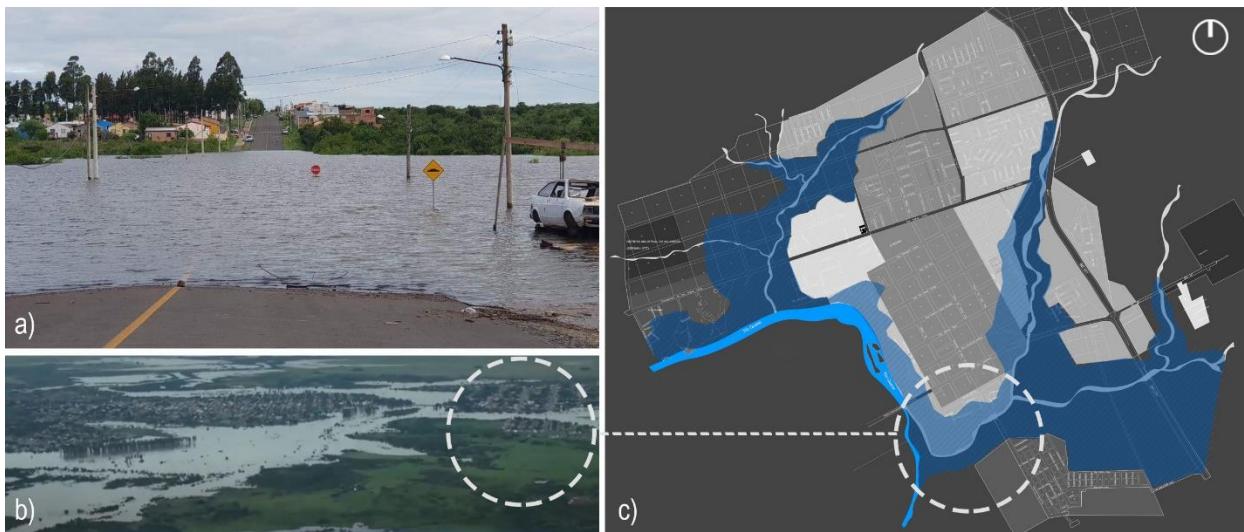
**Figura 1.5 – Setores de alto risco a inundações na cidade de Jaguarão.** Fonte: Silva / CPRM (2013b). Editado por Baumbach (2019).

Em maio de 2013, a Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) trabalhou na Ação Emergencial para Delimitação de Áreas em Alto e Muito Risco a Enchentes, Inundações e Movimentos de Massa do Município de Quaraí (Silva, 2013a). Os setores identificados em área de risco (Figura 1.6) compreendem 860 habitações e 3.560 pessoas.



**Figura 1.6 – Setores de alto risco a inundações na cidade de Quaraí.** Fonte: Silva / CPRM (2013a). Editado por Baumbach (2019).

As áreas de risco na cidade de Quaraí também estão apontadas no Plano Diretor de Quaraí (2007), expressas na Figura 1.7 c:



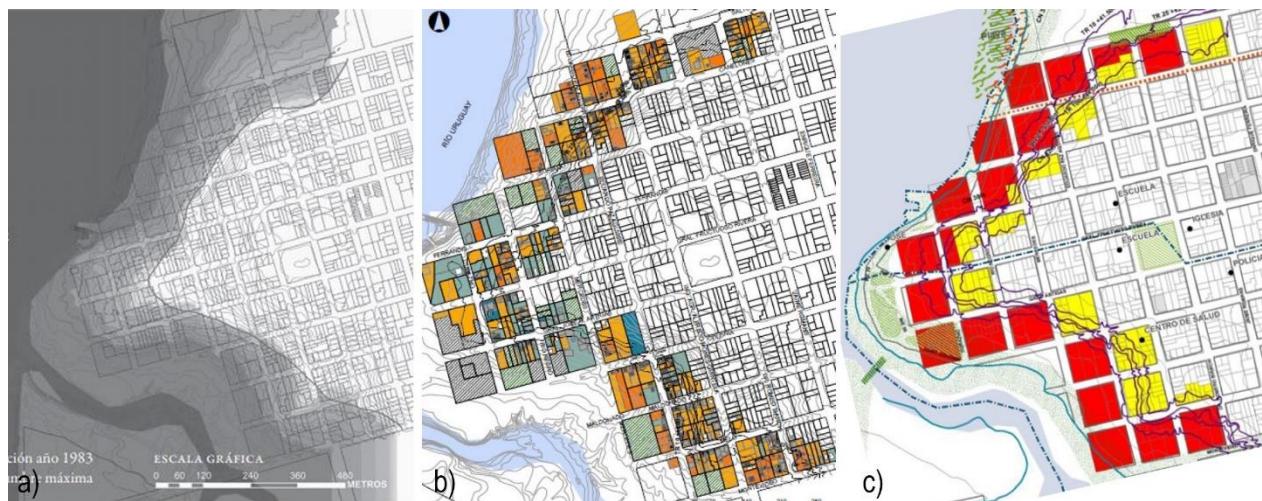
**Figura 1.7** – Montagem sobre inundações em Quaraí. Em a) fotografia da área em destaque em b e c; em b) foto aérea com destaque da área da foto em a; em c) indicação das zonas inundáveis reconhecida no Plano Diretor de Quaraí (2007). Elaborado por Baumbach com base no Plano Diretor (2019).

As enchentes e inundações que atingem Quaraí, também atingem Artigas, uma das cidades mais afetadas por inundações no Uruguai (Figura 1.8), conforme reconhecimento do SINAЕ (*Sistema Nacional de Emergencias*) do Uruguai.



**Figura 1.8** – Inundação em Artigas: à esquerda, imagem extraída do *Google Earth*; à direita, fotografia aérea que demonstra a inundação. Foto por: Zapata (2017). Elaborado por Baumbach (2019).

Bella Unión, por sua vez, passou por um mapeamento de risco de inundações em 2012, onde foram identificadas as áreas urbanas susceptíveis a inundações. Também foram identificados aspectos sociais da população atingida como qualidade da construção e renda (Figura 1.9).



**Figura 1.9 – Zonas com risco de inundação em Bella Unión:** em a) indicação das curvas por período de retorno, extraído de Piperno (2013); em b) mapeamento de risco de Bella Unión, com caracterização da qualidade da edificação (em azul, melhores edificações; em laranja e amarelo, edificações precárias); em c) mapeamento de risco de Bella Unión, em vermelho zonas de alto risco e em amarelo zonas de baixo e médio risco. Elaborado por Baumbach (2019) com base em DINAGUA-DINOT-IdeA (2012).

Os levantamentos apontados demonstram a inadequação da ocupação urbana devido às grandes áreas urbanas sobre planícies de inundação. Os registros históricos, por isso, indicam como os municípios sofrem com enchentes e inundações.

Uma consulta ao Sistema Integrado de Informações sobre Desastres (S2ID), base de dados oficial sobre a ocorrência e gestão de desastres, revela que decretaram Situação de Emergência (SE) ou Estado de Calamidade Pública (ECP) em decorrência de inundações: Barra do Quaraí, em 1999, 2009, 2010, 2014 e 2016; Quaraí, em 1977, 1987, 1991, 1992, 1993, 2001, 2002, 2003, 2009, 2010, 2012 e 2015; e Jaguarão, em 1972, 1977, 1992 e 2002. Ainda, é possível que algum evento de inundação não tenha sido registrado no S2ID, como - por exemplo - os ocorridos em Quaraí em 2016, 2018 e 2019 ou em Jaguarão em 2013, 2014 e 2015, os quais foram noticiados pela mídia, mas não registrados no sistema. Vale lembrar que a ocorrência dessas inundações é equivalente às cidades limítrofes uruguaias.

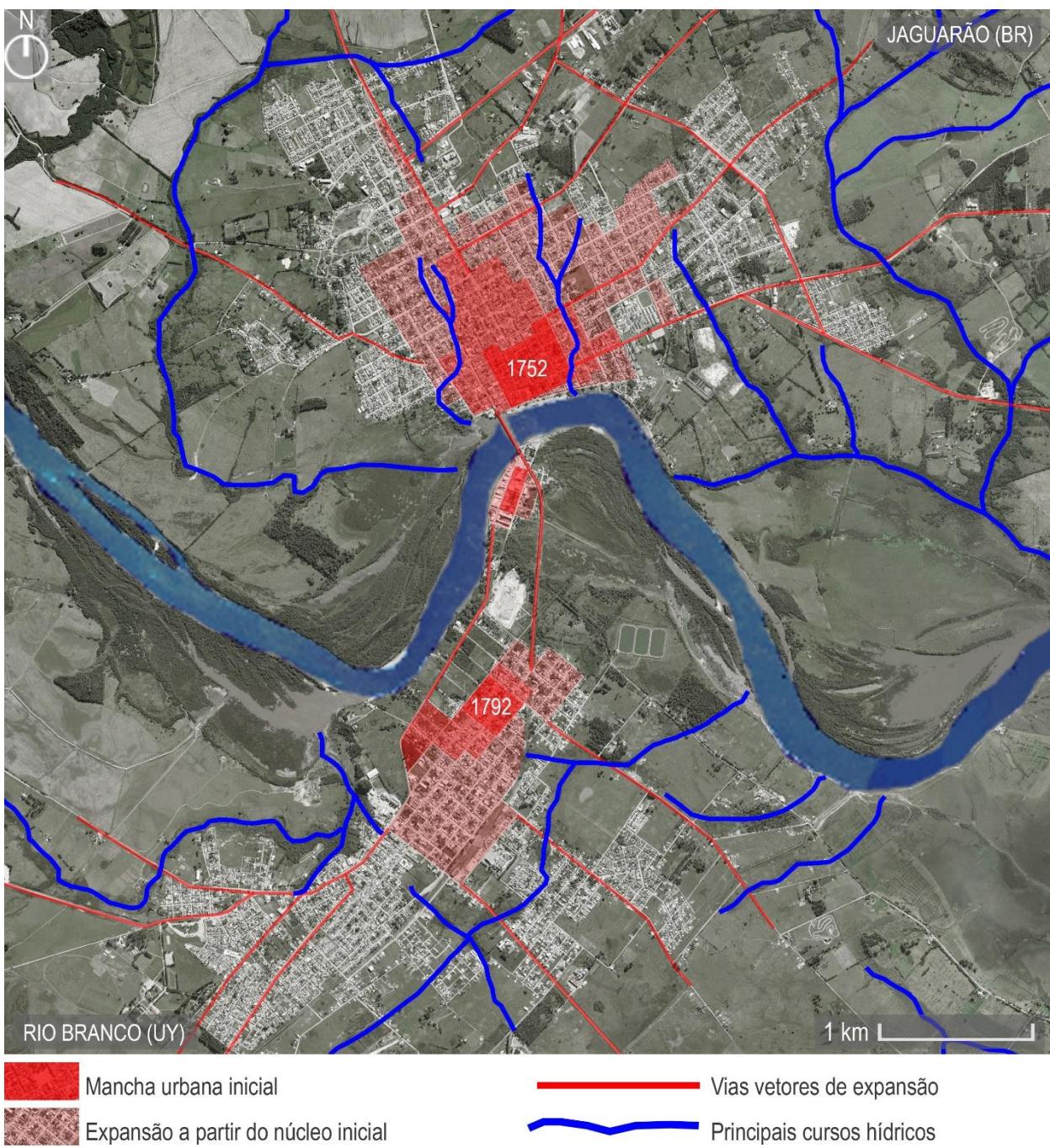
A análise da relação morfológica entre crescimento urbano e os cursos hídricos das cidades estudadas (Figuras 1.10, 1.11 e 1.12), demonstra o que Peres (2010) observou nas cidades da metade sul do Rio Grande do Sul. O núcleo urbano principal, localizado com alguma distância das linhas de drenagem, é posicionado em um ponto

mais elevado e por isso melhor drenado. A partir do núcleo principal a cidade se expande, de maneira predominantemente concêntrica, até encontrar uma linha de drenagem. Nessas áreas de contato entre urbanização e ambiente hídrico se observam alterações da forma urbana, partindo eixos axiais que correspondem às estradas, pontes e rodovias de acesso. A partir da transposição dos cursos hídricos por esses eixos ocorrem urbanizações difusas de baixa intensidade, que com o tempo se consolidam como novos núcleos urbanos com tendência de conurbação ao tecido urbano do núcleo original. Peres (2010) chamou essa dinâmica como fenômeno de diferenciação morfológica associada à hidrografia.

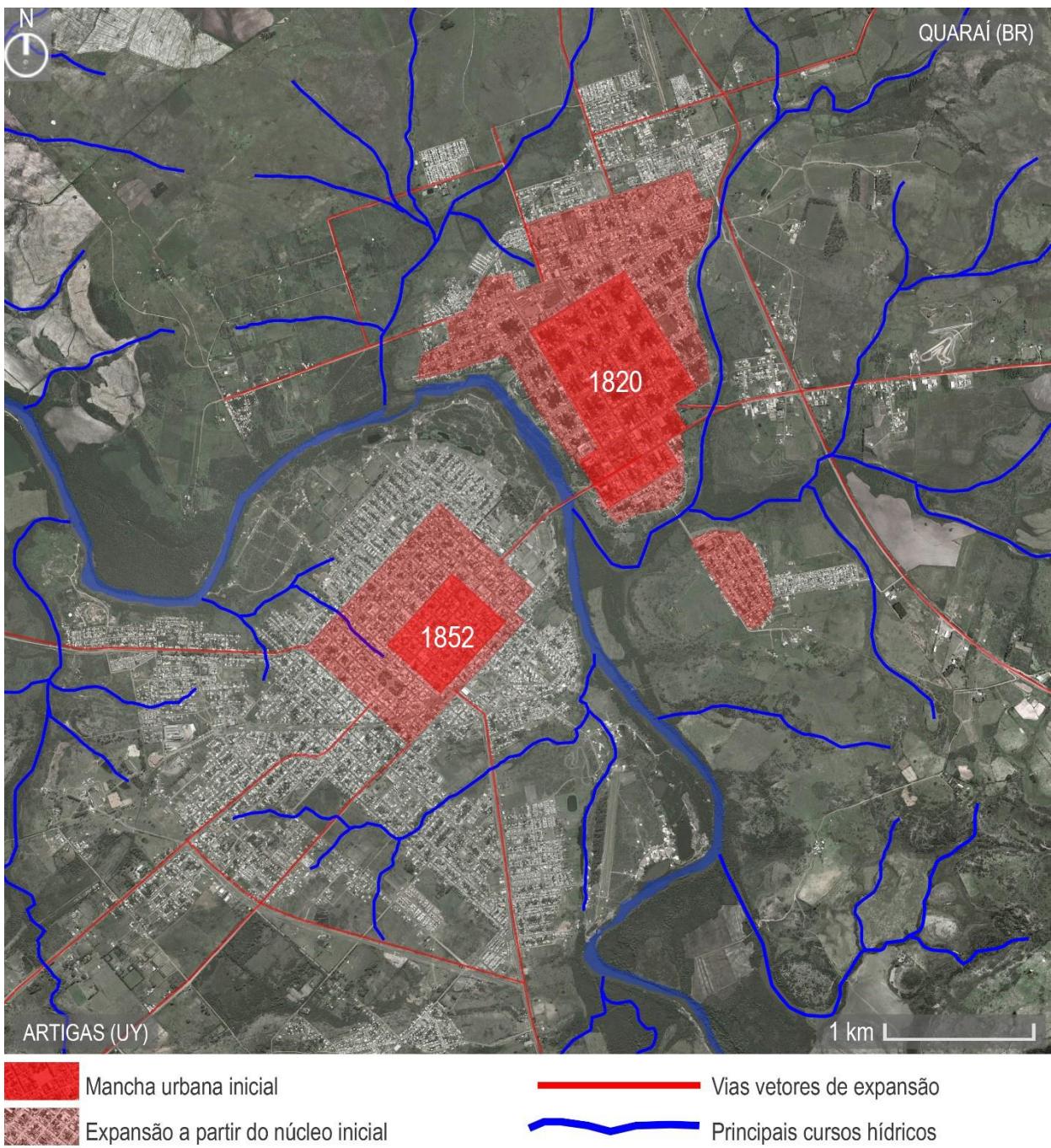
Este processo é bem observado ao centro de Jaguarão: o primeiro loteamento urbano (1815), foi localizado entre dois cursos hídricos. Com a expansão da cidade, em 1850, a mancha urbana se aproxima desses cursos hídricos, que são sobrepostos já em 1860 (Figura 1.10). Em Rio Branco se observa que os cursos hídricos estão em processo de incorporação ao tecido urbano ao sul e a leste (Figura 1.10), assim como ocorre ao sul e a leste de Artigas (Figura 1.11) e ao sul de Bella Unión (Figura 1.12). Já Barra do Quaraí, por ter uma mancha urbana relativamente pequena, ainda se encontra delimitada pelos cursos d'água naturais (Figura 1.12).

Ainda que as áreas alagáveis sejam conhecidas, o que se observa é a inadequação urbana que persiste no adensamento de zonas de inundação. O estudo se apoia, portanto, na necessidade de planejamento para prever a expansão de novas áreas urbanas sobre as áreas alagáveis.

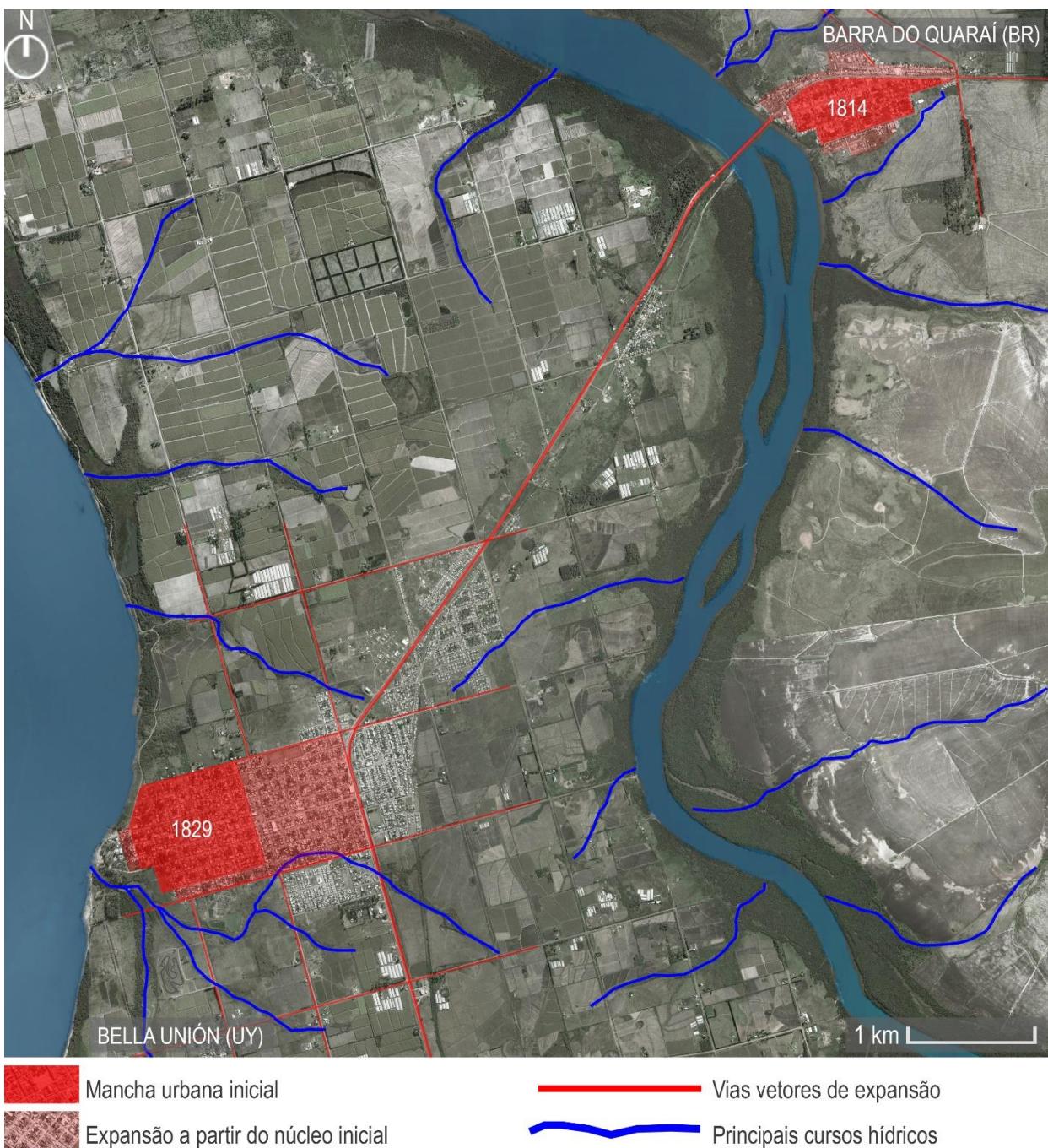
A escolha das cidades de fronteira entre Brasil e Uruguai como objeto de estudo, por fim, também objetiva contribuir com pesquisas sobre essa zona de transição internacional, propósito de trabalhos desenvolvidos no Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Pelotas, como por exemplo as investigações sobre o uso do espaço público na linha de fronteira entre Brasil e Uruguai (Resende, 2019) e a localização do uso do solo comercial nos tecidos intraurbanos nas cidades de fronteira seca entre Brasil e Uruguai (Moraes, 2018).



**Figura 1.10** – Relações morfológicas entre crescimento urbano e sistema hídrico para as cidades de Jaguarão (BR) e Rio Branco (UY). Os corpos hídricos aparecem em azul, as manchas urbanas iniciais em vermelho escuro, e os principais vetores de crescimento em traço vermelho. Representação cartográfica elaborada por Baumbach (2019).



**Figura 1.11** – Relações morfológicas entre crescimento urbano e sistema hídrico para as cidades de Jaguarão (BR) e Rio Branco (UY). Os corpos hídricos aparecem em azul, as manchas urbanas iniciais em vermelho escuro, e os principais vetores de crescimento em traço vermelho. Representação cartográfica elaborada por Baumbach (2019).



**Figura 1.12** – Relações morfológicas entre crescimento urbano e sistema hídrico para as cidades de Barra Do Quaraí (BR) e Bella Unión (UY). Os corpos hídricos aparecem em azul, as manchas urbanas iniciais em vermelho escuro, e os principais vetores de crescimento em traço vermelho. Representação cartográfica elaborada por Baumbach (2019).

Analizado o primeiro capítulo, com introdução ao tema de estudo, justificativa e apresentação da área de estudo, entra-se no capítulo 2 do trabalho, dedicado à revisão e fundamentação teórica.

## **2. REVISÃO TEÓRICA**

### **2.1 CIDADES E AMBIENTE HÍDRICO**

Conforme Abiko (1995) e Soja (2000), as primeiras sedes com características de civilização urbana surgem durante o IV milênio a.C., localizadas nas planícies ao longo dos rios Tigre e Eufrates na Mesopotâmia, e do rio Nilo, no Egito. Nestas planícies o homem encontrou solo fértil e facilidade de irrigação, o que permitiu o desenvolvimento da agricultura em larga escala. As aglomerações mais antigas conhecidas seriam aldeias ligadas à pesca ou agricultura (SANTOS, 2004).

A relação estabelecida entre rios e cidades é antiga, para Porath (2004), desde os primórdios das civilizações os rios serviram como fonte de recursos e meio de circulação por uma questão de sobrevivência e utilidade, manifestando assim probabilidades de agrupamento e construção. No Brasil, segundo Costa (2002), muitas cidades coloniais surgiram às margens dos rios, mesmo aquelas situadas em baías ou à beira-mar. Conforme a autora, muitos núcleos urbanos brasileiros surgiram a partir de rios – grandes, médios ou até mesmo pequenos cursos d’água.

Entretanto, Suguio (2006) é mais inquietante, ao afirmar que o relacionamento do ser humano com a água é inadequado e demonstra-se insustentável. No contexto brasileiro, por exemplo, segundo Gorski (2010), apesar de serem historicamente utilizados como meio de sobrevivência e lazer, os rios de muitas cidades receberam a negligência de anos de despejo de dejetos e detritos humanos, residenciais e industriais, sem políticas públicas de saneamento que acompanhassem o crescimento populacional. Também estão sujeitos à ocupação irregular das suas margens, à destruição das suas matas e nascentes, ao aterrramento de suas várzeas, à impermeabilização e assoreamento de suas calhas e às obras de engenharia implantadas de forma desorganizada.

A compreensão sobre o correto uso e manejo das águas e esgotos permitiu que alguns centros urbanos equacionassem a relação entre o urbanismo e o sistema hídrico local, mas as ações são pontuais. Na maioria das cidades a falta de planejamento que assegure a coexistência entre meio urbano e ambiente natural contribui para o atual

cenário de degradação dos sistemas ambientais. Em algumas cidades os rios, córregos e linhas de drenagem tiveram suas margens concretadas sendo enclausurados em galerias que recebem todo o tipo de efluente. Para Gorski (2010), a urbanização eclipsou os rios e anulou sua importância, restringindo sua presença a sintomas perturbadores como mau cheiro, obstáculo à mobilidade e ameaça de inundação.

Peloggia (1997), afirma que é nas concentrações urbanas que as modificações do homem sobre a natureza se ampliam e se diversificam. E é sobre os sistemas morfodinâmicos fluviais, segundo Nir, (1983) e Drew (1989) que ocorrem as maiores alterações físicas e ambientais do meio natural para o desenvolvimento das atividades humanas. Do mesmo modo, mas sob a perspectiva da urbanização, Desonie (2008) e Peres (2010), dizem que hidrografia é o atributo da paisagem natural que mais se destaca no processo de crescimento urbano.

O desenvolvimento urbano provoca impactos sobre o sistema hídrico tanto no modo qualitativo (pela variação da qualidade da água), quanto no modo quantitativo (com alteração dos padrões de fluxo e quantidade da água), como pontua Finkler (2012). Já Finotti (2009), afirma que à medida que a mancha urbana expande, com mesma significância crescem os impactos ambientais relacionados à geração de esgotos domésticos, efluentes industriais, resíduos sólidos urbanos e industriais e emissão de poluentes atmosféricos. Ainda, segundo Tucci (2006), o desenvolvimento urbano altera a cobertura vegetal, provocando efeitos que desequilibram o ciclo hidrológico natural.

Como observado, a relação intrínseca entre urbanização e a paisagem hídrica demonstra-se problemática do ponto de vista ambiental, pois à medida que o ser humano desenvolve suas atividades, crescem as emissões poluentes que alteram todo ciclo de funcionamento da Terra. De todo modo, a humanidade precisa do seu espaço, devendo ocupá-lo, então, de maneira consciente, a fim de minimizar suas ações danosas sobre os sistemas naturais, com o objetivo de garantir a preservação da diversidade ambiental para as futuras gerações.

Dito isso, a seguir o texto aborda brevemente como se construiu a relação entre a humanidade e os sistemas hídricos, desde seu estabelecimento na antiguidade até o discurso de gestão atual.

### **2.1.1 EVOLUÇÃO DA GESTÃO DAS ÁGUAS**

Foi ainda na antiguidade que o homem associou água suja e acúmulo de lixo à proliferação de doenças. A necessidade de fornecer água limpa ou escoar a água utilizada ocorreu através de técnicas de controle, tais como a construção de diques e canalizações superficiais ou subterrâneas. Em cidades da Mesopotâmia foram encontrados vestígios de esgoto e de redes de água, os quais evidenciam que, já nos primeiros núcleos habitacionais, havia ações de saneamento básico. Na Grécia, as preocupações com as condições sanitárias foram abordadas pela primeira vez no texto “Ares, Águas e Lugares”, do tratado de Hipócrates (séc. V a.C.), em que se informava aos profissionais da medicina sobre o vínculo entre meio ambiente e saúde (SOUZA, 2009).

Já os romanos aplicaram tecnologia hidráulica desenvolvendo inúmeras obras para captação, transporte, distribuição e evacuação das águas por todo o seu Império. Construíram barragens, aquedutos, canais, poços, cisternas, tanques e engenhos hidráulicos (CARDOSO et al., 1997). Através dos aquedutos, os romanos captavam água nas montanhas e a levavam por gravidade até as fontes e outros pontos de distribuição.

Na Idade Antiga, então, os gestores urbanos aprenderam a relação entre abastecimento de água e afastamento das águas servidas. Ainda assim, na Idade Média, as condições de saneamento nas vilas e cidades (europeias) eram péssimas, estimulando a propagação de doenças de veiculação hídrica. Neste período se consolidou a Teoria dos Miasmas (século XVII), a qual perdurou até parte do século XIX como enfoque principal nas questões relativas à higiene pública, servindo como justificativa e fundamentação para as intervenções urbanas de saneamento (MASTROMAURO, 2011). De acordo com essa teoria, os miasmas seriam os gases provenientes da putrefação de matéria orgânica, e carregariam consigo partículas danosas às pessoas. Estariam no ar insalubre e infectado, sendo mortíferos. Para a ciência, eram considerados os agentes das doenças.

Os miasmas poderiam estar presentes em fatores naturais como pântanos, solos úmidos, água parada, decomposição de matéria orgânica e vegetal, ou em ambientes urbanos insalubres. Assim, a Teoria dos Miasmas influenciou grandes transformações no

saneamento urbano. Os médicos sanitaristas defendiam que equipamentos como matadouros, curtumes, mercados, hospitais e cemitérios ficassem afastados dos núcleos centrais, surgindo a preocupação de garantir ventilação natural (CORBIN, 1987). No contexto urbano, mesmo com a evolução da ciência e o desenvolvimento da microbiologia explicando a transmissão de doenças, as ações urbanas de caráter higienista continuaram.

A partir da segunda Revolução Industrial, com o aumento das cidades e da população urbana, as condições de saneamento assumem maior importância na infraestrutura urbana. As reformas urbanas de Paris por Haussmann são um grande exemplo das intervenções sobre a hidrografia natural com paradigma higienista (MUMFORD, 1961). Estas intervenções consistiam em prover água de fontes seguras e em coletar os efluentes para despejá-los à jusante dos cursos d'água, sem tratamento, continuando a poluição do ambiente natural (TUCCI, 2008).

As preocupações do homem moderno com o meio ambiente, associadas às questões sociais, políticas, ecológicas e econômicas com o uso racional dos recursos hídricos, emergem na virada da década de 60 para a década de 70. A reunião do Clube de Roma, em 1968, segundo Santos (2004), representa um marco sobre as convicções de desenvolvimento da sociedade contemporânea. Dos anos 70 ao início dos anos 80 se fortaleceu a ideia de preservação dos recursos naturais para melhorar a qualidade de vida da população. Surgiram neste período planejamentos regionais integrados e sistematização interativa de elementos do meio natural ou antrópico (SANTOS, 2004). Para Kahtouni (2004), esse foi o momento de o homem repensar as maneiras de se relacionar com a natureza, construindo novos paradigmas em prol da valorização e da conservação dos elementos naturais.

As ações de gestão das águas urbanas, no período compreendido entre as décadas de 70 e 90, são classificadas por Tucci (2008) de corretivas. Nessa época se consolidou a ideia de utilizar sistemas de amortecimento em detrimento da canalização e das obras de drenagem que aumentam a velocidade de escoamento dos rios à jusante<sup>3</sup>. Também se investiu em infraestruturas de tratamento de esgoto doméstico e industrial.

---

<sup>3</sup> Em hidrologia, jusante é a direção para onde corre o fluxo de água de um curso hídrico.

Em suma, eram ações que pretendiam melhorar a qualidade dos rios a partir do tratamento dos efluentes, ainda a partir de medidas estruturais.

Apesar disso, a poluição sobre os cursos d'água permaneceu. A partir dos anos 90 se fortaleceu o paradigma de *desenvolvimento sustentável*, que considera a ação de medidas não estruturais sobre os sistemas naturais. Sua base é uma urbanização que preserve os caminhos naturais de drenagem e escoamento, priorizando a infiltração das águas no solo (TUCCI, 2008).

No contexto global atual, a tendência na gestão das águas vem sendo construída a partir de uma série de encontros organizados principalmente pela Organização das Nações Unidas (ONU). Veja-se como exemplo, a *Conferência sobre o Meio Ambiente Urbano*, em Estocolmo, em 1972; a *Conferência das Nações Unidas para a Água*, na Argentina, em 1977; a *Conferência Internacional sobre Água e Meio Ambiente*, na Irlanda, em 1992; a *Conferência sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento*, no Rio de Janeiro, também em 1992; a *Cúpula Mundial sobre Desenvolvimento Sustentável*, em Johanesburgo, em 2002; e o *Fórum Mundial da Água*, que acontece a cada três anos desde 1997 em diferentes locais (SILVA, 2008).

Após a *Cúpula do Milênio das Nações Unidas*, realizada no ano de 2000 em Nova Iorque, diversos países e organizações internacionais se comprometeram com metas e objetivos para melhorar as condições de vida das populações vulneráveis do planeta até o ano de 2015. Estas metas ficaram conhecidas como *Objetivos de Desenvolvimento do Milênio* (ODM). Um dos objetivos era garantir a disponibilidade e fortalecer a gestão sustentável da água e do saneamento básico para toda população mundial.

Em 2015, com o final do prazo estabelecido para o alcance das metas do ODM, a ONU estabeleceu a *Agenda 2030* e a transição do ODM para os *Objetivos de Desenvolvimento Sustentável* (ODS), com metas até 2030. São 17 objetivos que visam um desenvolvimento com consumo e produção responsáveis, em cidades e comunidades sustentáveis, buscando saúde e bem-estar para a população, com erradicação da pobreza e redução das desigualdades sociais, uso de energias renováveis e com agricultura, indústria e infraestruturas eficientes. Também são objetivos: a proteção do

clima e do meio ambiente para harmonia na vida terrestre e aquática e assegurar disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todas as pessoas.

A ONU também criou um grupo de gerenciamento chamado *United Nations Water (Un-Water)*, que busca orientar as ações relacionadas à água e ao saneamento. Sob a coordenação do programa *World Water Assessment Programme (WWAP)*, da *United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO)*, a *Un-Water*, em parceria com governos, agências e organizações não governamentais, publica anualmente o relatório *World Water Development Report (WWDR)*, o qual apresenta diferentes ferramentas e ações estratégicas para implementar o uso racional e sustentável dos recursos hídricos, e fornece dados e tendências sobre a água no mundo.

A *UNESCO* tem também o *International Hydrological Programm (IHP)*, dedicado à pesquisa sobre a água e ao aperfeiçoamento da gestão dos recursos hídricos, em que fornece, desde fevereiro de 2018, informações sobre a qualidade da água doce na superfície terrestre, a partir de recursos de sensoriamento remoto. Estes dados são disponibilizados através do *World Water Quality Portal*.

A comunidade internacional, assim, orienta e expõe diretrizes de saneamento e gestão das águas que são apropriadas de diferentes maneiras pelos países. Para reforçar a importância da temática, a ONU anunciou em 2018 a *International Decade for Action on Water for Sustainable Development, (2018-2028)*, enfatizando que a gestão integrada dos recursos hídricos e o desenvolvimento sustentável são fundamentais para se cumprir a Agenda 2030.

Portanto, na virada do século XIX para o século XX, conforme Kahtouni (2004), as preocupações governamentais eram as ações de infraestruturas de transporte e abastecimento, a partir do controle tecnológico e de ações saneadoras da cidade. Já na virada do século XX para o século XXI, segundo Ferreira e Debeus (2018), as conferências internacionais dão destaque a aspectos de governança e acesso à água. Contudo, o saneamento ainda precário em grande parte do mundo, e que ainda hoje é pauta central nas reuniões globais, demonstra que o avanço na questão foi insatisfatório. Assim, atualmente se verifica o discurso sobre a crise hídrica mundial, e o aperfeiçoamento de mecanismos de gestão das águas (SILVA, 2008).

## **2.1.2 ASPECTOS DE GESTÃO DAS ÁGUAS NO BRASIL**

Para Ferreira e Debeus (2018), no Brasil, a mudança e evolução na gestão das águas acompanhou as transformações sociais, seguindo os modelos burocrático e econômico-financeiro (voltados à esfera econômica e sanitária) e, atualmente, o modelo sistêmico (voltado ao planejamento sustentável, com racionalização de usos e preservação do meio-ambiente). Essa mudança no modelo de gestão dos recursos hídricos no Brasil demonstra o engajamento do país nos debates e acordos internacionais, que caminham para a visão sistêmica da gestão dos recursos, como mostrado anteriormente.

O modelo de gestão sistêmica e integração participativa é fundamentado na Lei 9433 de 1997, conhecida como Lei das Águas. Esta lei instituiu a Política Nacional dos Recursos Hídricos (PNRH), e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, trazendo um conjunto de diretrizes, metas e programas que servem como instrumento que orienta a gestão das águas no Brasil. Entre os fundamentos da lei está que sua gestão deve ser descentralizada, a partir da participação do governo, da sociedade civil e dos demais usuários (inciso IV, artigo 1º, Lei 9.433/1997), portanto sistêmica.

Vale lembrar, conforme ANA (2002), que a legislação promulgada em 1997 é o resultado de um movimento que começa muito antes, ainda na década de 1980, a partir de setores técnicos do governo que reconheciam a necessidade de modernizar a legislação hídrica brasileira, então baseada no Código de Águas de 1934, o qual, apesar de ter sido um marco jurídico no país, já tinha se tornado obsoleto. Assim, antes mesmo da aprovação da legislação federal de 1997, alguns estados brasileiros já haviam instituído sistemas estaduais de gerenciamento de recursos hídricos, bem como surgiram comitês de bacias espontaneamente, a partir do movimento de interessados e usuários locais. Foi, portanto, a partir da convergência de iniciativas locais, regionais e nacionais, em ambiente público, privado e técnico-científico, que foi construída a legislação dos recursos hídricos do país.

Atualmente, a articulação entre as diversas esferas de usuários e o poder público se estabelece através de conselhos, das agências reguladoras e dos comitês de bacias.

Fazem parte do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (Singreh): o Conselho Nacional de Recursos Hídricos, colegiado consultivo e normativo do Singreh; a Agência Nacional de Águas (ANA), agência reguladora dos recursos hídricos do Brasil; os Comitês de Bacias Hidrográficas (CBH), que reúnem representantes do poder público e da sociedade civil; e outros órgãos federais, estaduais ou municipais. Assim, a gestão dos recursos hídricos no Brasil é efetuada de forma integrada entre os estados e a União, a partir de diferentes mecanismos de organização.

Conforme relatório da *Organisation for Economic Co-operation and Development* (OECD, 2015), é notável o progresso na gestão dos recursos hídricos no Brasil com a legislação de 1997, saindo de um modelo de desenvolvimento centralizado e tecnocrático para o modelo de gestão integrada. Ainda assim, conforme o relatório, a política hídrica no Brasil é altamente fragmentada na sua formulação e implementação devido às lacunas de governança e aos desafios de coordenação relacionados. Além disso, há variabilidade econômica, financeira e hidrológica entre os estados do Brasil, com diferenciação na capacidade de monitorar o uso da água e de instituir as políticas públicas de gestão hídrica. Desse modo, devido à limitação financeira e à capacidade de gestão, os inúmeros planos de recursos hídricos, em níveis nacional, estadual ou local, não chegam a ser colocados em prática.

Logo, segundo Oliveira (2013), em algumas regiões do Brasil a gestão hídrica ainda apresenta características de gestão econômico-financeira, com tendências tecnocratas e burocratas, apesar do esforço legal de estimular um olhar integrado sobre as águas. Ainda, conforme Ferreira e Debeus (2018), as grandes barreiras que existem para a implementação da gestão sistêmica prevista nos instrumentos da política atual se deve à variabilidade hidrológica brasileira, aliada à complexidade das relações sociais, e da participação popular nos processos de decisão.

Assim, apesar do avanço da legislação brasileira em introduzir formas modernas de gestão das águas, destacando-se inclusive no cenário internacional (ANA, 2002), é possível verificar que o discurso atual no âmbito nacional adere à discussão mundial, versando sobre crise hídrica e o aperfeiçoamento nos mecanismos de gestão.

### **2.1.3 ÁGUAS URBANAS E DRENAGEM URBANA**

As águas urbanas, na definição de Tucci (2008), abrangem o sistema de abastecimento de água e esgoto sanitário, a gestão dos resíduos sólidos, a drenagem urbana e as inundações ribeirinhas. Já Riguetto (2009), conforme Lei Federal 11.445/2007, salienta que o manejo das águas pluviais urbanas corresponde ao conjunto de infraestruturas e instalações operacionais de drenagem urbana das águas pluviais; do transporte, detenção ou retenção para o amortecimento de vazões de cheias; e do tratamento final das águas pluviais drenadas, relacionadas ao planejamento da ocupação do espaço territorial urbano.

Conforme Tucci (2003), a drenagem urbana é dividida em microdrenagem e macrodrenagem. A microdrenagem envolve todo sistema de condutos pluviais e canais de drenagem no nível do lote e da rede urbana, como por exemplo, as vias, as sarjetas, o meio-fio, os bueiros ou os poços de visita. A microdrenagem escoa para o sistema de macrodrenagem, que são os canais de maiores dimensões.

Outros dispositivos hidráulicos de caráter estrutural utilizados para o manejo das águas urbanas, agora conforme Riguetto (2009), são cisternas ou paisagismo que integre adequadamente as áreas impermeabilizadas e as áreas verdes para o controle da geração do deflúvio a nível do lote, diminuindo a sobrecarga à jusante. Em áreas maiores, também, podem ser utilizados micro-reservatórios de infiltração. Para cidades de grande porte e regiões metropolitanas, uma boa solução é a introdução de reservatórios de detenção, capazes de armazenar grandes quantidades de água.

Além disso, as cidades apresentam condições diferentes e específicas de drenagem das águas urbanas, devendo as soluções para os problemas de drenagem observar as características, potencialidades e limitações locais (RIGUETTO, 2009). Entretanto, a gestão das águas pluviais urbanas está sob jurisdição municipal, e se reconhece que a maioria dos municípios brasileiros não possui capacidade técnica para tratar do tema. As ações municipais, em geral, têm impactos exportados para a jusante, dentro da bacia hidrográfica (TUCCI, 2008).

Para Finkler (2012), a impermeabilização do solo, o aterramento ou canalização dos cursos d'água, o desmatamento e as deficiências no saneamento promovem

alterações na drenagem das águas pluviais da zona urbana. A falta de planejamento da ocupação territorial urbana, junto a eventos hidrológicos de alta intensidade, desencadeia problemas de drenagem nas cidades. A impermeabilização das bacias hidrográficas<sup>4</sup> pela expansão urbana provoca diminuição da capacidade de infiltração e o consequente aumento do escoamento superficial, fatores de grande influência nos alagamentos urbanos (RIGUETTO, 2009). Esses condicionantes antrópicos, para Goerl e Kobiyama (2005), podem determinar a ocorrência e o tipo de inundação.

#### **2.1.4 PLANÍCIES DE INUNDAÇÃO**

As planícies de inundação ou planícies aluviais, conforme DNAEE (1976), são áreas de terras planas próximas ao fundo do vale de um rio que são inundadas quando o escoamento do curso d'água excede a capacidade do leito maior do canal. As áreas de inundação natural em uma planície de inundação também são conhecidas popularmente como áreas de várzea. Para Press et al. (2006), as planícies de inundação ocorrem em vales abertos e são caracterizadas como áreas planas adjacentes ao nível do topo do canal, as quais se estendem para ambos os lados do curso d'água. Assim, planícies de inundação se caracterizam por serem áreas predominantemente planas que são suscetíveis a inundações de magnitudes e frequência variáveis (SILVEIRA, 2019).

As inundações, portanto, são fenômenos que fazem parte da dinâmica fluvial que atingem periodicamente as várzeas ou planícies de inundação. Representam o extravasamento das águas de um curso de água para as áreas marginais quando a vazão é superior à capacidade da calha de um rio (SANTOS, 2012). Conforme Oliveira (1998), as planícies de inundação são um regulador hidrológico, absorvendo o excesso de água extravasado de um rio nos períodos de intensas chuvas.

Para a geografia, planícies de inundação são formações sedimentares de deposição formadas pela ação da água que carregam sedimentos que são depositados adjacentes ao canal fluvial (GIANNINI E RICCOMINI, 2009). Para Borges e Ferreira (2019), planícies de inundação representam uma configuração geográfica modelada por

---

<sup>4</sup> Se admite como Bacia Hidrográfica um conjunto de terras drenadas por seu rio e seus afluentes, com limite geográfico nítido e bem definido, conforme definição de Barrella (2001) e Borsato (2004).

processos geomorfológicos e hidrológicos que operam juntos na paisagem. Conforme Christofoletti (1974), as planícies de inundação constituem a forma mais comum de sedimentação fluvial, e podem ser encontradas em rios de qualquer grandeza. Ainda para Christofoletti (1974), a denominação “planície de inundação” é apropriada porque durante a cheia de um rio toda essa área pode ser inundada, tornando-se o leito do rio.

As planícies de inundação são áreas que ora estão inundadas, ora estão secas. Conforme Scheren (2014), são ambientes que variam sazonalmente entre zonas alagadas em períodos de inundação e zonas de terra firme vegetadas em períodos menos chuvosos ou de seca. São inundadas apenas em decorrência de chuvas extremas, quando a calha do leito maior não suporta o volume d’água, ocorrendo a extravasão. Na maior parte do tempo, porém, a planície apresenta solo e vegetação (SCHEREN, 2014).

Por estarem entre áreas não inundáveis e o leito de um rio, que permanece com água por quase todo o tempo, Neiff (2003) considera as planícies de inundação como um “sistema de transição entre terra e água”. Desse modo, as planícies de inundação formam a passagem entre o sistema terrestre e o aquático.

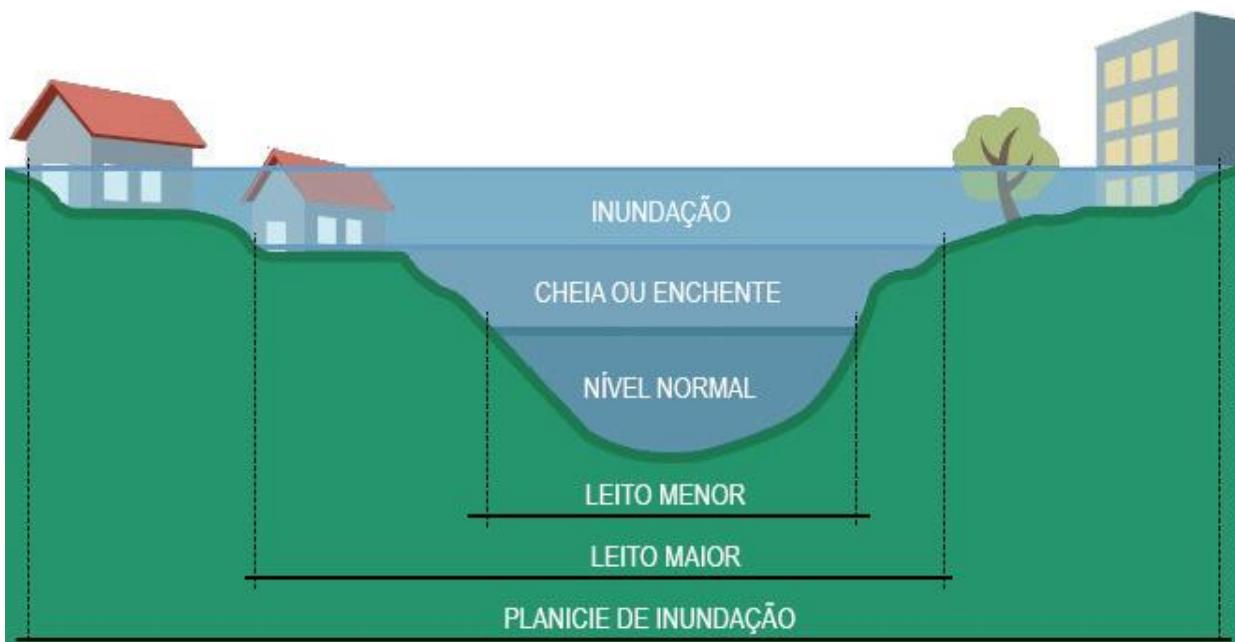
As planícies de inundação – por serem planas – apresentam condições favoráveis à ocupação humana frente ao relevo acidentado, tornando-se atraentes a agentes econômicos diversos. Conforme Borges e Ferreira (2019), as planícies de inundação são utilizadas para o cultivo agrícola, devido à alta fertilidade do solo; para pastagem do gado, pela facilidade e proximidade com a água para dessedentação dos animais; e em áreas urbanas, onde a impermeabilização do solo para estruturação urbana se demonstra como um problema sério e recorrente.

Ainda que a inundação natural das planícies de inundação cause danos à agricultura e à pecuária, é nas zonas urbanizadas que ocorrem os maiores prejuízos. Tucci (1999) salienta que esse tipo de inundação é natural, e que o evento ocorre porque áreas naturalmente inundáveis foram ocupadas pela urbanização. A ocupação da planície de inundação, neste caso, não é a causa da inundação. Uma sequência de anos sem enchentes ou inundações, como afirma Tucci (2003), é razão suficiente para que áreas inundáveis – e por isso inadequáveis à ocupação urbana – sejam loteadas.

Assim, são recorrentes os estudos sobre urbanização em planícies de inundação que trazem a comprovação de que os eventos existem, são naturais e continuaram a ocorrer, não havendo ações mitigatórias suficientes que impeçam tal realidade (Borges e Ferreira, 2019).

### 2.1.5 EVENTOS HIDROLÓGICOS E PROTEÇÃO CIVIL

Não existe padronização para a classificação dos eventos hidrológicos no Brasil. A Classificação e Codificação Brasileira de Desastres (COBRADE, 2012), define em três modalidades os tipos de desastres hidrológicos no país: as enchentes (ou cheias), as enxurradas e os alagamentos. Já a Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM, empresa do governo federal ligada ao Ministério de Minas e Energia, classifica como quatro os processos hidrológicos: as enchentes (ou cheias), as enxurradas, os alagamentos e as inundações. A Figura 2.1 demonstra a diferença entre enchentes e inundações.



**Figura 2.1 –** Enchente e inundação. Fonte: CEMADEN (2016). Editada por Baumbach (2019).

Conforme CPRM (2017), enchente (ou cheia) é o processo de cheia do rio, que passa a ocupar o seu leito maior devido ao aumento do volume de água. Em enchentes os rios podem alcançar a cota máxima do leito maior, mas não ocorre o seu transbordamento.

Já inundação ocorre quando há o transbordamento do rio do seu leito maior para as planícies de inundação (ou áreas de várzea). Esse transbordamento ocorre de modo gradual, ocasionado por chuvas distribuídas e alto volume acumulado na bacia de contribuição (CPRM, 2017). Eventos de inundação têm maior impacto sobre assentamentos urbanos do que enchentes, pois muitas cidades se localizam ou expandiram seu território sobre planícies de inundação, como é o caso das cidades analisadas na pesquisa.

O alagamento é o acúmulo de água no perímetro urbano, causado por problemas de extrapolação da capacidade de escoamento do sistema de drenagem urbana. Ocorrem após chuvas intensas e são comuns em grandes centros urbanos, onde há impermeabilização do solo. Os alagamentos, conforme IBGE (2017), diferenciam-se das enchentes e inundações por estarem diretamente relacionados com a permeabilidade da água no solo e com os sistemas de drenagem urbana existentes.

As enxurradas, por sua vez, ocorrem quando o escoamento superficial é concentrado e com alta energia, aumentando sua velocidade. São ocasionadas por eventos chuvosos intensos ou extremos e não há tempo hábil para proteção material ou civil (CPRM, 2017). As enxurradas também podem ser chamadas de inundações bruscas, segundo IBGE (2017).

Contudo, na prática os termos são muitas vezes utilizados como sinônimos. Enchentes são reconhecidas como inundações e inundações como enchentes, ou até mesmo como alagamentos. A definição que interessa para a pesquisa é a de inundação, ou seja, o processo de transbordamento natural de um curso hídrico sobre sua planície de inundação.

O Brasil aparece entre os países com maior incidência de sinistros devido às inundações, conforme Cunha (2019), registrando anualmente centenas de mortes por afogamento, enxurradas, enchentes e acidentes em vales de inundação (MENDIONDO

et al., 2013). De acordo com o Atlas Brasileiro de Desastres Naturais (CEPED – UFSC, 2013), de 1991 a 2010, inundações e movimentos de massa foram os sinistros com maior número de mortes no país. Conforme Servidoni et al. (2019), no Brasil as enchentes e inundações são os desastres naturais que mais causam prejuízos sociais, econômicos e ambientais. Entre 2001 e 2015, segundo EM-DAT (2016), estimasse que 6,8 milhões de pessoas foram afetadas, com mais de 2.500 óbitos e danos na ordem de R\$ 20 bilhões de reais.

A Pesquisa de Informações Básicas Municipais – MUNIC 2017, publicada pelo IBGE (2017), investigou aspectos da gestão de risco e resposta a desastres em 5.570 municípios brasileiros. Do total, 1.515, ou 27,2% dos municípios, foram atingidos por enchentes ou inundações nos últimos quatro anos anteriores à pesquisa. A Região Sul do país, com 50,7%, é a região que apresenta maior concentração de municípios atingidos por estes eventos.

Frente a isso, e como já indicado na justificativa, a Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM, empresa do governo federal ligada ao Ministério de Minas e Energia, realiza desde novembro de 2011 a Setorização de Áreas em Alto e Muito Risco a Movimentos de Massa, Enchentes e Inundações nos municípios brasileiros pré-indicados pelas Defesas Civis Nacional e Estadual, com finalidade de prevenção e redução das perdas sociais e econômicas consequentes desses desastres naturais (CPRM – DEGET, 2019).

No Brasil, a Lei nº 12.608, de 10 de abril de 2012, instituiu a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil – PNPDEC (2012). A PNPDEC abrange ações de prevenção, mitigação, preparação, resposta e recuperação à proteção e defesa civil, devendo a União, os Estados, o Distrito Federal e os Municípios adotar medidas necessárias à redução do risco de desastre. As ações da PNPDEC devem integrar-se às políticas de ordenamento territorial, desenvolvimento urbano, meio ambiente, gestão dos recursos hídricos, geologia, infraestrutura, ciência e tecnologia, promovendo o desenvolvimento sustentável (PNPDEC, 2012).

Apesar do alto índice de municípios atingidos com desastres hidrológicos, somente 9% possuem Plano Municipal de Redução de Riscos, 2% têm lei específica para

prevenção de enchentes e enxurradas e apenas 1% apresenta lei específica para prevenção de escorregamentos ou deslizamentos de encostas. O mapeamento de áreas de risco é o principal instrumento de gerenciamento de risco de desastres hidrológicos presentes nos municípios brasileiros, em 19% daqueles atingidos. Ainda assim, a fiscalização e o controle das áreas de risco acontecem em somente 11% dos municípios, revelando que mesmo com o mapeamento das áreas de risco, ainda é ineficiente o controle da ocupação urbana sobre essas áreas (Almeida, 2015).

Apesar disso, a atual PNPDEC considera estratégicas as ações preventivas, trabalhando, portanto, em ações de mitigação dos desastres. Para viabilizar as estratégias do PNPDEC existem o Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais (CEMADEN), vinculado ao Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, e o Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres (CENAD), vinculado ao Ministério de Desenvolvimento Regional.

As ações de proteção a desastres também são gerenciadas pelo sistema de Defesa Civil. A Defesa Civil brasileira é estruturada a partir do Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil (SINPDEC), composto por órgãos da administração pública da União, do Distrito Federal, dos Estados e dos Municípios, através dos conselhos e secretarias nacionais, das coordenadorias estaduais ou municipais e dos núcleos comunitários municipais. Também atuam no SINPDEC entidades privadas ou organizações não governamentais relativas à proteção civil.

Sob responsabilidade da Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil (SEDEC) e do Ministério da Integração (MI), é utilizado, desde 2012, o Sistema Integrado de Informações sobre Desastres (S2ID). Conforme previsto na Portaria MI 526/2012, é necessária a solicitação e registro do desastre no S2ID, por parte dos municípios, para o reconhecimento federal sobre uma Situação de Emergência (SE) ou Estado de Calamidade Pública (ECP). O S2ID foi concebido para gerar um banco de dados e informações sobre os desastres nacionais, de maneira a fornecer subsídios à gestão de riscos e desastres no país (MI – SEDEC, 2017).

A Agência Nacional de Águas (ANA), a Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) e o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) também auxiliam no

monitoramento de desastres hidrológicos através da instalação de pluviômetros automáticos, estações hidrometeorológicas e radares meteorológicos (LONDE et al., 2014).

No Brasil, o monitoramento hidrológico é realizado a partir de estações pluviométricas e fluviométricas que fornecem informações sobre a quantidade e qualidade dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos do território nacional. As estações hidrometeorológicas no país são geradas por instituições públicas ou privadas, e podem ou não estar vinculadas à Rede Hidrometeorológica Nacional (RNH). Em 2017, a RNH possuía 21 mil estações hidrometeorológicas (ANA, 2017). Os dados de monitoramento são disponibilizados no Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH). Além do monitoramento convencional por estações hidrometeorológicas há o monitoramento por satélite (ANA, 2017) o qual é capaz de indicar aspectos de quantidade e qualidade da água de rios e lagos de algumas bacias brasileiras. O monitoramento hidrológico e dos sistemas de drenagem, e a modelagem hidrológica, funcionam como ações preventivas frente ao risco de inundações, servindo também como instrumento de suporte para o planejamento de novas áreas urbanas (RIGUETTO, 2009).

## **2.1.6 CONSIDERAÇÕES SOBRE URBANIZAÇÃO E AMBIENTE HÍDRICO**

A demanda por desenvolvimento sustentável produz impacto relevante na concepção dos sistemas urbanos, com maior atenção aos sistemas de drenagem urbana (RIGUETTO, 2009). O discurso que prevalece é o da gestão integrada das infraestruturas urbanas e das águas urbanas, com os novos paradigmas de consciência ambiental e desenvolvimento sustentável (FERREIRA; DEBEUS, 2018).

Conforme Tucci (2006), o desenvolvimento urbano sobre as bacias hidrográficas altera o ciclo hidrológico devido à impermeabilização que a urbanização provoca no solo, diminuindo a capacidade de infiltração da água, aumentando o escoamento superficial e reduzindo o escoamento subterrâneo e a evapotranspiração. Para Riguettto (2009), a ocupação urbana modifica o padrão de escoamento de deflúvios superficiais nas bacias. Quando as áreas naturais são impermeabilizadas, há redução nos processos de

infiltração e retenção de água, com aumento significativo na velocidade de escoamento superficial e deflúvios nas áreas a jusante, aumentando os riscos de inundações.

O crescimento urbano, então, precisa ser induzido sobre áreas de menor fragilidade ambiental, de modo a preservar as linhas de drenagem naturais para possibilitar que a água escoe o mais próximo do seu curso, velocidade e volume natural (LANNA, 1999; TUCCI, 2008; PERES, 2010). Assim, devem-se priorizar medidas não estruturais e o gerenciamento integrado entre infraestrutura, morfologia urbana e linhas de drenagem naturais (TUCCI, 2005).

Ainda assim, medidas estruturais de planejamento podem promover a preservação dos sistemas naturais, evitando a degradação ambiental. Para Paschoal (2015), formas antrópicas como terraços agrícolas e patamares em cortes podem ser consideradas como medidas de conservação por estarem aliadas ao planejamento ambiental. Com relação ao manejo das águas e o controle de inundações, para Finkler (2012), as medidas estruturais, que geralmente envolvem grandes quantidades de recursos, podem resolver problemas específicos e localizados. Mas, em uma escala que compreenda toda a bacia hidrográfica o planejamento precisa ser pensado com medidas não estruturais, compatibilizando desenvolvimento urbano e preservação natural.

Assim, o uso e ocupação do solo, tanto das áreas rurais como das áreas urbanas, deve ser orientado a partir da agregação de um conjunto de ações e soluções de ordem estrutural e não estrutural, com pequenas e grandes obras de planejamento de gestão e ocupação do espaço urbano, e com o auxílio de legislações e fiscalizações eficientes (RIGUETTO, 2009).

Desse modo, o impacto negativo da urbanização sobre o sistema ambiental, sobretudo sobre o sistema de drenagem natural e do ciclo hidrológico, demonstra a necessidade de integração entre planejamento urbano e ambiental direcionado a partir de uma perspectiva sistêmica, de modo a estimular o desenvolvimento das atividades humanas com menor impacto sobre os sistemas naturais. Com isso, espera-se um desenvolvimento urbano que promova qualidade de vida e a conservação ambiental, a partir do equilíbrio entre espaço construído e ambiente natural.

## **2.2 MORFOLOGIA, MODELAGEM E DINÂMICAS URBANAS**

Esta é a segunda parte da revisão teórica. Primeiro introduz o tema da Morfologia Urbana, explicando seus conceitos e aplicações, além de apontar as principais correntes de pensamento e pesquisadores da área, bem como os principais periódicos e eventos relacionados ao tema. Relaciona brevemente a teoria geral dos sistemas e as cidades enquanto sistemas complexos – demonstrando a tendência da abordagem sistêmica nos estudos urbanos – e fala sobre modelagem urbana enquanto ferramenta metodológica utilizada para compreender as dinâmicas espaciais que ocorrem nas cidades.

Por fim, conceitua autômatos celulares, teoria empregada na elaboração da plataforma utilizada para a realização do procedimento técnico experimental proposto na pesquisa, bem como indica trabalhos de modelagem urbana com autômatos celulares relacionados a enchentes e inundações.

### **2.2.1 MORFOLOGIA URBANA**

A morfologia urbana, como o nome sugere, é utilizada para o estudo da forma das cidades. Segundo Krafta (2014), a forma urbana resulta da articulação de três elementos básicos: as formas construídas (objetos tridimensionais), as parcelas destinadas a edificação privada e os espaços públicos. Para o autor, ainda que pareça reducionista devido à multiplicidade de agentes e atores que produzem a cidade, toda forma de ocupação urbana, da vila à metrópole, é resultado da combinação específica desses três elementos. Embora muito diferentes, as cidades são formadas por poucas categorias de elementos que mesmo articulados em inúmeras composições gramaticais e sintáticas, são limitadas. Assim, a linguagem urbanística resultante de todo processo social, político, econômico, antropológico, estético, derivará desses troncos morfológicos fundamentais (KRAFTA, 2014).

Batty e Longley (1994), dizem que a Morfologia Urbana é o estudo da forma e do processo, do crescimento e da forma, da forma e da função. Para Maretto (2013), Morfologia Urbana é o estudo das formas urbanas e dos atores e processos responsáveis pela sua transformação, permitindo, dinamicamente, compreender um organismo urbano em todas as suas escalas. Conzen (2012, apud COSTA E NETTO, 2015) define

Morfologia Urbana como a ciência que estuda a forma edificada das cidades, buscando explicar o traçado e a composição espacial das estruturas urbanas e dos espaços abertos. Rego e Meneguetti (2011) dizem que a Morfologia Urbana trata do estudo do meio físico da forma urbana, dos processos e das pessoas que o formatam, constituindo um instrumento para entendimento e planejamento da cidade.

A Morfologia Urbana, portanto, ajuda a entender a estrutura, forma e transformação da cidade e da paisagem urbana, estando diretamente ligada ao estudo das cidades. Mas ainda que exista consenso sobre os elementos morfológicos (ruas, lotes, bairros, prédios, praças, tecido urbano, etc.) há divergências de como esses elementos devam ser abordados.

A Morfologia Urbana tem sua base estruturada nas escolas Francesa, Italiana e Inglesa. Ainda assim, as que efetivamente contribuem para os estudos de Morfologia Urbana e têm maior influência mundial, para Costa e Netto (2015), são a Escola Inglesa e a Escola Italiana. Estas escolas estudam a transformação do tecido urbano e apontam os processos que modificam a cidade ao longo do tempo, compartilhando a ideia de evolução formativa e transformadora da forma urbana (COSTA, 2013).

A diferença entre a Escola Italiana e a Escola Inglesa está na abordagem sobre o objeto de estudo e nas escalas de análise (COSTA E NETTO, 2015). Enquanto a Escola Inglesa tem noção ampla de território, analisando o plano da cidade e seus componentes, a Escola Italiana baseia-se na escala arquitetônica, selecionando a edificação, ou tipo básico, como principal elemento morfológico na análise da evolução urbana (COSTA et al., 2017). A Escola Inglesa adota uma abordagem explanatória, cognitiva, que almeja produzir explicações para a forma urbana, já a Escola Italiana parece estimulada pelas possibilidades de desenho urbano, com uma abordagem de cunho mais normativo e prescritivo, que a partir da leitura e entendimento das tipologias existentes articulam uma visão de futuro (REGO E MENEGUETTI, 2011).

A Escola Italiana de Morfologia Urbana foi fundada pelo arquiteto Saverio Muratori (1910 – 1973), e posteriormente teve grande influência de Carlo Aymonino, Aldo Rossi e Gianfranco Caniggia. Na Escola Italiana a sistematização do tipo arquitetônico é o objeto principal para a definição do tecido urbano. Para Muratori, conforme Caniggia e

Maffei (2001), a cidade é um organismo vivo em constante transformação, onde os edifícios são as inúmeras células que, em conjunto, estabelecem os quarteirões e o tecido urbano. Atualmente a Escola de Arquitetura de Florença e a Sociedade Italiana de Morfologia Urbana (CISPUT) são as entidades mais representativas sobre Morfologia Urbana na Itália (COSTA E NETTO, 2015).

A Escola Inglesa de Morfologia Urbana se originou a partir dos estudos do geógrafo alemão Michael Robert Gunther Conzen (1907 – 2000), para o qual o plano urbano das cidades está associado às necessidades de sua população e da ordem econômica estabelecida em diferentes épocas para atender às demandas sociais e culturais (COSTA E NETTO, 2015). Atualmente destaca-se o *The Bartlett Centre for Advanced Spatial Analysis* (CASA), vinculado à Universidade de Londres. São evidenciados os trabalhos de Bill Hillier, Julienne Hanson, Michael Batty e Ivor Samuels. As principais fontes científicas sobre Morfologia Urbana, em inglês, são o *Journal of the International Seminar on Urban Form (UM)*, publicação do *International Seminar on Urban Form (ISUF)* e o *International Journal of Research in Urban Studies*.

A Morfologia Urbana, portanto, investiga os componentes físicos-espaciais (ruas, lotes, edificações, áreas livres, etc.) e socioculturais (usos e ocupação) da forma urbana e como eles se transformam no decorrer do tempo. Esses elementos fundamentais que compõem a cidade e que levam ao desenvolvimento do tecido urbano podem estar relacionados e articulados de diversas maneiras, apresentando espaços únicos (KRAFTA, 2014). O que une as escolas de morfologia é o fato de que para todas elas a cidade pode ser interpretada pela sua forma física, assim, as diferentes escolas concordam com o objeto de seus estudos (REGO E MENEGUETTI, 2011).

Além das escolas tradicionais de Morfologia Urbana, com abordagens histórico-geográfica e tipológica projetual, existe a abordagem metodológica da sintaxe espacial (*Space Syntax*) e a análise espacial, que inclui autômatos celulares (*Cellular Automata – CA*), modelos baseados em agentes (*Agent Based Models – ABM*) e fractais. Estas quatro abordagens metodológicas são as que dominam o cenário internacional atual sobre Morfologia Urbana (OLIVEIRA, 2016).

A sintaxe espacial, desenvolvida no Reino Unido por Hillier e Hanson (1984), é uma teoria e uma metodologia analítica. Trouxe uma nova forma de representação do espaço urbano, a partir do mapa axial, que pode ser traduzido em um grafo, de onde se pode extrair as medidas topológicas que permitem quantificar as características da configuração espacial. Pode ser usada isoladamente ou em conjunto com outros métodos, indo da escala macro à micro e fornecendo evidências de diferentes contextos geográficos (OLIVEIRA, 2016). Krafta (2014), expõe a Sintaxe Espacial como um conjunto de métodos e técnicas para descrever a configuração espacial com vinculação do comportamento social urbano, a partir da medida de aspectos sociais como fluxos, copresença e uso do solo.

Por fim, a abordagem metodológica da análise espacial, expressão sugerida por Kropf (2009), envolve os autômatos celulares, os modelos baseados em agentes e os fractais. Conforme Oliveira (2016), os pesquisadores que se destacam e que contribuem para a conceituação destas metodologias, respectivamente, são Tobler (1979), Batty (2005) e Batty e Longley (1994). Michael Batty, geógrafo britânico, é o criador do já citado *The Bartlett Centre for Advanced Spatial Analysis (CASA)*, que desenvolve pesquisa avançada em análise espacial urbana. O CASA propõe pesquisas relacionadas à modelos de simulação da dinâmica espacial urbana e inclui a reprodução computadorizada de fenômenos de crescimento urbano, de transformação interna, de geração e distribuição de fluxos, etc. Batty também é editor do periódico *Environment and Planning B*, principal publicação da área.

No contexto brasileiro atual, conforme Costa e Teixeira (2014), a maior influência vem da Escola Inglesa, mais especificamente da *Oxford Brookes University* que foi responsável pela nova geração de morfologistas brasileiros, como Romulo Krafta (1986), Vicente del Rio (1990), Humberto Yamaki (2003), Stael de Alvarenga Pereira Costa (2003), Flávio Malta (2007) e Lélia Vasconellos (2011).

Para fortalecer os estudos sobre Morfologia Urbana no idioma português, tendo em vista que a maioria das publicações sobre o tema é escrita em língua inglesa, foi articulada, a partir de 2010, a Rede Lusófona de Morfologia Urbana (*Portuguese Network of Urban Morphology – PNUM*). Integrante do ISUF, o PNUM se demonstra como o

principal meio difusor dos estudos sobre Morfologia Urbana em língua portuguesa, a partir da publicação científica Revista de Morfologia Urbana e realizando conferências e workshops no Brasil e em Portugal, como no Porto em 2011, Lisboa 2012, Coimbra 2013, Brasília 2015, Guimarães 2016, Vitória 2017, novamente no Porto em 2018 e Maringá em 2019. No contexto de Portugal se destacam os nomes de Teresa Marat-Mendes e Vitor Oliveira.

Os trabalhos de pesquisadores brasileiros reunidos nos principais periódicos de Morfologia Urbana revelam a diversidade teórica e metodológica na abordagem do tema. Nas abordagens tradicionais se destacam os trabalhos de Costa et al. (2009), Costa (2015) e Almeida (2017), de Minas Gerais; Rego e Meneguetti (2011), Rego et al. (2015) e Rego et al. (2017), do Paraná; Macedo et al. (2012), Macedo et al. (2016) e Gonçalves (2014), de São Paulo; e Cardoso et al. (2016), do Pará. Já nas abordagens da sintaxe espacial e da análise espacial se evidenciam os trabalhos de Saboya (2010), de Santa Catarina; Rigatti e Silva (2007), Krafta (2009) e Palma (2014), do Rio Grande do Sul; Amorim e Griz (2008) e Amorim e Barros Filho (2017), de Pernambuco; Holanda (2000), Holanda (2014), do Distrito Federal; e Feitosa et al. (2012), de São Paulo.

Há uma diferença significativa no modo como as quatro principais abordagens morfológicas percebem a questão temporal. Enquanto as abordagens tradicionais (histórico-geográfica da Escola Inglesa e tipológica projetual da Escola Italiana) endossam o passado ao presente procurando explicações na evolução urbana e tipológica, as abordagens da sintaxe espacial e da análise espacial têm a característica de explorar cenários futuros de desenvolvimento urbano. Isso porque são sistemas baseados em modelos matemáticos, capazes de processar uma grande quantidade de dados e informações nos processos de investigação, sendo por isso explorados como métodos de análise e comparação.

Esta pesquisa, que apresenta a área de estudo a partir de uma análise morfológica tradicional sobre a relação da evolução urbana e o sistema hídrico natural (capítulo 1), agora discorre para a metodologia da análise espacial. Assim, apresenta a seguir uma revisão sobre as teorias da complexidade, passando pela modelagem urbana até chegar nos autômatos celulares, teoria que baseia a análise experimental proposta.

## **2.2.2 SISTEMAS, COMPLEXIDADE E URBANISMO**

Proposta pelo biólogo austríaco Ludwig Von Bertalanffy na década de 40, a Teoria Geral dos Sistemas (TGS) buscava respostas para problemas teóricos nas ciências biossociais. Até então a metodologia adotada correspondia em analisar partes isoladas de um conjunto sem interpretar suas inter-relações. Bertalanffy sugere que além de se considerar o estudo das partes e dos processos de maneira isolada, é necessário compreender as dinâmicas e inter-relações entre as partes que, em conjunto, formam um sistema. Conforme Kasper (2000), em contradição ao pensamento analítico tradicional, que focaliza a análise das partes, o pensamento sistêmico direciona a compreensão da existência de um todo, ou seja, um sistema.

Um sistema, para Bertalanffy (1975), é um complexo de unidades entre os quais existem relações. Para Griffith (2005) é um grupo de componentes interligados, inter-relacionados e interdependentes, que forma um complexo unificado. Oliveira e Portela (2006) dizem que cada sistema é composto por subsistemas que integram um macrossistema. Um sistema, portanto, é o conjunto de partes interconectadas que formam um todo. Quando um sistema não pode ser entendido pela análise do comportamento dos seus componentes individuais, mas sim pelo comportamento global das interações dos componentes individuais, são chamados de sistemas complexos.

Sistemas complexos são formados por um grande número de componentes que, aparentemente independentes, interagem entre si, e a riqueza dessas interações muitas vezes permite que o sistema como um todo seja auto organizado. Com os sistemas complexos podem ser estudados fenômenos difíceis de serem compreendidos sem a modelagem por equações (BAR-YAM, 1997). A partir de programas computacionais apropriados podem ser feitas simulações do comportamento desses sistemas de forma a prever acontecimentos, ainda que, conforme Batty e Torrens (2005), os resultados das interações e dinâmicas de sistemas complexos, com entidades coerentes e reconhecíveis, podem surpreender previsões. Redes neurais, modelos baseados em agentes e autômatos celulares são exemplos de ferramentas matemáticas capazes de realizar estas simulações a partir da modelagem de sistemas complexos reais, de natureza física, biológica ou econômica.

A TGS apresentou uma gama de abordagens e aplicações para trabalhar com a complexidade nas mais diferentes áreas do conhecimento (KASPER, 2000), sendo, por isso, apropriada de variadas formas pelas inúmeras ciências. Macedo et al. (2008), afirma que todos os campos do conhecimento possuem sistemas, e tendem a obter resultados satisfatórios quando abordados de modo sistêmico. A partir da TGS surgiram uma série de teorias que se concentram no estudo dos fenômenos em sua totalidade e complexidade, como a teoria dos compartimentos, a teoria das redes, a teoria dos conjuntos, a teoria da informação, a teoria dos jogos, a teoria da decisão, a teoria dos autômatos celulares, a teoria do caos e a teoria dos sistemas dinâmicos.

A cidade, para Ferreira (2011), é a mais complexa estrutura feita pelo homem. Segundo Oliveira (2016, apud NACIFF, 2019), estudos empíricos sobre cidades constataram a existência de relações complexas entre os diferentes fatores e agentes urbanos. Kasper (2000), assume a cidade como um sistema complexo e dinâmico, em constante modificação, que manifesta ainda maior complexidade pela presença do fator humano. A cidade se configura, então, como um sistema complexo.

Assumir as cidades como sistemas complexos e trazer o pensamento sistêmico para o urbanismo, conforme Naciff (2019), permite uma abordagem global do espaço urbano, o que possibilita ações integradoras frente aos problemas urbanos, que, segundo Romanelli e Abiko (2011), geralmente são compreendidos de modo parcial e isolado. É possível abordar os processos e dinâmicas das cidades, como prática do urbanismo contemporâneo, a partir da lógica sistêmica. Neste sentido, algumas teorias embasadas na TGS que também influenciam o urbanismo contemporâneo, por exemplo, são os sistemas não-lineares, a teoria da complexidade, emergência e auto-organização, o crescimento fractal, a teoria da lógica difusa e os autômatos celulares.

A cidade enquanto sistema dinâmico e complexo, fora de equilíbrio e auto-organizável, conforme Polidori e Krafta (2003), exige esforço para a descrição e apreensão do fenômeno urbano, pois seu dinamismo e processo de crescimento são de difícil compreensão em razão da quantidade elevada de fatores presentes na cidade, suas interinfluências e seus horizontes temporais. Estudos de modelagem urbana, permitem, como mostrado a seguir, capturar e antecipar dinâmicas urbanas.

### **2.2.3 MODELAGEM E DINÂMICAS URBANAS**

Ainda que as cidades sejam sistemas complexos, com dinamismos e processos inerentes aos fatores sociais, econômicos, culturais, políticos, etc. que na sua mescla e combinação formam o espaço urbano, apresentam determinadas composições que permitem o agrupamento em padrões. Esses padrões são objetos de análise da Morfologia Urbana. A modelagem urbana, por sua vez, é um instrumento metodológico construído para dar suporte ao estudo da forma e da estrutura espacial urbana.

Os modelos urbanos, da sua concepção teórica às tecnologias contemporâneas, buscam a compreensão dos processos e das dinâmicas territoriais urbanas, de modo a prever as mudanças espaciais e antecipar as possíveis transformações territoriais que possam ocorrer no espaço. Conforme Almeida (2003), os modelos clássicos partem da teoria de anéis concêntricos de Von Thünen (1826), do modelo de Weber para localização industrial (1909), da teoria de lugares centrais de Christaller (1933) e da teoria de regiões econômicas de Lösch (1940), e buscavam o entendimento dos processos e mudanças espaciais urbanas. Conforme Trentin e Freitas (2010), estes modelos tinham caráter teórico e quantitativo e eram desvinculados de recursos de representação espacial que possibilitasse a visualização dos resultados.

Com o surgimento de computadores nas décadas de 50 e 60 aparecem os primeiros modelos urbanos computacionais. Almeida (2003) cita o modelo de localização residencial de Clark (1951), o modelo de transportes de Lowry (1964) e o modelo comercial de Lakshmanan e Hansen (1965). Neste período os modelos abordavam os diferentes aspectos da vida urbana (demanda residencial, transporte e localização comercial) de forma distinta e segmentada no aspecto temporal.

Os próximos modelos urbanos procuraram incorporar aspectos dinâmicos e temporais a partir de uma abordagem integradora como em Batty (1974); Batty (1976); Allen et al. (1981); Wilson (1981); Wegener et al. (1986). Ainda conforme Almeida (2003), esses modelos introduziram aprimoramentos como a adição da dimensão temporal na análise qualitativa, o emprego de ferramentas matemáticas sofisticadas e a análise das interações espaciais entre diferentes atividades humanas. Ainda assim, estes modelos eram difíceis de serem visualizados espacialmente (ALMEIDA, 2003).

Foi somente na década de 80 que o avanço da modelagem urbana enquanto forma de representação espacial ocorreu (BATTY, 2016). Os modelos espaciais dinâmicos permitiram a visualização espacial das simulações e teorias propostas e a compreensão de fenômenos urbanos e naturais em dimensões espaço-temporais (PEDROSA E CÂMARA, 2002). O fenômeno urbano, na modelagem urbana, pode ser reproduzido, controlado, explorado e visualizado (ECHENIQUE, 1975; BATTY, 2009). Nesse período a teoria de autômatos celulares começou a ser amplamente utilizada na modelagem urbana, metodologia que se manteve nos estudos de análise urbana atuais.

Um modelo urbano em autômato celular permite a representação simplificada da realidade e pode reproduzir realidades complexas do fenômeno urbano. Isto ocorre da seguinte forma: Em um tempo inicial a área de estudo é subdividida em células e cada célula recebe um estado. Em tempo final, e com uma regra de transição, o estado de cada célula será definido pelo seu estado e o estado das células vizinhas. Esses modelos espaciais dinâmicos descrevem a evolução de padrões espaciais de um sistema ao decorrer de um tempo (BATTY, 2013; WILENSKY E RAND, 2015).

Esse conceito tem sido aplicado em estudos urbanos porque o ambiente celular baseado em autômatos permite a compreensão de fenômenos e suas dimensões espaço-temporais, diferente do Sistema de Informação Geográfica (SIG), que ainda enfatiza a representação de fenômenos espaciais de maneira inerte, tendo como principal abstração o mapa (PEDROSA E CÂMARA, 2002). Para Câmara et al. (2003), os fenômenos espaciais são dinâmicos e as representações estáticas não conseguem representá-los de maneira correta. Processos e fenômenos inherentemente dinâmicos perdem significância se representados de maneira estática, como por exemplo o escoamento da água, os fluxos populacionais ou o próprio crescimento urbano.

A partir da modelagem as cidades podem ser compreendidas como um sistema complexo com características intrínsecas de emergência, auto-organização, autossimilaridade e comportamento não-linear (TRENTIN E FREITAS, 2010). A aplicação de modelos espaciais dinâmicos na análise de fenômenos urbanos e regionais, para Allen (1997) e Batty e Torrens (2005), possibilita a compreensão das relações de sistemas complexos, permitindo fazer análises para interferências futuras.

Apesar do reconhecimento da complexidade das dinâmicas no modo de mudança do uso do solo e da expansão urbana, com interferência de fatores sociais, econômicos ou políticos (PORTUGALI, 2000), processos difíceis de serem modelados, as simulações aplicadas com autômatos celulares têm proporcionado bons resultados na previsão de cenários futuros (ALMEIDA et al., 2005; GUAN et al., 2011; OSMAN et al., 2014; ZELLNER E CAMPBELL, 2015; MASSABKI, 2017). Também demonstram grande interesse ao planejamento, pois permitem a análise crítica de impactos futuros de políticas propostas (BARREDO et al., 2003; LIU et al., 2005; BONETT NETO, 2015), e por isso podem ser utilizadas para a construção de políticas públicas (COUCLELIS, 2005; ZELLNER E CAMPBELL, 2015; AHMED E BRAMLEY, 2015).

Entre os atuais desafios da modelagem urbana, conforme Levy et al. (2016) está a utilização das ferramentas de modelagem fora do ambiente acadêmico e de pesquisa, sendo que os principais questionamentos são referentes à validação dos modelos e à complexidade de utilização das ferramentas. Entretanto, conforme pontuam Dalcin e Silva (2019), já existem trabalhos que testaram a aplicação da modelagem urbana na elaboração de planos ou projetos urbanísticos como por exemplo Todes (2012), Abolhasani et al. (2016) e Acharya et al. (2017).

Também ocorre com frequência na modelagem urbana atual, conforme Behnisch et al. (2019) a incorporação de métodos baseados em *Big Data*, que, segundo Keller et al. (2016) têm revolucionado a forma de pesquisa em diferentes ciências. Dados colaborativos, redes sociais, bilhetes eletrônicos, telefones celulares e cartões de crédito têm em comum o georreferenciamento. Como resultado, segundo Serras (2014), é a transição de uma base de dados estática (em geral dados censitários) para uma base de dados dinâmica e constante. Essa grande quantidade de dados e um contínuo processamento em algoritmos de análise numérica e inteligência artificial possibilita análises aprofundadas das dinâmicas do território urbano (DALCIN E SILVA, 2019).

Por fim a possibilidade de previsão da cidade do futuro (para um período de 50 anos ou mais) continua como principal estímulo e desafio na modelagem urbana (WINSON, 2016), bem como ter a certeza do uso da ciência da análise urbana a favor do planejamento de cidades melhores (BATTY, 2019).

## 2.2.4 AUTÔMATOS CELULARES E MODELAGEM URBANA

De maneira simplificada um autômato celular (AC) é uma matriz de células onde cada célula tem um número finito de estados ou atributos. O estado de cada célula pode alterar conforme o estado das células adjacentes e por regras de transição pré-estabelecidas. Em suma, cada célula do sistema porta um estado, entre os possíveis, e pode mantê-lo ou alterá-lo para outro estado, entre os possíveis, conforme as condicionantes estabelecidas nas regras de transição (KRAFTA, 2014).

O conceito de autômatos celulares, do ponto de vista teórico, surgiu na década de 1940 pelos matemáticos Stanislaw Ulam e John von Neumann. Já a aplicação do conceito ocorreu apenas em 1960 quando John Horton Conway desenvolveu o Jogo da Vida (DEWDNEY, 1990; BERLEKAMP et al., 2004).

No Jogo da Vida há uma matriz de células onde cada célula pode estar em um de dois estados: viva ou morta. A vizinhança da célula é representada pelas oito células adjacentes (vizinhança de Moore). As regras de transição entre os tempos são as seguintes: a) a célula permanece viva se dois ou três dos seus vizinhos imediatos também estiverem vivos; b) a célula morta é alterada para o estado vivo se tiver três vizinhos no estado vivo. A Figura 2.2 demonstra o Jogo da Vida conforme descrito em Furtado e Delden (2011):

A célula e seu estado:

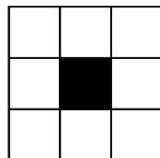


Célula viva



Célula morta

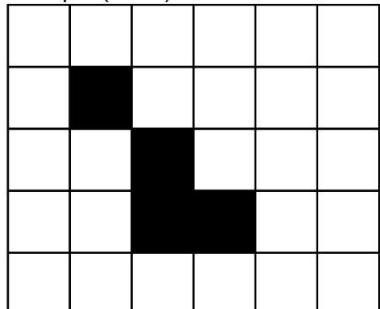
A célula e a vizinhança:



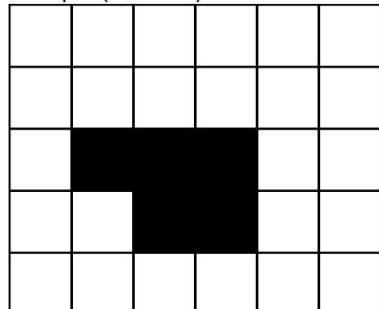
As regras de transição:

- a) a célula permanece viva se dois ou três vizinhos estiverem vivos
- b) célula torna-se viva se tiver três vizinhos vivos
- c) célula morre nos demais casos

Tempo ( $t = 0$ )



Tempo ( $t = 0+1$ )



Tempo ( $t = 0+2$ )

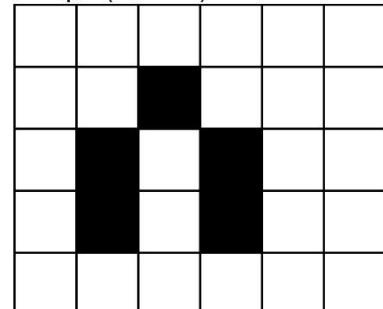


Figura 2.2 – Jogo da Vida de Conway com base na descrição de Furtado (2011). Baumbach, 2019.

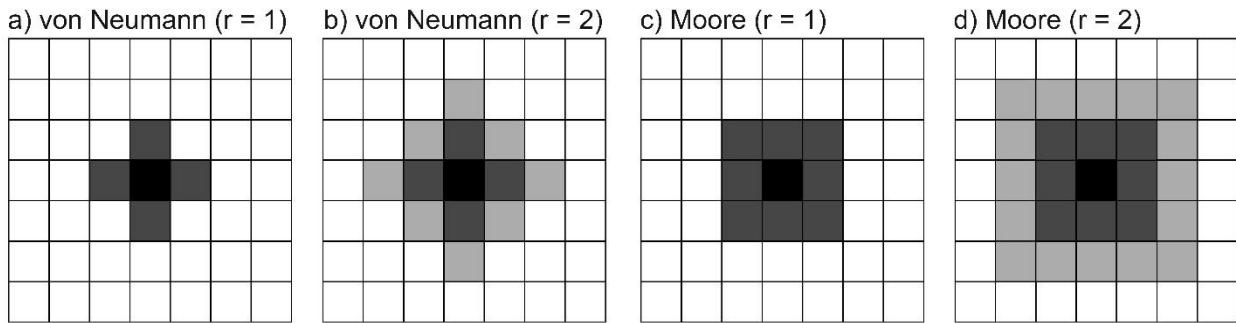
Ainda que pareça simples, a aplicação dessas regras permite resultados complexos e inesperados que produzem respostas semelhantes a como certos sistemas evoluem na realidade (PEDROSA E CÂMARA, 2002). Assim, o conceito básico de AC preconiza que a partir de um reduzido número de elementos e do padrão de comportamento local, é possível extrair padrões de comportamentos regionais (BATTY, M. E XIE, Y; 1994). Da iteração de simples elementos, emergem aspectos de sistemas complexos da macroescala urbana (BATTY, 2001).

São quatro as propriedades básicas de um AC na sua origem conceitual, conforme descritas em BATTY (1999): a primeira propriedade é a matriz celular; a segunda é que cada célula pode ter apenas um estado entre os estados definidos nos atributos do sistema (no Jogo da Vida, por exemplo, os estados eram vivo ou morto); a terceira propriedade é que o estado de cada célula depende do estado e das configurações das células vizinhas, sendo que as células vizinhas são todas aquelas células adjacentes. Por fim, existem as regras de transição que aplicam a mudança no estado de cada célula do sistema ao longo do tempo e em função da sua vizinhança. Batty (2001) cita ainda um quinto elemento intrínseco aos modelos urbanos baseados em AC, também encontrado em Wolfram (1984): o componente temporal que permite o caráter dinâmico a esses modelos.

De todo modo, os modelos baseados em AC tiveram grande evolução desde sua concepção até os modelos urbanos atuais. O formalismo teórico de Ulam, Newmann e Conway não era adequado para aplicações urbanas pois eram muito simplificados para representar cidades reais (WOLFRAM, 1994), sendo necessária a introdução de novos componentes para adicionar funcionalidade aos modelos básicos de AC. Logo, a utilização de AC nas ciências que estudam os fenômenos geográficos foi se desenvolvendo. As estruturas do grid em AC foram modificadas e as possibilidades de estado de cada célula foram ampliadas, além da vizinhança que varia consideravelmente dos modelos clássicos de von Neumann e Moore (BATTY, 2001).

A vizinhança de uma célula em ambiente celular pode ser definida de várias formas. As formas mais clássicas são os modelos de vizinhança regulares propostos por von Neumann (Figura 2.3 a e b) e por Moore (Figura 2.3 c e d). Contudo, em modelagem

urbana com AC já aparecem estudos onde a célula é representada pelo lote cadastral, gerando *grids* irregulares, como em Stevens e Dragicevic (2007), Shen (2009), Pinto e Antunes (2010) e mais recentemente em Barreira et al. (2019).



**Figura 2.3 –** Vizinhanças clássicas em AC: a) vizinhança de von Neumann; b) vizinhança de von Neumann estendida; c) vizinhança de Moore; d) vizinhança de Moore estendida. Baumbach, 2019.

As regras de transição também foram modificadas, incluindo aspectos de hierarquia, expressões probabilísticas, medidas de acessibilidade, fatores externos, inércia e padrões estocásticos. Assim, houve uma transição do abstracionismo matemático formal da conceituação de AC para a incorporação de AC enquanto ferramenta de simulação urbana (BATTY, 2001).

Tobler (1979), Couclelis (1987) e White e Angelen (1993) adaptaram o modelo básico de AC a aplicações urbanas, enquanto Batty (1998) procurou adequação às demandas do mundo real (KRAFTA, 2014). Conforme Oliveira (2016), foi após o trabalho de Tobler (1979) que vários autores passaram a implementar AC em modelagem urbana. De fato, a quantidade de modelos urbanos baseados em AC é expressiva, tendo sido publicada uma edição especial sobre o tema no periódico *Environmental and Planning B* (BATTY et al, 1997).

As vantagens dos AC para a modelagem urbana, conforme TORRENS (2000), inclui a abordagem descentralizada e dinâmica, a conexão com as teorias da complexidade, a conexão entre forma e função e entre padrões e processos, a relativa facilidade para visualização dos resultados e sua capacidade de integração com dados de sensoriamento remoto e informações georreferenciadas.

Assim, modelos baseados em AC têm sido empregados para explorar uma grande variedade de fenômenos urbanos como o próprio crescimento urbano (CLARKE, 1998; BATTY, 1999; WARD, 2000; LI, 2000; CHENG, 2004; LAU, 2005; FENG, 2013; KONG, 2017), a forma urbana (WU, 2000; YEH, 2001; BATTY, 2005), fenômenos de migração (PORTUGALI, 1995; SEMBOLI, 1997), fenômenos de segregação espacial (PORTUGALI, 2000; BENENSON, 2004), fenômenos de gentrificação (O'SULLIVAN, 2002), fenômenos de alteração do uso do solo (ARAI, 2004; LIU, 2004), densidades urbanas (YEA E LI, 2002), comportamento competitivo (BENATI, 1997; FURTADO, 2012), dinâmicas socioespaciais (VAN VLIET, 2012; KHAKPOUR, 2016) e fenômenos de fluxos de pedestres (BLUE, 1998; BLUE, 1999; ZHANG, 2011; CHAI, 2019), de veículos automotores (MENG, 2010; LI, 2013; WU, 2015; YANG, 2017) e de bicicletas (GOULD, 2009; ZHAO, 2013).

Também existem uma série de trabalhos que abordam a modelagem com AC sob a ótica de alagamentos, inundações ou enchentes urbanas, campo teórico que fundamenta e justifica essa pesquisa. Na última década se destacam os trabalhos de: Dottori (2011), que compara resultados de inundações em um modelo AC com os resultados da abordagem analítica de modelos hidráulicos tradicionais; Liu (2013), que propõe a integração entre AC e o modelo *RFSM* (*rapid flood spreading model*); Li (2015), sobre a adaptação de um modelo AC para a utilização de dados de enchentes em tempo real; Liu (2015), Douvinet (2015) e Guidolin (2016), ao proporem modelos em AC para simular as inundações de alagamentos de enxurradas (*flash floods*); Kassogué (2017), ao propor o modelo *2CAFODYM* (*Two scale Cellular Automaton for Flow DYnamics Modeling*) para análises das dinâmicas de enchentes; Perez-Molina (2017), que propõe a integração entre AC e o modelo de análise espacial para enchentes *openLISEM*; Wang (2018), ao parametrizar o modelo proposto por Guidolin (2016), *CADDIES* (*Cellular Automata Dual-DraInagE Simulation*), a partir de dados de diferentes fontes; e Jamali (2019), ao propor o modelo *CA-ffé* (*Cellular Automata Fast Flood Evaluation*), com maior capacidade de processamento que os predecessores *RFSM*.

Portanto, é notória a variabilidade de aplicações de autômatos celulares em modelagem, tendo se consolidado como metodologia para a simulação de fenômenos urbanos complexos. Nessa pesquisa, o interesse no autômato celular é pela possibilidade

de precaver a morfologia urbana básica da cidade, formada pela mancha urbana que cresce e avança em direção às planícies de inundação.

### **3. SIMULAÇÕES DE CRESCIMENTO URBANO**

O crescimento e avanço da mancha urbana produzem um movimento de expansão que é a captura de territórios não urbanizados. Do mesmo modo, o autômato celular é capaz de reproduzir esse movimento de avanço – recuo, de mudança de estado em função da célula vizinha, podendo indicar padrões de movimento – crescimento urbano sobre as áreas de inundações naturais nas cidades analisadas.

Assim, com a apresentação geral da pesquisa e sua base teórica, está abordada agora a metodologia utilizada para a realização das simulações de crescimento propostas no trabalho. Os recursos de modelagem e simulação computacional utilizados estão disponíveis através da plataforma de modelagem urbana *CityCell* (SARAIVA E POLIDORI, 2014).

As simulações propostas foram baseadas nas seguintes etapas: a) criação dos *inputs*, ou entrada de dados, que é a representação dos atributos do território no ambiente celular; b) processamento, a partir da calibração do modelo a partir dos parâmetros e das regras de transição; c) obtenção dos resultados, ou *outputs*; e d) análise dos resultados.

Para melhor compreender o funcionamento da plataforma, são apresentadas a seguir suas principais propriedades de funcionamento e operação. Também são expostos o modelo de crescimento urbano e as regras de transição utilizadas para a realização das simulações propostas.

#### **3.1 PLATAFORMA CITYCELL**

*CityCell – urban growth simulator*, é uma plataforma que disponibiliza instrumentos para a execução de modelos de simulação de crescimento urbano, a partir de ferramentas de geoprocessamento, visualização de dados e parametrização das simulações. Permite a exploração de cenários futuros de crescimento urbano, possibilitando especulações sobre eventuais morfologias urbanas. Foi desenvolvida por

Saraiva e Polidori (2014), no Laboratório de Urbanismo – LabUrb, da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – FAUrb, da Universidade Federal de Pelotas – UFPel. A versão *CityCell 4.2 Curupira* (64bits) está disponível para download no endereço <https://wp.ufpel.edu.br/citycell/>.

A plataforma *CityCell* é um desenvolvimento das propostas originais de Polidori (2004) com o Modelo SACI – Simulador do Ambiente da Cidade, na sua Tese de Doutorado em Ecologia no Programa de Pós-Graduação em Ecologia – PPGECO, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. O modelo SACI possibilita estudos da dinâmica espacial urbana e suas relações com a paisagem natural a partir da integração de questões ecológicas e urbanas. Para isso, considera fatores urbanos, naturais e institucionais no processo de modelagem, que podem atuar como atração e/ou resistência à urbanização nas simulações de crescimento urbano.

Estudos com o uso do SACI e do *CityCell* em pesquisas acadêmicas têm sido apresentadas como forma de apoio ao planejamento de cidades como Pelotas (POLIDORI, 2004 e POLIDORI, 2016), Joinville (PEIXE, 2012), Jaguarão e Rio Branco (DETTONI, 2017), Arambaré e Candiota (Oficina de Modelagem Urbana, disponível em: <https://wp.ufpel.edu.br/ofm/>, 2018). Também existem trabalhos sobre o crescimento urbano articulado aos recursos hídricos (PERES, 2010), à formação de periferias (TORALLES, 2013) e à segregação socioespacial (SANTOS, 2015).

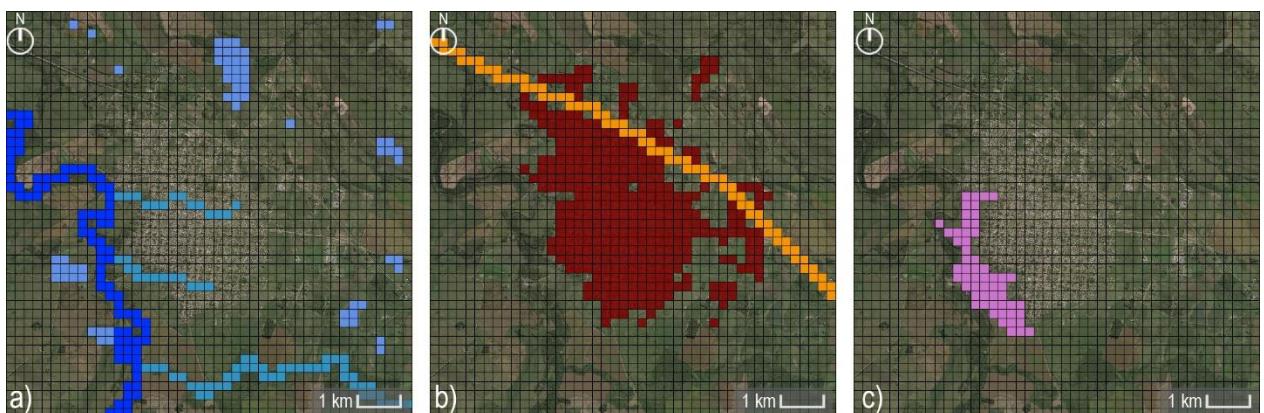
Conforme Saraiva (2013), a arquitetura do *CityCell* é dividida em dois módulos: a plataforma em si, responsável pela entrada, processamento e saída de dados; e os modelos de simulação de crescimento urbano, que atribuem dinamismo ao autômato celular, chamados de regras de transição (as quais estão relacionadas logo adiante).

### **3.1.1 ENTRADA DE DADOS**

A etapa de entrada de dados, ou *inputs*, é onde ocorre a transcrição da área de estudo para o ambiente computacional. A plataforma opera sobre um *grid* bidimensional, com células quadradas, cujo tamanho é definido pelo operador do sistema com base na sua área de estudo. Após a delimitação da área são incluídas as variáveis consideradas

relevantes para o processo, as quais são chamadas de atributos e estarão vinculadas às células do *grid*.

Cada célula pode assumir mais de um atributo, que pode ser do tipo natural, urbano ou institucional. Os atributos naturais descrevem o ambiente não antropizado (matas nativas, cursos d'água, banhados, nascentes, relevo, afloramentos rochosos, solos e outros aspectos naturais) e o ambiente não urbanizado, mas antropizado (plantações, cultivos, matas plantadas, açudes, barragens e outros componentes antrópicos). Os atributos urbanos descrevem o ambiente urbanizado (áreas residenciais, comerciais ou industriais, parques, praças, sistema viário ou outras infraestruturas) e indicadores socioeconômicos (densidade demográfica, custo do solo, renda ou outros indicadores). Por fim, os atributos institucionais que representam mecanismos legais de restrição ou incentivo à urbanização ou densificação urbana (zonas de interesse cultural, zonas de preservação, taxa de ocupação e índice de aproveitamento, impostos variados, entre outros). A Figura 3.1 demonstra um exemplo de atributos naturais, urbanos e institucionais para a cidade de Dom Pedrito/RS.



**Figura 3.1** – Exemplo de entrada de dados para Dom Pedrito em ambiente celular onde cada célula representa 200x200m: em a) atributos naturais (águas lênticas e lóticas em tons de azuis); em b) atributos urbanos (área efetivamente urbanizada em vermelho e rodovia federal em amarelo); e em c) atributo institucional (área de restrição à ocupação urbana, conforme Plano Diretor do Município de Dom Pedrito, em rosa). Baumbach, 2019.

Durante o processamento os atributos podem admitir os estados de *mutable* ou *freezing*. Quando *mutable* a célula poderá ser modificada, alterando seu estado, quando *freezing* o atributo da célula permanecerá em seu estado inicial durante todo o

processamento. Os atributos também podem ser diferenciados através de pesos, parametrizados no modelo antes do processamento.

Os atributos, por fim, geram tensão de atração ou resistência à urbanização. Uma célula tem seu estado alterado quando a diferença de centralidade (gerada pelas tensões) indicar o potencial para realização da mudança, que tem prevalência de características naturais ou urbanas. A predominância de características naturais ou urbanas, então, indica o fenótipo da célula.

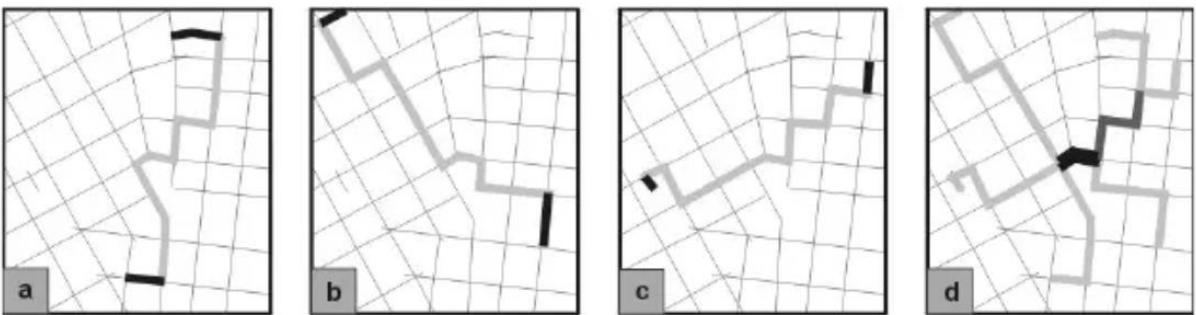
### **3.1.2 MEDIDAS DE CENTRALIDADE ESPACIAL E CENTRALIDADE CELULAR**

A centralidade espacial tem sido estudada a partir do conceito de Freeman (1977) sendo posteriormente desenvolvidas por Krafta (1994), o qual acrescentou a ideia de considerar o uso do solo, denominado pelo autor como estoques construídos. Para Krafta, a centralidade depende de tensões geradas entre esses estoques construídos e do caminho mínimo entre eles, numa relação que dominou de interação espacial.

Para adaptar a ideia de centralidade espacial aos estudos urbanos, Krafta propôs considerar os sistemas urbanos em dois elementos básicos: as formas construídas e os espaços públicos abertos. Todas as edificações existentes no espaço urbano são consideradas formas construídas. Já os espaços abertos são as ruas, praças, parques e todos os espaços que possibilitam o fluxo humano entre as formas construídas. (SABOYA, 2001).

A ideia de centralidade espacial adaptada por Krafta, então, assume que toda forma construída pode ser alcançada a partir de qualquer outra forma construída através do caminho mínimo (*betweenness*) no sistema de espaços públicos abertos. Nesse sistema os espaços com maior centralidade serão aqueles com o maior número de conexão entre as formas construídas. Assim, alguns espaços serão mais centrais que outros.

A Figura 3.2 demonstra o conceito de centralidade espacial conforme Krafta (1994). Em *a*, *b* e *c* estão representadas a distância mínima para se chegar de um ponto a outro. Em *d* estão indicadas as conexões de maior centralidade espacial, definidas pela sobreposição dos caminhos mínimos de *a*, *b* e *c*.



**Figura 3.2** – Exemplo de centralidade espacial conforme Krafta (1994). Em *a*, *b* e *c*: caminhos mínimos para se chegar de um ponto ao outro. Em *d*: sobreposição dos caminhos mínimos indicam as conexões de maior centralidade. Fonte: Saboya (2011).

No modelo de centralidade espacial proposto por Krafta as formas construídas podem ter pesos definidos para atribuir diferenciação (uma casa pode ser diferenciada de um prédio de apartamentos ou de galpões industriais, por exemplo). Desse modo haverá uma tensão gerada pela diferenciação entre os pares. Esta tensão é gerada conforme equação 1. A tensão é distribuída nos espaços localizados no caminho mínimo entre os pares, conforme equação 2. Já a centralidade é o resultado do acúmulo das tensões de um espaço que se localiza no caminho mínimo de todas as interações que ocorrem no sistema, conforme equação 3, mostrada à frente.

$$T_{ij} = (a_i \times a_j) \quad (1)$$

$$c_{ij} = T_{ij} / n_{ij} \quad (2)$$

Onde:

$T_{ij}$ : tensão gerada entre os carregamentos urbanos dos espaços  $i$  e  $j$ .

$a_i, a_j$ : carregamentos urbanos das células  $i$  e  $j$ .

$n$ : quantidade de espaços localizados no caminho mínimo entre  $i$  e  $j$ ;

$c_{ij}$ : medida de centralidade entre um par de células  $i$  e  $j$ .

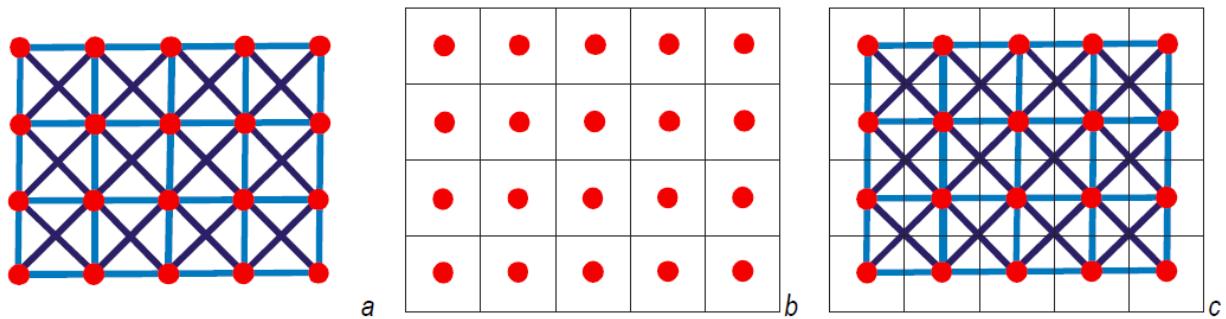
**Equações 1 e 2** – Equação 1: representa a tensão gerada entre os carregamentos de um par de células; Equação 2: representa a medida de centralidade gerada entre um par de células. Fonte: Krafta (2001).

A capacidade de integrar características urbanas (forma construída), espaços abertos e aspectos sociais urbanos (demandas, fluxos, atividades) diferencia a medida de centralidade de Krafta da sintaxe espacial de Hillier e Hanson (1984). Na sintaxe espacial o estudo urbano é baseado em medidas primárias da morfologia, definidas pelos eixos viários do sistema urbano, sem consideração dos estoques construídos e das atividades adjacentes ao sistema (KRAFTA, 1994).

A medida de centralidade espacial de Krafta é utilizada no estudo do crescimento urbano pois, ao considerar a distribuição desigual da matéria urbana sobre o espaço, conduz o sistema ao desequilíbrio espacial. Esse desequilíbrio por diferença de centralidade estimula a ocorrência de mudança, o que Krafta chama de medida potencial de crescimento, ou potencial-centralidade (KRAFTA 1999).

Essa hipótese é fundamentada na ideia de crescimento desigual de Harvey (1985), onde a cidade é entendida como um fenômeno em constante desequilíbrio espacial e em permanente potencial à ocorrência de mudança, estando em constante produção do espaço. O potencial de transformação do espaço urbano nesta hipótese ocorre nos locais com a maior diferença de centralidade.

A medida de centralidade espacial de Krafta, que opera através de grafos, foi adaptada para uso com autômatos celulares por Polidori (2004). Na Figura 3.3: em a, o sistema urbano é representado na forma vetorial por pontos e linhas (grafos); em b, sugere-se que cada ponto vetorial represente uma célula do *grid* no ambiente celular (célula do autômato); em c, propõe-se a integração entre grafos e autômatos a partir da associação entre o ponto vetorial e a célula do *grid*.

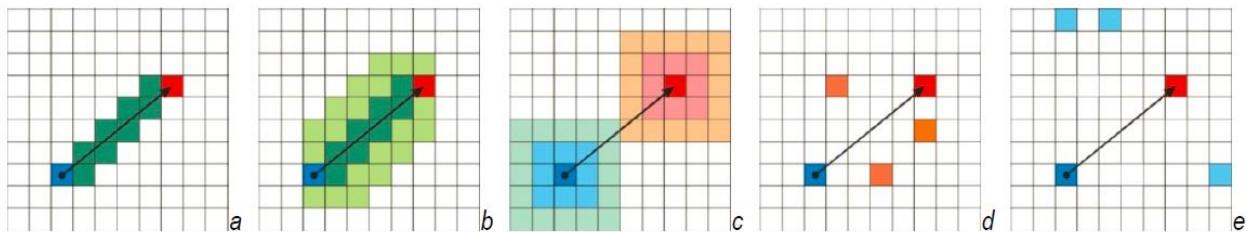


**Figura 3.3 – Grafos integrados à autômatos celulares:** em a) representação vetorial de pontos interligados em um grafo; em b) autômato celular onde cada célula pode ser atribuído um ponto; em c) integração entre grafo e autômato celular. Fonte: Polidori (2004).

A integração entre autômatos celulares e grafos permite estabelecer relações de vizinhança imediata (ambiente celular) e relações de vizinhança remota (através dos grafos). Polidori (2004) então propôs que as tensões geradas pela diferenciação entre os pares, que em Krafta percorrem o caminho mínimo, sejam distribuídas a partir de cinco

relações diferentes, possibilitando novos dinamismos na distribuição das forças sobre o sistema.

As tensões propostas por Polidori (2004) são descritas em: a) axiais, que representam as distâncias entre as células; b) axial de *buffer*, que inclui células adjacentes ao caminho mínimo entre dois pontos; c) polar, que ocorre de maneira concêntrica em torno de um núcleo; d) difusa do tipo 1, capaz de capturar a lógica imobiliária formal em local de alto custo do solo e privilégio ambiental; e) difusa do tipo 2, capaz de compreender a lógica imobiliária informal em áreas de baixo custo do solo e com fragilidade ambiental (Figura 3.4).



**Figura 3.4** – Representação da distribuição de forças de tensões em autômatos celulares: a) células inclusas na distribuição axial (verde); b) células inclusas na distribuição axial de buffer (verde claro); c) células inclusas na distribuição de tensões do tipo polar (azul e rosa); d) células inclusas na distribuição de tensões do tipo difusa 1 (laranja); e) células inclusas na distribuição de tensões do tipo difusa 2 (azul).

Fonte: Polidori (2004), adaptado por Peres (2010).

Com isso, Polidori admitiu a medida de centralidade celular como a soma de todas as tensões recebidas por uma célula do sistema, de modo que a célula mais central é aquela que acumula o maior número de tensões. A equação 3 demonstra a medida de centralidade celular:

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

Onde:

*CentCel<sub>iN</sub>*: centralidade celular da célula *i* na interação *N*

*x, y, z, w, q*: quantidades relativas dos modos de distribuição de tensões, sendo  $\sum = 1$   
*A, B, P, D1, D2*: distribuição axial, axial de buffer, polar, difuso 1 e difuso 2, respectivamente

**Equação 3** – Equação de centralidade celular. Fonte: Polidori (2004).

A partir da medida de centralidade celular, Polidori propôs um conjunto de regras de transição que delimitam a transformação de cada célula em função do estado de sua vizinhança.

- 1) *Threshold Potencial*, ou potencial de crescimento limiar. É a regra base do modelo. Assume a medida da centralidade como indicador de qualidade locacional, onde o potencial de desenvolvimento urbano de cada célula é definido pela diferença entre sua própria centralidade e a centralidade máxima de sua vizinhança. O limiar significa que existe um limite de crescimento pré-estabelecido que uma célula pode atingir antes de sua conversão. Quando o limiar de crescimento é atingido, significa que podem haver problemas ambientais intraurbanos na célula.
- 2) *Free Potencial*. Esta regra tem as características da *Threshold Potencial*, com a diferença de desconsiderar o limiar de crescimento, perdendo, contudo, a possibilidade de indicar problemas ambientais intraurbanos.
- 3) *Threshold Reload*. Assume como potencial de crescimento as diferenças entre o carregamento urbano de cada célula e o maior carregamento urbano de sua vizinhança, sem considerar o componente grafo, representado pela medida de centralidade de Krafta. Nesta regra existe um limiar de crescimento e suas relações de resistências ambientais.
- 4) *Free Reload*. Tem as propriedades da *Threshold Reload*, com a diferença de desconsiderar o limiar de crescimento.
- 5) *Environmental Percolation*. Simula o crescimento de atributos naturais através da percolação entre atributos de células adjacentes.

Também existem regras adicionais às regras apresentadas por Polidori. A regra *WaterLand Factor*, proposta por Peres (2010) como fator complementar à regra *Threshold Potencial*, sugere que o crescimento da cidade, quando em contato com corpos hídricos, passa por um movimento de alternância, fragmentação e compactação da forma urbana. Já a regra *Periurban Growth*, sugerida por Toralles (2013), investiga a formação de periferias formais e informais.

A regra utilizada no processamento dos modelos propostos neste trabalho é a *Threshold Potencial*, detalhada a seguir, detalhada a seguir.

### 3.1.3 REGRA *THRESHOLD POTENCIAL*

Como descrito anteriormente, a regra *Threshold Potencial*, ou potencial de crescimento limiar é a regra base do modelo. Esta regra se dedica à produção e ao crescimento de células com atributo urbano no modelo. Conforme Polidori (2004), esta regra entende que os atributos naturais, urbanos e institucionais descritos no modelo funcionam como carregamentos ou como resistências ao crescimento urbano. A distribuição dos atributos no espaço e sua configuração espacial geram tensões que diferenciam o espaço através da medida de centralidade (a partir de grafo) que produzem crescimento nas células com maior potencial de crescimento (a partir do ambiente celular).

Em um *grid*, composto por uma matriz de células, cada célula está associada a um valor diferente de centralidade celular. O maior potencial de crescimento celular estará na maior diferença de centralidade entre uma célula e sua vizinhança. Portanto, o potencial de crescimento celular é a diferença entre a centralidade máxima da vizinhança e a centralidade própria de cada célula. Desse modo, as células com maior potencial de crescimento serão as células com menor centralidade própria combinada com a maior centralidade da vizinhança. O potencial crescimento celular é representado conforme a equação 4.

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

Onde:

*PoteCel<sub>i</sub>*: potencial celular de crescimento celular da célula *i*

*CentCel<sub>Max\Delta buffer<sub>i</sub></sub>*: centralidade celular máxima do buffer da célula *i*

*CentCel<sub>i</sub>*: centralidade celular da célula *i*

$\lambda$  (*lambda*): coeficiente relacionado à taxa de crescimento

**Equação 4** – Equação de potencial crescimento celular. Fonte: Polidori (2004).

A regra *Threshold Potencia*<sup>5</sup> opera com um potencial de crescimento limiar, ou seja, existe um limite de crescimento pré-estabelecido que, quando superado, indica a

<sup>5</sup> O fluxograma detalhado do modelo de crescimento urbano a partir da regra *Threshold Potencial* pode ser consultado em Polidori (2004, p. 75-77).

possibilidade de ocorrência de problemas ambientais intraurbanos. Os efeitos que o potencial de crescimento opera sobre uma célula são: a) diminuição de resistências; b) aumento do carregamento urbano; c) diminuição do carregamento urbano. A diminuição de resistências significa a antropização de atributos naturais ou a superação de restrições institucionais nos atributos urbanos. O aumento do carregamento urbano significa intensidade crescente de urbanização, através de melhoria públicas ou privadas. Entretanto, se a intensidade de urbanização ultrapassar o valor limiar, o potencial de crescimento da próxima iteração do sistema será usado para rebaixar o valor urbano, simulando investimentos para a mitigação de problemas ambientais (POLIDORI, 2004).

O valor do potencial crescimento celular é elevado ao expoente  $\lambda$  (lambda), permitindo sua parametrização de modo a comprimir ou descomprimir seu valor. Assim, é viável simular cenários econômicos diferenciados. Através do parâmetro  $\lambda$  também é possível ajustar a taxa de crescimento simulada para que corresponda à taxa de crescimento real do local de estudo. Deste modo, pode-se considerar que cada iteração de um processamento seja equivalente ao intervalo de 1 ano. É um parâmetro que ajusta quantitativamente a regra de crescimento urbano.

A dinâmica de expansão urbana compreendida pela regra *Threshold Potencial*, portanto, considera que o crescimento urbano acontece prioritariamente nos locais com maiores possibilidades de geração de renda, através da conveniência locacional, ou seja, o crescimento tende a ocorrer em locais de baixa centralidade – consequentemente com menor custo – adjacente à uma vizinhança de alta centralidade e com maior conveniência, que representam facilidades urbanas (POLIDORI, 2004). Assim, altos valores de centralidade celular equivalem às áreas de melhor localização, maior movimentação e maior valor urbano, enquanto baixos valores de centralidade denotam o oposto (TORALLES, 2013).

### **3.1.4 SAÍDA DE DADOS**

Os resultados obtidos como *outputs* no *CityCell* são de dois tipos: a) dados tabulares, no formato de tabelas, que apresentam dados estatísticos e medidas que descrevem os resultados; b) dados gráficos, no formato de *grids*, que informam os

resultados geograficamente localizados na matriz celular, permitindo análises qualitativas e quantitativas. Os dados gráficos auxiliam, portanto, na visualização espacial das dinâmicas urbanas que atuam sobre o modelo.

Os dados gráficos de saída do *CityCell* estão relacionados abaixo, conforme descrito em Polidori (2004):

- *Cell Type*, ou células urbanas. Essa variável demonstra as células com predomínio de fatores urbanos sobre os fatores naturais, representando, então, se a célula é ou não é urbana.

- *Urban Load*, ou carregamento urbano. Indica os valores de carregamento urbano das células do sistema. É uma variável que permite quantificar os fatores que atraem urbanização;

- *Cellular Potencial*, ou potencial crescimento celular. Representa o potencial de transformação celular a partir da diferença entre a centralidade celular de cada célula e a centralidade máxima das células vizinhas;

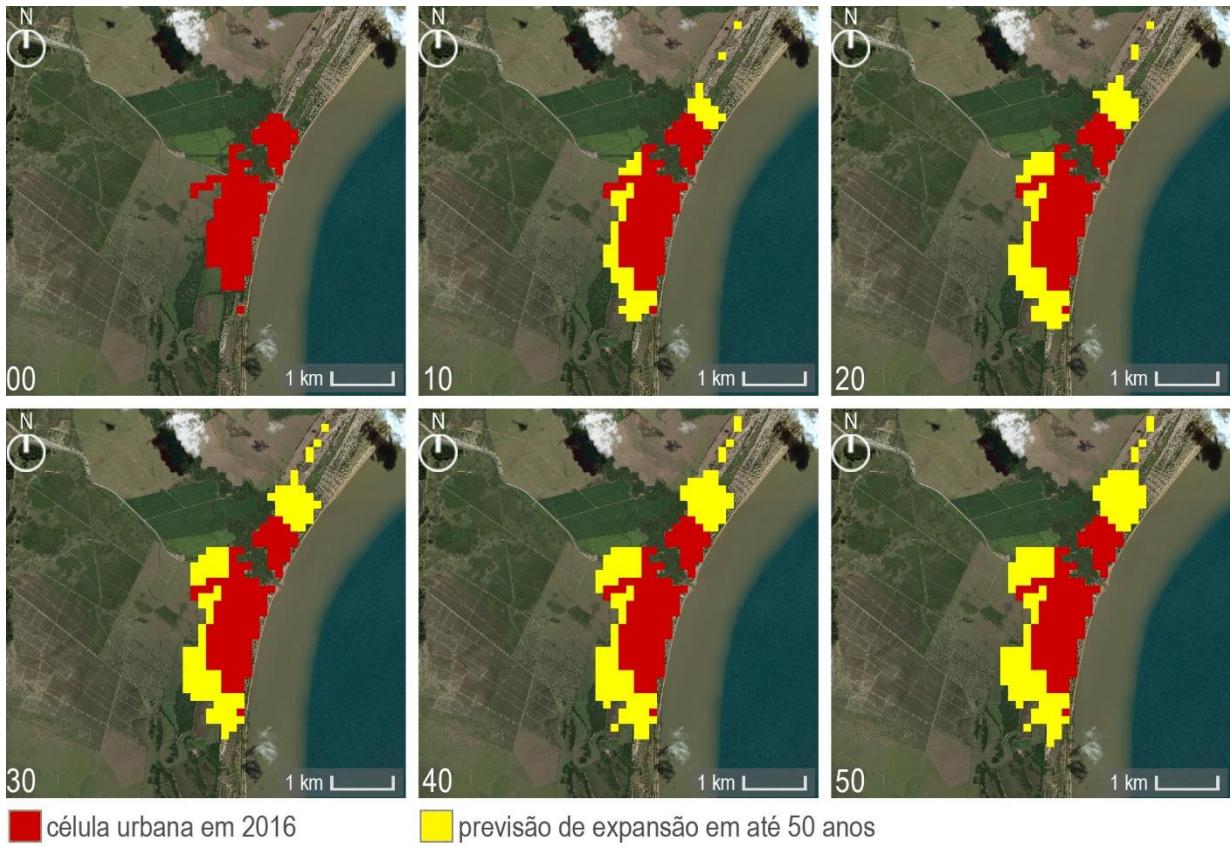
- *Absolute Cellular Centrality*, ou centralidade celular absoluta. Representa o somatório das tensões que ocorrem sobre a célula;

- *Environmental Problems - Accumulated*, ou problemas ambientais acumulados. Representa os problemas ambientais intraurbanos resultantes da superação do limiar de crescimento pelas células de maior potencial de crescimento;

- *Environmental Resistance*, ou resistência ambiental. Indica a intensidade de resistência dos fatores naturais frente à urbanização, e que precisam ser superados para que ocorra o crescimento urbano.

Como pontuado, cada dado de saída indica uma característica sobre determinado fator referente a aspectos da urbanização. No caso de estudo, o dado de interesse para análise será o *output Cell Type*, pois sendo uma variável do tipo qualitativa, que indica ou não o predomínio urbano ou natural sobre uma célula, permite observar o processo de evolução urbana e suas tendências de crescimento, além de estabelecer os limites entre as zonas rurais e as zonas urbanas. Permite, então, a visualização simples de possibilidades de crescimento urbano sendo assim o dado de saída a ser analisado

para os estudos propostos na pesquisa. A figura 3.5 ilustra a variável *Cell Type* em uma simulação de crescimento urbano para um período de 50 anos para a cidade de Arambaré.



**Figura 3.5 – Output Cell Type para Arambaré, iterações 00, 10, 20, 30, 40 e 50. Baumbach (2019).**

Desse modo, o *City Cell*, reproduzindo respostas parecidas aos processos de evolução dos sistemas na realidade, permite a análise temporal sobre os movimentos de crescimento urbano horizontal e a morfologia urbana.

## EPÍLOGO DOS CAPÍTULOS 1, 2 E 3

Nos capítulos iniciais desse trabalho foram introduzidos o tema, os objetivos e as justificativas da pesquisa. Na revisão teórica foi apontada a importância da relação da humanidade com a água, desde o fundamento das aglomerações urbanas até o cenário

de preocupação ambiental atual. Nesse caminho, pelo fato da degradação ambiental dos sistemas hídricos e dos riscos de desastres naturais como as enchentes e inundações, as quais afetam povos em todo mundo, há também um movimento de transformação da própria relação social com as águas, que traz a ambiguidade da água representar morte e degeneração além de vida e prosperidade. Também há aspectos do uso e controle da água, desde a antiguidade, com os primeiros sistemas de captação, transporte, armazenamento, distribuição e eliminação das águas residuais até os atuais sistemas de gestão que incluem legislações e normas específicas em diferentes esferas políticas, da local a global.

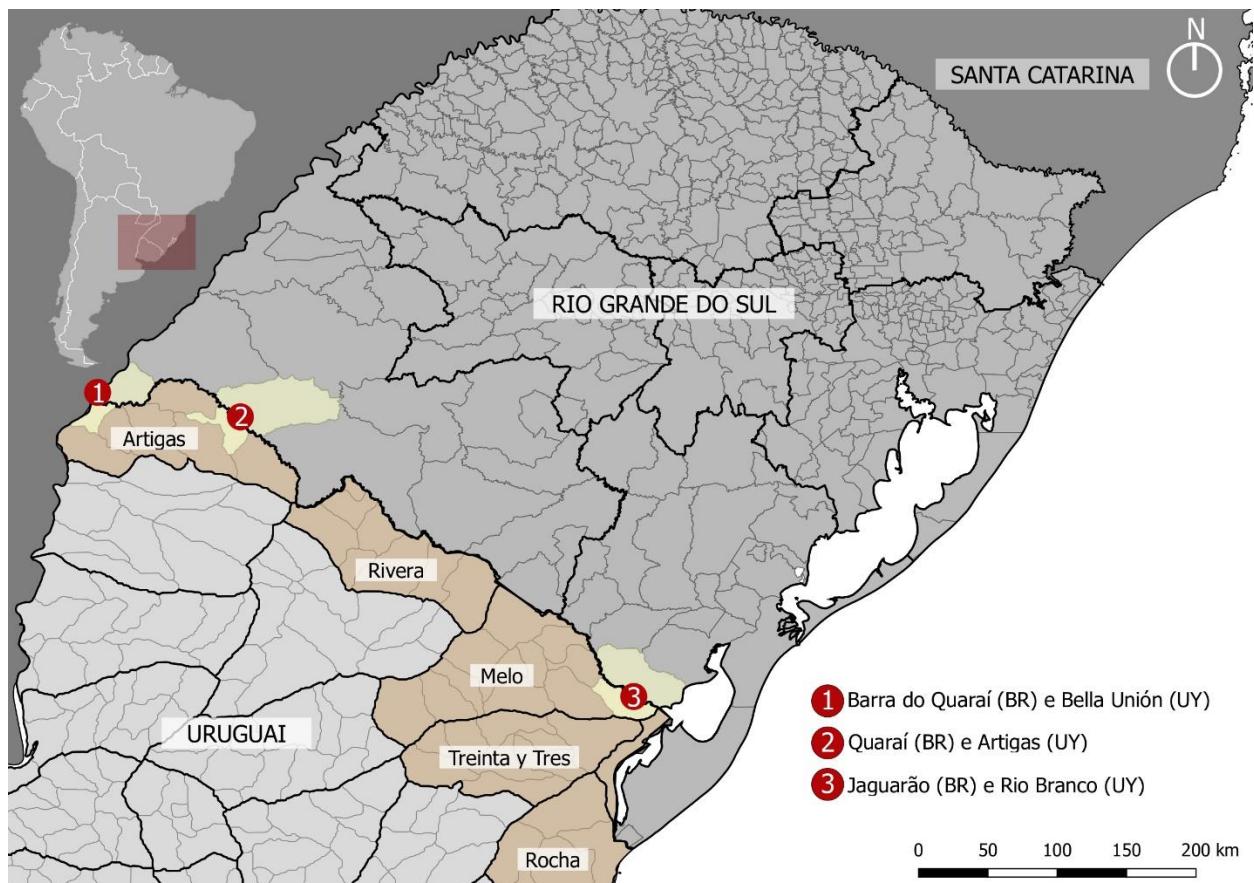
Além disso, houve uma dedicação acerca dos estudos de morfologia urbana, objeto de interesse para as discussões sobre a forma urbana futura. Nesse aspecto, foram diferenciadas as abordagens morfológicas investigadas atualmente, que apresentam distinção em relação ao aspecto temporal: a abordagem tradicional aborda a evolução urbana do passado para o presente e a análise espacial busca percorrer cenários futuros de expansão urbana. Sobre isso, o trabalho explorou ambas as abordagens, indicando aspectos do crescimento urbano do passado para o presente através da relação morfológica entre crescimento urbano e os cursos hídricos das cidades de estudo em um tempo passado, em uma abordagem morfológica tradicional, e propondo realizar as simulações de crescimento do presente para o futuro, através de uma abordagem da análise espacial.

Por isso, os últimos aspectos revisados no capítulo anterior foram sobre as teorias dos sistemas, complexidade e modelagem urbanas, base para compreensão dos autômatos celulares – interesse da plataforma de simulação de crescimento urbano *CityCell* utilizada para a criação dos cenários do presente para o futuro.

Com essas considerações, o próximo capítulo traz estudos de caso que propõem a realização de simulações de crescimento urbano para as cidades objetos de estudo (considerando ou não suas áreas de inundações naturais), assim como as análises e discussões dos resultados obtidos nos processamentos.

#### 4. ESTUDOS DE CASO

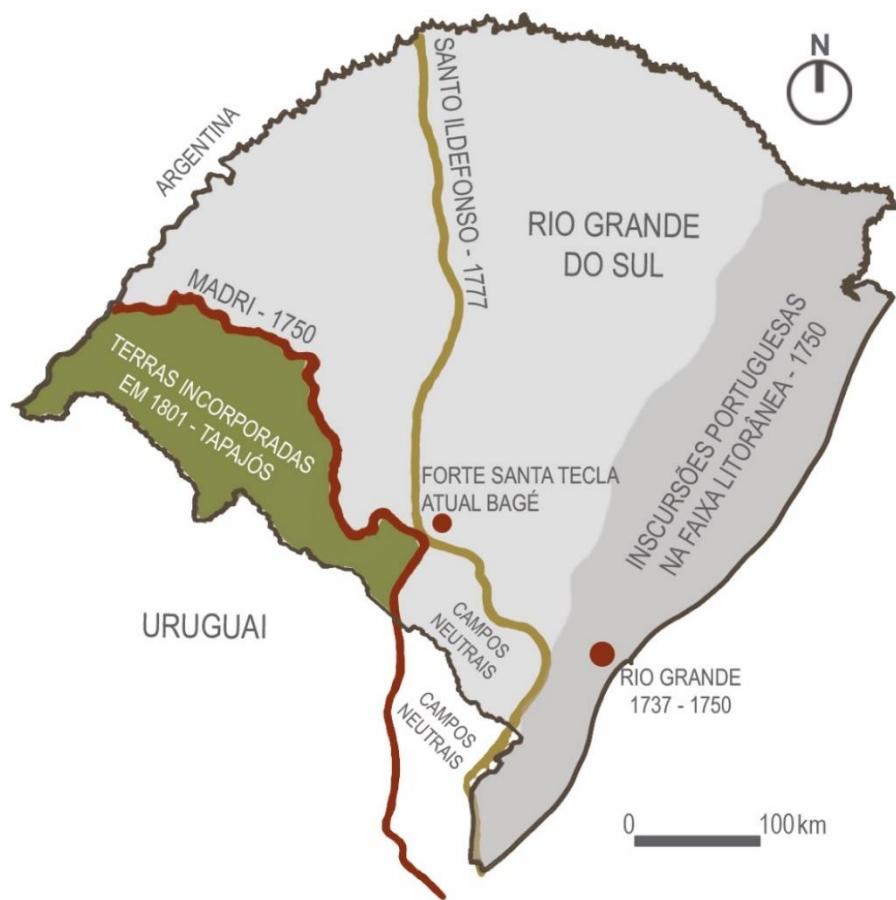
As cidades escolhidas para a realização das simulações urbanas, como já citado, são as cidades de fronteira entre Brasil e Uruguai que possuem parte de seu território, inclusive área urbanizada, sobre planícies de inundação. São três cidades brasileiras e três cidades uruguaias: Jaguarão (BR) – Rio Branco (UY), Quaraí (BR) – Artigas (UY) e Barra do Quaraí (BR) – Bella Unión (UY), as quais estão indicadas na Figura 4.1.



**Figura 4.1** – Mapa com a localização dos municípios gaúchos e departamentos uruguaios na fronteira, com indicação dos municípios estudados. Baumbach (2020).

As cidades de fronteira entre o Brasil e Uruguai começaram a ser estabelecidas em meados do século XIX, na tentativa das coroas espanhola e portuguesa de consolidar o domínio e o poder sobre esse território. Os primeiros agrupamentos urbanos, por esse motivo, tiveram sua origem através de assentamentos militares. Struminski, 2015, afirma que no meio de acampamentos e fortificações militares foram surgindo moradias, galpões e igrejas que indicavam um processo de urbanização com característica familiar.

De todo modo, foram muitos anos até o estabelecimento da atual fronteira entre o Brasil e Uruguai. No meio de guerras e revoluções, houve o pacto de diversos tratados, como por exemplo os tratados de Madri (1750) e Santo Ildefonso (1777). Mas é somente em 1801, com o Tratado de Tapajós, quando houve um forte estímulo à ocupação desse território através da doação de terras para portugueses se estabelecerem na região, que a fronteira entre os dois países toma a forma atual (Figura 4.2).



**Figura 4.2** – Mapa com a sobreposição dos tratados que definiram as fronteiras do Rio Grande do Sul.  
Elaborado por Baumbach (2020) com base na descrição de Magnoli et al (2001).

Toda essa luta pelo domínio da área pelos portugueses e espanhóis fez com que essa região ficasse conhecida como “fronteira do vai-e-vem”, devido aos diferentes tratados que definiam o território como ora espanhol, ora português (LOPES, 1972). Roger Bastide (1959), ao descrever essa região, afirma: “a que separa as possessões

espanholas das possessões portuguesas, deslocava-se ao sabor dos golpes de surpresa e das batalhas; era a fronteira feita de corpos humanos, e não de montanhas ou de rios".

Apesar disso, como pontua Resende (2019), guerras e lutas não impediram a conciliação dos povos através de laços comerciais entre as cidades dos dois países ainda nessa formação histórica. Houve necessidade de sobrevivência mútua que possibilitou um contato além de pactos e acordos diplomáticos. Assim, hoje a fronteira entre Brasil e Uruguai tem um caráter integrador, de alianças, convênios e convivência harmônica que foi construído desde a formação dos limites dos dois países (RESENDE, 2019).

Com relação à morfologia urbana, há uma diferença na forma de ocupação territorial das cidades espanholas e das portuguesas (na região de estudo). A ocupação espanhola produziu uma malha xadrez, obedecendo às diretrizes da Lei das Índias<sup>6</sup>, com medidas exatas, precisas, ortogonais e retilíneas. Esse tipo de implantação permitia exercer com maior facilidade a defesa e o controle do território. Já a ocupação portuguesa, ainda que em malha xadrez, não apresenta a mesma exatidão de medidas e ortogonalidade que a ocupação espanhola. Isso porque a implantação da malha urbana pelos portugueses considerava aspectos geográficos para a instalação das infraestruturas, como as deformações e declividades do terreno ou outros aspectos naturais (BRAGA, 2013).

Além de dividirem o mesmo processo de formação histórica, há também a questão do compartilhamento do mesmo bioma. O Pampa, que abrange o sul do Rio Grande do Sul, o Uruguai em sua totalidade e o norte da Argentina, é caracterizado pelo relevo suave, com vegetação rasteira e alguns cerros. Por ser relativamente plano, esse bioma também apresenta grandes planícies de inundação.

Por esse motivo, o trabalho se debruça sobre as cidades da fronteira do Uruguai e do Brasil que têm seus limites internacionais definidos por rios e que com a expansão urbana avançaram sobre as áreas de inundações, enfrentando, por isso, enchentes e inundações periodicamente.

---

<sup>6</sup> A Lei das Índias foi instituída em 1573 pelo Rei Filipe II de Espanha. É considerada a primeira legislação urbanística da idade moderna. Consagrou a implantação urbana ortogonal, ainda que na prática esse tipo de implantação já fosse usado (DANTAS, 2004).



Imagen disponível em: <<http://www.agenciapreview.com/ponte-internacional-barao-de-maua/>>

#### **4.1 JAGUARÃO (BR) – RIO BRANCO (UY)**

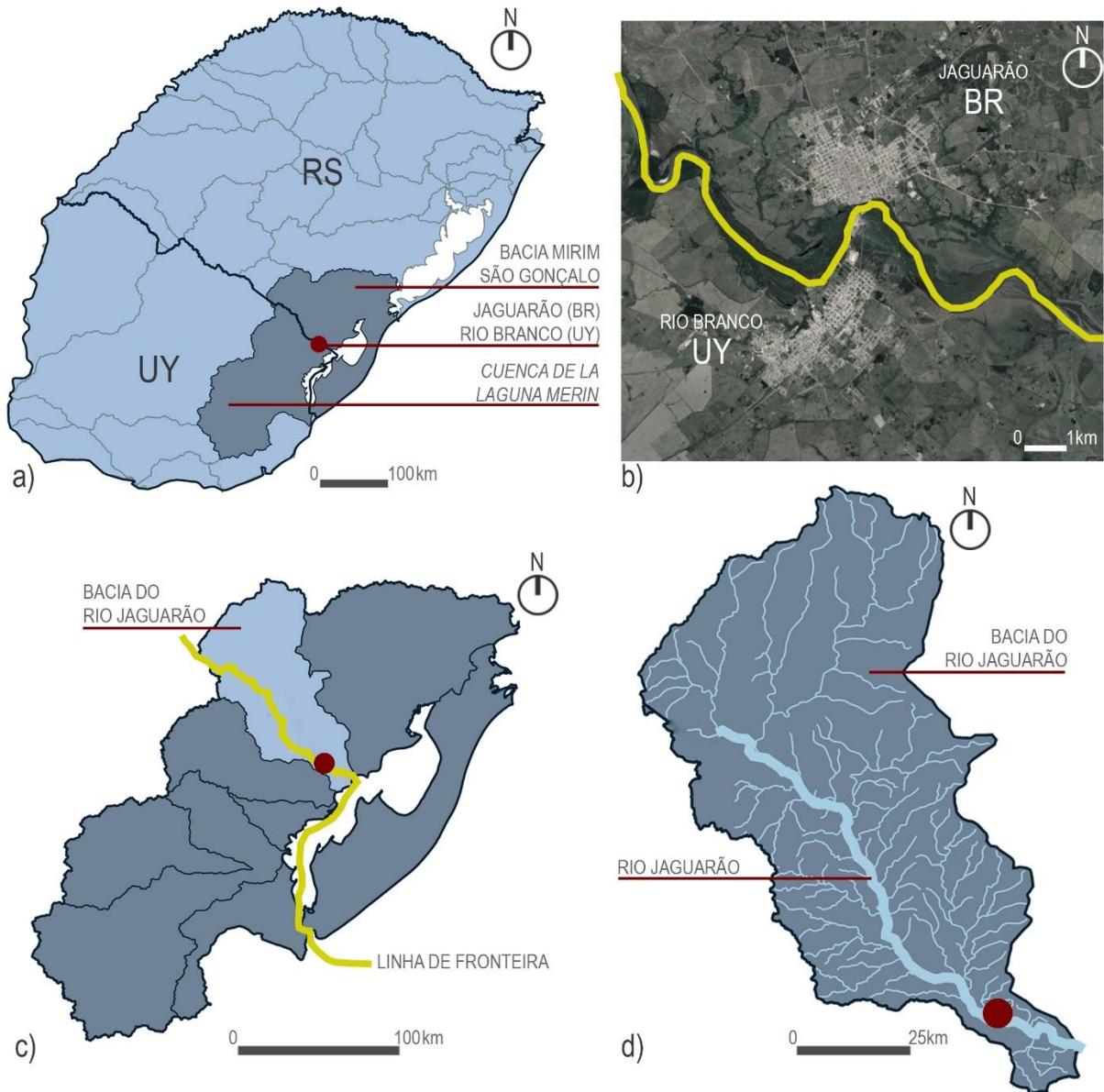
Jaguarão (população de 28.230 habitantes, conforme IBGE, 2016) e Rio Branco (população de 14.604 habitantes, conforme CENSUS, 2011) estão localizadas próximas à foz do Rio Jaguarão com a Lagoa Mirim, na Bacia Hidrográfica do Rio Jaguarão.

Jaguarão foi a primeira cidade da fronteira entre o Brasil e Uruguai a iniciar o processo de povoamento (1752), sendo elevada à cidade em 1855 (MARTINS, 2001). É a única das cidades estudadas que tem seu nascimento espontâneo, sem intervenção do estado. Ainda assim, por estar em uma posição estratégica na região de fronteira, logo foi militarizada, o que refletiu também no seu desenho urbano, planejado por engenheiros militares.

Rio Branco foi fundada com a intenção da coroa espanhola de ocupar o território de fronteira e impedir o avanço português, já materializado do outro lado do Rio Jaguarão, pela cidade de Jaguarão. Assim, entre 1792 e 1793 há a fundação dos primeiros postos de guarda, que mais tarde evoluíram à condição de cidade (MARTINS, 2001).

As cidades de Jaguarão e Rio Branco apresentam alto grau de vulnerabilidade a inundações, conforme o Atlas de Vulnerabilidade a Inundações do Rio Grande do Sul (2012). O Rio Jaguarão nasce na localidade de Coxilha das Flores, região rural do município de Bagé e percorre 135km até sua desembocadura na Lagoa Mirim.

A Figura 4.3 contextualiza a Bacia do Rio Jaguarão e a área de estudo.

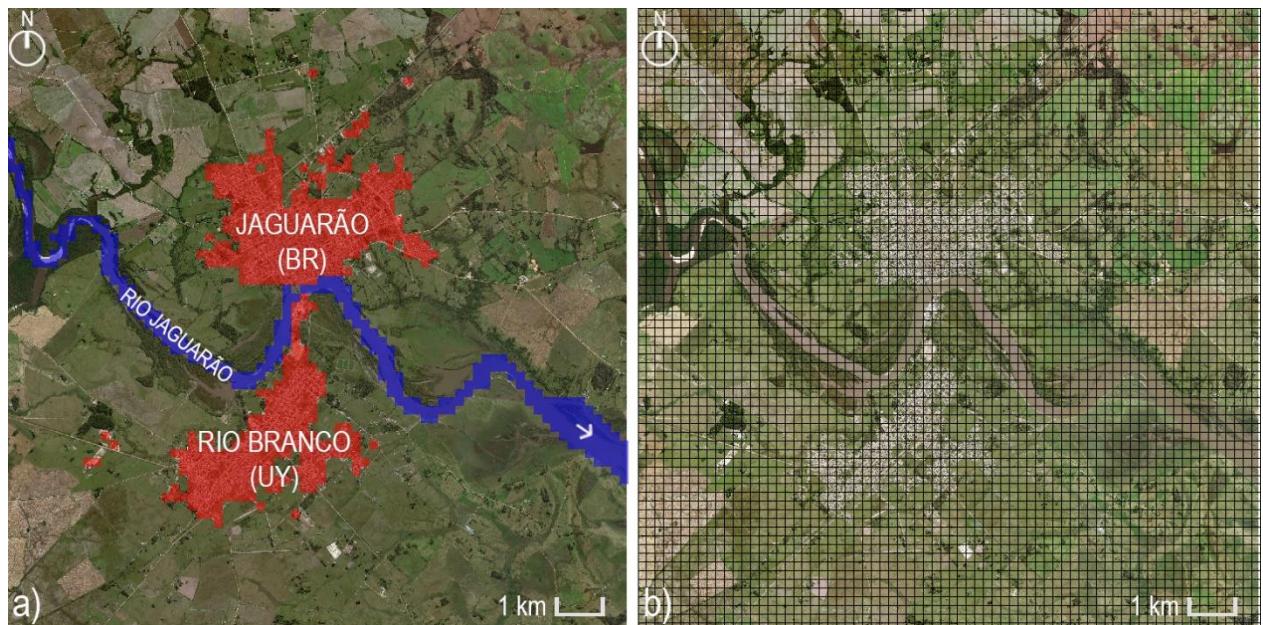


**Figura 4.3 – Área de estudo:** em a) localização de Jaguarão e Rio Branco e o contexto das bacias hidrográficas no Brasil e no Uruguai; em b) imagem de satélite com o contexto urbano e a demarcação da linha de fronteira; em c) ampliação da Bacia Mirim – São Gonçalo e da Cuenca de la Laguna Merín, com indicação da Bacia Hidrográfica do Rio Jaguarão; em d) Bacia do Rio Jaguarão. Baumbach (2020).

#### 4.1.1 RECORTE ESPACIAL

O recorte espacial para Jaguarão e Rio Branco abrange a área efetivamente urbanizada e seu entorno rural imediato, de modo a possibilitar a realização das simulações de crescimento urbano do presente para o futuro (Figura 4.4 a).

Na plataforma *CityCell* a área de interesse foi seccionada em células quadradas de 200m (Figura 4.4 b). Obteve-se um grid com malha de 72x72 células que representam uma área de 20.736ha. O tamanho da célula foi definido com base na área de estudo e no tipo de análise proposta. Para uma investigação geral da forma urbana, o tamanho de 200m para cada célula é suficiente para demonstrar os aspectos morfológicos que se busca. Se o objetivo do estudo for um detalhamento pormenorizado, poderiam ser utilizados outros níveis de desagregação, com células de 100m ou 50m, por exemplo.

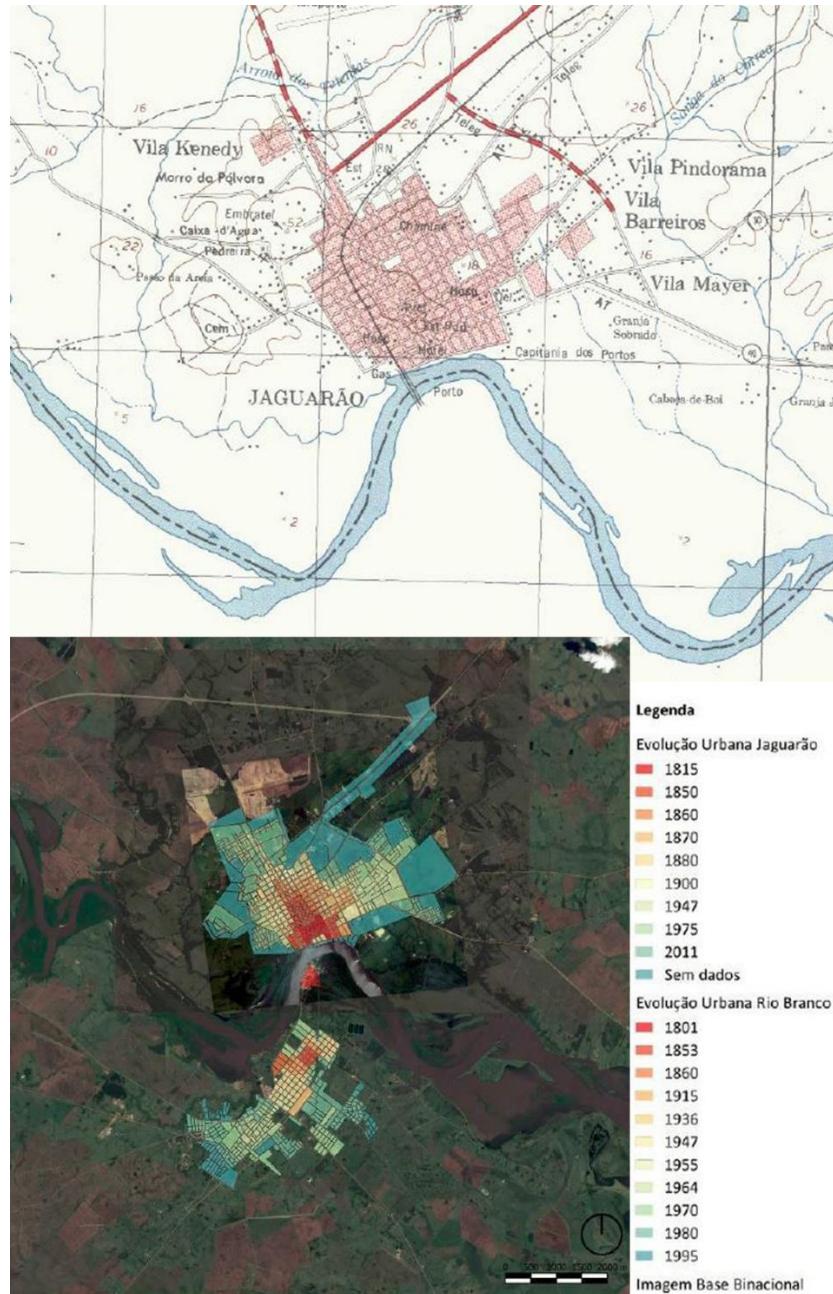


**Figura 4.4** – Recorte espacial para Jaguarão e Rio Branco: em a) contextualização da área; em b) recorte espacial com a matriz celular definida. Baumbach (2020).

#### 4.1.2 DADOS DE ENTRADA

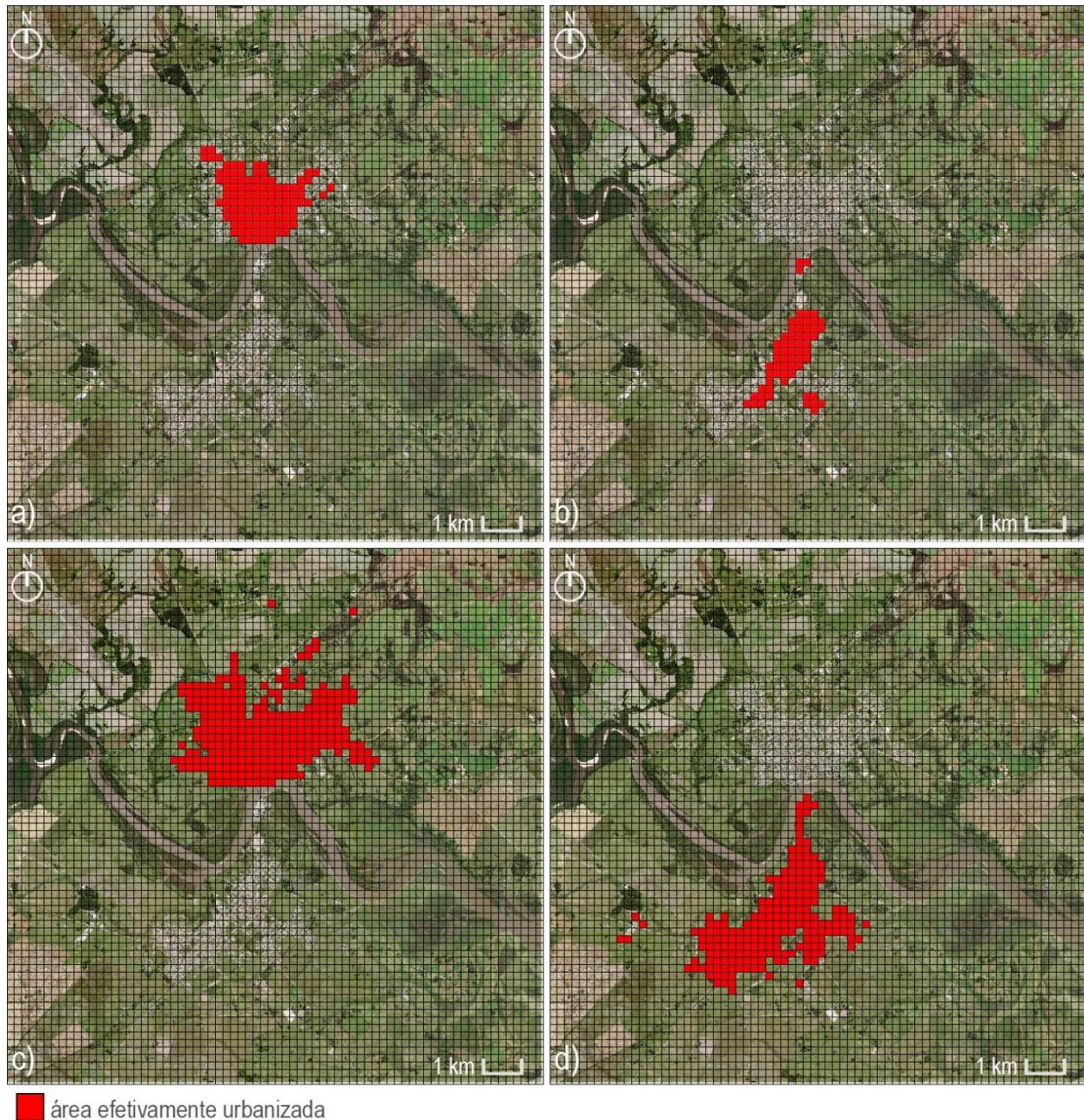
Para a criação dos *inputs* foi utilizada imagem do satélite *Landsat8*, do ano de 2016 (bandas, 6,5,4), com resolução espacial de 30 metros. Dessa imagem foram extraídas as informações de: a) área efetivamente urbanizada; b) rodovias e estradas; c) ferrovias; d) campos e plantações; e) mata nativa ou plantada; f) sistemas de águas superficiais naturais ou antrópicas.

A criação dos *inputs*, a fim de realizar a legitimação do modelo simulando o crescimento do passado para o presente, foi feita a partir da carta topográfica matricial do Exército Brasileiro, no caso de Jaguarão, datada de 1976. Para Rio Branco, a mancha urbana desse período foi extraída a partir do mapa de expansão urbana de Jaguarão, produzido por Detoni (2017), conforme Figura 4.5.

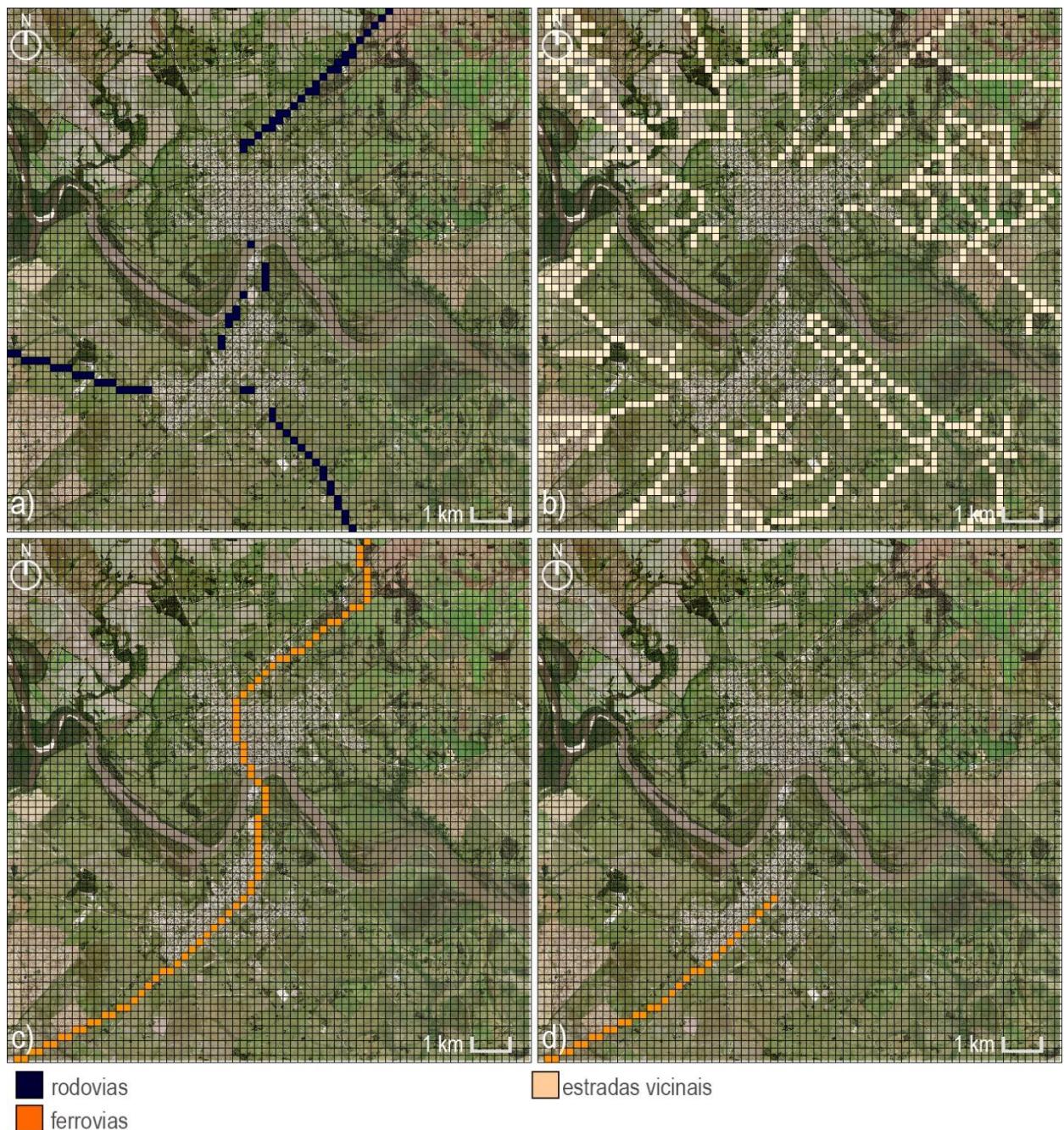


**Figura 4.5** – Trabalhos cartográficos que serviram como referência para criação dos *inputs* de entrada para as cidades de Jaguarão e Rio Branco. Acima: fragmento do levantamento topográfico matricial do Exército Brasileiro (disponível no banco de dados *online* do Exército). Abaixo: Expansão urbana de Jaguarão e Rio Branco desenvolvido por DETONI, et al. (2017). Organizado por Baumbach (2020).

Os atributos urbanos utilizados nas simulações, e que descrevem a área efetivamente urbanizada para Jaguarão e Rio Branco, estão representados nas Figuras 4.6 e 4.7:



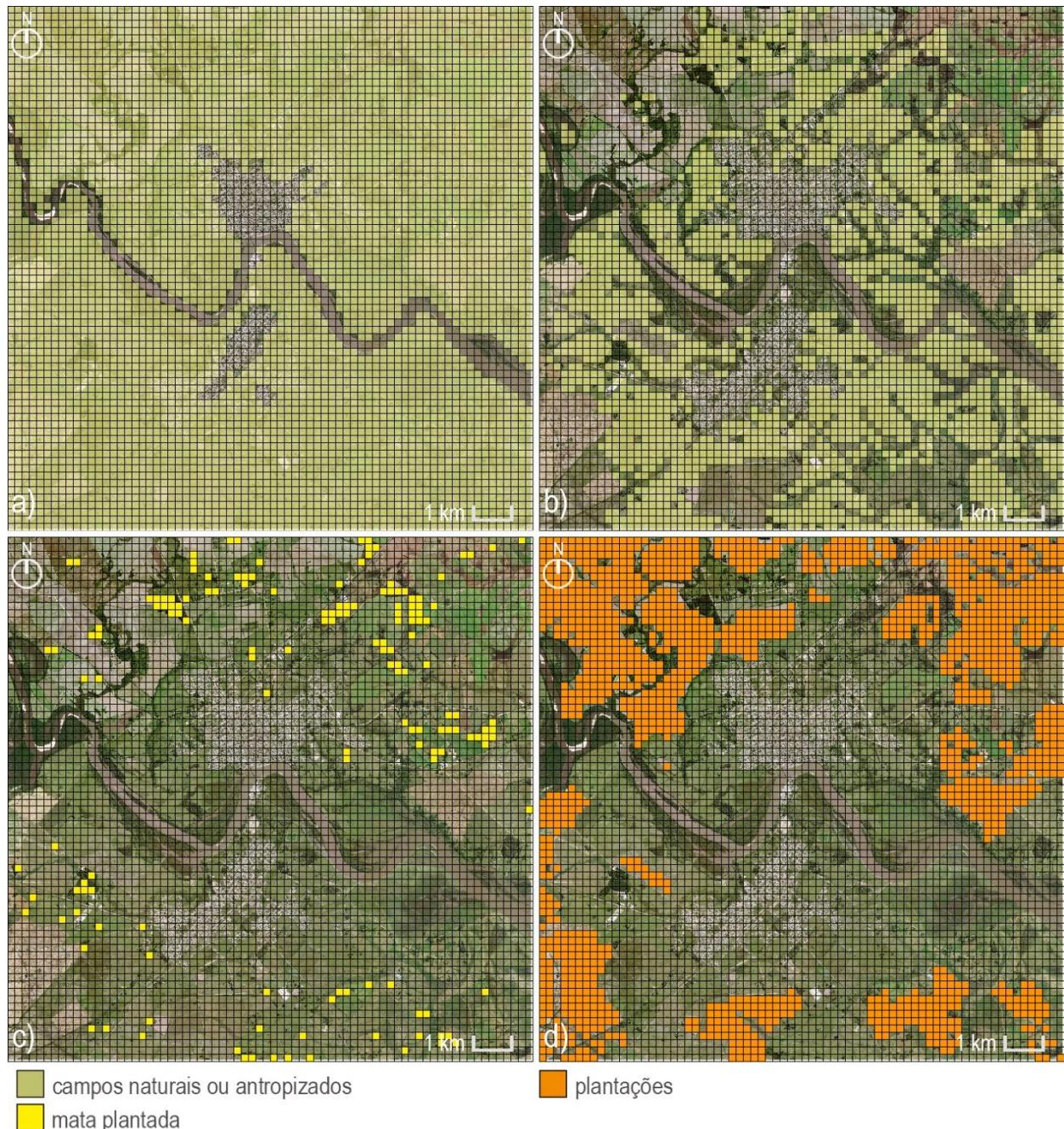
**Figura 4.6** – Atributos urbanos para Jaguarão e Rio Branco: em a) área urbanizada de Jaguarão em 1975; em b) área urbanizada de Rio Branco em 1975; em c) área urbanizada de Jaguarão em 2016; em d) área urbanizada de Rio Branco em 2016. Baumbach (2020).



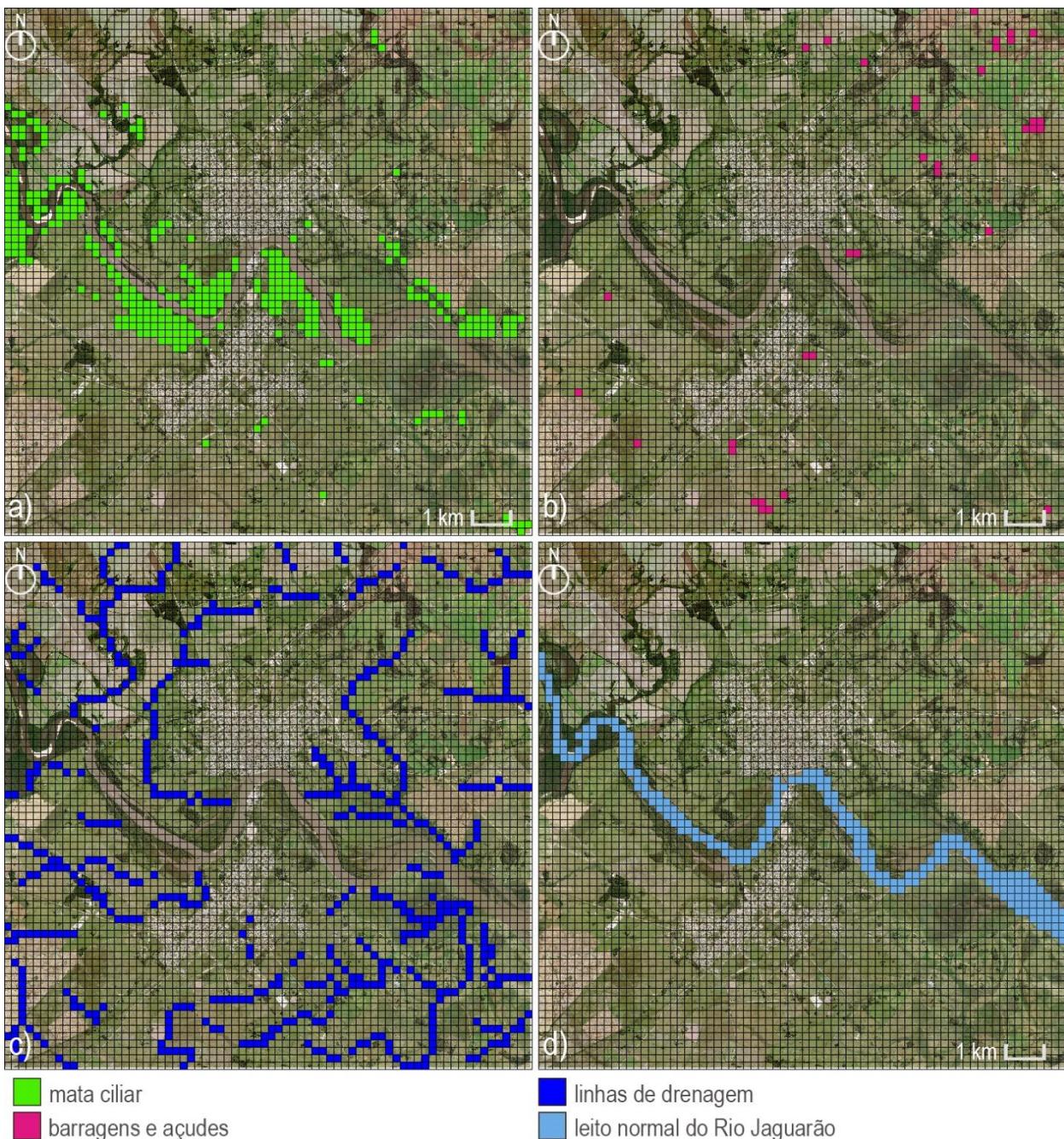
**Figura 4.7 – Atributos urbanos para Jaguarão e Rio Branco: em a) rodovias em 2016; em b) estradas vicinais em 2016; em c) ferrovia existente em 1932; em d) ferrovia existente em 2016. Baumbach (2020).**

Os atributos naturais utilizados nas simulações de crescimento para Jaguarão e Rio Branco estão representados nas Figuras 4.8 e 4.9. Para o cenário atual, os dados foram extraídos a partir da imagem de satélite utilizada. Já para o cenário passado foi

considerado como campo natural ou antropizado tudo aquilo que não foi identificado como área urbana ou leito do rio.



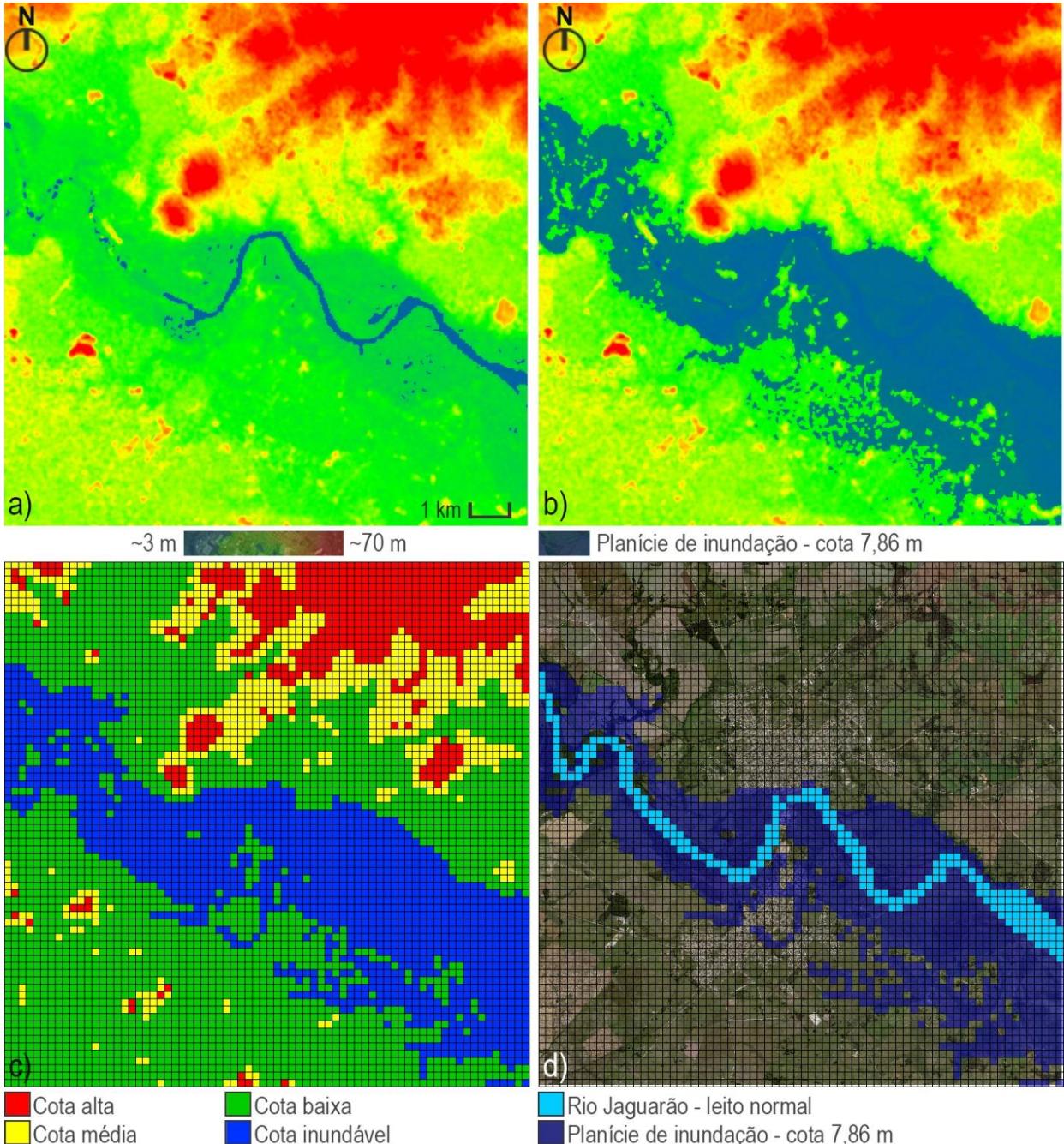
**Figura 4.8** – Atributos naturais para Jaguarão e Rio Branco: em a) campos naturais ou antropizados em 1975; em b) campos naturais ou antropizados em 2016; em c) mata plantada em 2016; em d) plantações em 2016. Baumbach (2020).



**Figura 4.9** – Atributos naturais para Jaguarão e Rio Branco: em a) mata ciliar em 2016; em b) barragens e açudes em 2016; em c) principais linhas de drenagem em 2016; em d) leito normal do Rio Jaguarão. Baumbach (2020).

As informações de relevo, altitude e as áreas de inundação do Rio Jaguarão foram extraídas de mapa hipsométrico (Figura 4.10 a, b), com resolução espacial de 38m, gerado a partir do Modelo Digital de Elevação SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*) com apoio do software de geoprocessamento *GlobalMapper*.

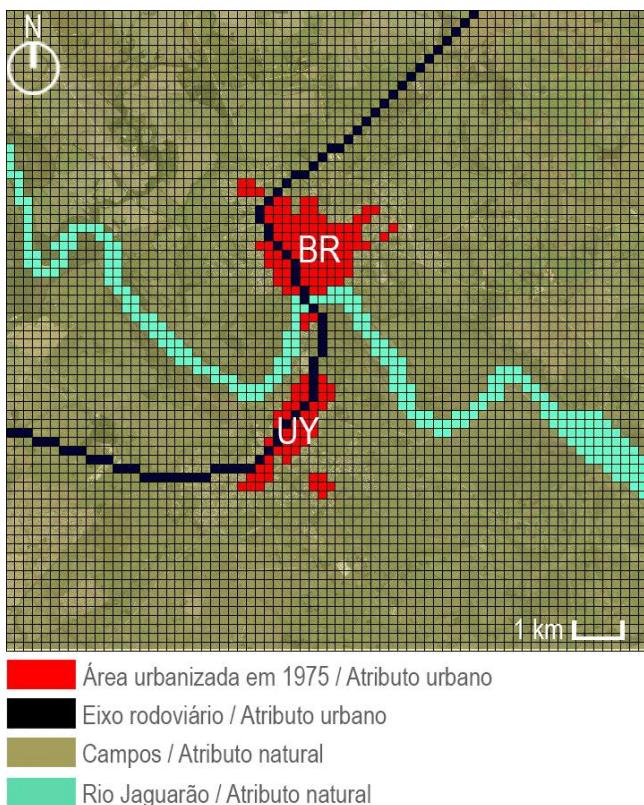
Com base nos dados de altitude foram construídos *inputs* (classificados como naturais) para diferenciar as áreas altas das baixas (Figura 4.10 c). Uma vez conhecida a área de inundação do Rio Jaguarão foi definido um *input* institucional (Figura 4.10 d), para possibilitar restrições de expansão urbana sobre essas áreas nas simulações.



**Figura 4.10 – Mapas hipsométricos e *inputs*.** Em a) mapa hipsométrico com nível do Rio Jaguarão normal; em b) mapa hipsométrico com simulação de maior cota de inundação para o Rio Jaguarão (7,86m, em 25/09/2015, conforme ANA); em c) *input* natural, diferenciação da área com base nas altitudes; em d) *input* institucional, representa a planície de inundação na cota 7,86m. Baumbach (2020).

#### 4.1.3 CALIBRAGEM

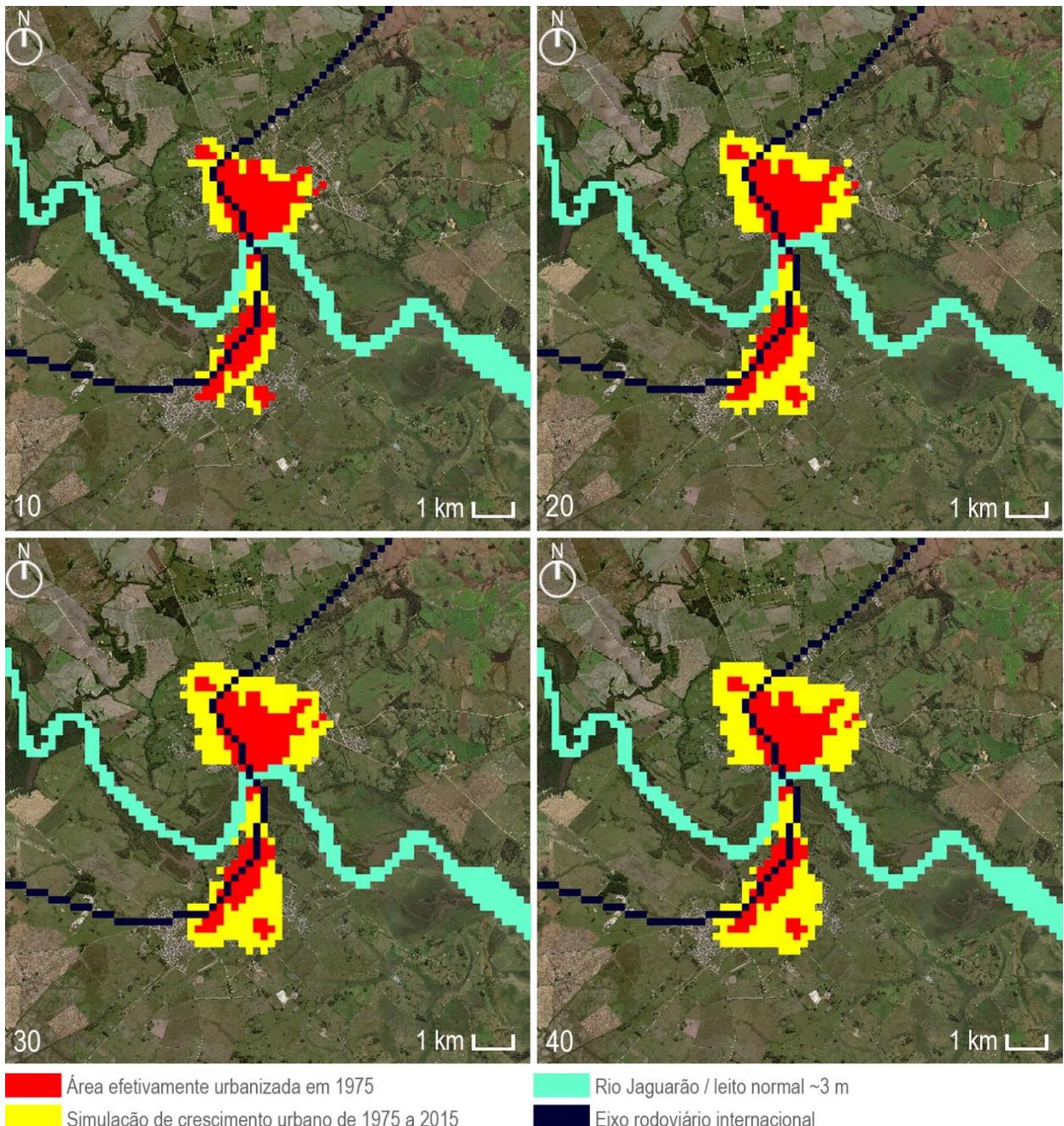
Para que as simulações de crescimento futuro tenham confiabilidade, é necessária a realização da legitimação (ou calibragem) do modelo. A calibragem é efetuada através dos ajustes dos parâmetros do modelo. A calibragem para Jaguarão e Rio Branco ocorreu através da simulação da mancha urbana existente em 1975 (conforme informações cartográficas citadas), até a área efetivamente urbanizada em 2016 (conforme imagem de satélite utilizada para criação dos *inputs* do cenário atual). A regra utilizada foi a *Threshold Potencial* em um processamento de 40 iterações. O cenário modelado para a realização desse processo está descrito na Figura 4.11.



**Figura 4.11** – Cenário modelado no *CityCell* para o ano de 1975. Baumbach (2020).

Para a visualização dos resultados de modo dinâmico, o *CityCell* permite a exportação dos processamentos no formato *gif*, onde é possível observar o movimento temporal gerado nas simulações. Contudo, nesse documento, pela impossibilidade de reprodução de arquivos *gif*, os resultados estão representados de modo estático. Desse modo, a figura 4.12 representa o dado de saída *Cell Type*, que demonstra a evolução

urbana simulada. Estão expostas as iterações de tempo 10, 20, 30 e 40. Cada iteração representa uma evolução temporal de 1 ano, com crescimento de 1% (conforme crescimento indicado para o COREDE<sup>7</sup> sul, 2020, onde se localiza Jaguarão).



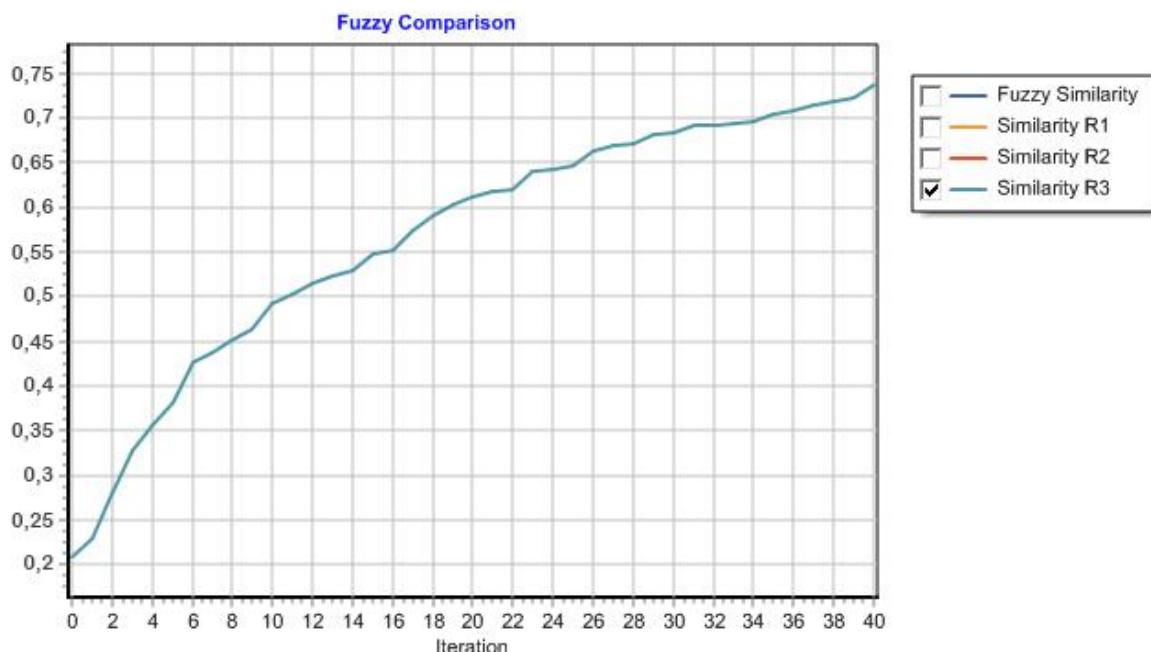
**Figura 4.12 – Simulação urbana de 1975 a 2015 para Jaguarão e Rio Branco. Em amarelo o dado de saída CellType, que indica as novas células urbanizadas. Baumbach (2020).**

<sup>7</sup> COREDEs, ou Conselhos Regionais de Desenvolvimento, são um fórum de discussão para a promoção do desenvolvimento regional. Atualmente, os 497 municípios gaúchos estão divididos em 28 COREDEs.

Para averiguar se o processamento conseguiu simular as dinâmicas de crescimento urbano do passado para o presente foram aplicadas técnicas de comparação por semelhança difusa (*fuzzy comparison*), método quantitativo que permite a aferição da concordância entre o cenário urbanizado atual e o simulado.

Conforme Saraiva (2013), na modelagem urbana é preferível identificar padrões gerais na estrutura do objeto de estudo, do que acertar detalhes em pequena escala. Neste sentido, a comparação do tipo *fuzzy* permite identificar situações de quase acerto, diferenciando-os dos erros. Assim, técnicas de comparação por semelhança difusa consideram a representação da célula a partir da influência das células da vizinhança.

A Figura 4.13 demonstra a comparação *fuzzy R3*, que considera as células com distância de 200m das células corretas como acertos de 50%, células com distância de 400m das células corretas como acertos de 25% e células com erro maior de 400m como incorretas. Já a tabela 4.1 apresenta o nível de acerto da comparação, em um grau de zero a um.



**Tabela 4.1** – Tabela da análise *Fuzzy R3*, com grau de zero a um de acerto nas iterações para a simulação de validação das cidades de Jaguarão e Rio Branco. Baumbach (2020).



**Figura 4.13 – Análise Fuzzy Comparison R3 para as iterações 10, 20, 30 e 40. Baumbach (2020).**

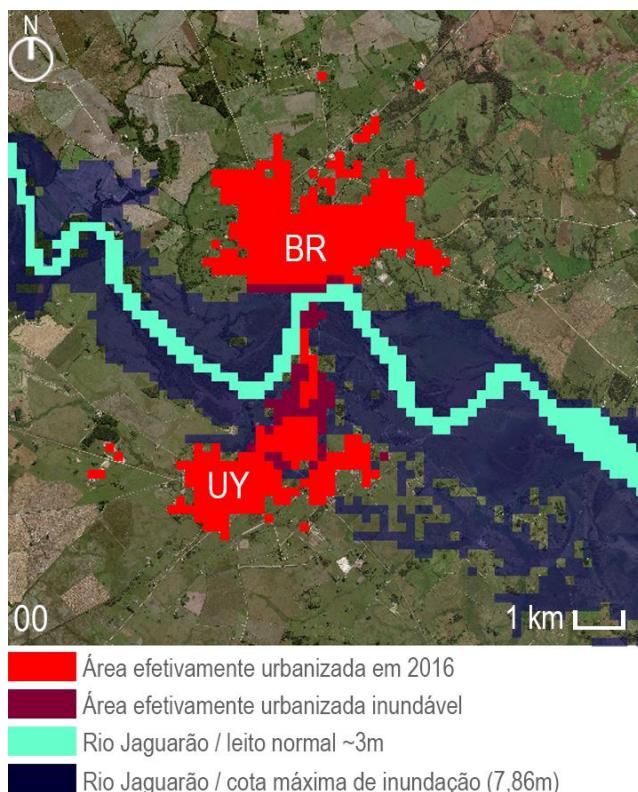
A validação do modelo é atingida quando se obtém uma aproximação suficiente entre simulação e realidade (POLIDORI, 2004). O nível de acerto para a simulação de crescimento urbano de Jaguarão e Rio Branco, em uma escala de zero a um, foi de 0,74. Assim, admite-se como um resultado satisfatório para que se possa prosseguir com o modelo e realizar as simulações do presente para o futuro.

#### 4.1.4 SIMULAÇÃO DE CRESCIMENTO FUTURO

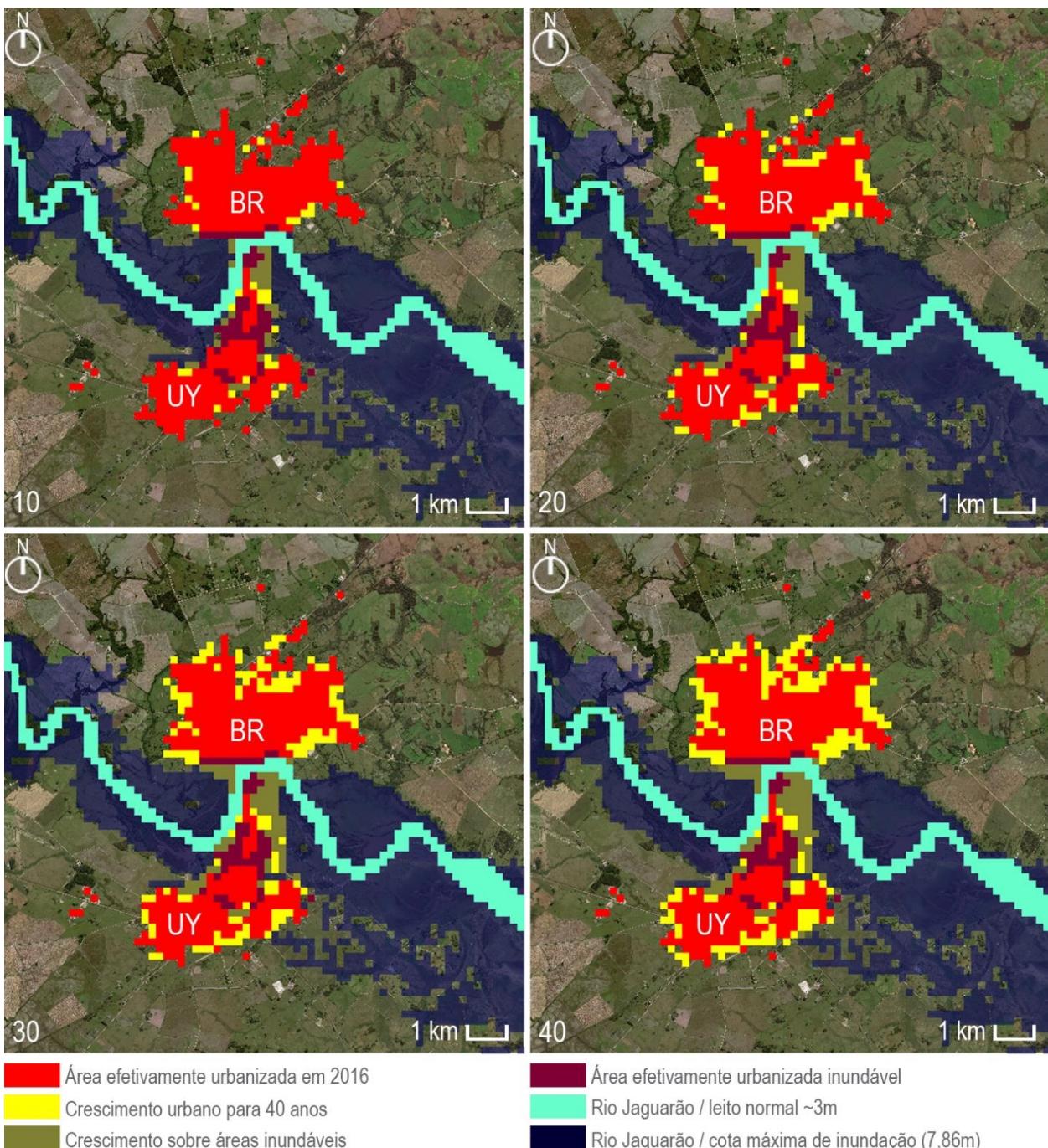
Após a etapa de calibragem do modelo foram realizadas simulações de crescimento urbano do presente para o futuro, a fim de revelar o processo de crescimento urbano sobre o ambiente hídrico.

Para isso, foram realizadas duas simulações a partir de um tempo 00 (ano de 2016, conforme imagem base para criação dos *inputs* do tempo presente), de acordo com a Figura 4.14: a) com o atributo que representa a área alagável do Rio Jaguarão (Figura 4.10 d, pag. 91) no modo *mutable*, ou seja, com possibilidade de transformação de suas células em urbanas (ainda que esse atributo apresente resistência à urbanização), para simular o crescimento urbano sobre as áreas alagáveis (Figura 4.15); b) com o atributo no modo *freezing*, ou seja, sem possibilidade de alteração de suas células, para simular o crescimento com a proteção das áreas alagáveis (Figura 4.16).

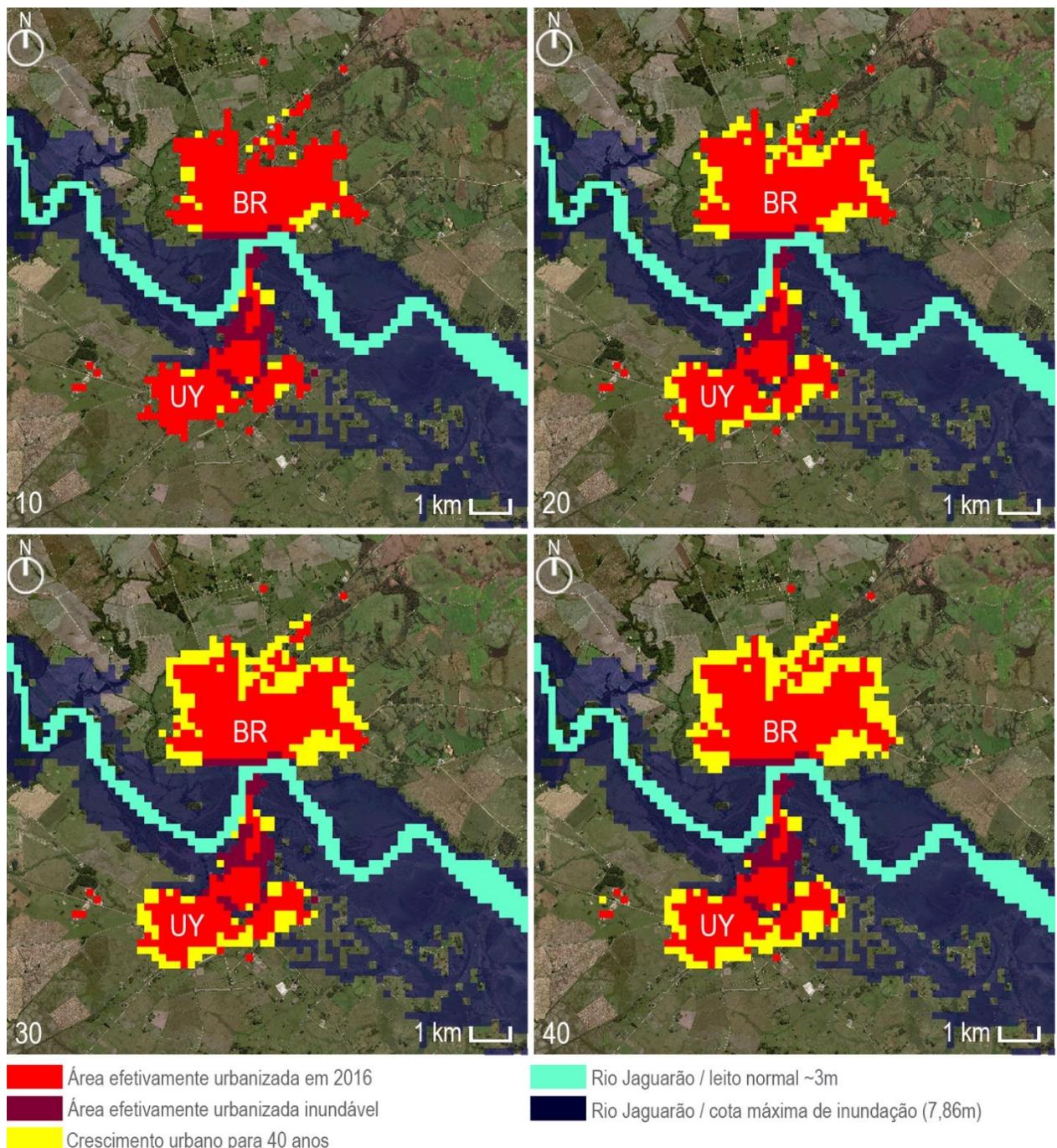
A regra utilizada foi a *Threshold Potencial*, como já mencionado, e o modelo foi calibrado para simular o crescimento urbano a uma taxa de 1%, em um processamento de 40 iterações, que representam a projeção temporal de 40 anos (2016 a 2056).



**Figura 4.14** – Iteração de tempo 00 para ambas as simulações. Baumbach (2020).



**Figura 4.15 – Simulação de crescimento para Jaguarão e Rio Branco com área alagável *mutable*. Iterações 10, 20, 30 e 40. Baumbach (2020).**



A quantidade de simulações realizadas, os principais parâmetros e pesos utilizados para a calibragem do modelo, bem como o tempo de processamento das simulações apresentadas, estão relacionados no Apêndice do trabalho (página 158).

#### 4.1.5 SIMULAÇÃO X RESULTADOS ALCANÇADOS

A simulação para o crescimento urbano de Jaguarão e Rio Branco sugere a tendência de expansão urbana sobre as áreas de planície de inundação do Rio Jaguarão. Em Rio Branco, a análise de imagens de satélite (série histórica do *Google Earth*) revela o processo de densificação da zona comercial próxima à Ponte Internacional Barão de Mauá, fronteira com o Brasil, mesmo com o conhecimento da vulnerabilidade a inundações do local (Figura 4.17).



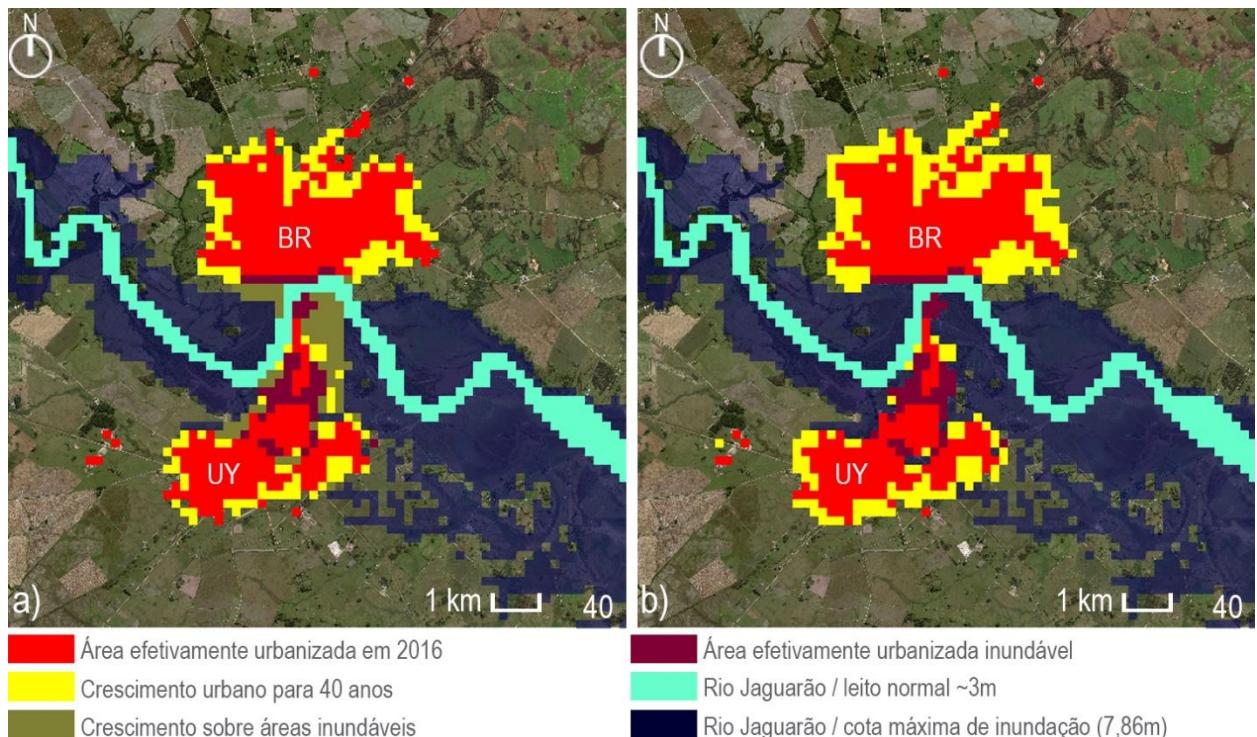
**Figura 4.17** – Análise da densificação urbana na zona comercial de Rio Branco através de aterramento da planície de inundação. Fotos da inundação por Vera Cassel. Organizado por Baumbach (2019).

Na comparação visual entre os cenários de tempo 40, com e sem possibilidade de expansão sobre as áreas de inundação (Figura 4.18), pode ser observada a diferença

da forma resultante do crescimento urbano. Em 4.18a se demonstra a tendência de crescimento concêntrico e a ocupação das áreas inundáveis, mesmo com a resistência à urbanização que essas áreas representam. Isso confirma a tendência apresentada, de expansão urbana sobre as áreas de planície de inundações do Rio Jaguarão.

Nesse caso houve um acréscimo de 14 células sobre áreas inundáveis em Jaguarão (o que representa 56ha) e de 59 células para Rio Branco (ou 236ha), isso significa que, em 40 anos, 30% do crescimento urbano total será sobre áreas inundáveis. Essa diferença de crescimento sobre áreas inundáveis entre Jaguarão e Rio Branco pode ser explicada pela tendência que Rio Branco demonstra de se expandir sobre a área convexa do meandro do Rio Jaguarão, área sobre a planície de inundações.

Já em 4.18b se observa a tendência de maior crescimento periférico, ou seja, das bordas da cidade, em áreas não inundáveis, representando o crescimento urbano se a proibição de ocupação das áreas inundáveis fosse efetiva. Nas duas simulações a contagem de células urbanas passou de 471 para 714 células, o que representa um acréscimo de área urbana de 1.884ha para 2.856ha, ou 52% de aumento total.



**Figura 4.18 – Simulação de crescimento para Jaguarão e Rio Branco:** em a) iteração de tempo 40 com área alagável *mutable*; em b) iteração de tempo 40 com área alagável *freezing*. Baumbach (2019).



Foto: Taís Beltrame dos Santos / agosto de 2018

#### **4.2 QUARAÍ (BR) – ARTIGAS (UY)**

Quaraí (população de 23.555 habitantes, conforme IBGE, 2016) e Artigas (população de 40.658 habitantes, conforme CENSUS, 2011) estão localizadas na Bacia Hidrográfica do Rio Quaraí. O Rio Quaraí nasce na região rural do município de Santana do Livramento e percorre 351km até sua desembocadura no Rio Uruguai.

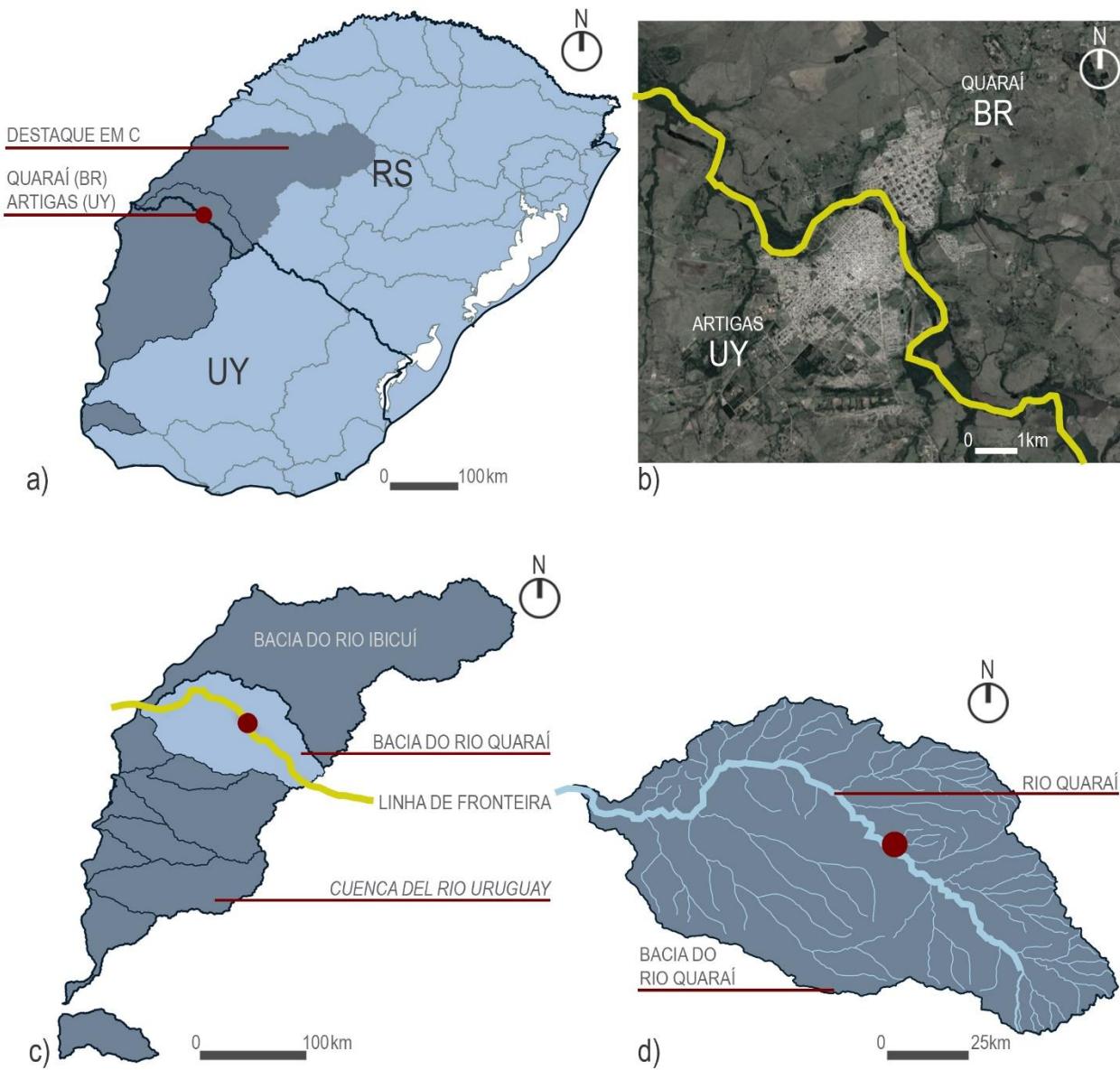
A ocupação dessa região também está ligada à preocupação do domínio do território pelas coroas portuguesas e espanholas. O povoamento de Quaraí teve início em 1820, com a instalação de um assentamento militar. Em 1858 ocorreu o levantamento e idealização do projeto urbano em formato xadrez pelos engenheiros militares. As ocupações irregulares e descontroladas que aproximaram a urbanização das áreas de inundação ocorreram no final do século XIX, período em que a cidade teve um importante crescimento demográfico devido à produção dos saladeiros. A restrição das áreas

impróprias para ocupação urbana devido às inundações ocorreu somente em 1971 (PUJOL, 2017).

Artigas, por sua vez, também com o propósito de consolidar a fronteira do Uruguai com o Brasil, foi fundada em 1852 (com nome de *San Eugenio del Cuareim*). Mais tarde, da mesma forma, teve seu traçado urbano desenhado por engenheiros militares em formato ortogonal, formando sua malha xadrez. Como pontua Resende (2019), assim como Quaraí a cidade de Artigas também se expande de forma irregular, com ocupação de moradias populares que não se enquadram ao traçado original, e enfrenta problemas de salubridade, saneamento básico e infraestrutura.

Desse modo, como Jaguarão e Rio Branco, Quaraí e Artigas também apresentam alto grau de vulnerabilidade a inundações, conforme o Atlas de Vulnerabilidade a Inundações do Rio Grande do Sul (2012).

A Figura 4.19 contextualiza a Bacia do Rio Quaraí e a área de estudo.

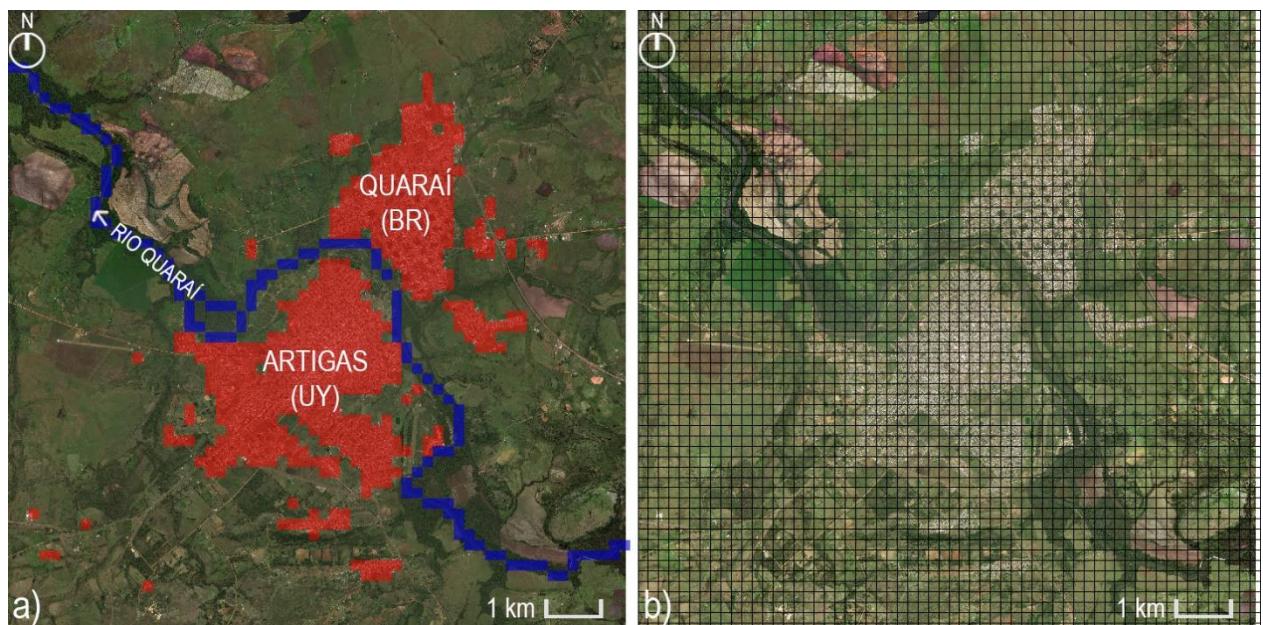


**Figura 4.19 – Área de estudo:** em a) localização de Quaraí e Artigas e o contexto das bacias hidrográficas no Brasil e no Uruguai; em b) imagem de satélite com o contexto urbano e a demarcação da linha de fronteira; em c) ampliação da *Cuenca del Rio Uruguay* e da Bacia do Rio Ibicuí, com indicação da Bacia Hidrográfica do Rio Quaraí; em d) Bacia do Rio Quaraí. Baumbach (2020).

#### 4.2.1 RECORTE ESPACIAL

O recorte espacial para Quaraí e Artigas abrange a área efetivamente urbanizada e seu entorno rural imediato, de modo a possibilitar a realização das simulações de crescimento urbano do presente para o futuro (Figura 4.20 a).

Na plataforma *CityCell* a área de interesse foi seccionada em células quadradas de 200m (Figura 4.20 b). Obteve-se um grid com malha de 60x60 células que representam uma área de 14.400ha. O tamanho da célula também foi definido com base na área de estudo e na análise proposta. Como uma célula de 200m, nesse caso, é possível obter os resultados esperados sobre os aspectos morfológicos que a cidade possa ter.

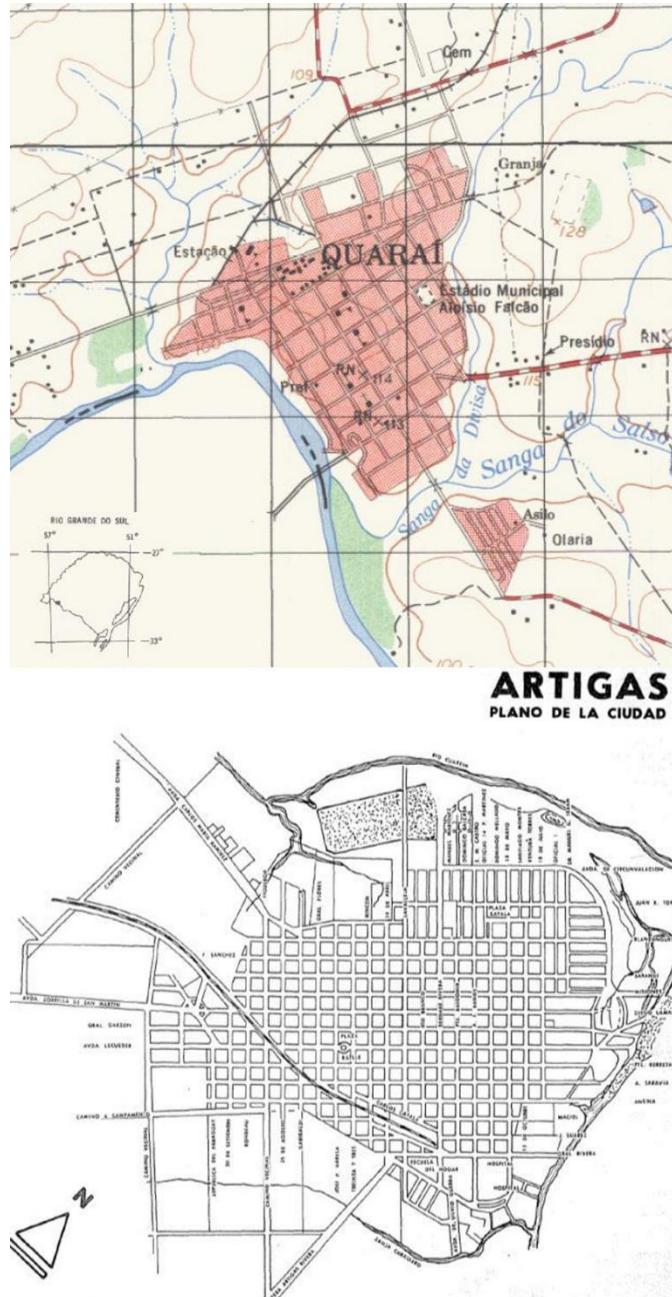


**Figura 4.20** – Recorte espacial para Quaraí e Artigas: em a) contextualização da área; em b) recorte espacial com a matriz celular definida. Baumbach (2020).

#### 4.2.2 DADOS DE ENTRADA

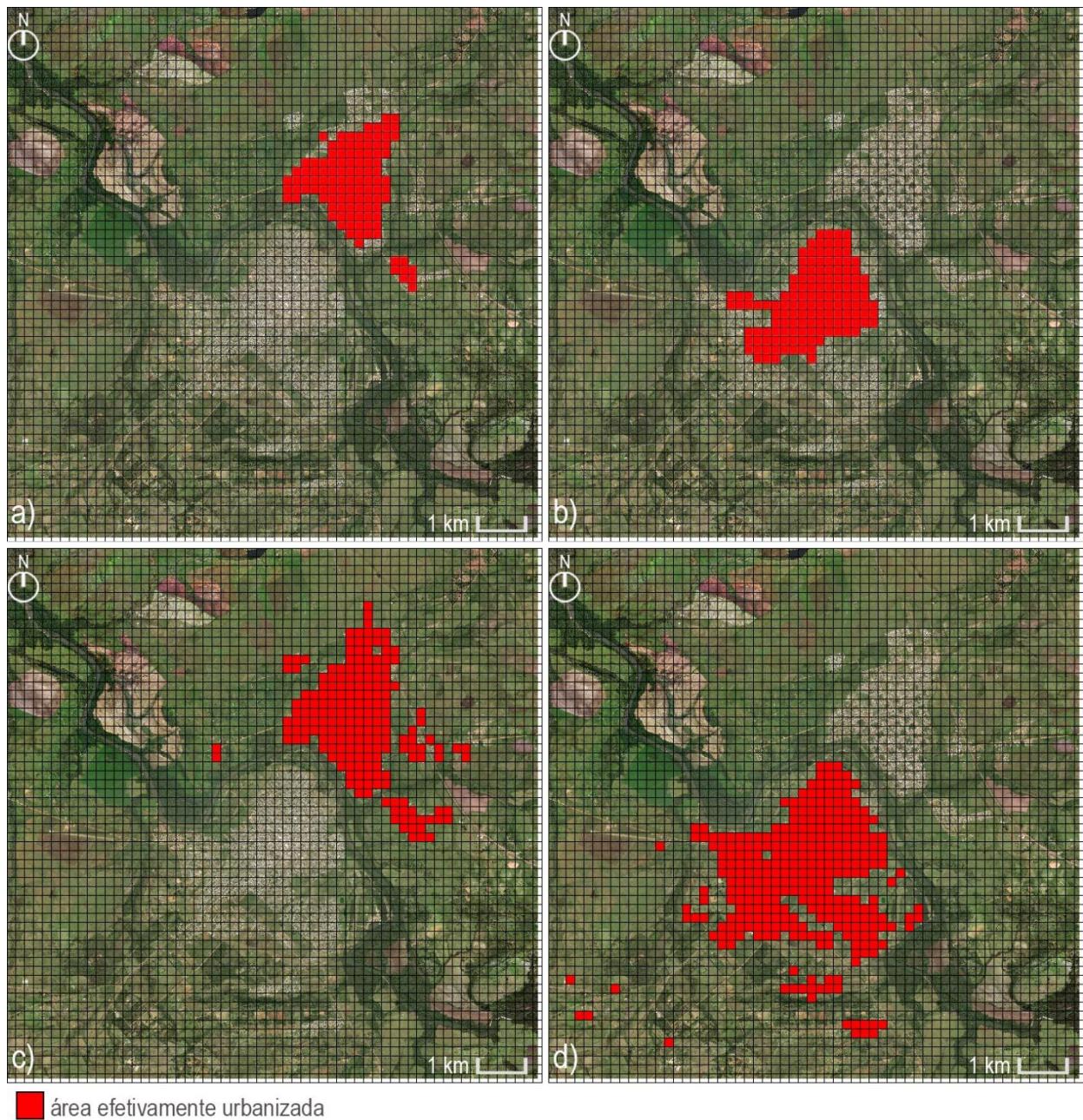
Para a criação dos *inputs* foi utilizada imagem do satélite *Landsat8*, do ano de 2016 (bandas, 6,5,4), com resolução espacial de 30 metros, de onde foram extraídas as seguintes informações: a) área efetivamente urbanizada; b) rodovias e estradas; c) ferrovias; d) campos e plantações; e) mata nativa ou plantada; f) sistemas de águas superficiais naturais ou antrópicas.

A criação dos *inputs*, a fim de realizar a legitimação do modelo simulando o crescimento do passado para o presente, foi feita a partir da carta topográfica matricial do Exército Brasileiro, no caso de Quaraí, datada de 1975. Para Artigas, a mancha urbana desse período foi extraída da coleção “Los departamentos – Artigas”, de 1970, conforme Figura 4.21.

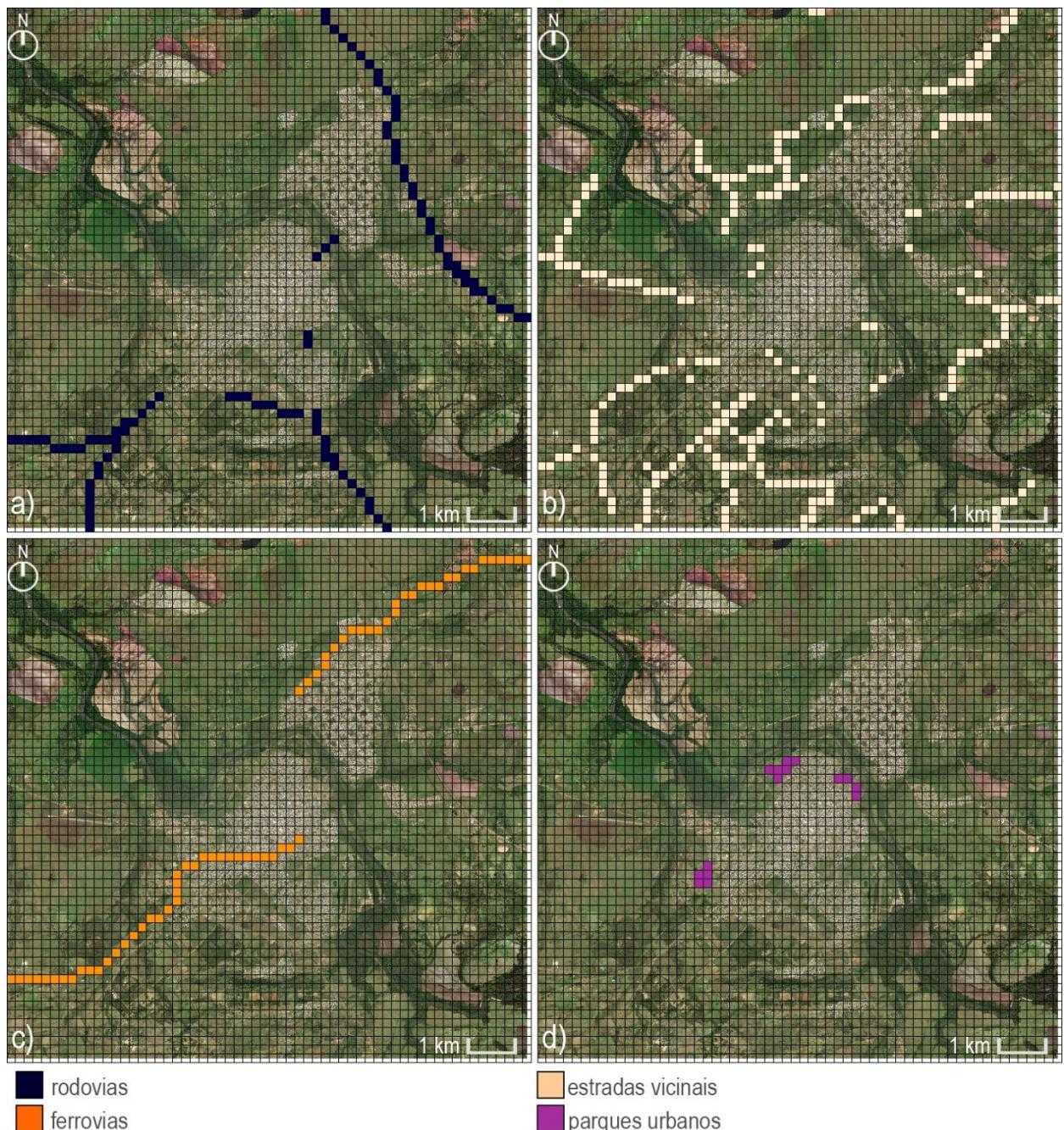


**Figura 4.21** – Trabalhos cartográficos que serviram como referência para a criação dos *inputs* de entrada para as cidades de Quaraí e Artigas. Acima: fragmento do levantamento topográfico matricial do Exército Brasileiro (disponível no banco de dados online do Exército). Abaixo: mapa da cidade de Artigas, extraído da publicação *Los Departamentos* (AUNATI, 1970). Organizado por Baumbach (2020).

Os atributos urbanos que descrevem a área efetivamente urbanizada para Quaraí e Artigas estão representados nas Figuras 4.22 e 4.23:



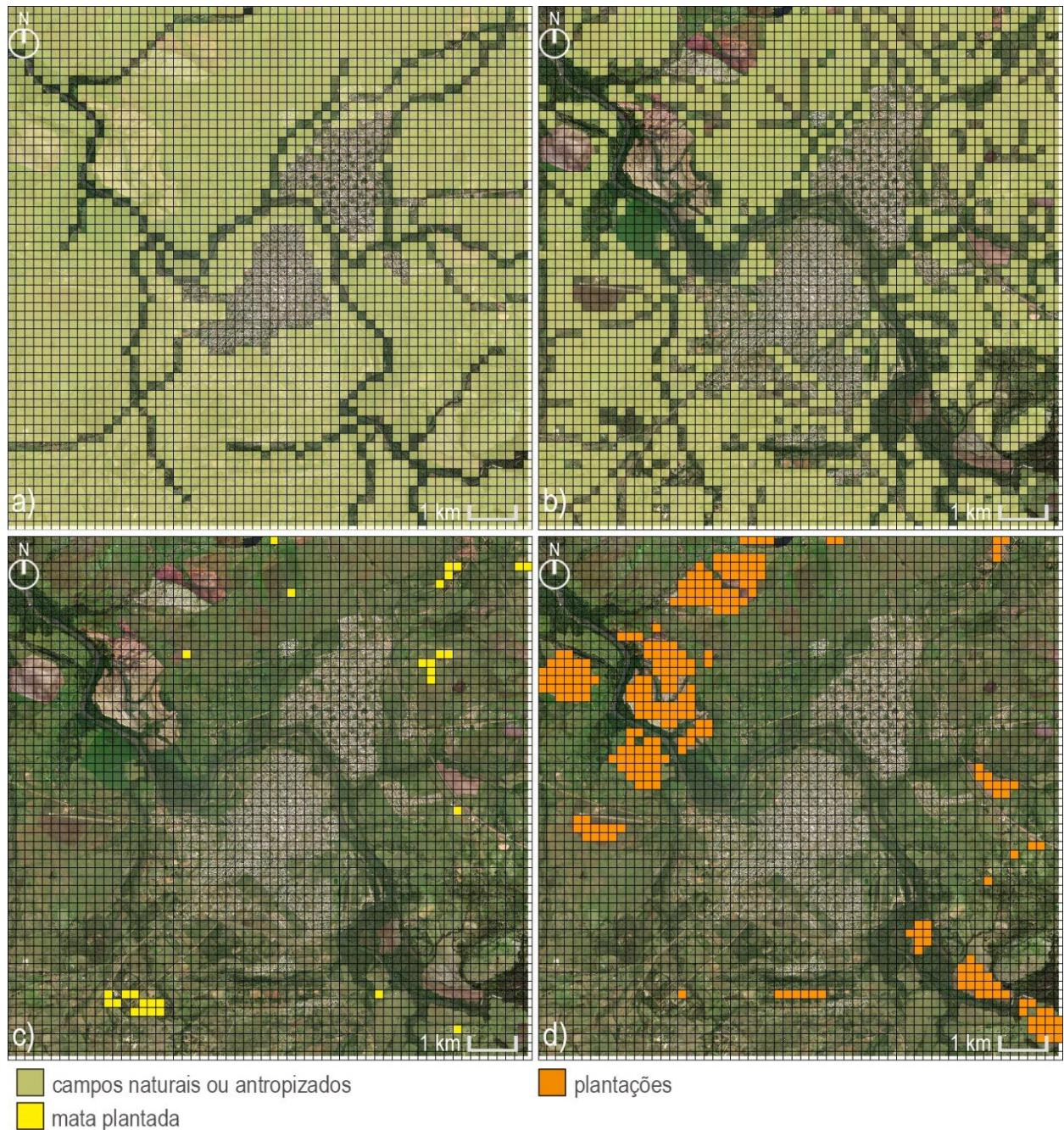
**Figura 4.22** – Atributos urbanos para Quaraí e Artigas: em a) área urbanizada de Quaraí em 1975; em b) área urbanizada de Artigas em 1975; em c) área urbanizada de Quaraí em 2016; em d) área urbanizada de Artigas em 2016. Baumbach (2020).



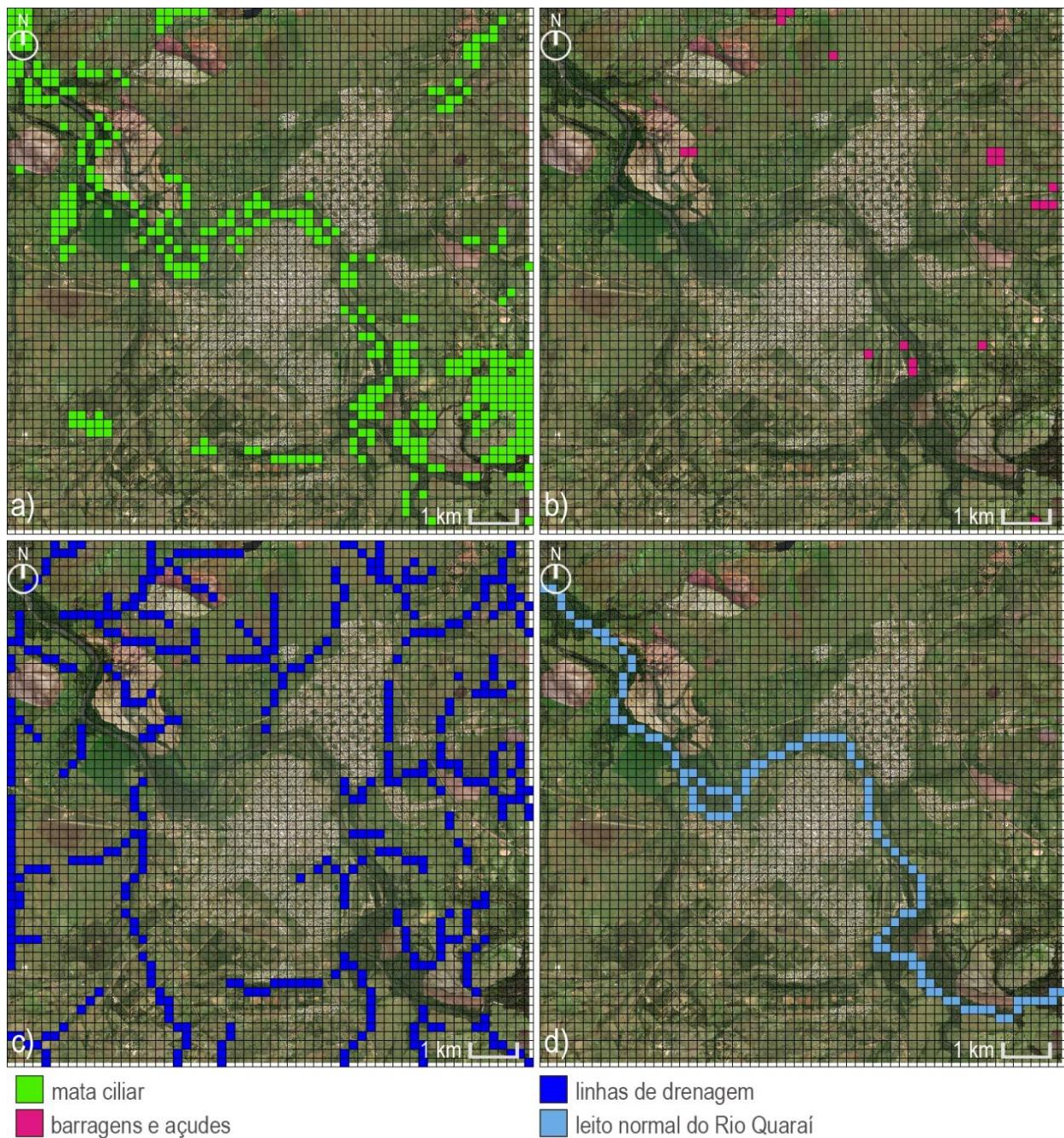
**Figura 4.23 – Atributos urbanos para Quaraí e Artigas: em a) rodovias em 2016; em b) estradas vicinais em 2016; em c) ferrovia existente em 1939; em d) parques urbanos reconhecidos, 2016.**  
Baumbach (2020).

Os atributos naturais utilizados nas simulações de crescimento para Quaraí e Artigas estão representados nas Figuras 4.24 e 4.25. Para o cenário atual, os dados foram extraídos a partir da imagem de satélite utilizada. Já para o cenário passado foi

considerado como campo natural ou antropizado tudo aquilo que não foi identificado como área urbana ou leito do rio.



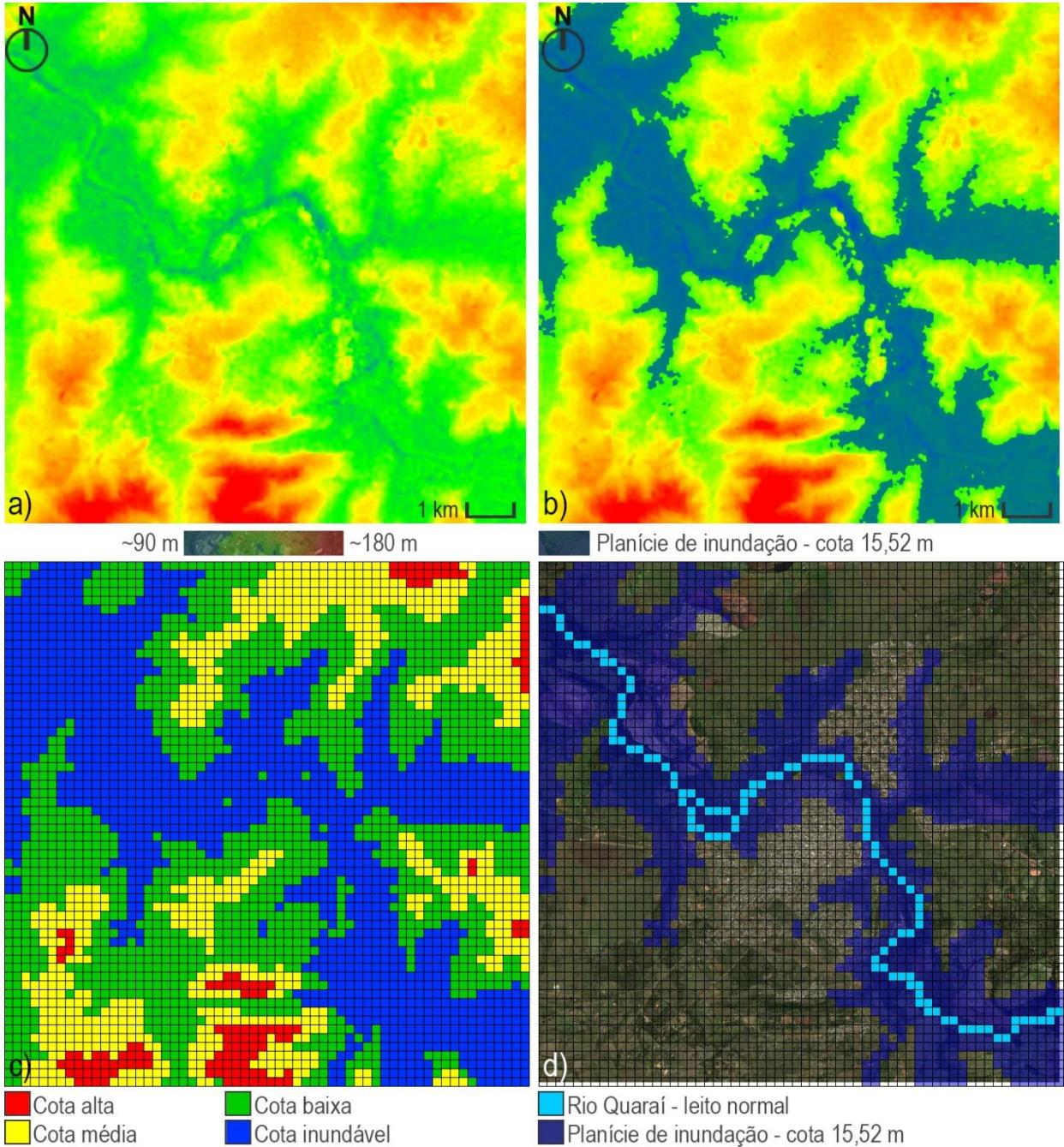
**Figura 4.24** – Atributos naturais para Quaraí e Artigas: em a) campos naturais ou antropizados em 1975; em b) campos naturais ou antropizados em 2016; em c) mata plantada em 2016; em d) plantações em 2016. Baumbach (2020).



**Figura 4.25** – Atributos naturais para Quaraí e Artigas: em a) mata ciliar em 2016; em b) barragens e açudes em 2016; em c) principais linhas de drenagem em 2016; em d) leito normal do Rio Quaraí. Baumbach (2020).

As informações de relevo, altitude e as áreas de inundação do Rio Quaraí foram extraídas de mapa hipsométrico (Figura 4.26 a, b), com resolução espacial de 38m, gerado a partir do Modelo Digital de Elevação SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*) com apoio do software de geoprocessamento *GlobalMapper*.

Com base nos dados do mapa hipsométrico foram construídos *inputs* (naturais) para diferenciar as áreas altas das baixas (Figura 4.26 c). Uma vez conhecida a área de inundação do Rio Quaraí foi definido um *input* institucional (Figura 4.26 d) para possibilitar restrições de expansão urbana sobre essas áreas nos processos de simulação.

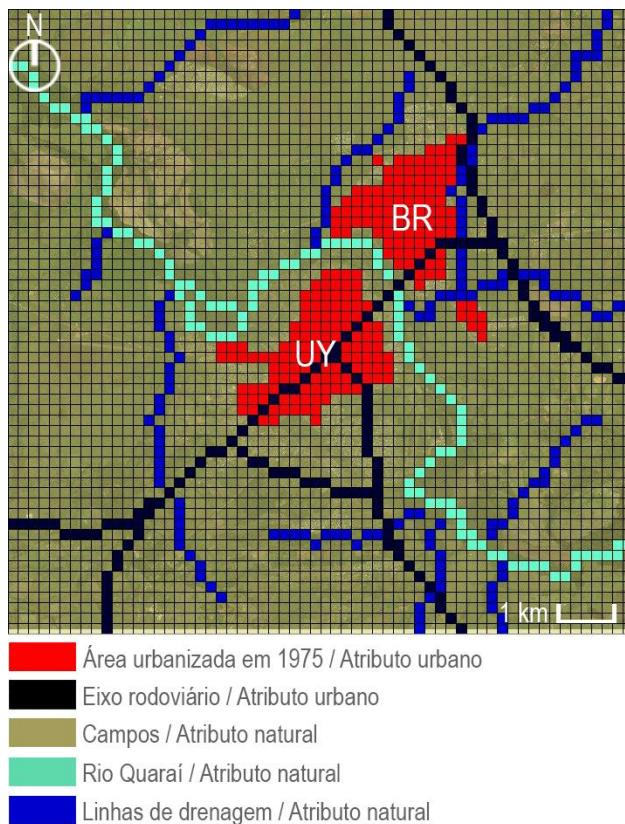


**Figura 4.26 – Mapas hipsométricos e *inputs*.** Em a) mapa hipsométrico com nível do Rio Quaraí normal; em b) mapa hipsométrico com simulação de maior cota de inundação para o Rio Quaraí (15,52m, em 01/06/2001, conforme ANA); em c) *input* natural, diferenciação da área com base nas altitudes; em d) *input* institucional, representa a planície de inundação na cota 15,52m. Baumbach (2020).

#### 4.2.3 CALIBRAGEM

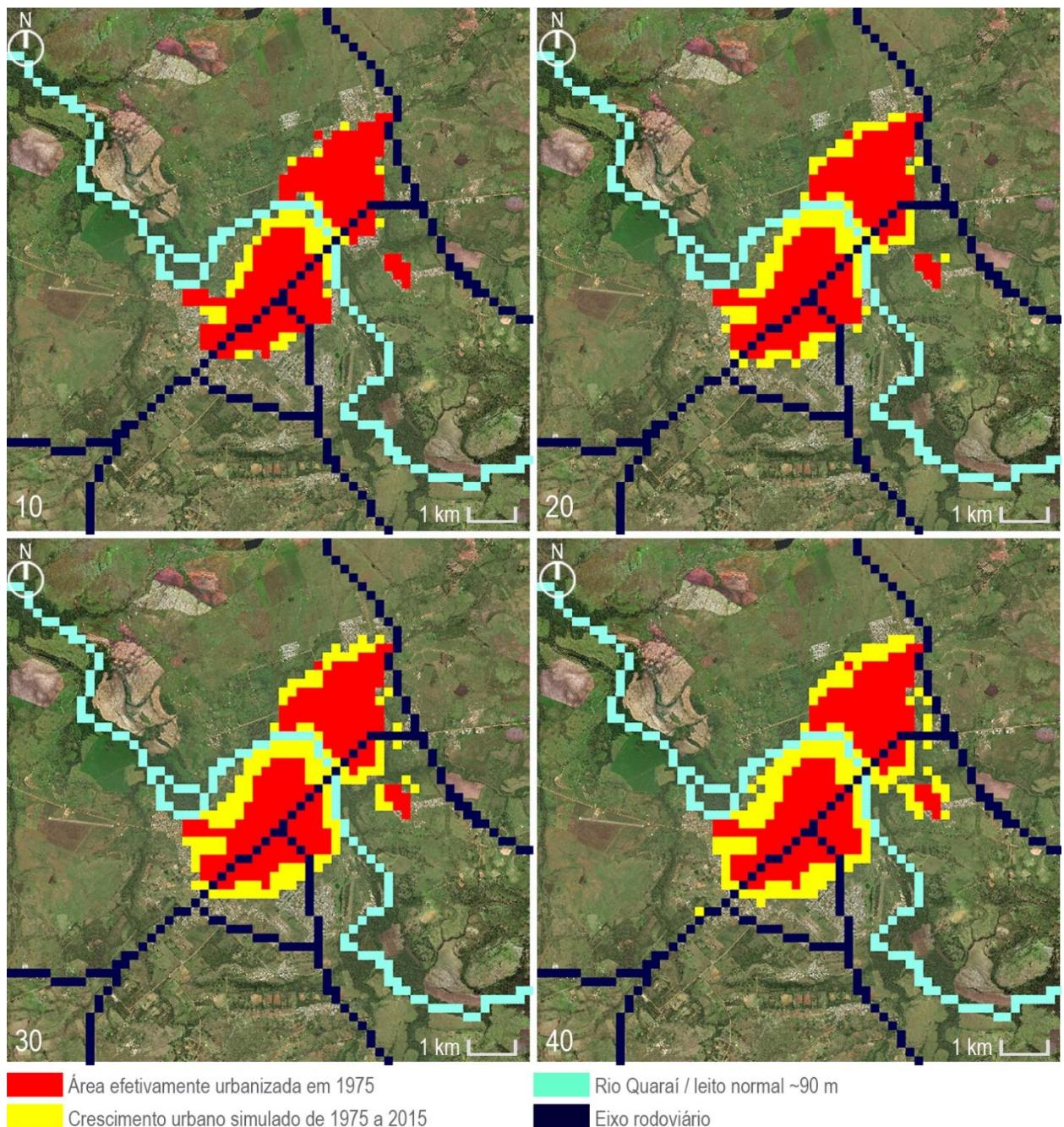
A calibragem para Quaraí e Artigas foi realizada através da simulação de crescimento da mancha existente em 1975 (conforme informações cartográficas citadas) até a área efetivamente urbanizada em 2016 (conforme imagem de satélite utilizada para criação dos *inputs* do cenário atual).

A regra utilizada foi a *Threshold Potencial* e o processamento realizado em um tempo de 40 iterações. O cenário modelado para a realização desse processo está descrito na Figura 4.27.



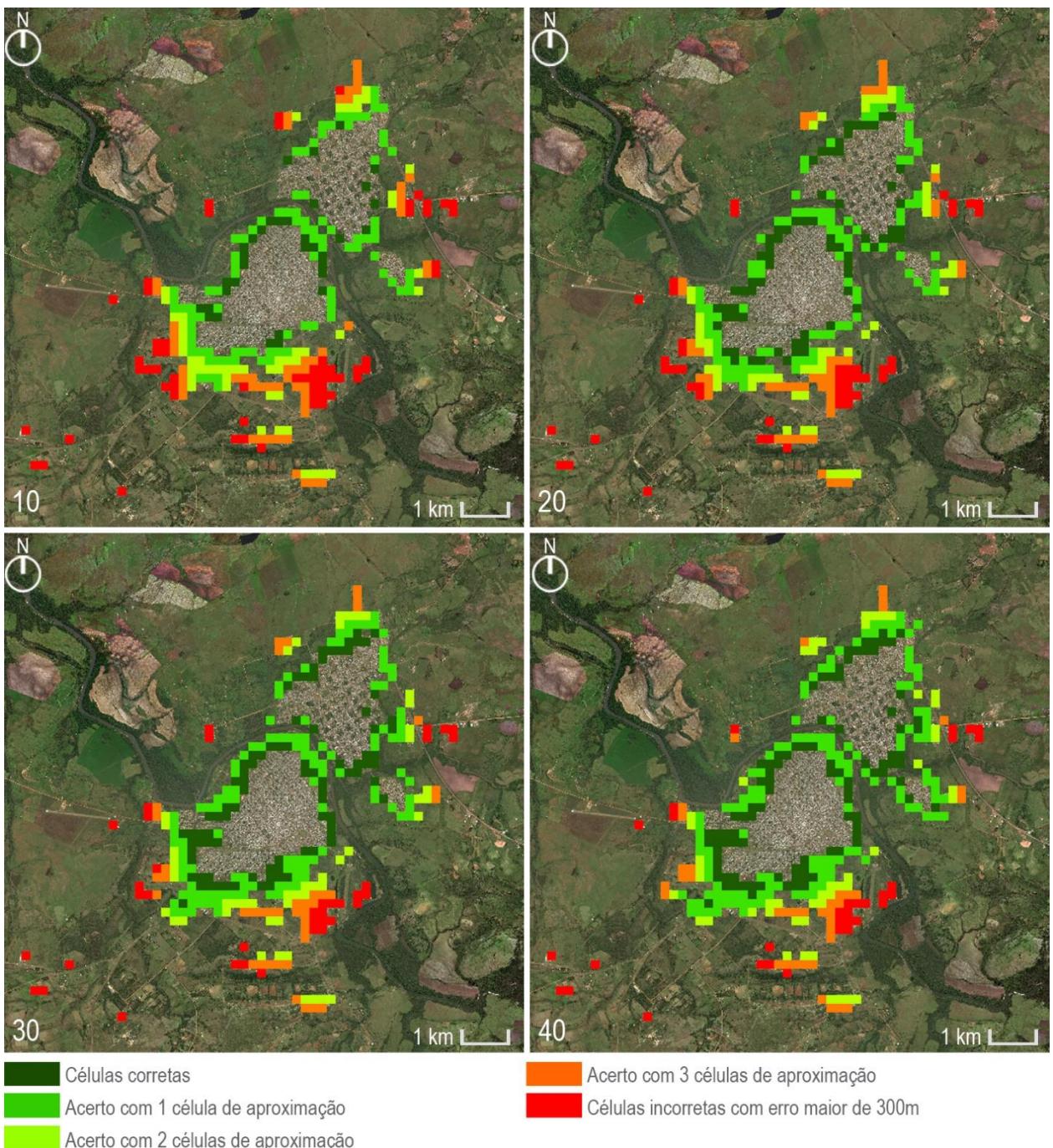
**Figura 4.27** – Cenário modelado no *CityCell* para o ano de 1975. Baumbach (2020).

A evolução urbana simulada pode ser observada pelo dado de saída *Cell Type*, indicado na Figura 4.28, em amarelo. Estão expostas as iterações de tempo 10, 20, 30 e 40, de um total de 40 iterações processadas no modelo. Cada iteração representa uma evolução temporal de 1 ano, com crescimento de 1% (conforme crescimento indicado para o COREDE da fronteira oeste, 2020, onde se localiza Quaraí).

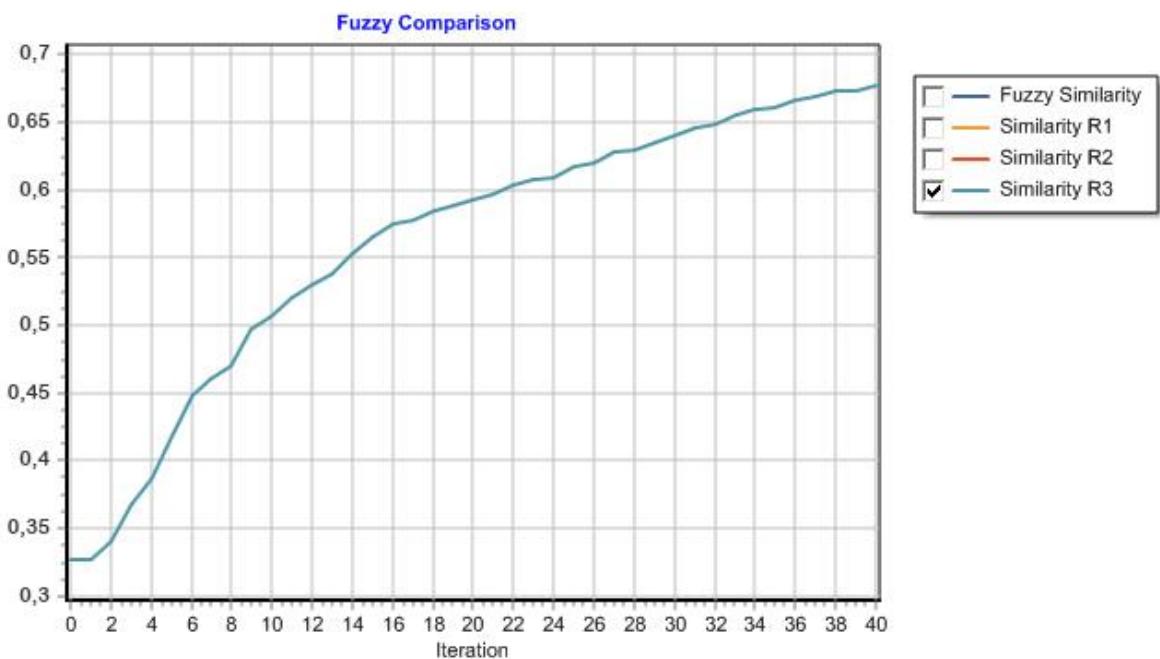


**Figura 4.28** – Simulação urbana de 1975 a 2015 para Quaraí e Artigas. Em amarelo o dado de saída *CellType*, que indica as novas células urbanizadas. Baumbach (2020).

Também para Quaraí e Artigas foi aplicado o método de comparação por semelhança difusa (*fuzzy comparison*) para análise entre o cenário urbanizado atual e o simulado (Figura 4.29). Já a tabela 4.2 apresenta o nível de acerto da comparação, em um grau de zero a um.



**Figura 4.29 – Análise Fuzzy Comparison R3 para as iterações 10, 20, 30 e 40. Baumbach (2020).**



**Tabela 4.2** – Tabela da análise *Fuzzy R3*, com grau de zero a um de acerto nas iterações para a simulação de validação das cidades de Quaraí e Artigas. Baumbach (2020).

O nível de acerto para a simulação de crescimento urbano do passado para o presente de Quaraí e Artigas, em uma escala de zero a um, foi de 0,68. Assim, admite-se como um resultado satisfatório para que se possa prosseguir com o modelo e realizar as simulações do presente para o futuro.

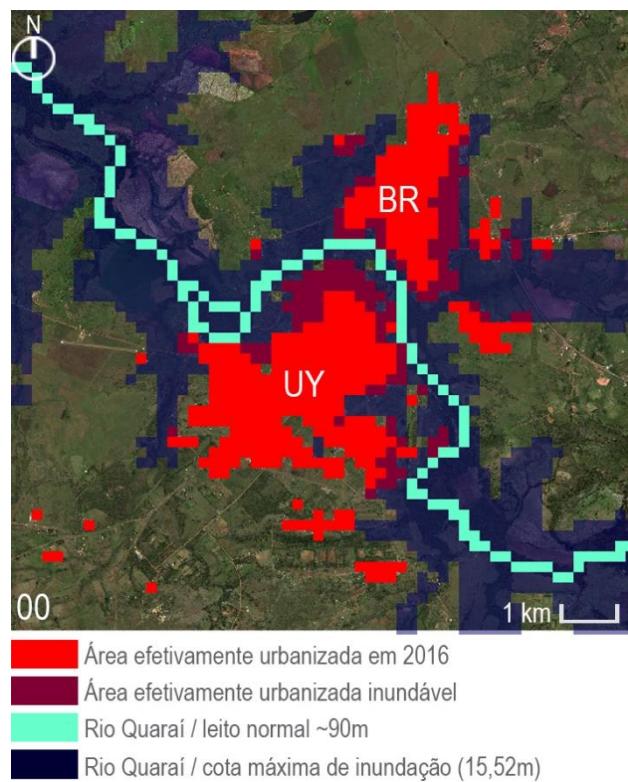
#### 4.2.4 SIMULAÇÃO DE CRESCIMENTO FUTURO

Também para Quaraí e Artigas, após a calibragem, foram realizadas as simulações de crescimento urbano do presente para o futuro, a fim de revelar o processo de crescimento urbano sobre o ambiente hídrico.

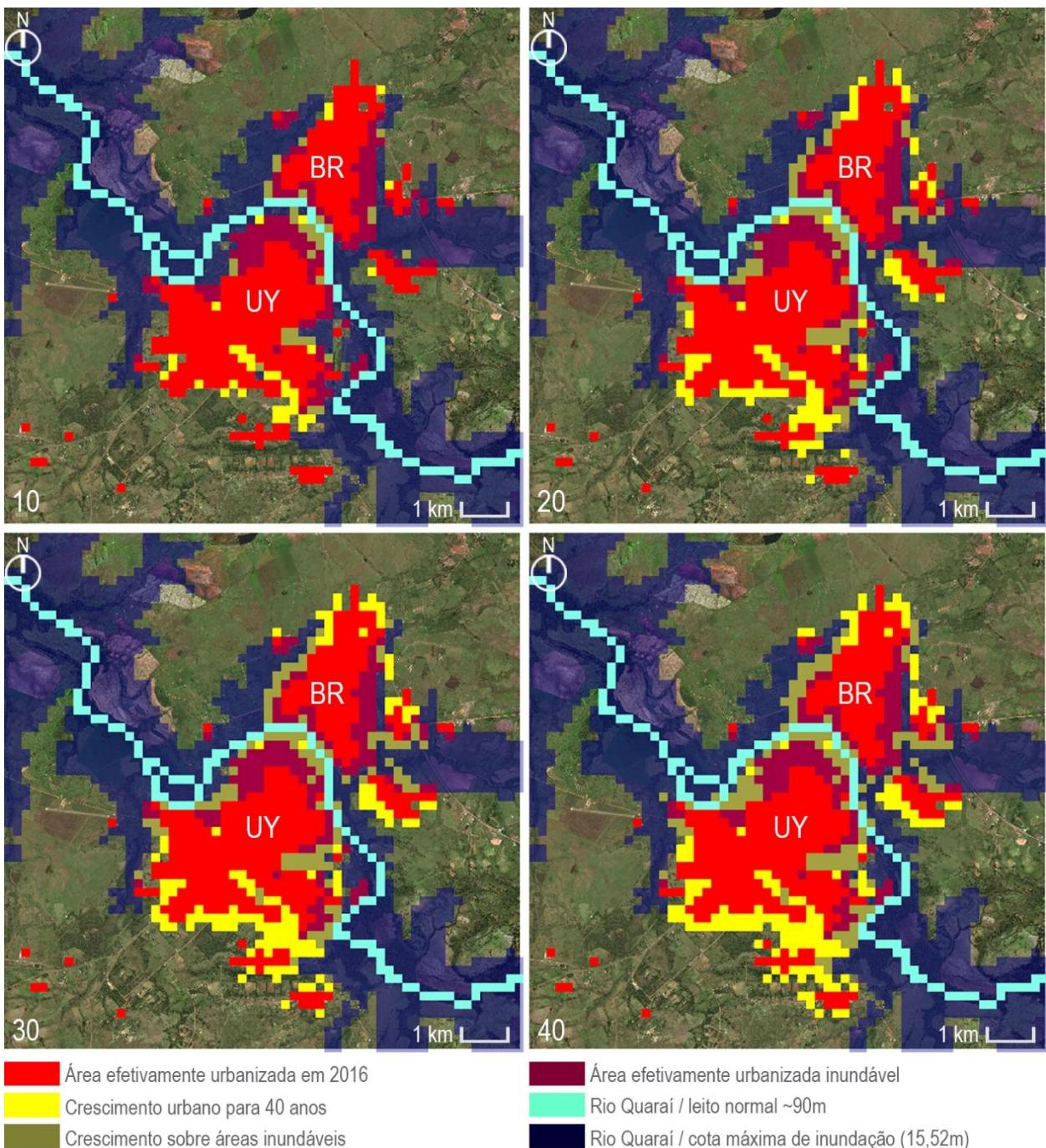
A partir do tempo 00 (ano de 2016, conforme imagem base para criação dos *inputs* do tempo presente), de acordo com a Figura 4.30, foram realizadas as simulações: a) com o atributo que representa a área alagável do Rio Quaraí (Figura 4.26 d, pag. 110) no modo *mutable*, ou seja, com possibilidade de transformação das células desse atributo em células urbanas, para simular o crescimento urbano sobre as áreas alagáveis (Figura 4.31); b) com o atributo no modo *freezing*, ou seja, sem possibilidade de alteração das

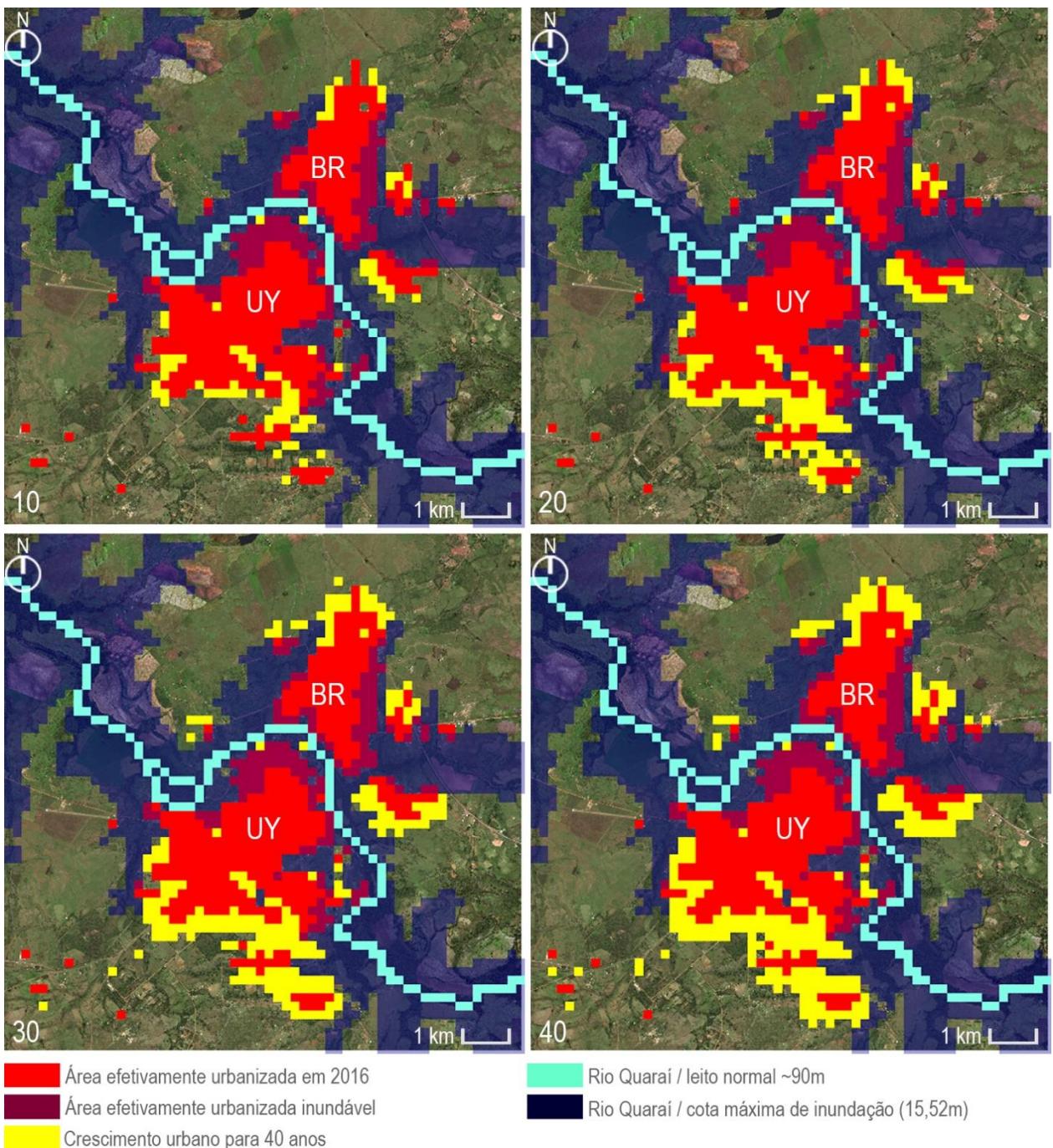
células desse atributo, para simular o crescimento urbano com proteção das áreas alagáveis (Figura 4.32).

Com uso da *Threshold Potencial* o modelo foi calibrado para simular o crescimento urbano a uma taxa de 1%, em um processamento de 40 iterações, representando uma projeção temporal de 40 anos (2016 a 2056).



**Figura 4.30** – Iteração de tempo 00 para ambas as simulações. Baumbach (2020).





**Figura 4.32 – Simulação de crescimento para Quaraí e Artigas com área alagável freezing.  
Iterações 10, 20, 30 e 40. Baumbach (2020).**

#### 4.2.5 SIMULAÇÃO X RESULTADOS ALCANÇADOS

A simulação para o crescimento urbano de Quaraí e Artigas sugere a tendência de expansão urbana sobre as áreas de planície de inundação do Rio Quaraí. Isto porque se observa através das imagens de satélite o processo (ainda que lento) de adensamento das áreas inundáveis.

A cidade de Quaraí apresenta um processo de expansão urbana planejada em 1920 que ignora importantes linhas de drenagem. Essa área é reconhecida como vulnerável a inundações, e, ainda que sua consolidação não tenha sido completa, como no plano, se observa pelas imagens de satélite o processo de consolidação do tecido urbano a partir das suas vias estruturantes (Figura 4.33).

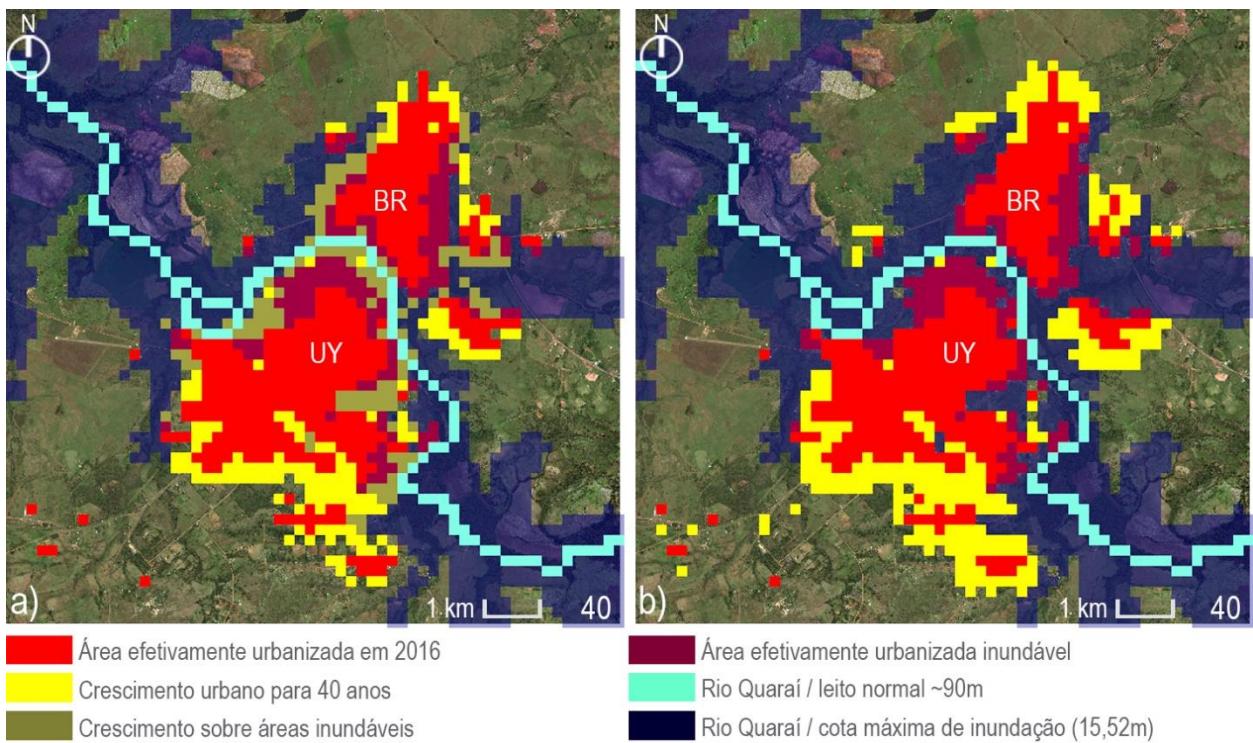


**Figura 4.33** – Processo de consolidação urbana sobre áreas inundáveis na cidade de Quaraí: a esquerda reprodução de planta de Quaraí datada de 1920, com projeção de novas quadras urbanas; a direita vetorização dos cursos hídricos em azul sobre imagem de satélite, onde se percebe o processo de consolidação das vias projetadas em 1920. Baumbach (2019).

A diferença da forma urbana resultante nas simulações de crescimento urbano propostas podem ser observadas na Figura 4.34. A tendência de crescimento concêntrico com ocupação das áreas inundáveis pode ser observada na Figura 4.34 a, de acordo com as simulações apresentadas. Nesse caso, a contagem de células sobre as áreas inundáveis (Figura 4.34 a) indica um acréscimo de 48 células sobre áreas inundáveis em Quaraí (o que representa 192ha) e 70 células sobre áreas inundáveis em Artigas (ou 280ha), assim, em um tempo de 40 anos, o crescimento sobre áreas inundáveis representa 70% do crescimento total para o período. O maior crescimento de Artigas

sobre áreas inundáveis do que Quaraí pode ser explicado porque Artigas se localiza na margem convexa do Rio Quaraí, enquanto Quaraí se localiza na área côncava.

Já em 4.34 b, a tendência é o crescimento periférico, em áreas não inundáveis, representando o crescimento urbano se a proibição de ocupação das áreas inundáveis fosse efetiva. Nas duas simulações a contagem de células urbanas passou de 512 para 778 células, o que representa um acréscimo de área urbana de 2.048ha para 3.112ha, ou 52% de aumento de área urbanizada.



**Figura 4.34 –** Simulação de crescimento para Quaraí e Artigas: em a) iteração de tempo 40 com área alagável *mutable*; em b) iteração de tempo 40 com área alagável *freezing*. Baumbach (2020).

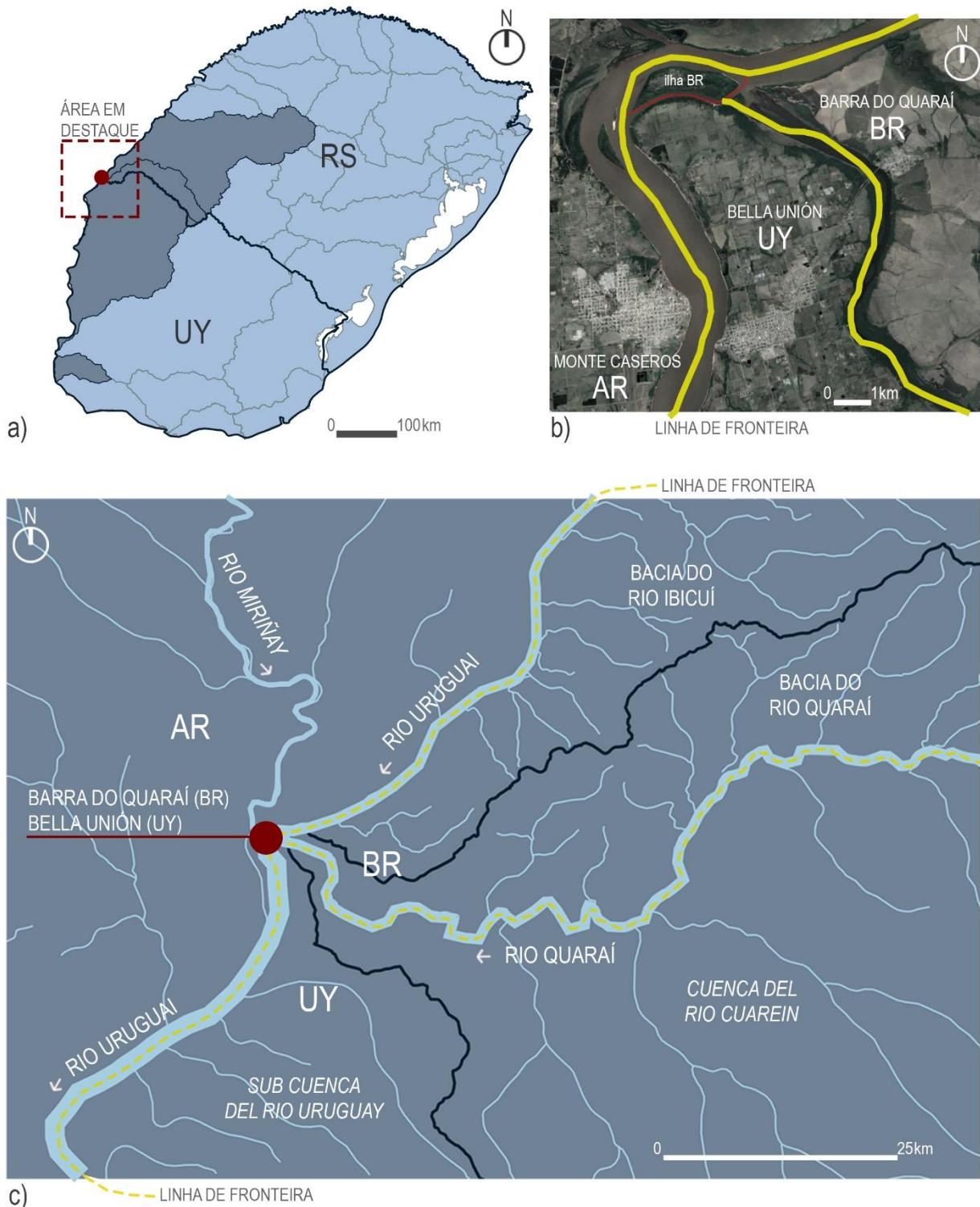


Foto: Flávio Almansa Baumbach / setembro de 2018

#### 4.3 BARRA DO QUARAÍ (BR) – BELLA UNIÓN (UY)

Barra do Quaraí (população de 4.215 habitantes, estimativa pelo IBGE, 2019) e Artigas (população de 19.100 habitantes, conforme CENSUS, 2011) estão localizadas na Tríplice Fronteira entre Brasil, Uruguai e Argentina. Barra do Quaraí se encontra sobre as bacias do Rio Quaraí e do Rio Ibicuí. Já Bella Unión se localiza sobre a *Cuenca del Rio Cuarein* e sobre a *Cuenca del Rio Uruguay Nord* (Figura 4.35).

Esta zona é área de confluência dos seguintes rios: Rio Quaraí, fronteira entre Brasil e Uruguai; Rio Uruguai, fronteira entre Uruguai e Argentina; e o Rio Miriñay, em território argentino. Configura-se, desse modo, como uma tríplice fronteira.



**Figura 4.35 – Área de estudo:** em a) localização de Quaraí e Artigas e o contexto das bacias hidrográficas no Brasil e no Uruguai; em b) imagem de satélite com o contexto urbano e a demarcação da linha de fronteira; em c) ampliação da área em destaque em a) com o contexto hídrico local.  
Baumbach (2020).

Conforme o portal *online* da Prefeitura de Barra do Quaraí, os registros históricos mais remotos de ocupação da área indicam que em 1814 foi instalado um posto militar da Guarda Portuguesa de Fronteira, visando o controle e a defesa territorial de possíveis avanços da coroa espanhola. Seu ápice econômico foi em torno de 1887, com a instalação de um saladeiro que abastecia vários países da região. Seu declínio, contudo, ocorreu por volta de 1917 com a construção, em Rio Grande, do primeiro frigorífico do estado, onde o sistema de refrigeração viria a substituir os métodos rudimentares empregados nos saladeiros até então.

Pelo motivo do declínio econômico, Barra do Quaraí teve pouco desenvolvimento urbano, sendo o menor município em número de habitantes e em extensão territorial urbanizada entre as cidades estudadas.

A área de Bella Unión, por sua vez, foi ocupada inicialmente em 1829 por um militar uruguai e por cerca de 8 mil indígenas guaranis refugiados que o acompanharam no processo de ocupação do local. Esta ocupação não obteve êxito, pois o Uruguai, no período de 1839 e 1851, esteve em uma guerra civil interna (Guerra Grande ou Guerra Civil do Uruguai), entre os partidos *Blanco* e *Colorado*, e, nesse tempo, um decreto ordenou a destruição da ocupação. Com isso, os indígenas abandonaram a região, que restou desabitada (AUANATI, 1970).

Com o fim da Guerra Grande (1851), o governo uruguai propôs um plano para ocupação e proteção da região da fronteira com o Brasil, a fim de impedir o avanço e a influência brasileira. Assim, em 1853 ocorre o repovoamento de Bella Unión, denominada à época de *Santa Rosa del Cuarein* (AUANATI, 1970).

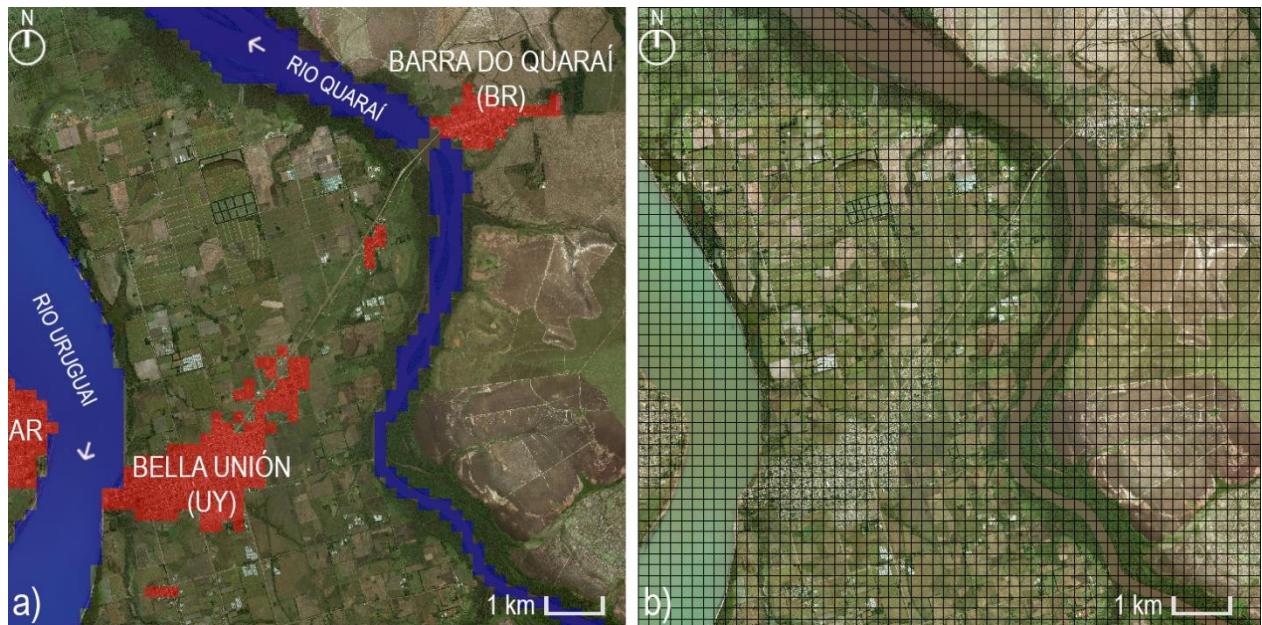
Barra do Quaraí e Bella Unión, então, também têm suas origens na preocupação que os portugueses e espanhóis tinham em manter o domínio e controle do território. Assim que as cidades portuguesas eram estabelecidas no atual Rio Grande do Sul, também as cidades espanholas iam surgindo no atual Uruguai.

#### 4.3.1 RECORTE ESPACIAL

O recorte espacial para Barra do Quaraí e Bella Unión abrange a área efetivamente urbanizada e seu entorno rural imediato, de modo a possibilitar a realização das simulações de crescimento urbano do presente para o futuro (Figura 4.36 a).

Na plataforma *CityCell* a área de interesse foi seccionada em células quadradas de 200m (Figura 4.36 b). Obteve-se um grid com malha de 57x57 células que representam uma área de 12.996ha.

A cidade de Monte Caseros, na Argentina, aparece parcialmente na área do recorte de estudo, porém, não foi considerada para a realização das simulações nos processamentos.

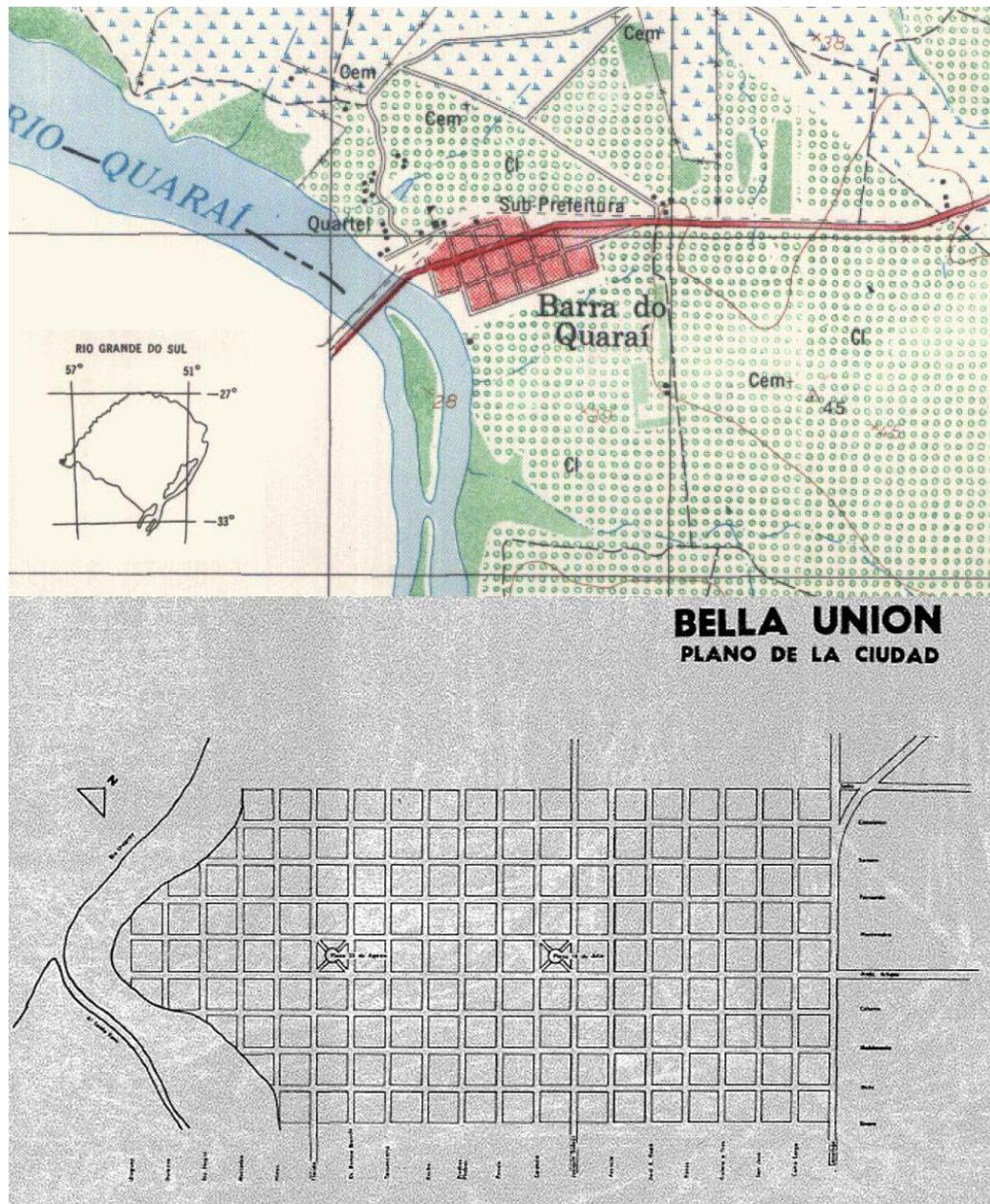


**Figura 4.36** – Recorte espacial para Barra do Quaraí e Bella Unión: em a) contextualização da área; em b) recorte espacial com a matriz celular definida. Baumbach (2020).

#### 4.3.2 DADOS DE ENTRADA

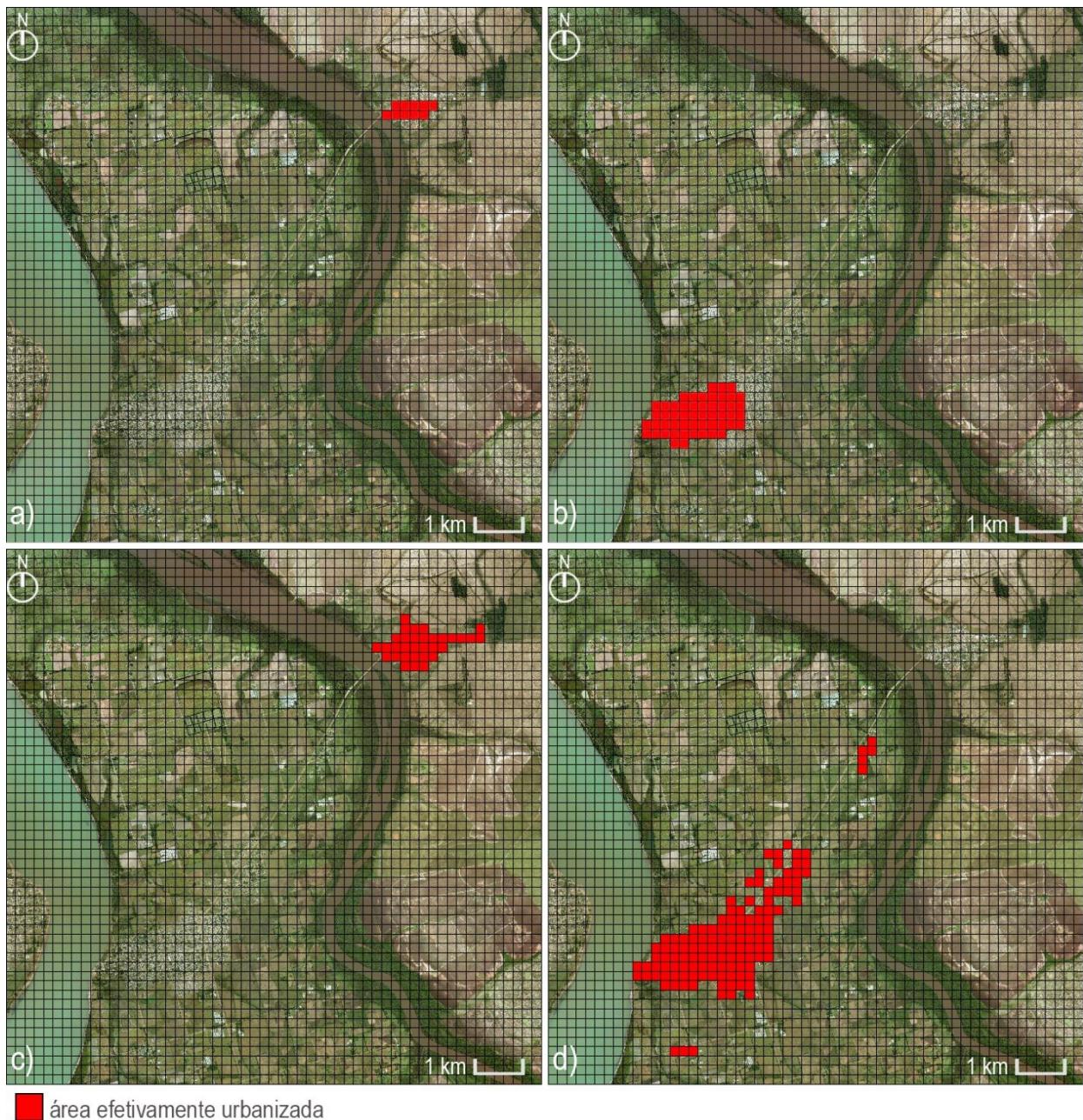
Para a criação dos *inputs* de Barra do Quaraí e Bella Unión também foi utilizada imagem do satélite *Landsat8*, do ano de 2016 (bandas, 6,5,4), com resolução espacial de 30 metros. Da imagem foram extraídas as informações de: a) área efetivamente urbanizada; b) rodovias e estradas; c) ferrovias; d) campos e plantações; e) mata nativa ou plantada; f) sistemas de águas superficiais naturais ou antrópicas.

A criação dos *inputs*, a fim de realizar a legitimação do modelo simulando o crescimento do passado para o presente, foi feita a partir da carta topográfica matricial do Exército Brasileiro, no caso de Barra do Quaraí, datada de 1975. Para Bella Unión, a mancha urbana desse período foi extraída da coleção “Los departamentos – Artigas”, de 1970, conforme Figura 4.37.

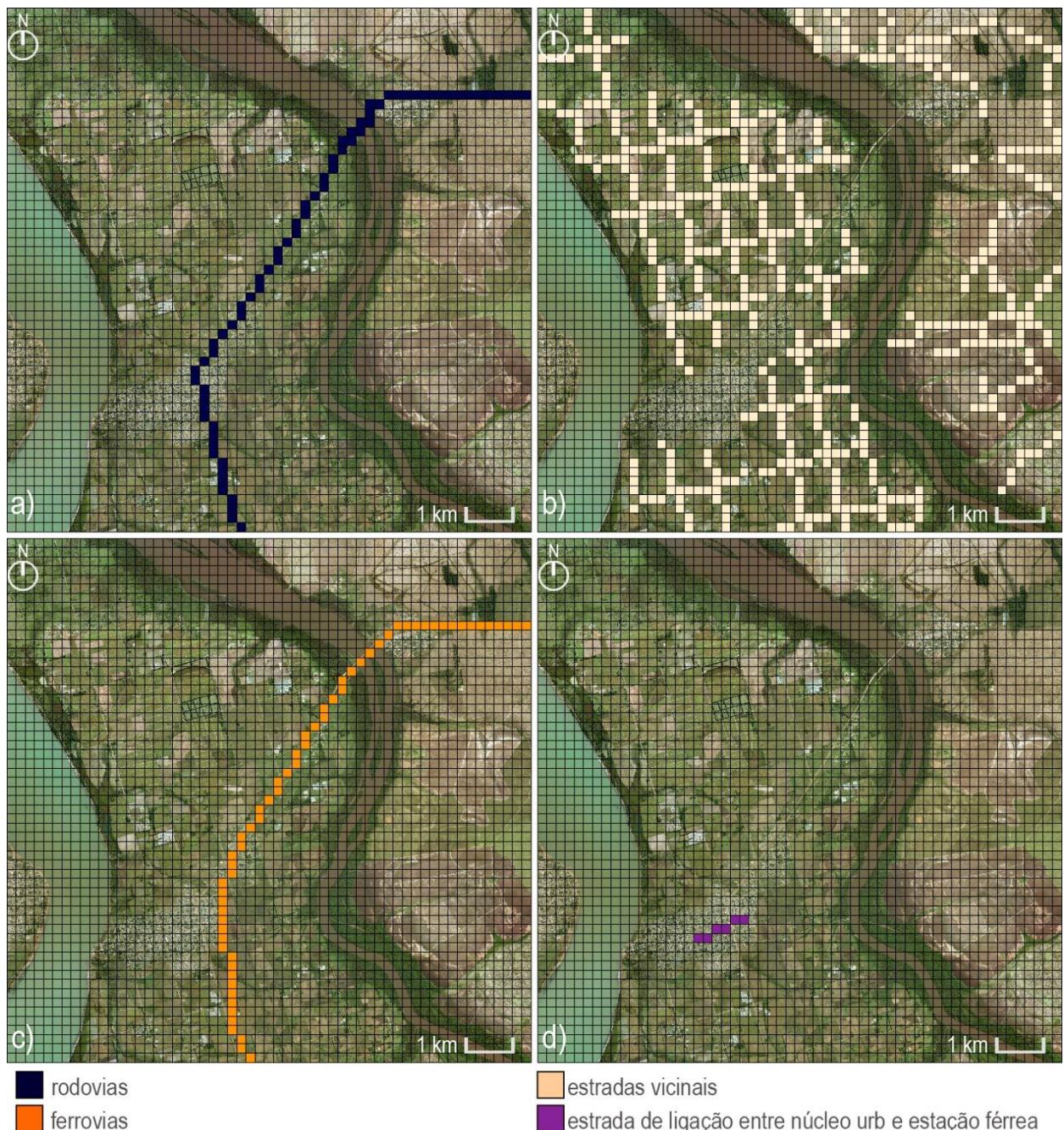


**Figura 4.37** – Trabalhos cartográficos que serviram como referência para criação dos *inputs* de entrada para as cidades de Barra do Quaraí e Bella Unión. Acima: fragmento do levantamento topográfico matricial do Exército Brasileiro (disponível no banco de dados online do Exército). Abaixo: mapa da cidade de Artigas, extraído da publicação *Los Departamentos - Artigas* (AUNATI, 1970). Organizado por Baumbach (2020).

Os atributos urbanos que descrevem a área efetivamente urbanizada para Barra do Quaraí e Bella Unión estão representados nas Figuras 4.38 e 4.39:



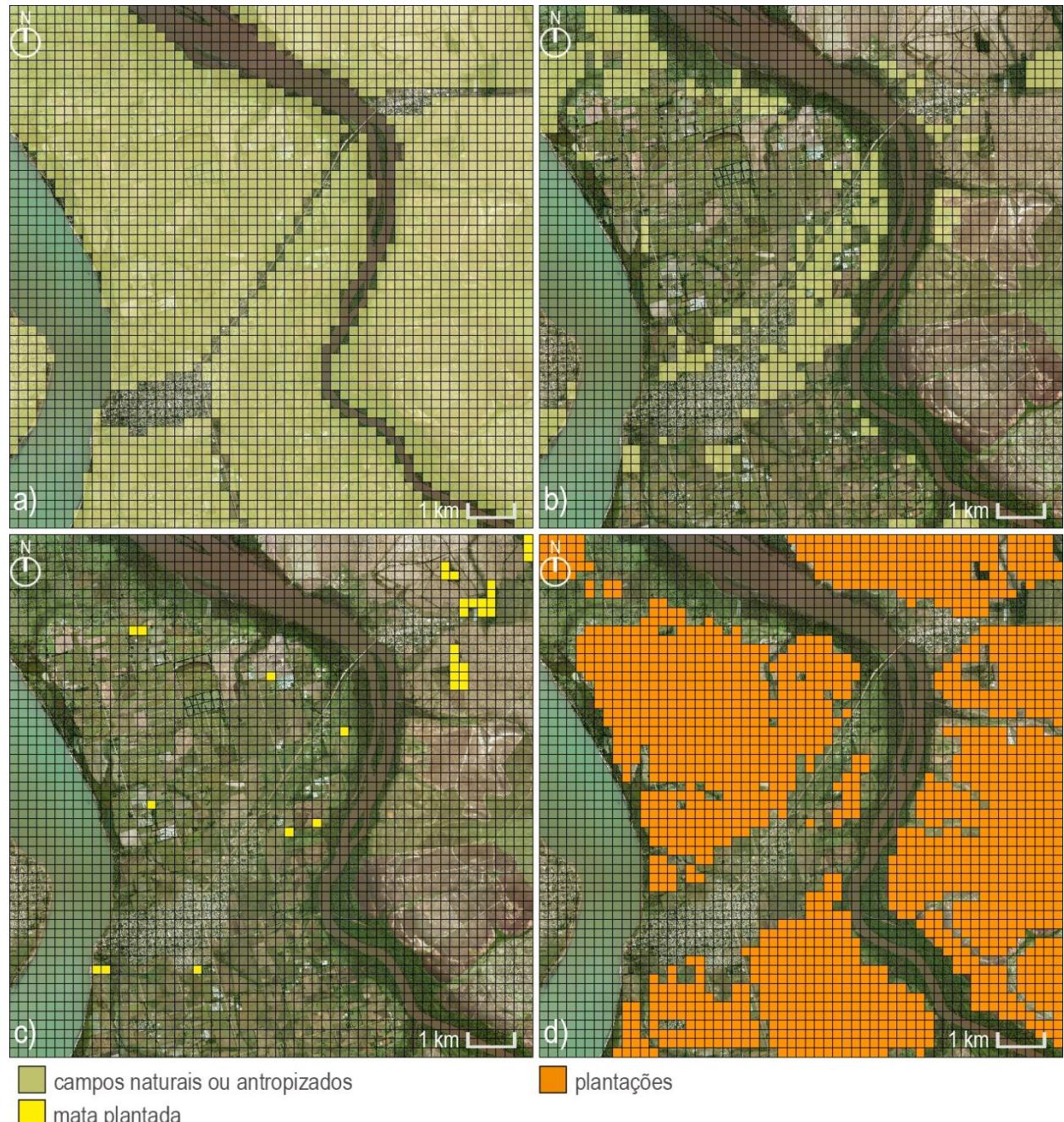
**Figura 4.38** – Atributos urbanos para Barra do Quaraí e Bella Unión: em a) área urbanizada de Barra do Quaraí em 1975; em b) área urbanizada de Bella Unión em 1975; em c) área urbanizada de Barra do Quaraí em 2016; em d) área urbanizada de Bella Unión em 2016. Baumbach (2020).



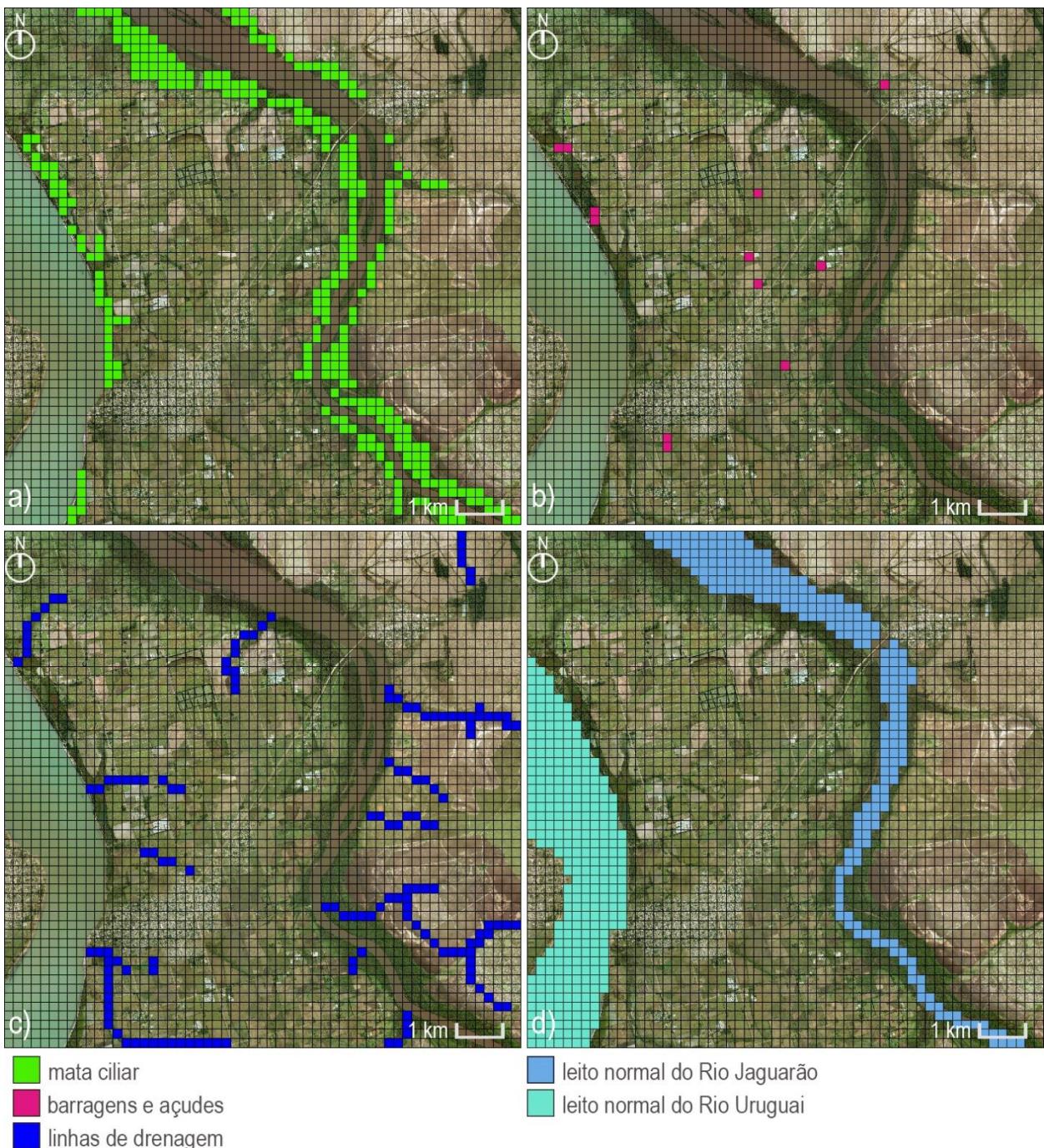
**Figura 4.39 – Atributos urbanos para Barra do Quaraí e Bella Unión: em a) rodovias em 2016; em b) estradas vicinais em 2016; em c) ferrovia existente em 1915; em d) estrada de ligação entre o núcleo urbano e a estação férrea em 1915. Baumbach (2020).**

Os atributos naturais utilizados nas simulações de crescimento para Barra do Quaraí e Bella Unión estão representados nas Figuras 4.40 e 4.41. Para o cenário atual, os dados foram extraídos a partir da imagem de satélite utilizada. Já para o cenário

passado foi considerado como campo natural ou antropizado tudo aquilo que não foi identificado como área urbana ou leito do rio.

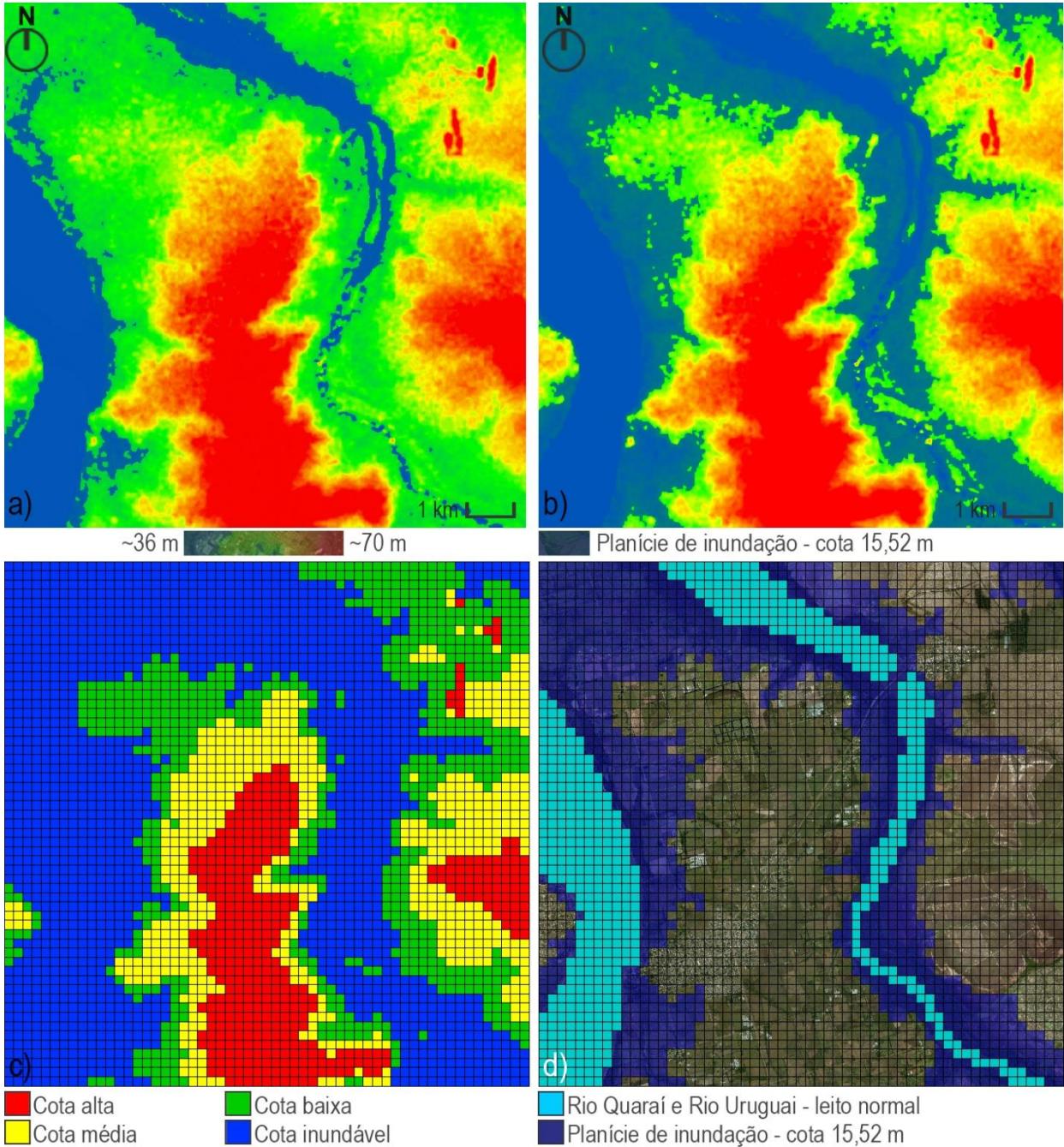


**Figura 4.40** – Atributos naturais para Barra do Quaraí e Bella Unión: em a) campos naturais ou antropizados em 1975; em b) campos naturais ou antropizados em 2016; em c) mata plantada em 2016; em d) plantações em 2016. Baumbach (2020).



As informações de altitude e as áreas de inundação também foram extraídas de mapa hipsométrico do SRTM (Figura 4.42 a, b) através do *GlobalMapper*.

Assim, foram construídos *inputs* naturais para diferenciar as áreas mais altas das áreas mais baixas (Figura 4.42c) e um *input* institucional (Figura 4.42 d), que representa as áreas de inundações dos rios Quaraí e Uruguai, para possibilitar restrições de expansão urbana sobre essas áreas nas simulações.

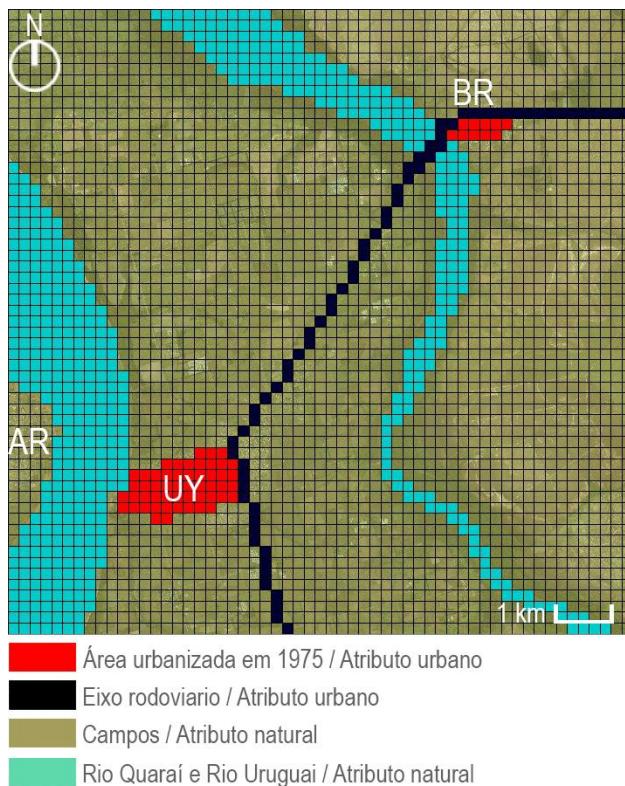


**Figura 4.42 – Mapas hipsométricos e *inputs*.** Em a) mapa hipsométrico com nível do Rio Quaraí e do Rio Uruguai normal; em b) mapa hipsométrico com simulação de maior cota de inundaçāo (15,52m, em 01/06/2001, conforme ANA); em c) *input* natural, diferenciação da área com base nas altitudes; em d) *input* institucional, representa a planície de inundaçāo na cota 15,52m. Baumbach (2020).

### 4.3.3 CALIBRAGEM

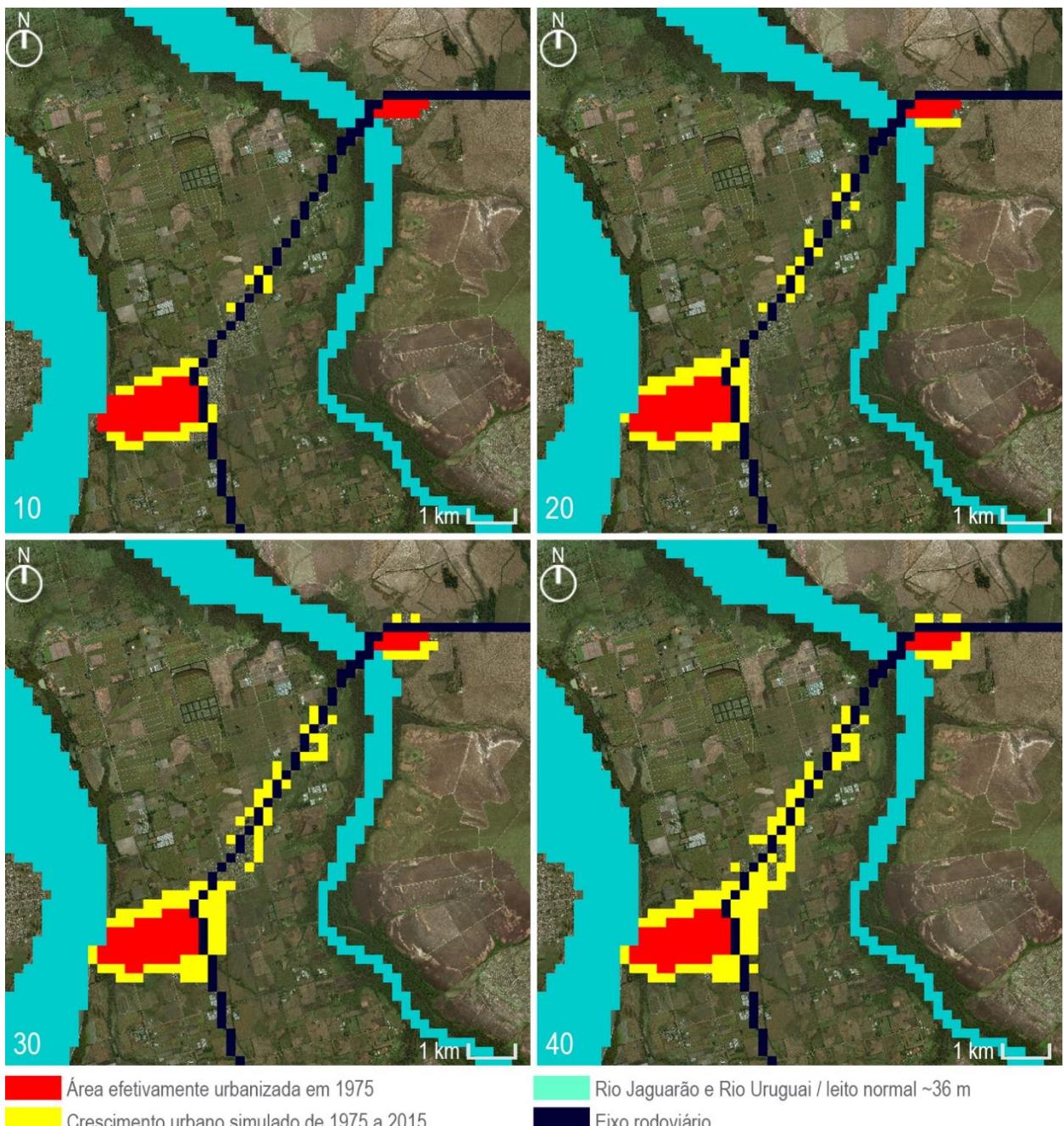
Para Barra do Quaraí e Bella Unión a validação também foi realizada a partir da simulação de crescimento da mancha existente em 1975 (conforme informações cartográficas citadas), até a área efetivamente urbanizada em 2016 (conforme imagem de satélite utilizada para criação dos *inputs* do cenário atual).

A regra utilizada continua a *Threshold Potencial* e o processamento realizado com 40 iterações. O cenário modelado para a realização desse processo está descrito na Figura 4.43.



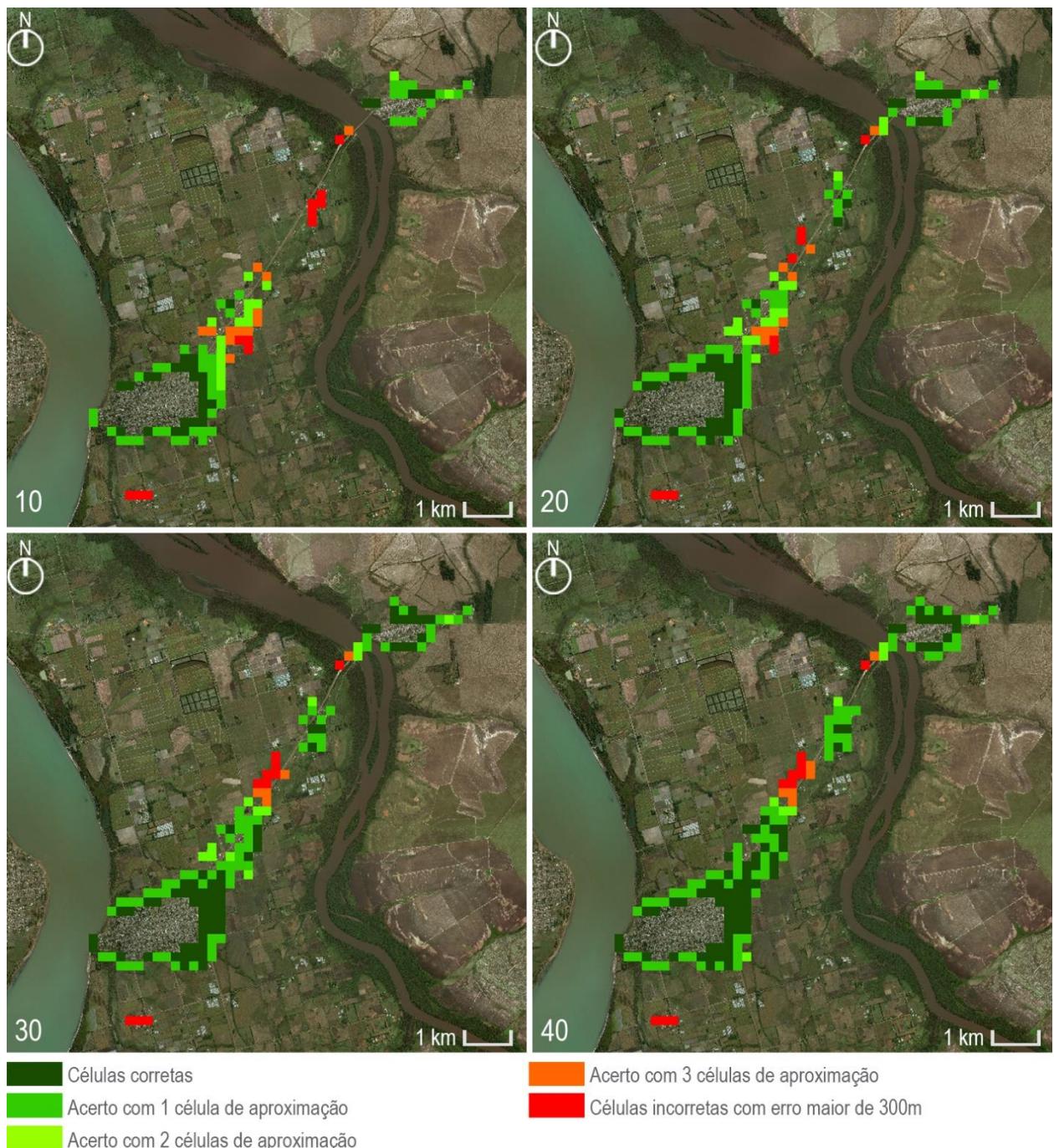
**Figura 4.43 – Cenário modelado no *CityCell* para o ano de 1975. Baumbach (2020).**

A evolução urbana simulada pode ser observada pelo dado de saída *Cell Type*, indicado na Figura 4.44, em amarelo. Estão expostas as iterações de tempo 10, 20, 30 e 40, de um total de 40 iterações processadas no modelo. Cada iteração representa uma evolução temporal de 1 ano, com crescimento de 1% (conforme crescimento indicado para o COREDE da fronteira oeste, 2020, onde se localiza Barra do Quaraí).



**Figura 4.44** – Simulação urbana de 1975 a 2015 para Barra do Quaraí e Bella Unión. Em amarelo o dado de saída *CellType*, que indica as novas células urbanizadas. Baumbach (2020).

Para Barra do Quaraí e Bella Unión também foi aplicado o método de comparação por semelhança difusa (*fuzzy comparison*) para análise entre o cenário urbanizado atual e o simulado (Figura 4.45). Já a tabela 4.3 apresenta o nível de acerto da comparação, em um grau de zero a um.



**Figura 4.45 – Análise Fuzzy Comparison R3 para as iterações 10, 20, 30 e 40. Baumbach (2020).**



**Tabela 4.3** – Tabela da análise *Fuzzy R3*, com grau de zero a um de acerto nas iterações para a simulação de validação das cidades de Barra do Quaraí e Bella Unión. Baumbach (2020).

Para Barra do Quaraí e Bella Unión o nível de acerto para a simulação de crescimento urbano do passado para o presente, em uma escala de zero a um, foi de 0,75. O modelo conseguiu reproduzir o crescimento do passado para o presente tanto em Barra do Quaraí com o em Bella Unión. Com isso, admite-se que o modelo possa ser utilizado para realizar as simulações do presente para o futuro.

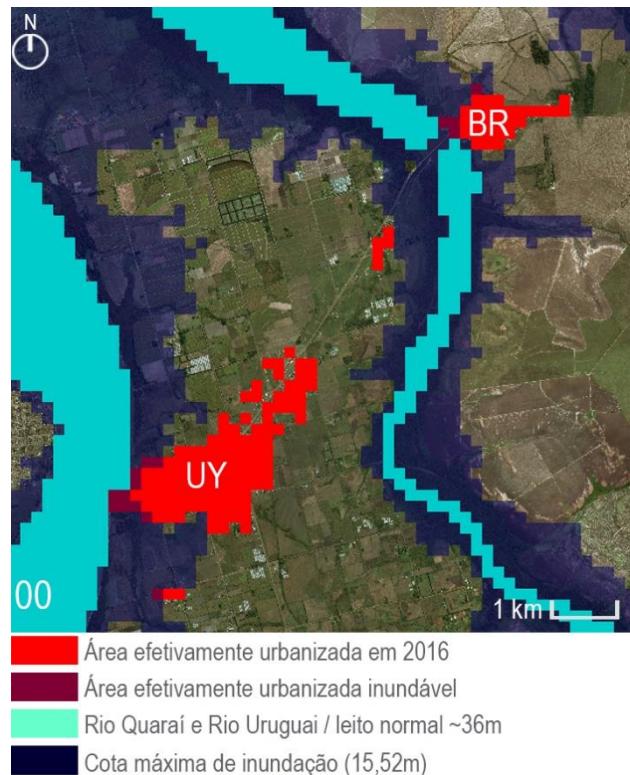
#### 4.3.4 SIMULAÇÃO DE CRESCIMENTO FUTURO

Após a calibragem para Barra do Quaraí e Bella Unión foram realizadas as simulações de crescimento urbano do presente para o futuro, a fim de revelar o processo de crescimento urbano sobre o ambiente hídrico.

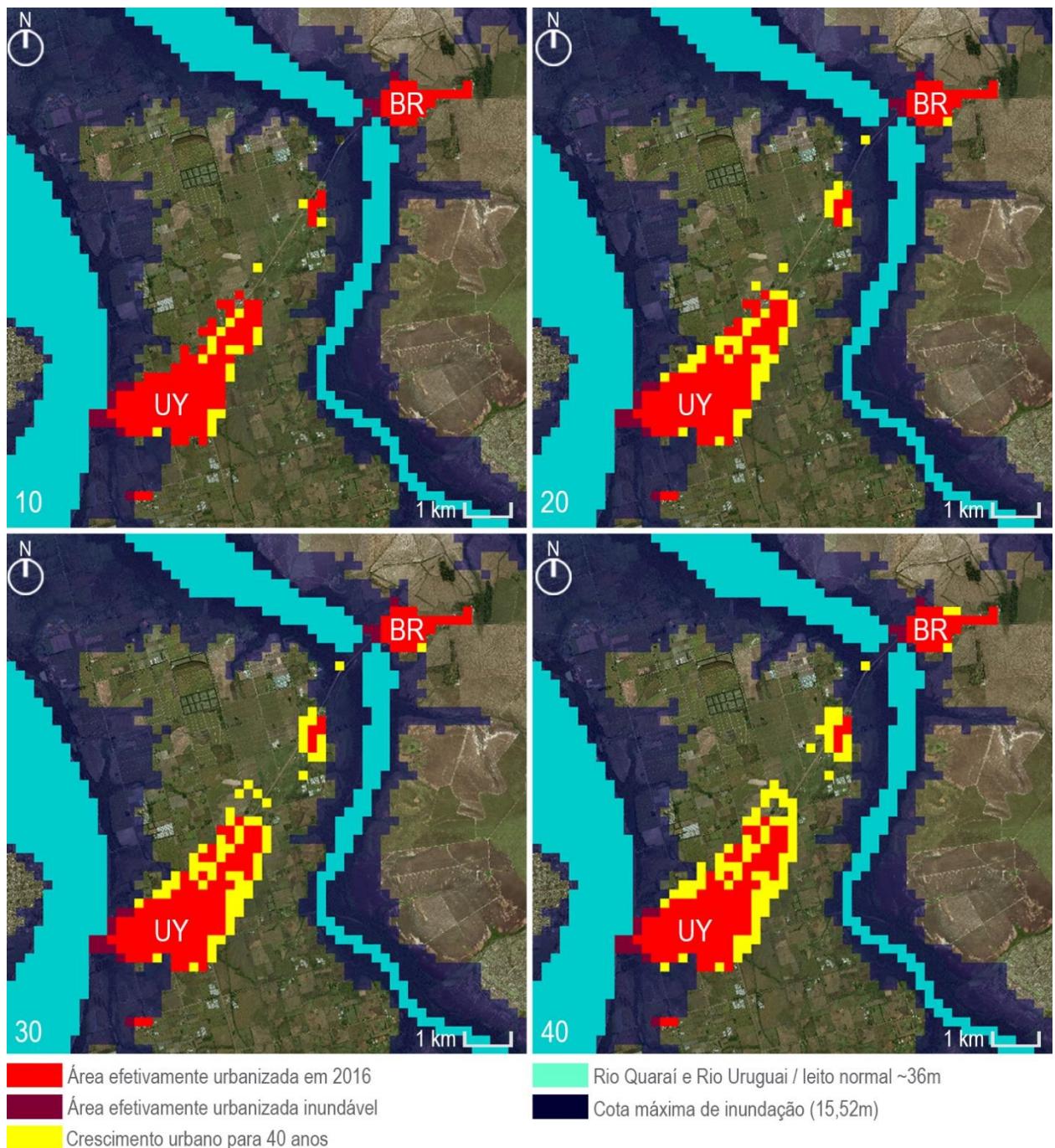
A partir do tempo 00 (ano de 2016, conforme imagem base para criação dos *inputs* do tempo presente), de acordo com a Figura 4.46, foram realizadas as simulações: a) com o atributo que representa a área alagável (Figura 4.42 d, pag. 129) no modo *mutable*, ou seja, com possibilidade de transformação das células desse atributo em células urbanas, para simular o crescimento urbano sobre as áreas alagáveis (Figura

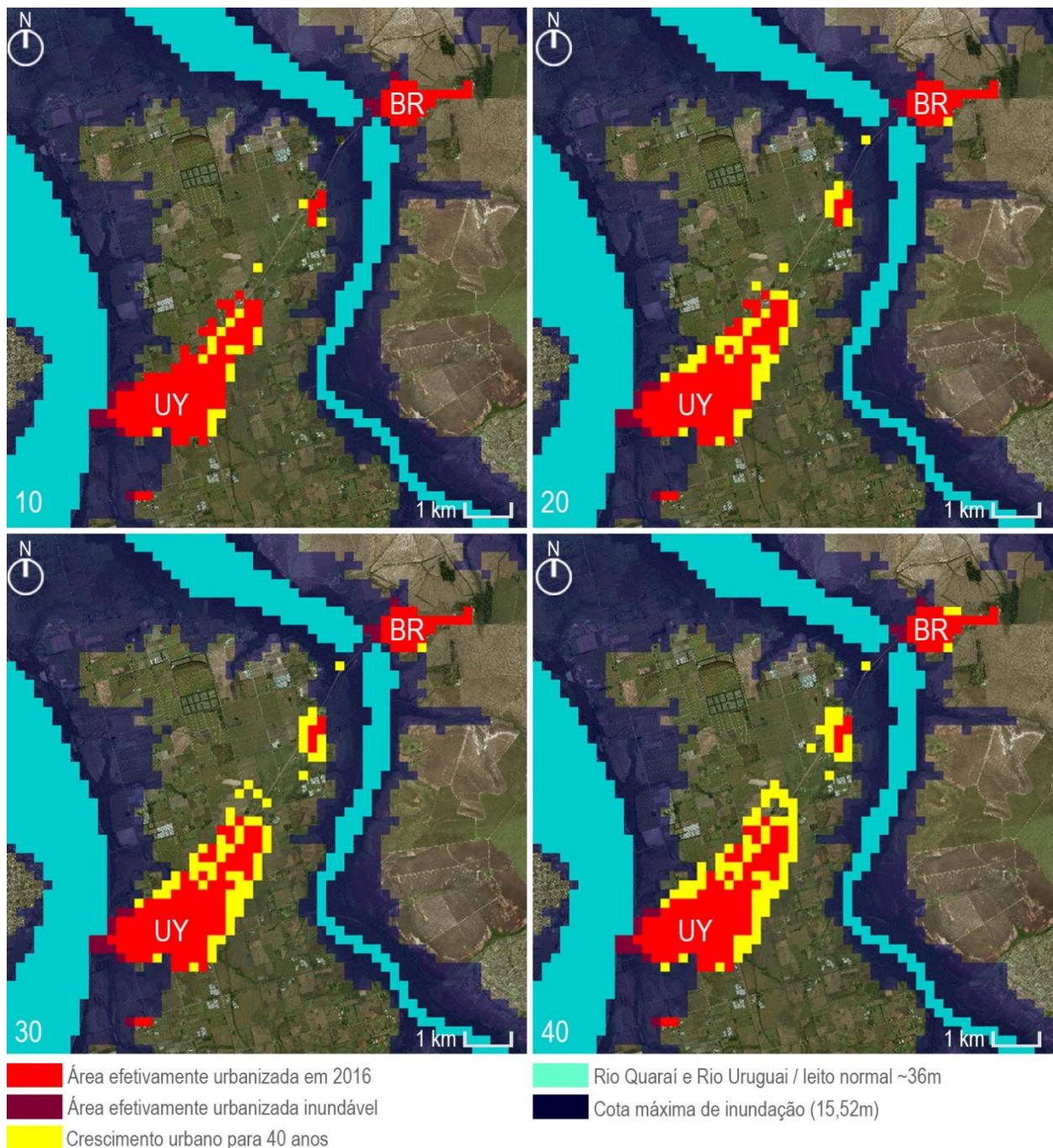
4.47); b) com o atributo no modo *freezing*, ou seja, sem possibilidade de alteração das células desse atributo, para simular o crescimento urbano com proteção das áreas alagáveis (Figura 4.48).

A regra padrão empregada foi a *Threshold Potencial*, com o modelo calibrado para simular uma taxa de crescimento de 1%. O processamento foi executado com 40 iterações representando uma projeção temporal de 40 anos (2016 a 2056).



**Figura 4.46** – Iteração de tempo 00 para ambas as simulações. Baumbach (2020).



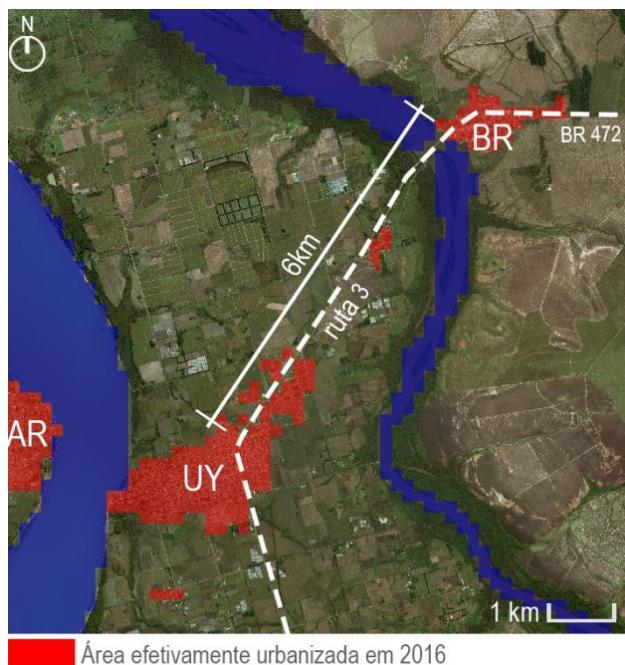


**Figura 4.48** – Simulação de crescimento para Barra do Quaraí e Bella Unión com área alagável *freezing*. Iterações 10, 20, 30 e 40. Baumbach (2020).

#### 4.3.5 SIMULAÇÃO X RESULTADOS ALCANÇADOS

As cidades de Barra do Quaraí e Bella Unión têm seus núcleos urbanos distantes por cerca de 6km, diferentemente de Quaraí / Artigas e Jaguarão / Rio Branco, que têm núcleos mais próximos.

Contudo, Barra do Quaraí e Bella Unión estão interligadas por um modal rodoviário (*ruta 8*, no Uruguai, e BR 472, no Brasil; conectadas pela Ponte Internacional Bella Unión – Barra do Quaraí), que exerce atração à urbanização e funciona como um eixo de desenvolvimento urbano (Figura 4.49). Antes da conexão rodoviária existia ainda uma conexão ferroviária, inaugurada em 1915 e desativada em 1952. Não existe conexão rodoviária ou ferroviária entre Barra do Quaraí – Bella Unión e Monte Caseros, na Argentina.



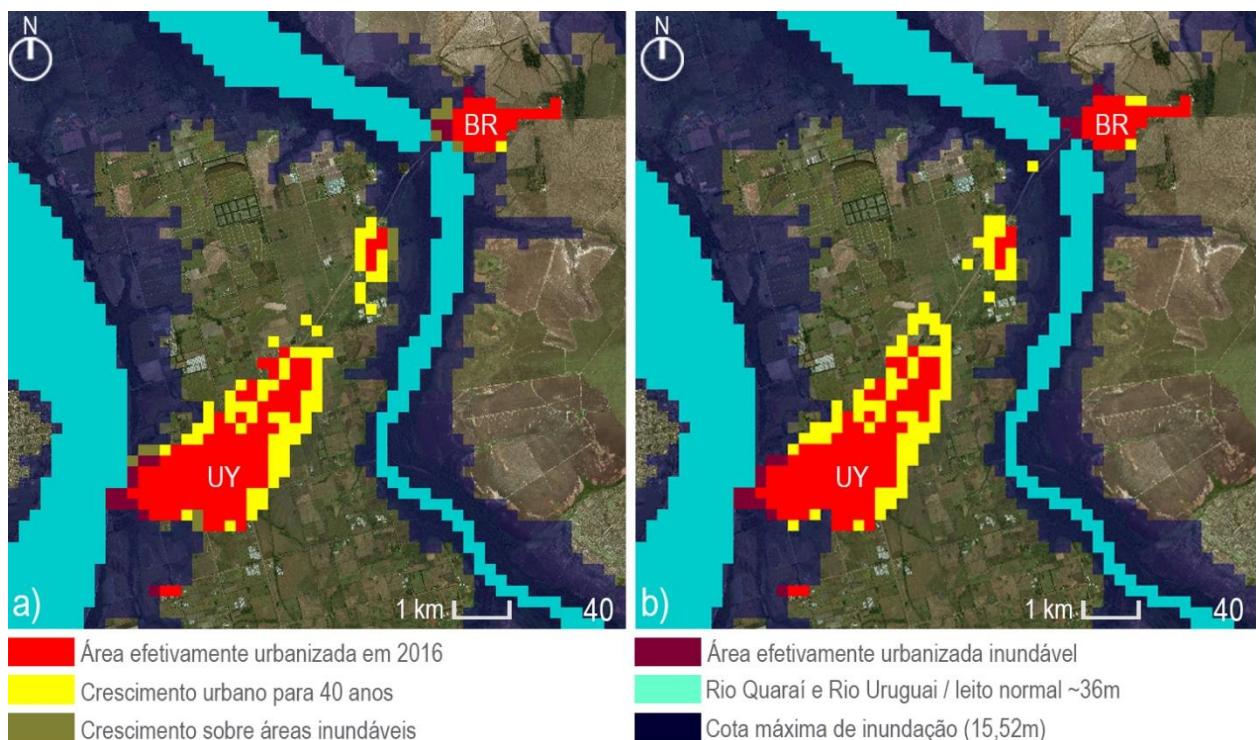
**Figura 4.49** – Contextualização da área de interesse. Baumbach (2020).

Assim, a simulação para o crescimento urbano de Barra do Quaraí e Bella Unión sugere a tendência de crescimento linear, impulsionado pelo vetor de atração que o modal rodoviário exerce, sobre a área periurbana<sup>8</sup> de Bella Unión.

<sup>8</sup> Periurbana marca a transição entre a área urbana e a área rural, onde se desenvolvem atividades urbanas e rurais.

Nas duas simulações a contagem de células urbanas passou de 160 para 244 células, o que representa um acréscimo de área urbana de 640ha para 976ha, ou 52% de aumento de área urbanizada. A contagem de células sobre áreas inundáveis indicadas na Figura 4.50 a foi de 5 células para Barra do Quaraí (20ha) e 7 células para Bella Unión (28ha), o que representa 14% do crescimento urbano sobre áreas inundáveis, em um período de 40 anos. Isso caracteriza pouca área quando comparado ao acréscimo de área sobre as áreas inundáveis nas simulações de Jaguarão / Rio Branco e Quaraí / Artigas.

Assim, a tendência de crescimento linear pôde ser comprovada com os experimentos realizados. Nas duas simulações propostas (com atributo institucional que representa as áreas de inundação – Figura 4.42 d, pag. 129 – *mutable* ou *freezing*) o padrão de crescimento identificado foi o de crescimento linear impulsionado pela conexão rodoviária, sem tendência de expansão sobre áreas alagáveis em nenhum dos casos (Figura 4.50).



**Figura 4.50** – Simulação de crescimento para Barra do Quaraí e Bella Unión: em a) iteração de tempo 40 para a simulação com área alagável *mutable*; em b) iteração de tempo 40 com área alagável *freezing*. Baumbach (2020).

## **5. CONCLUSÕES**

### **5.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS**

O trabalho procurou identificar as características de crescimento urbano sobre as planícies de inundação nas cidades de fronteira entre Brasil e Uruguai através da modelagem urbana com Autômatos Celulares. Para isso, foram realizadas simulações de crescimento urbano para um tempo futuro de 40 anos nas cidades de Jaguarão (BR) – Rio Branco (UY), Quaraí (BR) – Artigas (UY) e Barra do Quaraí (BR) – Bella Unión (UY), cidades que têm parte de sua área urbana sobre planícies de inundação, e que, por esse motivo, periodicamente enfrentam situações de emergência ou estado de calamidade pública pelas inundações naturais.

Para compreender como a área urbanizada se desenvolve foram realizadas simulações com e sem possibilidade de expansão sobre as planícies de inundação, de modo a permitir uma análise comparativa dos resultados de ambas as simulações para as cidades estudadas.

A impossibilidade de expansão urbana sobre as áreas inundáveis procurou simular como a cidade cresceria se consideradas as legislações atuais de proteção às áreas de preservação próximas aos cursos hídricos e a impossibilidade de construir sobre as áreas de inundação, presente na maioria dos planos urbanísticos das cidades.

Já as simulações com possibilidade de expansão sobre as áreas de inundação foram realizadas para entender como seria o desenvolvimento da área urbanizada se desconsideradas as proteções legais de impossibilidade de expansão urbana sobre as planícies de inundações. Isso porque ainda que as áreas sujeitas a inundações sejam menos atrativas para a expansão urbana, na prática ainda há ocupação delas (através de parcelamentos ou posses ilegais), ou adensamento daquelas já ocupadas, como demonstrado na pesquisa através da análise de mapas históricos e na comparação de imagens de satélite.

As cidades de Jaguarão (BR) e Rio Branco (UY) demonstraram tendência de crescimento sobre as planícies de inundação do Rio Jaguarão. Esse crescimento é mais acentuado em Rio Branco (UY), pois a cidade se localiza na margem convexa do meandro do Rio Jaguarão onde há uma grande área sem urbanização sobre a planície

de inundação. Rio Branco também demonstra a propensão da densificação de áreas parcialmente urbanizadas sobre a planície de inundação através da utilização de aterramentos. Os resultados indicam que, se não forem obedecidas as restrições quanto à ocupação e ao adensamento das áreas impróprias, a tendência é de que, em 40 anos, 30% do crescimento urbano total será sobre áreas da planície de inundação do Rio Jaguarão. Isso ocorre porque existe a propensão de Jaguarão e Rio Branco crescerem de modo concêntrico aos seus núcleos urbanos, mas com forte atração de uma cidade à outra, de modo a ocupar as áreas inundáveis que as separam. Se obedecidos os parâmetros de proibição, contudo, a tendência de crescimento é periférica, nas bordas de ambas as cidades, áreas não inundáveis. Nas duas simulações o crescimento da área urbana para ambas as cidades foi de 52% de aumento total.

Quaraí (BR) e Artigas (UY) demonstraram ainda maior tendência de crescimento urbano sobre a planície de inundação do Rio Quaraí. As simulações indicam que, para ambas as cidades, se não forem obedecidas as legislações de restrição à ocupação das áreas impróprias, o crescimento sobre áreas inundáveis pode chegar a 70% do total do crescimento para 40 anos. O maior crescimento sobre as áreas inundáveis foi observado em Artigas (UY), o que pode ser explicado por esta estar localizada na margem convexa do Rio Quaraí, onde há maior disponibilidade de área ainda não urbanizada sobre as planícies inundáveis, enquanto Quaraí se localiza na margem côncava. Quaraí (BR), contudo, apresenta ainda disposição à densificação e parcelamento de áreas inundáveis pré-urbanizadas (ainda que lenta e gradual), projeto da década de 1920 que não foi totalmente executado, mas que está pré-estruturado. A forma urbana resultante nessa hipótese é de crescimento concêntrico a partir de seus núcleos urbanos, também com forte atração de uma cidade à outra, de modo a ocupar a planície de inundação do Rio Quaraí, que as separam. Se obedecidas as legislações de proibição de ocupação das áreas impróprias à urbanização, entretanto, a tendência de crescimento é periférica (assim como em Jaguarão e Rio Branco) sobre áreas não inundáveis das bordas de ambas as cidades. A área urbanizada total nessas simulações demonstra um acréscimo de 52%.

Por fim, Barra do Quaraí (BR) e Bella Unión (UY), quando comparada com as outras cidades estudadas, apresentaram pouca tendência de expansão urbana sobre as

planícies de inundação do Rio Quaraí. Bella Unión (UY) também apresentou alguma propensão de crescimento sobre a planície de inundação do Rio Uruguai. Em ambas as simulações a área urbanizada obteve um acréscimo de 52%. Na simulação com possibilidade de crescimento sobre as planícies de inundação o resultado obtivo foi de que, em 40 anos, 14% do crescimento urbano pode ser sobre as áreas inundáveis. Ainda que esta zona seja a confluência de importantes rios e apresenta grandes áreas de planície de inundação, o maior crescimento urbano nas duas simulações (com e sem possibilidade de crescimento sobre as áreas inundáveis) foi observado no eixo de ligação entre as cidades. Essa área está localizada na zona de interflúvio entre as bacias do Rio Quaraí e do Rio Uruguai, em zona não inundável.

As cidades estudadas tiveram sua ocupação historicamente relacionada ao domínio e controle territorial por parte das coroas portuguesa e espanhola. Postos e guardas militares foram fundados e desenvolveram-se em núcleos urbanos, que mais tarde adquiriram o status de cidades. A configuração urbana geral encontrada, ainda que com algumas diferenças e particularidades, é a ortogonalidade e linearidade da malha xadrez, que possibilitava maior supervisão e domínio territorial. Há essa época, porém, as cidades eram instituídas em áreas bem drenadas, ainda que próximas aos rios. Foi com o passar do tempo, contudo, que a falta de controle e planejamento urbano (ou, ainda, planejamentos equivocados, como demonstrado em Quaraí) levaram à expansão inadequada sobre as áreas de planícies de inundação. Hoje, por isso, as cidades sofrem periodicamente com as inundações naturais, as quais não se podem evitar.

Os resultados encontrados confirmam as tendências levantadas para cada cidade analisada. Se não cumpridos rigorosamente os planos de prevenção e proibição de ocupação e densificação das áreas em planícies de inundação, as cidades tendem a se expandir sobre estas áreas, ainda que de forma lenta e gradual. A centralidade urbana pareceu exercer força em Jaguarão / Rio Branco e Quaraí / Artigas, enquanto Barra do Quaraí / Bella Unión demonstraram tendência de crescimento linear sobre o eixo de ligação entre elas.

Desse modo, cumpre-se o objetivo geral do trabalho de identificar padrões de crescimento urbano sobre as planícies de inundação nas cidades de fronteira entre Brasil

e Uruguai. As cidades são direcionadas a partir de seus eixos de estruturação, definidos basicamente pelas vias de circulação, que representam grande força de atração à urbanização, de forma a promover a ligação (ou a aproximação máxima) entre as cidades, ainda que em áreas inundáveis.

Os objetivos específicos estabelecidos também foram atingidos: o processo de evolução das cidades com o contexto hídrico local foi analisado e demonstrado ainda no capítulo 1, através das relações morfológicas estabelecidas entre o crescimento urbano e o sistema hídrico das cidades estudadas, como demonstrado nas Figuras 1.10, 1.11 e 1.12 (páginas 33, 34 e 35, respectivamente), nesse aspecto, foi utilizada a abordagem morfológica tradicional, que, através da análise de mapas, imagens ou outros dados históricos, revela aspectos da estrutura urbana de um tempo passado ao atual; os vetores de crescimento das cidades foram identificados ao se completar o objetivo geral, onde foram assinalados os eixos de ligação das cidades – atualmente identificados através das vias de circulação – como principais vetores de indução ao crescimento urbano; e por fim, a realização das simulações de expansão urbana com recursos de modelagem urbana, já dentro da abordagem morfológica da análise espacial, objetivando encontrar aspectos da forma urbana no tempo que vai do presente ao futuro, conforme relacionado no capítulo 4.

Foi identificada a força de atração à urbanização nos eixos de ligação entre as cidades, antigamente representados pelas ligações ferroviárias e, atualmente, pelos eixos rodoviários. Os resultados encontrados, então, indicam a tendência de aglutinação urbana de modo que as cidades tendem a se expandir uma ao encontro da outra, até o limite onde se pode urbanizar: o rio que as separa. Nesse processo de crescimento as linhas de drenagem de ordem primária e secundária são suprimidas através de aterramentos ou modificadas e desviadas através de canalizações. Por isso, salienta-se a necessidade de políticas públicas eficientes que impeçam o desenvolvimento urbano, tanto de novos parcelamentos como de densificação urbana, sobre as linhas de drenagem naturais e sobre as áreas localizadas em planícies de inundações.

## **5.2 LIMITAÇÕES DA PESQUISA**

As principais limitações da pesquisa estão relacionadas à utilização da plataforma *CityCell*. Ainda que simples de ser utilizada, é necessário treinamento até que se adquira familiaridade e domínio da mesma. A calibração do sistema para a realização da validação do modelo é feita manualmente através da alteração de parâmetros, que precisam ser modificados até que se obtenha um resultado satisfatório de análise do passado para o presente a fim de que se realizem as simulações do presente para o futuro.

O mapeamento progresso das cidades estudadas também pode trazer dificuldade, dependendo do tempo que se busca resgatar. Para a década de 70, no Brasil, há o levantamento organizado pelo Exército Brasileiro e disponibilizado gratuitamente a partir de cartas matriciais. Para as cidades uruguaias, contudo, foi necessária uma profunda pesquisa documental até que se encontrassem os dados necessários referente à urbanização de épocas passadas.

A pesquisa também não considerou aspectos particulares intrínsecos às dinâmicas locais de cada país, como planos de contingenciamento ou planejamento de novas áreas urbanas definidos nas legislações locais. Uma possibilidade de aprimoramento seria comparar os resultados obtidos às legislações específicas de cada localidade.

Também não foram diferenciados aspectos da área intraurbana, como uso predominante do solo urbano, densidades, renda e custo do solo, os quais demandariam maior tempo de análise devido à alta complexidade para levantamento e compilação dos dados. Foi optado pela simplificação em definir o ambiente urbanizado com o mesmo peso de atração à urbanização, ainda que não corresponda às dinâmicas reais, onde solos com maior valorização, com melhor infraestrutura e maior centralidade são mais atrativos à urbanização. Dessa forma, ainda que reduzida a complexidade para alimentação do sistema, obtiveram-se resultados satisfatórios para o propósito do trabalho.

### **5.3 POSSIBILIDADE DE REPLICAÇÃO**

O trabalho realizado teve como objeto de estudo as cidades da fronteira do Rio Grande do Sul com o Uruguai definidas com algum grau de vulnerabilidade a inundações. A escolha da área de estudo foi baseada no interesse de análise das cidades de fronteira, as quais vêm sendo objeto de estudo em alguns trabalhos desenvolvidos no PROGRAU, como explicado anteriormente.

As cidades estudadas estão localizadas próximas à foz dos rios, áreas onde a topografia é menos acentuada que na vertente dos mesmos. Assim, as dinâmicas encontradas foram semelhantes, haja visto que o modo de implantação e espalhamento das cidades se assemelham: foram estabelecidas em locais bem drenados e, com o passar dos anos, se expandiram às planícies de inundaçāo. Contudo, é provável que os resultados para cidades localizadas em superfícies acidentadas sejam diversos, dado que as planícies de inundações não são tão estendidas como nas áreas aqui analisadas.

Contudo, pela simplicidade do modelo, com a devida orientação e apoio no uso da plataforma e a facilidade de acesso à maioria dos dados de entrada (os quais são extraídos de imagens de satélite, sem necessidade de visita a campo), seria possível estender as simulações e análises a outras cidades que passem por inundações.

### **5.4 CONSTRIBUIÇÕES DA PESQUISA**

Conclui-se, assim, essa pesquisa, que através de simulações de crescimento urbano futuro buscou compreender o processo de expansão urbana sobre as áreas de planícies de inundações das cidades da fronteira entre o Brasil e o Uruguai. Como principal contribuição está o fato de revelar dados e informações do que pode acontecer com a forma urbana se não tomadas as precauções de evitar o desenvolvimento ou adensamento urbano sobre as áreas inundáveis. Quais áreas de risco e onde é provável que ocorra a ocupação das planícies de inundaçāo foram algumas das questões que o trabalho respondeu.

Ao mesmo tempo, também foi apresentada uma ferramenta de auxílio ao planejamento e estudo urbanos, a qual é capaz de contribuir para o estudo da forma urbana ao revelar possíveis morfologias que a cidade possa ter em um tempo futuro.

Saber a forma urbana em um tempo futuro é possível se a cidade tiver um plano de expansão e crescimento. Mas e se os planos não forem seguidos? Como poderá se desenvolver a cidade e qual a forma resultante desse processo? Com a utilização da plataforma de crescimento urbano foi possível identificar essa questão, revelando os aspectos morfológicos além dos planos e projetos atuais.

Há também a questão da fronteira internacional, lugar de limite, afastamento e transição, onde existem sobreposições de jurisdições e interesses, mas que também representa conexão, proximidade e aliança, afinal há tantos aspectos em comum como a identidade cultural do povo, o pampa, o rio, a água, o sofrimento pelas inundações, a distância dos centros políticos: as cidades uruguaias longe de Montevideo, as brasileiras afastadas de Porto Alegre, ou ainda mais de Brasília. Se dividimos angústias e alegrias, porque trabalhar apenas com as cidades brasileiras? Não. O trabalho aqui proposto buscou a integração, a cheia que acontece de um lado também atinge o outro, a água é uma só.

Contribui-se, desse modo, ao planejamento urbano, na busca de que os erros do passado (o avanço da cidade sobre as águas) não se repitam e que a cidade possa ser lugar de todos, democrática, com acesso à terra seca e drenada. Que a convivência entre o urbano e o ambiental seja menos dramática e trágica e mais pacífica e sossegada. Que quando a água avance na sua dinâmica natural não invada casas e destrua vidas, mas que siga seu curso natural em harmonia com o meio urbano.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABIKO, Alex Kenya; et al. **Urbanismo: história e desenvolvimento.** São Paulo: EPUSP, 1995.
- ABOLHASANI, S; et al. **Simulating urban growth under planning policies through parcel-based cellular automata (ParCA) model.** In: International Journal of Geographical Information Science, n.11, v.30, p. 2276-2301, 2016.
- ACHARYA, A; et al. **City planning using integrated urban modelling: Jeddah Structure Plan.** In: Anais de 11<sup>th</sup> Space Syntax Symposium Lisbon. Portugal: Instituto Superior Técnico, 2017.
- AHMED, S; BRAMLEY, G. **How will Dhaka grow spatially in future? Modelling its urban growth with a near-future planning scenario perspective.** In: International Journal of Sustainable Built Environment, n.2, v.4, p. 359-377, 2015.
- ALLEN, P. M. **Cities and regions as self-organizing systems: models of complexity.** Amsterdam: Taylor & Francis, 1997.
- ALLEN, P. M; SANGLIER, M; BOON, F. **Intra-urban Evolution – Part II.** In: KAHN, D. (Ed.) *Models of urban settlement and structure as dynamic self-organizing systems.* Washington: Departament of Tranportation, 1981.
- ALMEIDA, C. M. **Modelagem da dinâmica espacial como uma ferramenta auxiliar ao planejamento: simulação de mudanças de uso da terra em áreas urbanas para as cidades de Bauru e Piracicaba (SP), Brasil.** 351 f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2003.
- ALMEIDA, C. M; MONTEIRO, A. M; CÂMARA, G. **Modelos de simulação e prognósticos de mudanças de uso do solo urbano: instrumento para subsídio de ações e políticas públicas urbanas.** In: Anais da ANPUR, 2005. Salvador, 2005.
- ALMEIDA, C. M; MONTEIRO, A. M. V; CÂMARA, G. **Perspectiva histórica de modelos de dinâmicas urbanas e regionais.** In: ALMEIDA, C. M; CÂMARA, G; MONTEIRO, A. M. V. (Orgs). *Geoinformação em urbanismo: cidade real x cidade virtual.* São Paulo: Oficina de Textos, 2007. p. 254-285.
- ALMEIDA, Paula E. G. **A política Nacional de Proteção e Defesa Civil: os desastres como problema político.** In: Anais do Seminário Internacional de Ciência Política da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2015.
- ALMEIDA, Reginaldo Magalhães de. **Uma Cidade Industrial' de Tony Garnier: repensando a gênese do urbanismo progressista.** In: Revista de Morfologia Urbana, n.1, v.5, p. 15-26, 2017.
- ANA. **A evolução da gestão dos recursos hídricos no Brasil.** Agência Nacional de Águas: Brasília, 2002.
- ANA. **Atlas de Vulnerabilidade a Inundações do Rio Grande do Sul.** Agência Nacional de Águas: Brasília, 2012.
- ANA. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil.** Agência Nacional de Águas: Brasília, 2017.
- AMORIM, Luiz; BARROS FILHO, Mauro. **Convergência de métodos de descrição da forma urbana: análise de textura de imagens de satélite e análise gráfica visual.** In: Revista de Morfologia Urbana, n.2, v.5, p. 65-81, 2017.
- AMORIM, L; GRIZ, C. **Cidades: urbanismo, patrimônio e sociedade.** Recife: Editora Livro Rápido – Pós-graduação em Desenvolvimento Urbano UFPE, 2008.
- ARAI, T; AKIYAMA, T. **Empirical analysis for estimating land use transition potential functions: case in the Tokyo metropolitan region.** In: Computers, Environment and Urban Systems, n.28, p. 65-84, 2004.
- AUANATI, Daniel; BENEDETTO, Mario; PERDOMO, Walter. **Los Departamentos - Artigas.** Montevideo: Nuestra Tierra, 1970.
- BARREIRA, P; AGUILERA, F; GÓMEZ, M. **Implementation and calibration of a new irregular cellular automata-based model for local urban growth simulation: the MUGICA model.** In: Environment and Planning B, n.2, v.46, p. 243-263, 2019.

- BARRELLA, W; et al. **As relações entre as matas ciliares os rios e os peixes.** In: RODRIGUES, R. R; LEITÃO FILHO; H. F. (Ed.) *Matas ciliares: conservação e recuperação*. 2.ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2001.
- BARREDO, J; et al. **Modelling dynamic spatial processes: simulation of urban future scenarios through cellular automata.** In: *Landscape and Urban Planning*, v.64, p. 145-160, 2003.
- BAR-YAM, Yannar. **Dynamics of complex systems.** Boston: Addison-Wesley, 1997.
- BASTIDE, Roger. **Terra de contrastes.** São Paulo: Difusão Europeia do Livro, 1959.
- BATTY, Michael. **Cellular automata and urban simulation: where do we go from here?** In: *Environment and Planning B*, n.2, v.28, p. 163-168, 2001.
- BATTY, Michael. **Cities and complexity.** Cambridge: MIT Press, 2005.
- BATTY, Michael. **Classifying urban models.** In: *Environment and Planning B*, n.2, v.43, p. 251-256, 2016.
- BATTY, Michael. **From cells to cities.** In: *Environment and Planning B*, n.1, v.21, p. 31-48, 1994.
- BATTY, Michael. **Urban analytics defined.** In: *Environment and Planning B*, n.3, v.46, p. 403-405, 2019.
- BATTY, Michael. **Urban evolution on the desktop: simulation with the use of extended cellular automata.** In: *Environment and Planning A*, n.11, v.30, p. 1943-1967, 1998.
- BATTY, Michael. **Urban modelling: algorithms, calibrations, predictions.** Cambridge: Cambridge University Press, 1976.
- BATTY, Michael. **Urban systems as cellular automata.** In: *Environment and Planning B*, n.2, v.24, p. 159-164, 1997.
- BATTY, Michael. **Urban Modeling.** In: [THRIFT, Nigel; KITCHIN, Rob. (Ed.)]. *International encyclopedia of Human Geography*. Oxford, UK, Elsevier, 2009. p. 51-58.
- BATTY, Michael. **The New Science of Cities.** Cambridge: MIT Press, 2013.
- BATTY, Michael; XIE, Y; SU N, Z. **Modeling urban dynamics through GIS-based cellular automata.** In: *Computers, Environment and Urban Systems*, n.23, p. 205-233, 1999.
- BEHNISCH, Martin; HECHT, Robert; HEROLD, Hendrik; JIANG, Bin. **Urban big data analytics and morphology.** In: *Environment and Planning B*, n.7, v.46, p. 1203-1205, 2019.
- BENATI, S. **A cellular automaton for the simulation of competitive location.** In: *Environment and Planning B*, n.2, v.24, p. 205-218, 1994.
- BENENSON, I; TORRENS, P. M. **Geosimulation: automata-based modeling of urban phenomena.** London: John Wiley, 2004.
- BERLEKAMP, E. R; CONWAY, J. H; GUY, R. K. **Winning ways for your mathematical plays.** Wellesley: A K Peters Ltd., 2004.
- BERTALANFFLY, Ludwig. **A Teoria Geral dos Sistemas.** Petrópolis: Vozes, 1975.
- BLUE, Victor; ADLER, Jeffrey. **Cellular automata microsimulation of bidirectional pedestrian flows.** In: *Transportation Research Record*, v.1678, p. 135-141, 1999.
- BLUE, Victor; ADLER, Jeffrey. **Emergent fundamental pedestrian flows from cellular automata microsimulation.** In: *Transportation Research Record*, v.1644, p. 29-36, 1998.
- BONETT NETO, J. **Panorama sobre métodos quantitativos de análise espacial, modelagem urbana e geotecnologias aplicados ao planejamento urbano no Brasil: evolução histórica e perspectivas contemporâneas.** In: *Anais do XVI ENANPUR*. Belo Horizonte: ANPUR. 2015.

- BORGES, Fernanda; FERREIRA, Vanderlei. **Planícies de inundação e áreas inundáveis: análise comparativa dos conceitos mediante aplicação nas bacias hidrográficas do Ribeirão Bom Jardim e Rio das Pedras, Triângulo Mineiro.** In: Revista Cerrados, n.1, v.17, p. 114-130, 2019.
- BORSATO, F. H; MARTONI, A. M. **Estudo da fisiografia das bacias hidrográficas urbanas no município de Maringá, estado do Paraná.** In: Revista Acta Scientiarum. Maringá - PR.v.26, n.2, p. 273-285, 2004.
- BRAGA, Andrea da Costa. **A espacialização de trocas multiculturais em conurbações internacionais da fronteira Brasil - Uruguai.** 567 f. Tese (Doutorado em Planejamento Urbano e Regional) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.
- BRASIL. Lei n. 9433, de 8 de janeiro de 1997. **Regulamentação da Política e do Sistema Nacional de Recursos Hídricos.** Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 9 de janeiro de 1997. Disponível em: <<http://www.planalto.gov.br/CCIVIL/LEIS/L9433.htm>>. Acesso em 3/11/17.
- BRASIL. Lei n. 11.455, de 5 de janeiro de 2007. **Diretrizes Nacionais e Política Federal de Saneamento Básico.** Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 5 de janeiro de 2007. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2007-2010/2007/Lei/L11455.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2007/Lei/L11455.htm)>. Acesso em 17/05/19.
- BRASIL. Lei n. 12.608, de 10 de abril de 2012. **Política Nacional de Proteção e Defesa Civil.** Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 10 de abril de 2012. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2011-2014/2012/Lei/L12608.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Lei/L12608.htm)>. Acesso em 19/08/19.
- BRITTO, A. L. N. P; SILVA, V. A. C. **Viver às margens dos rios: uma análise da situação dos moradores da favela Parque Unidos de Acari.** In: COSTA, Lucia M. S. A. (Org.). Rios e Paisagens em Cidades Brasileiras. 1ed. Rio de Janeiro: Viana & Mosley/PROURB, 2006, v.1, p. 17-34.
- CANNIGIA, Gianfranco; MAFFEI, Gian Luigi. **Architectural composition and building typology: interpreting basic building.** Firenze: Alinea Editrice srl, 2001.
- CÂMARA, G; MONTEIRO, A. M. V; MEDEIROS, J. S. **Representações computacionais do espaço: fundamentos epistemológicos da ciência da geoinformação.** In: Geografia, n.1, v.28, p. 83-96, 2003.
- CARDOSO, Ana Cláudia; MELO, Ana Carolina; GOMES Taynara. **O urbano contemporâneo na fronteira de expansão do capital: padrões de transformações espaciais em seis cidades do Pará, Brasil.** In: Revista de Morfologia Urbana, n.1, v.4, p. 5-28, 2016.
- CARDOSO, Joao Luis; QUINTELA, Antônio de Carvalho; MASCARENHAS, José Manuel. **Os Romanos e a Água.** In: Portugal Romano, a exploração dos recursos naturais. Lisboa: Cromotipo Artes Gráficas, 1997.
- CEPED, UFSC. **Atlas Brasileiro de Desastres Naturais: 1991 a 2012.** Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres. 2ed. Florianópolis: CEPED-UFSC, 2013.
- CHAI, Chen; et al. **Fuzzy cellular automata models for crowd movement dynamics at signalized pedestrian crossings.** In: Transportation Research Record, v.2490, p. 21-31, 2019.
- CHENG, J; MASSER, I. **Understanding spatial and temporal processes of urban growth: cellular automata modelling.** In: Environment and Planning B, n.2, v.31, p. 167-194, 2004.
- CHRISTOFOLLETTI, Antonio. **Geomorfologia.** São Paulo: Editora Edgard Blucher, 1974.
- CLARK, C. **Urban population densities.** In: Journal of the Royal Statistical Society, v.114, p. 490-496, 1951.
- CLARKE, K; GAYDOS, L. **Loose-coupling a cellular automaton model and GIS: long-term urban growth prediction for San Francisco and Washington/Baltimore.** In: International Journal of Geographical Information Science, n.7, v.12, p. 699-714, 1998.
- COBRADE. **Classificação e codificação brasileira de desastres.** Brasília, 2012. Disponível em: <<https://www.bombeiros.go.gov.br/wp-content/uploads/2012/06/1.-Codifica%C3%A7%C3%A3o-e-Classifica%C3%A7%C3%A3o-Brasileira-de-Desastres-COBRADE2.pdf>>. Acesso em 15/08/19.
- CORBIN, Alan. **O Olfato e o Imaginário Social nos Séculos XVIII e XIX.** São Paulo: Companhia das letras, 1987.

**COREDE. Crescimento populacional.** 2020. Disponível em: <<http://atlassocioeconomico.rs.gov>>. Acesso em: 20/09/2010.

COSTA, Lucia M. S. A. **Águas urbanas: os rios e a construção da paisagem**. In: Encontro Nacional de Ensino de Paisagismo em Escolas de Arquitetura e Urbanismo, VI, Recife, 2002. Anais... Recife: [S.I.], 2002.

COSTA, Stael de Alvarenga Pereira. **Encontro de Mentes: Investigações sobre os conceitos comuns e abordagens diferenciadas das principais Escolas de Morfologia Urbana.** Relatório Final de Pesquisa (FAPEMIG) – Laboratório da Paisagem – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

COSTA, Stael de Alvarenga Pereira; et al. **Conceitos de preservação e de permanência nos trabalhos simultâneos de Sylvio de Vasconcellos e M. R. G. Conzen: uma sincronicidade?** In: 1º Simpósio Científico ICOMOS Brasil. Belo Horizonte, 2017.

COSTA, Stael de Alvarenga Pereira; et al. **Os elementos tipo-morfológicos dos sistemas de espaços livres do município de Belo Horizonte**. In: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, Belo Horizonte, 2009.

COSTA, Stael de Alvarenga Pereira; NETTO, Maria Manoela Gimmler. **Fundamentos de Morfologia Urbana**. Belo Horizonte: C/Arte, 2015.

COSTA, Stael de Alvarenga Pereira. **Relatos sobre o ensino de Morfologia Urbana na UFMG**. In: Revista de Morfologia Urbana, n.1, v.3, p. 67-69. 2015.

COSTA, Staél de Alvarenga Pereira; TEIXEIRA, Maria Cristina Villefort. **The study of urban form in Brazil**. In: *Urban Morphology*, n.2, v.18, p. 119-127, 2014.

COUCLELIS, H. **Cellular dynamics: how individual decisions lead to global change.** In: European journal of operational research, v.30, 1987.

COUCLELIS, H. **Where has the future gone? Rethinking the role of integrated land-use models in spatial planning.** In: Environment and Planning A, v.37, 2005.

CPRM – DEGET. Processo Hidrológicos – inundações, enchentes, enxurradas e alagamentos na geração de áreas de risco. Vitória 2017. Disponível em: <<https://defesacivil.es.gov.br/Media/defesacivil/Capacitacao/Material%20Did%C3%A1tico/CBPRG%20-202017/Processos%20Hidrol%C3%B3gicos%20%20%20Inunda%C3%A7%C3%A3o%20%20Enchente%20Enxurradas%20Alagamentos%20na%20Gera%C3%A7%C3%A3o%20de%20reas%20Risco.pdf>>. Acesso em 05/09/19.

CPRM – DEGET. Setorização de Áreas em Alto e Muito Risco a Movimentos de Massa, Enchentes e Inundações. Brasília, 2019. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/Sobre/Estrutura-Organizacional/Departamento-de-Gestao-Territorial---DEGET-224.html>>. Acesso em 05/09/19.

CUNHA, Ana P; et al. **Brazilian experience on the development of drought monitoring and impact assessment systems**. Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction. GAR. 2019.

DALCIN, Guilherme Kruger; SILVA, André de Souza. **Simulando cenários futuros: modelagem de dinâmicas do uso do solo como suporte ao planejamento urbano.** In: Anais do XVIII ENANPUR. Natal: ANPUR. 2019.

DANTAS, Ana Claudia de Miranda. **Cidades coloniais americanas**. In: Arquitextos, n.050.05, Vitruvius, 2004. Disponível em: <<http://vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/05.050/566>>. Acesso em: 25/11/2020.

DE MIRANDA, Ricardo Augusto Calheiros; DE OLIVEIRA, Marcus Vinícius Siqueira; DA SILVA, Danielle Ferreira. **Ciclo hidrográfico planetário: abordagens e conceitos**. Geo UERJ, v.1, n.21, p. 109-119, 2010.

DNAEE. Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica. **Glossário de termos hidrológicos**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 1976.

DESONIE, Dana. **Our Fragile Planet; Geosphere: The Land and Its Uses**. Chelsea House, New York, 2008.

- DETOMI, Luana; et al. **Planejamento urbano no Pampa: instrumentos para revisão do perímetro urbano na fronteira de Jaguarão-BR e Rio Branco-UY**. In: Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades, n.29, v.5, p. 140-155, 2017.
- DEWDNEY, A. K. **The cellular automata programs that create wireworld, rugworld and other diversions**. In: Scientific American, n.1, v.262, p. 146-149, 1990.
- DINAGUA-DINOT-Idea. **Mapa de riesgo por inundación: el caso de Bella Unión**. Uruguay, 2012.
- DOTTORI, F; TODINI, E. **Developments of a flood inundation model based on the cellular automata approach: testing different methods to improve model performance**. In: Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, n.7-8, v.36, p. 266-280, 2011.
- DOUVINET, Johnny; et al. **A flash flood hazard assessment in dry valleys (northern France) by cellular automata modelling**. In: Natural Hazards, n.3, v.75, p. 2905-2929, 2015.
- DREW, David. **Processos interativos homem-meio ambiente**. 2.ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1989.
- ECHENIQUE, Marcial. **Modelos: uma discussión, La Estructura del Espacio Urbano**. Barcelona: GG, 1975. p. 235-248.
- ECHENIQUE, Marcial. **Modelos matemáticos de la estructura espacial urbana, aplicaciones en América Latina**. Buenos Aires: Ediciones SIAP/ Ediciones Nueva Visión, 1975.
- EM-DAT. **The International Disaster Database**. Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, 2016. Disponível em: <[http://emdat.be/advanced\\_search/index.html](http://emdat.be/advanced_search/index.html)>. Acesso em: 25/05/2020.
- FEITOSA, F; et al. **Countering Urban Segregation in Brazilian Cities: Policy-Oriented Explorations Using Agent-Based Simulation**. In: Environment and Planning B, n.6, v.39, p. 1131-1150, 2012.
- FENG, Y; LIU, Y. **A cellular automata model based on nonlinear kernel principal component analysis for urban growth simulation**. In: Environment and Planning B, n.1, v.40, p. 117-134, 2013.
- FERREIRA, Amanda; et al. **Morfologia Urbana como instrumento para planejamento urbano**. In: 1º Simpósio Científico ICOMOS Brasil. Belo Horizonte, 2017.
- FERREIRA, Flávio. **Apresentação**. In: LYNCH, Kevin. A imagem da cidade. São Paulo: Martins Fontes, 2011.
- FERREIRA, S. M; DEBEUS, G. **Avaliação dos modelos de gestão ao longo da história em Portugal e Brasil: um olhar acerca das tendências internacionais nas políticas hídricas**. In: Revista Geografia em Atos, v.9, p. 22-43, 2018.
- FINKLER, R. **Planejamento, manejo e gestão de bacias hidrográficas**. Unidade 1, apostila didática. Projeto água e gestão. Itaipu Binacional, ANA, 2012.
- FINOTTI, A.R; FINKLER, R; SILVA, M.D; CEMIN, G. **Monitoramento de recursos hídricos em áreas urbanas**. Caxias do Sul: EDUCS, 2009. 270p.
- FURTADO, B; et al. **A cellular automata intraurban model with prices and income-differentiated actors**. In: Environment and Planning B, n.5, v.39, p. 897-924, 2012.
- FURTADO, Bernardo Alves; VAN DELDEN, Hedwig. **Modelagem urbana e regional com autômatos celulares e agentes: panorama teórico, aplicações e política pública**. In: Texto para discussão, n.1576, Instituto de Pesquisa Eletrônica IPEA. Brasília, 2011.
- FREEMAN, L. **A set of measures of centrality based on betweenness**. In: Sociometry, n.40, p. 35-41, 1977.
- GIANINNI, P; RICCOMINI, C. **Sedimentos e processos sedimentares**. In: Decifrando a Terra. São Paulo: Companhia Editora Nacional., 2009.

- GOMES, R. **Implementação metodológica para qualificação dos prejuízos decorrentes de cheias urbanas aplicada ao município de São João de Meriti.** 110 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.
- GONÇALVES, Paulo; GUIMARÃES, Marília. **Transformações da forma urbana paulistana: o caso do bairro da Mooca como referência tipológica.** In: Revista de Morfologia Urbana, n.2, v.2, p. 71-84, 2014.
- GOERL, R. F; KOBIYAMA, M. **Considerações sobre as Inundações no Brasil.** In: XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, João Pessoa, 2005. Anais... Porto Alegre, Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2005.
- GORSKI, Maria C. B. **Rios e cidades: ruptura e reconciliação.** São Paulo: editora Senac São Paulo, 2010.
- GOULD, Gregory; KARNER, Alex. **Modeling bicycle facility operation: cellular automaton approach.** In: Transportation Research Record, v.2140, p. 157-164, 2009.
- GRIFFITH, James. **O modelo físico-social da recuperação ambiental.** In: Revista Brasil Mineral, n.242, v.22, p. 166-174, 2005.
- GUAN, D; et al. **Modeling urban land use change by integration of cellular automaton and Markov model.** In: Ecological Modelling, n.222, p. 3761-3772, 2011.
- GUIDOLIN, Michele; et al. **A weighted cellular automata 2D inundation model for rapid flood analysis.** In: Environmental Modelling and Software, v.84, p. 378-394, 2016.
- HARVEY, D. **The urbanization of capital.** Oxford: Blackwells, 1985.
- HILLIER, Bill; HANSON, Julienne. **The social logic of space.** Cambridge: Cambridge University Press, 1984.
- HOLANDA, Frederico. **O espaço de exceção.** Brasília: Editora da UNB, 2000.
- HOLANDA, Frederico. **O mundo das miudezas: plano de preservação do conjunto urbanístico de Brasília.** In: Revista de Morfologia Urbana, n.1, v.2, p. 5-13, 2014.
- IBGE. **Classificação e caracterização dos espaços rurais e urbanos do Brasil: uma primeira aproximação.** IBGE, Coordenação de Geografia. Rio de Janeiro, IBGE, 2017.
- IBGE. **Perfil dos Municípios Brasileiros - MUNIC.** IBGE, Coordenação de População e Indicadores Sociais. Rio de Janeiro, IBGE, 2017.
- INE, INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA. **Resultados del censo de población 2011: población, crecimiento y estructura por sexo y edad.** Uruguay, 2011.
- JAMALI, Behzad; et al. **A cellular automata fast flood evaluation (CA-ffé) Model.** In: Water Resources Research, n.6, v.55, p. 4936-4953, 2019.
- JAPIASSÚ, Luana Andressa; LINS, Regina Dulce. **As diferentes formas de expansão urbana.** In: Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades, n.13, v.2, p. 15-25, 2014.
- KAHTOUNI, Saide. **Cidade das Águas.** São Carlos: RiMa Editora, 2004.
- KASSOGUÉ, Hamidou; et al. **A two scale cellular automaton for flow dynamics modeling (2CAFDM).** In: Applied Mathematical Modelling, v.43, p. 61-77, 2017.
- KELLER, Sallie Ann; SHIPP, Sthephanie; SCHROEDER, Aaron. **Does Big Data change the privacy landscape? A review of the issues.** In: Review in Advance, n.13, v.1, 2016.
- KHAKPOUR, M; ROD, J. **An attraction-based cellular automaton model for generating spatiotemporal population maps in urban areas.** In: Environment and Planning B, n.2, v.43, p. 297-319, 2016.
- KONG, H; SUI, D. **Integrating the normative with the positive dimension of the new science for cities: a geodesign-based framework for Cellular Automata modeling.** In: Environment and Planning B, n.5, v.44, p. 837-863, 2017.

- KRAFTA, Romulo. **Análise especial urbana: aplicações na região metropolitana de Porto Alegre**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.
- KRAFTA, Romulo. **Notas de Morfologia Urbana**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2014.
- KRAFTA, Romulo. **Modelling intra-urban configurational**. In: Environment and Planning B, v.21, p. 67-82, 1994.
- KROPF, Karl. **Aspects of urban form**. In: Urban Morphology, n.2, v.13, p. 105-120, 2009.
- KASPER, Humberto. **O processo de pensamento sistêmico: abordagens a partir de um quadro de referência proposto**. 291 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.
- LAKSHMANAN, T. R; HANSEN, W. G. **A retail market potential model**. In: Journal of the American Institute of Planners, v.31, p. 134-143, 1965.
- LAMAS, José M. R. G. **Morfologia urbana e o desenho da cidade**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbekian, 1992.
- LANNA, Antonio E. L. **Gestão das Águas**. Texto da disciplina de Gestão de Recursos Hídricos. IPH – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1999, 235p.
- LAU, K; KAM, B. **A cellular automata model for urban land-use simulation**. In: Environment and Planning B, n.2, v.32, p. 247-263, 2005.
- LEVY, S; MARTENS, K; HEIJDEN, R. **Agent-based models and self-organisation: addressing common criticisms and the role of agent-based modelling in urban planning**. In: Town Planning Review, Liverpool University, n.3, v.87, p. 321-338, 2016.
- LI, Yi; et al. **Real-time flood simulations using CA model driven by dynamic observation data**. In: International Journal of Geographical Information Science, n.4, v.29, p. 523-535, 2015.
- LI, X; YEH, A. **Modeling sustainable urban development by the integration of constrained cellular automata and GIS**. In: International Journal of Geographical Information Science, n.2, v.14, p. 131-152, 2000.
- LI, Xian-sheng; et al. **Traffic accident propagation properties and control measures for urban links based on cellular automata**. In: Advances in Mechanical Engineering, v.5, 2013.
- LIU, H; ZHOU, Q. **Developing urban growth predictions from spatial indicators based on multi-temporal images**. In: Computers, Environment and Urban Systems, n.29, p. 580-594, 2005.
- LIU, L; et al. **Developing an effective 2-D urban flood inundation model for city emergency management based on cellular automata**. In: Natural Hazards and Earth System Sciences, v.15, p. 381-391, 2015.
- LIU, Yang; PENDER, Gareth. **Carlisle 2005 urban flood event simulation using cellular automata-based rapid flood spreading model**. In: Soft Computing, n.1, v.17, p. 29-37, 2013.
- LIU, X; ANDERSSON, C. **Assessing the impact of temporal dynamics on land-use change modeling**. In: Computers, Environment and Urban Systems, n.28, p. 107-124, 2004.
- LONDE, Luciana R; et al. **Desastres relacionados à água no Brasil: perspectivas e recomendações**. In: Ambiente & Sociedade, v.17, n.4, p. 133-152, 2014.
- LOPES, José Antônio Dias. **A cidade de Dom Pedrito**. Porto Alegre: Livraria do Globo, 1972.
- LOWRY, I. **A modelo f metropolis**. Santa Mônica: RAND Corporation, 1964.
- MACEDO, Adilson; IMBRONITO, Maria. **Tipos de corredores e ruas locais no distrito da Mooca, São Paulo**. In: Revista de Morfologia Urbana, n.2, v.4, p. 85-105, 2016.
- MACEDO, Márcia Helena; SILVA, Antônio Rodrigues da; COSTA, Marcela da Silva. **Abordagem sistêmica da mobilidade urbana: reflexões sobre o conceito e suas implicações**. São Carlos: EESC/USP, 2008.

MACEDO, Silvio Soares; et al. **Quadro dos sistemas de espaços livres nas cidades brasileiras**. Universidade Federal de São Paulo, 2012.

MAGNOLI, Demétrio; OLIVEIRA, Giovana; MENEGOTTO, Ricardo. **Cenário gaúcho. Representações históricas e geográficas**. São Paulo: Moderna, 2001.

MARETTO, Marco. **Saverio Muratori: towards a morphological school of urban design**. In: *Urban Morphology*, n.17, p. 93-106, 2013.

MARTIS, Roberto Duarte. **A ocupação do espaço na fronteira Brasil – Uruguai: a construção da cidade de Jaguarão**. 280 f. Tese (Doutorado em Histórias Especializadas) – Escola Técnica Superior de Arquitetura, Universidade Politécnica da Catalunha, 2001.

MASSAKI, José Augusto; PEIXOTO, Anna Silvia; KAISER, Ilza Machado; MANZATO, Gustavo Garcia. **Modelagem dos padrões da expansão urbana da Região Metropolitana de São Paulo baseada em Autômatos Celulares**. In: *Revista Brasileira de Gestão Urbana*, n.9, p. 361-371, 2017.

MASTROMAURO, Iovana Carla. **Surtos epidêmicos, teoria miasmática e teoria bacteriológica: instrumentos de intervenção nos comportamentos dos habitantes da cidade do século XIX e início do XX**. In: *Anais do XXVI Simpósio Nacional de História – ANPUH*. São Paulo, 2011.

MELCHOR, Mendéz. **Plano de la Bella Unión, pueblo misionero**. Museo Histórico Nacional del Uruguay. Disponível em: <<http://www.museohistorico.gub.uy/mecweb/imprimir.jsp?contentid=124164&site=32&channel=mecweb>>. Acesso em: 22/08/2020.

MELO, Vera Mayrink. **A formação histórica das paisagens do Rio Capibaribe na Cidade do Recife**. Rio de Janeiro, [s.e.], 2006.

MENDIONDO, E. M; et al. **Ações colaborativas na redução da vulnerabilidade aos desastres hidrológicos usando tecnologias resilientes para drenagem urbana**. In: YOSHIZAKI, H. (coord.). NAP/CEPED-USP: Núcleo de apoio a pesquisa, Pró-reitoria de Pesquisa, USP, 2013.

MENG, Qiang; WENG, Jinxian. **Cellular automata model for work zone traffic**. In: *Transportation Research Record*, v.2188, p. 131-139, 2010.

MORAES, Felipe D. **O comércio em cidades de fronteira entre Brasil e Uruguai: identificando padrões nos tecidos intraurbanos de Aceguá/Acequa, Chuí/Chui e Santana do Livramento/Rivera**. 186 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2010.

MUMFORD, Lewis. **A Cidade na História**. São Paulo: Martins Fontes, 2004.

NACIFF, Yordana; KNEIB, Erika; AMARAL, Camilo. **O pensamento sistêmico em análises urbanas: uma perspectiva para o problema da segregação socioespacial nas cidades**. In: *Revista eletrônica de Arquitetura e Urbanismo*, n.24, p. 8-25, 2019.

NAGEN, Fernanda Raquel. **Avaliação econômica dos prejuízos causados pelas cheias urbanas**. 125 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.

NEIFF, Juan. **Planícies de inundação são ecótonos?** In: *Ecótonos nas Interfaces dos Ecossistemas Aquáticos*. Brasil: Editora RIMA, 2003.

NIR, Dov. **Man, a geomorphological agent**. Jerusalem: Keter Publishing House, 1983.

O'SULLIVAN, D. **Toward micro-scale spatial modeling of gentrification**. In: *Journal of Geographical Systems*, v.4, p.251-274, 2002.

O'SULLIVAN, P.E. **The Ecosystem – Watershed Concept in the Environmental Sciences**. In: *International Journal Environmental*, USA, v.13, p.273-281, 1979.

OECD. **Governança dos Recursos Hídricos no Brasil**. Organisation for Economic Cooperation and Development. Paris: OECD Publishing, 2015.

- OLIVEIRA, Josildete; PORTELA, Lara. **A cidade como um sistema: reflexões sobre a Teoria Geral dos Sistemas aplicada à análise urbana.** In: Perspectivas Contemporâneas, n.2, v.1, p.164-182, 2006.
- OLIVEIRA, L. M. **Guia de prevenção de acidentes geológicos urbanos.** Curitiba: Mineropar, 1998.
- OLIVEIRA, M. A. **Governança na gestão dos recursos hídricos da bacia hidrográfica Piranhas-Açu: uma investigação jurídica, institucional e ambiental.** Tese (Programa de Pós-graduação em Recursos Naturais) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2013.
- OLIVEIRA, Vitor. **Morfologia Urbana: diferentes abordagens.** In: Revista de Morfologia Urbana, n.2, v.4, p. 65-84, 2016.
- OSMAN, T; DIVIGALPITIYA, P; ARIMA, T. **Modeling urban growth scenarios in Cairo Metropolitan Region 2035.** In: Proceedings of CUPUM. Cambridge, p. 213-218, 2015.
- PALMA, Niara. **Estudos urbanos e geometria fractal.** In: Revista de Morfologia Urbana, n.1, v.2, p. 15-24, 2014.
- PASARESI, Martino; et al. **Atlas of the Human Planet, 2016: Mapping Human Presence on Earth with the Global Human Settlement Layer.** Luxemburgo: Publication Office of the European Union, 2016.
- PASCHOAL, L. G. **Geomorfologia antropogênica e sua inserção em pesquisas brasileiras.** In: RBEUR – Revista Geographia Meridionalis, v.1, p. 95-126, 2015.
- PEDROSA, Bianca Maria; CÂMARA, Gilberto. **Modelagem dinâmica e geoprocessamento.** 40 f. Publicação (Análise Espacial de Dados Geográficos) – Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2002.
- PELOGGIA, Alex Ubiratan. **A ação do homem enquanto ponto fundamental da geologia do Tecnógeno.** In: Revista Brasileira de Geociências, v.27, n.3, p. 257-268, 1997.
- PERES, Otavio M. **Crescimento Urbano e Hidrografia: dinâmicas morfológicas e articulação à paisagem natural.** 132 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2010.
- PÉREZ-MOLINA, Eduardo; et al. **Developing a cellular automata model of urban growth to inform spatial policy for flood mitigation: A case study in Kampala, Uganda.** In: Computers, Environment and Urban Systems, v.65, p. 53-65, 2017.
- PINTO, L. S; HOLTZ, A. C; MARTINS, J. A. **Hidrologia de Superfície.** Editora Edgard Blücher. 2º Edição. São Paulo. 1973. 179p.
- PINTO, N; ANTUNES, A. **A cellular automata model based on irregular cells: application to small urban areas.** In: Environment and Planning B, n.6, v.37, p. 1095-1114, 2010.
- POLIDORI, Mauricio. **Crescimento urbano e ambiente: um estudo exploratório sobre as transformações e o futuro da cidade.** 353 f. Tese (Doutorado em Ecologia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.
- POLIDORI, Maurício; KRAFTA, Rômulo. **Crescimento urbano: fragmentação e sustentabilidade.** In: Anais do ANPUR, 2003.
- PORATH, Soraia Loehelt. **A paisagem de rios urbanos: a presença do Rio Itajaí-Açu na cidade de Blumenau.** Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, UFSC, Florianópolis, 2004.
- PORTUGALI, Juval. **Self-organization and the city.** Berlin: Springer, 2000.
- PORTUGALI, Juval; BENENSON, I. **Artificial planning experience by means of heuristic cell-space model: simulating international migration and the urban process.** In: Environment and Planning A, n.11, v.27, p. 1647-1665, 1995.
- PRESS, F; et al. **Rios: o transporte para os oceanos.** In: Para entender a Terra. São Paulo: ARTMED, 2006.

PUJOL, Vinícius B. **Fronteira: história e desenvolvimento de uma cidade.** In: Anais do XVII ENANPUR. São Paulo: ANPUR. 2017.

REGO, Renato Leão; et al. **Estratégia projetual e configuração urbana: estudo morfológico de duas cidades novas no Brasil de meados do século XX.** In: Revista de Morfologia Urbana, n.1, v.5, p. 5-13, 2017.

REGO, Renato Leão; MENEGUETTI, Karin Schwabe. **A respeito da morfologia urbana. Tópicos básicos para estudos da forma da cidade.** In: Acta Scientiarum, n.2, v.33, p. 123-127, 2011.

REGO, Renato Leão; RIBEIRO, Taissa Sessak; TAUB, Jaqueline. **Ideias clássicas, aspirações modernas: o academicismo e o traçado das cidades novas do norte do Paraná.** In: Revista de Morfologia Urbana, n.1, v.3, p. 19-29, 2015.

RESENDE, Lorena M. **Cartografia urbana na linha de Fronteira: Travessias nas cidades-gêmeas Brasil-Uruguay.** 640 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2019.

RIGATTI, D; SILVA, A. **Urban Morphology and the level of servisse of the sidewalks: influence the decision system in the movement of pedestrians.** In: 14º Seminário Internacional da Forma Urbana, Ouro Preto, 2007.

RIGUETTO, Antônio. **Manejo de Águas Pluviais Urbanas.** Rio de Janeiro: ABES, 2009.

ROMANELLI, Carla; ABIKO, Alex Kenya. **Processo de metropolização no Brasil.** São Paulo: EPUSP, 2011.

SABOYA, Renato. **Centralidade espacial: uma nova operacionalização do modelo baseada em um sistema de informações geográficas.** 123 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Urbanos e Regional) – PROPUR, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

SABOYA, Renato. **Permanência e renovação da morfologia urbana modernista. Um estudo e caso sobre Angélica.** In: Vitruvius, 11, 121.05, 2010.

SANTOS, Alexandre. **O lugar dos pobres na cidade: crescimento urbano e localização da baixa renda.** 314 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2015.

SANTOS, Kesia R. **Inundações urbanas: um passeio pela literatura.** In: Revista Geo UEG - Goiânia, v.1, p. 177-190, 2012.

SANTOS, Rosely Ferreira. **Planejamento Ambiental: Teoria e Prática.** Oficina de Textos, São Paulo, 2004, 184p.

SARAIVA, André Filipe Pereira. **A análise morfológica como suporte ao planejamento urbano.** 85 f. Dissertação (Mestrado em Urbanismo e Ordenamento do Território) – Instituto Superior Técnico de Lisboa, Lisboa, 2014.

SARAIVA, Marcus Vinicius Pereira; POLIDORI, Maurício Couto. **CityCell: Urban Growth Simulator (software).** LabUrb – Laboratório de Urbanismo da FAUrb. Pelotas: UFPel, 2014.

SARAIVA, Marcus Vinicius Pereira. **Simulação de crescimento urbano em espaços celulares com uma medida de acessibilidade: método e estudo de caso em cidades do sul do Rio Grande do Sul.** 99 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, 2013.

SCHEREN, Rudimar S. **Urbanização na planície de inundação do Rio Gravataí-RS.** 123 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

SEMBOLONI, F. **An urban and regional model based on cellular automata.** In: Environment and Planning B, n.2, v.24, p. 589-612, 1997.

SEPLAG/DEE. **Mapa da taxa de crescimento populacional anual para as cidades do Rio Grande do Sul.** Disponível em: <<http://atlassocioeconomico.rs.gov.br/crescimento-populacional>>. Acesso em: 24/08/2020.

SERRAS, Joan; BOSREDON, Melanie; HERRANZ, Ricardo; BATTY, Michael. **Urban Planning and Big Data – Taking LUTi Models to the Next Level?** In: Nordregio, 2014. Disponível em: <<https://archive.nordregio.se/en/Metameny/Nordregio-News/2014/Planning-Tools-for-Urban-Sustainability/Reflection/index.html>>. Acesso em 12/10/19.

- SERVIDONI, Lucas E; et al. **Avaliação de risco a enchentes e inundações por krigagem ordinária em sistemas de informação geográfica.** In: Caderno de Geografia, v.29, 2019.
- SHEN, Z; KAWAKAMI, M; KAWAMURA, I. **Geosimulation model using geographic automata for simulating land-use patterns in urban partitions.** In: Environment and Planning B, n.5, v.36, p. 802-823, 2009.
- SILVA, Diogo R. A; SILVA, Paulo R. R. **Ação emergencial para delimitação de áreas em alto e muito alto risco a enchentes, inundações e movimentos de massa: Quaraí, RS.** Serviço Geológico do Brasil, CPRM, 2013 a. Disponível em: <<http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/20132>>. Acesso em: 25/09/2019.
- SILVA, Diogo R. A; SILVA, Paulo R. R. **Ação emergencial para delimitação de áreas em alto e muito alto risco a enchentes, inundações e movimentos de massa: Jaguarão, RS.** Serviço Geológico do Brasil, CPRM, 2013 b. Disponível em: <<http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/20114>>. Acesso em: 25/09/2019.
- SILVEIRA, Greice V. **Dinâmicas das inundações por meio de séries temporais, Rio Uruguai - RS.** 114 f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Programa de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.
- SOJA, Edward W. **Postmetropolis. Estudios críticos sobre las ciudades e las regiones.** Madri, Traficantes de Sueños, 2000.
- SOUZA, F. S. **Saneamento básico na história da humanidade.** In: Comissão de serviços de infraestrutura do senado federal. Brasília, 2009.
- STEVENS, D; DRAGICEVIC, S. **A GIS-based irregular cellular automata model of land-use change.** In: Environment and Planning B, n.4, v.34, p. 708-724, 2007.
- STRUMINSKI, Edson. **Brasil e Uruguai, fronteiras e limites.** Ilhéus: Editus, 2015.
- SUGUIO, Kenitiro. **Água.** Ribeirão Preto: Holos Editora, 2006.
- TOBLER, Waldo Rudolph. **Cellular geography.** In: GALE, G; OLSSON, G. (Eds.) Philosophy in Geograph. Boston: Reidel, p. 379-386, 1979.
- TODES, A. **Urban growth and strategic spatial planning in Johannesburg, South Africa.** In: Cities, n.3, v.29, p. 158-165, 2012.
- TORALLES, C. **Cidade e crescimento periférico: modelagem e simulação da formação de periferias urbanas com autômatos celulares.** 169 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2013.
- TORRENS, P. M. **How cellular models of urban systems work?** In: WP-28, CASA, University College London, 2000.
- TRENTIN, Gracieli; FREITAS, Maria Isabel Castrehini. **Modelagem da dinâmica espacial urbana: modelo de autômato celular na simulação de cenários para o município de americana-SP.** In: Revista de Brasileira de Cartografia, n.62, p. 291-305, 2010.
- TUCCI, Carlos E. M. **Águas Urbanas.** In: Estudos Avançados 22 (63); p. 97-112, 2008.
- TUCCI, Carlos E. M. **Drenagem urbana e controle de inundações.** In: Ciências da Terra e meio ambiente. São Leopoldo: Editora Unisinos, 1999.
- TUCCI, Carlos E. M; BERTONI, Juan C. **Inundações Urbanas na América do Sul.** Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003.
- TUCCI, Carlos E. M. **Controle de Enchentes.** In: Hidrologia, ciência e aplicação. Porto Alegre: UFRGS/ABRH/EDUSP, 1993.
- TUCCI, Carlos E. M; MENDES, Carlos André. **Avaliação ambiental integrada de bacia hidrográfica.** Ministério do Meio Ambiente – SQA. Brasília, MMA, 2006.
- TUCCI, Carlos E. **Gestão das Inundações urbanas.** Unesco. Global Water Partnership: South America, 2005, 197p.

- UN-HABITAT. **Urbanization and Development: Emerging Futures - World Cities Report 2016**. Nairobi, Kenya: United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat), 2016.
- VAN VLIET, J; HURKENS, J; WHITE, R; VAN DELBEN, H. **An activity-based cellular automaton model to simulate land-use dynamics**. In: Environment and Planning B, n.2, v.39, p. 198-212, 2012.
- WANG, Yuntao; et al. **An integrated framework for high-resolution urban flood modelling considering multiple information sources and urban features**. In: Environmental Modelling and Software, v.107, p. 85-95, 2018.
- WARD, D; MURRAY, A; PHINN, S. **A stochastically constrained cellular model of urban growth**. In: Computers, Environment and Urban Systems, n.24, p. 539-558, 2000.
- WARD, R. C; ROBINSON, M. **Principles of Hydrology**. 4 Ed., McGraw-Hill, Berkshire, England, 2000.
- WEGENER, M; GNAD, F; VANNAHME, M. **The time escala of urban change**. In: HUTCHINSON, B; BATTY, M. (Eds.) Advances in urban systems modelling. Amsterdam: Elsevier, 1986. p. 175-197.
- WILENSKY, U; RAND, W. **An introduction to Agent-Based Modeling: Modeling Natural, Social and Engineered Complex Systems with NetLogo**. Cambridge: The MIT Press, 2015.
- WILSON, A. G. **Catastrophe theory and bifurcations: applications to urban and regional systems**. Berkeley: University of California Press, 1981.
- WILSON, Alan. **New roles for urban models: planning for the long term**. In: Regional Studies, Regional Science, n.1, v.3, p. 48-57, 2016.
- WHITE, R; ENGELEN, G. **Cellular automata and fractal urban form: a cellular modelling approach to the evolution of urban land-use patterns**. In: Environment and Planning A, n.8, v.25, p. 1175-1199, 1993.
- WHO; UNICEF. **Progress on Drinking Water, Sanitation and Hygiene: 2017 Update and SDG Baselines**. World Health Organization (WHO) and the United Nations Children's Fund (UNICEF), 2017.
- WOLFRAM, S. **Cellular automata and complexity**. Massachusetts: Addison-Wesley, 1994.
- WU, F; WEBSTER, C. **Simulating artificial cities in GIS environment: urban growth under alternative regulation regimes**. In: International Journal of Geographical Information Science, n.7, v.14, p. 625-648, 2000.
- WU, Jun; et al. **Vehicle load effect of long-span bridges: assessment with cellular automaton traffic model**. In: Transportation Research Record, v.2481, p. 132-139, 2015.
- YANG, D; et al. **Cellular automata-based modeling and simulation of a mixed traffic flow of manual and automated vehicles**. In: Transportation Research Record, v.2622, p. 105-116, 2017.
- YEH, A; LI, X. **A cellular automata model to simulate development density for urban planning**. In: Environment and Planning B, n.3, v.29, p. 431-450, 2002.
- YEH, A; LI, X. **A constrained CA model for the simulation and planning of sustainable urban forms by using GIS**. In: Environment and Planning B, n.5, v.28, p. 733-753, 2001.
- ZELLNER, M; CAMPBELL, S. **Planning for deep-rooted problems: what can we learn from aligning complex systems and wicked problems?** In: Planning Theory & Practice, n.4, v.16, p. 457-478, 2015.
- ZHAO, D; et al. **Modeling of passing events in mixed bicycle traffic with cellular automata**. In: Transportation Research Record, v.2387, p. 26-34, 2013.
- ZHANG, Xin; CHANG, Gang-Len. **Cellular automata-based model for simulating vehicular-pedestrian mixed flows in a congested network**. In: Transportation Research Record, v.2234, p. 116-124, 2011.

## APÊNDICE

### PROCESSAMENTOS E ATRIBUTOS DAS SIMULAÇÕES REALIZADAS

CIDADES	PROCESSAMENTOS REALIZADOS	SIMULAÇÕES DO PASSADO PARA O PRESENTE E DO PRESENTE PARA O FUTURO			VALORES FINAIS ESTABELECIDOS	LÂMBIDA EXTERNO*	TEMPO DO PROCESSAMENTO FINAL passado para presente      presente para futuro
		TIPO DO ATRIBUTO	COMPORTAMENTO DO ATRIBUTO	PRINCIPAIS ATRIBUTOS			
JAGUARÃO E RIO BRANCO	21	Urbano	Atração à urbanização	Área urbana de Jaguarão	1		
				Área urbana de Rio Branco	1		
		Ambiental	Resistência à urbanização	Estradas uruguaias	0,1		
				Estradas brasileiras	0,1		
				Rodovias uruguaias	0,2		
	16	Urbano	Atração à urbanização	Rodovias brasileiras	0,2		
				Campos e plantações uruguaios	1		
				Campos e plantações brasileiros	1		
QUARAÍ E ARTIGAS	28	Urbano	Atração à urbanização	Mata ciliar ou plantada uruguaias	1		
				Mata ciliar ou plantada brasileira	1		
		Ambiental	Resistência à urbanização	Rio Jaguão	1		
				Principais linhas de drenagem	1		
				Área urbana de Jaguarão	1		
	28	Urbano	Atração à urbanização	Área urbana de Rio Branco	1		
				Estradas uruguaias	0,1		
				Estradas brasileiras	0,1		
BARRA DO QUARAÍ E BELLA UNIÓN	28	Urbano	Atração à urbanização	Rodovias uruguaias	0,3		
				Rodovias brasileiras	0,3		
		Ambiental	Resistência à urbanização	Campos e plantações uruguaios	1		
				Campos e plantações brasileiros	1		
				Mata ciliar ou plantada uruguaias	1		
	28	Ambiental	Resistência à urbanização	Mata ciliar ou plantada brasileira	1		
				Rio Quaraí e Rio Uruguai	1		
				Principais linhas de drenagem	1		

\*Lâmbida externo: permite o ajuste do valor de crescimento urbano possibilitando maior ou menor potencial de crescimento