



Universidade Estadual Paulista
"Júlio de Mesquita Filho"

Programa Interunidades

unesp 

Mestrado

Engenharia Civil e Ambiental

JOSÉ AUGUSTO RODRIGUES MASSABKI

**IMPACTO DA RESOLUÇÃO ESPACIAL NA MODELAGEM DA
EXPANSÃO URBANA DA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO**

Bauru

2018



JOSÉ AUGUSTO RODRIGUES MASSABKI

**IMPACTO DA RESOLUÇÃO ESPACIAL NA MODELAGEM DA
EXPANSÃO URBANA DA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO**

Dissertação apresentada como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Área de Concentração Saneamento.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Garcia Manzato

Bauru
2018



Massabki, José Augusto Rodrigues.

Impacto da resolução espacial na modelagem da
expansão urbana da região metropolitana de São Paulo /
José Augusto Rodrigues Massabki, 2018
66 f.

Orientador: Gustavo Garcia Manzato

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual
Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2018

1. Modelagem espacial. 2. Autômatos celulares. 3.
Redes neurais artificiais. I. Universidade Estadual
Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE Mestrado de JOSÉ AUGUSTO RODRIGUES MASSABKI, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 01 dias do mês de fevereiro do ano de 2018, às 14:00 horas, no(a) Anfiteatro da Seção Técnica de Pós-graduação da FEB, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. GUSTAVO GARCIA MANZATO - Orientador(a) do(a) Departamento de Engenharia Civil e Ambiental / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. ANTÔNIO NÉLSON RODRIGUES DA SILVA do(a) Departamento de Engenharia de Transportes / Universidade de São Paulo, Profa. Dra. ILZA MACHADO KAISER do(a) Departamento de Engenharia Civil e Ambiental / Faculdade de Engenharia de Bauru, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE Mestrado de JOSÉ AUGUSTO RODRIGUES MASSABKI, intitulada **IMPACTO DA RESOLUÇÃO ESPACIAL NA MODELAGEM DA EXPANSÃO URBANA DA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO**. Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADO. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. GUSTAVO GARCIA MANZATO



Prof. Dr. ANTÔNIO NÉLSON RODRIGUES DA SILVA



Profa. Dra. ILZA MACHADO KAISER



AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela oportunidade de poder concluir essa etapa importante em minha vida profissional e pessoal.

Em especial, agradeço a meu orientador, Professor Dr. Gustavo Garcia Manzato, pelos conhecimentos compartilhados, pelo comprometimento e profissionalismo, paciência e acima de tudo a humildade, que ajudaram no meu desenvolvimento intelectual e pessoal.

A todos os professores do Departamento de Engenharia Civil/Ambiental, em especial a Professora Dra. Ilza Machado Kaiser, pelos conhecimentos, paciência e dedicação compartilhados durante o desenvolvimento das atividades de estágio docência.

A minha esposa Ariane Libâneo Massabki pela imensa dedicação, paciência e parceria, me deram forças para suportar e superar todos os desafios.

Aos meus pais, sou eternamente grato pela educação, valores familiares e pela dedicação empenhada durante toda minha vida, que permitiu meu desenvolvimento intelectual e pessoal.

O conhecimento é a chave que abre as portas do Universo. Não há porta pequena demais nem deveras grande onde ele não possa alcançar.

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi analisar os impactos da resolução espacial na modelagem da expansão urbana da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) por meio de autômatos celulares (CA, do inglês: *Cellular Automata*) combinados com redes neurais artificiais. Para tanto, foram utilizados dados do perímetro urbanizado referentes aos períodos de 1881, 1905, 1929, 1949, 1974 e 2005 para a construção de uma série de modelos espaciais. Uma estrutura de células regulares (grid) foi concebida para se representar a área de estudo, cuja resolução espacial se baseou em células de 1.000 por 1.000 metros, 800 por 800 metros e 600 por 600 metros. Os modelos também levaram em consideração a combinação de variáveis representando o estado inicial da célula (urbana ou não urbana), o número de células vizinhas classificadas como urbanas e o número de células vizinhas classificadas como não urbanas. Os resultados mostraram que a variação da resolução espacial não proporcionou impacto significativo no desempenho das modelagens desenvolvidas, visto que os desempenhos obtidos a partir das diferentes estruturas e tamanhos de grid foram bastante similares. Há os destaques para o Grid de 1000 por 1000 metros, baseado no estado e no número de vizinhos urbanos, com 90,09% de acertos global; para o Grid de 800 por 800 metros, baseado no estado, no número de vizinhos urbanos e no número de vizinhos não urbanos, com 90,25% de acertos global; e finalmente, para o Grid de 600 por 600 metros, baseado no estado e no número de vizinhos urbanos, com 90,14% de acertos global. Na sequência, uma previsão de ocupação do território para 2030 foi avaliada para esses modelos em destaque, observando-se tanto padrões de expansão urbana orientados por infraestruturas, como processos de ocupação urbana em áreas impróprias. Em síntese, esse estudo demonstrou que um aparente aumento na resolução espacial do grid não produz efeitos positivos em relação a um aumento no desempenho dos modelos espaciais desenvolvidos neste trabalho. Dessa forma, o Grid de 1000 por 1000 metros pode servir como ferramenta nos processos de planejamento urbano conforme a metodologia empregada. Cabe ressaltar ainda que esse grid acaba tornando o processamento computacional mais leve, em função da menor quantidade de dados envolvidos.

ABSTRACT

The objective of this work was to analyze the impacts of the spatial resolution related to the urban expansion modeling of the Metropolitan Region of São Paulo (MRSP) by means of Cellular Automata (CA) combined with Artificial Neural Networks. Data regarding the urbanized perimeter in the periods of 1881, 1905, 1929, 1949, 1974 and 2005 were used for the construction of a series of spatial models. A grid of regular cells was conceived to represent the study area, whose spatial resolution was based on cells of 1,000 by 1,000 meters, 800 by 800 meters and 600 by 600 meters. The models also took into account the combination of variables representing the initial state of the cell (urban or non-urban), the number of neighboring cells classified as urban, and the number of neighboring cells classified as non-urban. The results showed that the variation on the spatial resolution did not result in a significant impact on the performance of the developed models, since they were quite similar across the different structures and grid sizes explored. There were some highlights, for example, the Grid of 1000 by 1000 meters, based on the state of the cell and the number of urban neighbors, with 90.09% of global correct predictions; the Grid of 800 by 800 meters, based on the state of the cell, the number of urban neighbors and the number of non-urban neighbors, with 90.25% of global correct predictions; and finally, the Grid of 600 by 600 meters, based on the state of the cell and number of urban neighbors, with 90.14% of global correct predictions. In the sequence, a forecast of the territorial occupation was simulated for year 2030 considering those highlighted models. The results showed some patterns of urban expansion oriented by infrastructures, as well as processes of urban occupation in inappropriate areas. In sum, this study demonstrated that an apparent increase in the spatial resolution of the grid does not produce positive effects in relation to an increase in the performance of the spatial models developed in this work. Therefore, the Grid of 1000 by 1000 meters can serve as a tool for urban planning processes according to the methodology used. It should also be noted that this grid ends up making the computational processing lighter, due to the smaller amount of data involved.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Exemplos de dimensões de Autômatos Celulares	11
Figura 2. Exemplos de formatos de Autômatos Celulares.....	12
Figura 3. Tipo de vizinhança dos CAs	13
Figura 4. Estrutura Básica de um RNA (Adaptado de Silva et al., 2004).	15
Figura 5. Contorno do perímetro urbano dos períodos de dados utilizados	19
Figura 6. Imagem de satélite referente ao ano de 2015	20
Figura 7. Representação do Grid 1000 com os contornos de perímetro urbano	21
Figura 8. Localização das áreas de restrição.	21
Figura 9. Representação do Grid 1000 com restrição com os contornos de perímetro urbano.....	22
Figura 10. Representação dos Grids 1000, 800 e 600 com os contornos de perímetro urbanizado.....	23
Figura 11. Rasterização dos contornos do perímetro urbano para os períodos de 1881, 1905, 1929, 1949, 1974 e 2005 – Grid de 1000 por 1000 metros.	24
Figura 12. Rasterização dos contornos do perímetro urbano para os períodos de 1881, 1905, 1929, 1949, 1974 e 2005 – Grid de 800 por 800 metros.	25
Figura 13. Rasterização dos contornos do perímetro urbano para os períodos de 1881, 1905, 1929, 1949, 1974 e 2005 – Grid 600 por 600 metros.	26
Figura 14. Estrutura do Modelo “4 IN 1 OUT”	28
Figura 15. Estrutura do Modelo “3 IN 1 OUT”	28
Figura 16. Estrutura do Modelo T, T+25	29
Figura 17. Estado previsto para o ano 2005 e perímetro real do ano 2005.....	35
Figura 18. Células com Estado estimado em 2005 diferente do Estado real em 2005.....	35
Figura 19. Estado previsto para o ano de 2030 e Imagem do Google Earth referente ao ano de 2015.....	37
Figura 20. Distribuição espacial dos resultados com restrição para ano 2005, modelos A e C	39
Figura 21. Distribuição espacial dos resultados sem restrição para ano 2005, modelo C	39
Figura 22. Células com Estado estimados diferentes do Real para o ano de 2005	40
Figura 23. Cenário previsto para 2030 pelos modelos A e C sobrepostos a imagem de satélite do ano de 2015.....	41

Figura 24. Distribuição espacial dos resultados obtidos pelos Modelos de maior desempenho nas diferentes estruturas de modelagem, Grid 1000 por 1000 metros.	44
Figura 25. Células com Estado estimados diferentes do Real para o ano de 2005, nas diferentes estruturas de modelagem nas diferentes estruturas de modelagem, Grid 1000 por 1000 metros	45
Figura 26. Cenário previsto para 2030 pelos modelos A e C sobreposto a imagem de satélite do ano de 2015.....	46
Figura 27. Distribuição espacial dos resultados obtidos pelos Modelos de maior desempenho nas diferentes estruturas de modelagem, Grid 800 por 800 metros.	48
Figura 28. Células com Estado estimados diferentes do Real para o ano de 2005, nas diferentes estruturas de modelagem, Grid 800 por 800 metros	49
Figura 29. Cenário previsto para 2030 pelo Modelo C, estrutura “3 IN 1 OUT”, sobreposto a imagem de satélite do ano de 2015.	50
Figura 30. Distribuição espacial dos resultados obtidos pelos Modelos de maior desempenho nas diferentes estruturas de modelagem, Grid 600 por 600 metros.	52
Figura 31. Células com Estado estimados diferentes do Real para o ano de 2005, nas diferentes estruturas de modelagem, Grid 600 por 600 metros	53
Figura 32. Cenário previsto para 2030 pelo Modelo C, estrutura “3 IN 1 OUT”, sobreposto a imagem de satélite do ano de 2015.	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Estrutura dos modelos desenvolvidos	27
Tabela 2. Fases da modelagem e períodos utilizados – Modelo “4 IN 1 OUT”	30
Tabela 3. Fases da modelagem e períodos utilizados – Modelo “3 IN 1 OUT”	30
Tabela 4. Fases da modelagem e períodos utilizados – Modelo “T, T+25”	30
Tabela 5. Informações das RNAs de cada modelo desenvolvido.....	32
Tabela 6. Desempenho dos modelos no Grid 1000	34
Tabela 7. Análise parcial do desempenho do modelo C no Grid 1000	34
Tabela 8. Desempenho dos modelos no Grid 1000 com restrição	38
Tabela 9. Análise parcial do desempenho dos modelos no Grid 1000	39
Tabela 10. Análise do desempenho dos modelos no Grid 1000	43
Tabela 11. Análise do desempenho dos modelos no Grid 800	47
Tabela 12. Análise do desempenho dos modelos no Grid 600	51
Tabela 13. Análise do desempenho dos modelos nos Grids 1000, 800 e 600	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CA: Autômato Celular (*do inglês Cellular Automata*)

RMSP: Região Metropolitana de São Paulo

RNA: Redes Neurais Artificiais

SIG: Sistema de Informação Geográfica

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	1
1.2. OBJETIVO	2
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO.....	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1. EXPANSÃO URBANA E MEIO AMBIENTE -CONTEXTUALIZAÇÃO GERAL	3
2.2. MODELOS ESPACIAIS APLICADOS AO ESTUDO DA EXPANSÃO URBANA	7
2.3. CELLULAR AUTOMATA (CA).....	10
2.4. REDES NEURAIS ARTIFICIAIS (RNAS)	14
3. METODOLOGIA	18
3.1. DADOS UTILIZADOS	18
3.2. PREPARAÇÃO DOS DADOS	20
3.3. DEFINIÇÃO DOS MODELOS.....	27
4. RESULTADOS.....	33
4.1. MODELAGEM PRELIMINAR	33
4.1.1. GRID 1000 SEM RESTRIÇÃO.....	33
4.1.2. GRID 1000 COM RESTRIÇÃO	38
4.2. MODELOS COM BASE NO GRID 1000	42
4.3. MODELOS COM BASE NO GRID 800	46
4.4. MODELOS COM BASE NO GRID 600	50
4.5. SINTESE DOS RESULTADOS	54
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	56
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58

1. INTRODUÇÃO

Este capítulo caracteriza sucintamente o processo de expansão urbana e apresenta o objetivo e a estrutura deste trabalho.

1.1. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

A expansão urbana tem se tornado uma notável característica do desenvolvimento urbano em todo o mundo nas últimas décadas (SHAHRAKI et al., 2011). De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2016), já no ano de 2010, 55,7% da população brasileira habitava áreas urbanizadas e, segundo as Nações Unidas (UN, 2015), 54% da população mundial vive em áreas urbanas. Está previsto que esse número deva chegar a 66 % em 2050, ou seja, como discutido por Kourtit e Nijkamp (2013), o mundo se tornou um “mundo urbano”. Conseqüentemente, profundas mudanças tanto no tamanho quanto na distribuição espacial da população global são esperadas.

Essas mudanças populacionais têm proporcionado diversos problemas aos centros urbanos, como redução das áreas verdes, inundações, processos erosivos, ocupações irregulares, poluição atmosférica, deficiente atendimento à saúde, aumento da violência, entre outros. Sendo assim, o aumento populacional e seu espalhamento espacial não representam o problema em si, mas sim a forma como esse processo ocorre. Logo, o grande desafio é possibilitar que esse processo ocorra de forma sustentável, a fim de garantir recursos naturais para as atuais e futuras gerações.

Nesse caso, a utilização de ferramentas que possibilitem o entendimento de como as formas urbanas se moldam sob as tensões do crescimento populacional, ou seja, ferramentas que permitam extrair os padrões da expansão urbana no espaço e tempo, aparecem como alternativa para fundamentar as decisões dos gestores públicos em suas políticas de planejamento urbano.

Portanto, técnicas de modelagem espacial foram exploradas neste trabalho para determinar os padrões da expansão urbana e, conseqüentemente, permitir a previsão de cenários futuros, servindo como referência para estudos dos processos de expansão urbana e seu respectivo planejamento, na busca de torná-lo mais sustentável.

1.2.OBJETIVO

O objetivo geral deste trabalho foi analisar os impactos da resolução espacial na modelagem da expansão urbana da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) por meio de autômatos celulares (CA, do inglês: *Cellular Automata*) combinados com redes neurais artificiais (RNA). Com isso, como objetivo específico, pretendeu-se oferecer um mecanismo de monitoramento do processo de ocupação do território a fim de subsidiar o planejamento urbano sustentável.

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho apresenta no Capítulo 2 uma revisão bibliográfica referente ao processo de expansão urbana e meio ambiente, modelos desenvolvidos nesta temática e técnicas empregadas, abordando-se os conceitos de Autômatos Celulares e Redes Neurais Artificiais. No Capítulo 3 é apresentada a metodologia utilizada nesta pesquisa, no qual são descritos os dados utilizados, a etapa de preparação dos dados, definição das variáveis e os modelos desenvolvidos. A seguir, no Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos e suas análises. Por fim, no Capítulo 5 estão as conclusões, seguidas da lista das referências bibliográficas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1.EXPANSÃO URBANA E MEIO AMBIENTE - CONTEXTUALIZAÇÃO GERAL

A urbanização se caracteriza pela transformação ou passagem do ambiente rural para o urbano. Apesar das dificuldades conceituais e metodológicas para a definição de urbano e rural conforme discutido, por exemplo, por Reis (2006) e Monte-Mór (2006), tradicionalmente entende-se como urbano o relativo à cidade, ou seja, locais com concentrações populacionais e de edificações, com condições econômicas e sociais bastante características.

Sendo assim, de maneira bastante simples, pode-se entender o processo de expansão urbana como o espalhamento dos centros urbanos, considerando tanto os aspectos demográficos como de uso e ocupação do solo sobre as áreas rurais. Cabe observar que as áreas rurais são caracterizadas pela presença de cobertura vegetal, baixa densidade demográfica e características econômicas e sociais dependentes, basicamente, do uso do campo, como as atividades agropecuárias.

Historicamente, a Revolução Industrial foi um marco a partir do qual se observou uma acentuada migração das pessoas para as cidades em busca de trabalho e também motivadas pela procura de melhores condições de vida (RODRIGUEZ-POSE e KETTERER, 2012), resultando em um grande êxodo rural. De fato, as cidades concentram a maioria das atividades econômicas e possuem as melhores redes de infraestrutura como transportes, telecomunicações, energia elétrica, saúde, educação, lazer, etc.

Isso oferece grandes oportunidades para o desenvolvimento urbano, mas ao mesmo tempo provoca uma enorme pressão nessas áreas, pois as cidades são centros de atividades humanas com interações sociais e ambientais bastante intensas (KOURTIT e NIJKAMP, 2013). Nesse sentido, os grandes centros urbanos também experimentam diversas consequências negativas, como desconforto térmico, poluição atmosférica, poluição de recursos hídricos, alteração do ciclo hidrológico, problemas de provimento de saneamento básico, inundações, processos erosivos e escorregamento de taludes, além de deficiências em aspectos sociais, como

falta de atendimento de qualidade nos serviços de educação e saúde, problemas de oferta de emprego e condições precárias de moradia.

Mais especificamente, em relação aos problemas citados, as alterações climáticas dos centros urbanos estão relacionadas principalmente com as características do uso e ocupação do solo e com o processo de supressão de cobertura vegetal. Estudos realizados por Oke (1987), Carvalho (2001), Andrade (2005) e Gartland (2010) mostram um aumento nas temperaturas das áreas urbanizadas, fenômeno conhecido como “Ilhas de Calor”, relacionando-o com os materiais construtivos aplicados. Além de absorverem e reterem maior carga de energia solar, alguns materiais também impermeabilizam o solo, o que favorece o escoamento direto, desfavorecendo a dissipação da temperatura por evaporação e/ou evapotranspiração quando na presença de vegetação.

Nesse sentido, estudos realizados por Bias et al. (2003), Nonomura et al. (2009), Feitosa et al. (2011) e Hass e Ban (2014) demonstraram a concentração de temperaturas mais elevadas nas áreas urbanizadas, justificado pela retirada de cobertura vegetal, visto nas áreas periféricas às regiões estudadas, com maior concentração de áreas verdes, apresentaram temperaturas mais amenas.

Além de proporcionarem maior desconforto térmico, as Ilhas de Calor nas áreas urbanas incrementam o risco de ocorrência de chuvas convectivas ou tempestades. Jauregui e Romales (1996) e Willems et al. (2012) relataram a influência do crescimento urbano na formação de chuvas convectivas na Cidade do México. Estudos de Filho (2000) mostram uma tendência de formação de chuvas convectivas na Região Metropolitana de São Paulo, relacionadas com o aumento da temperatura urbana e à mudança rápida de umidade pela chegada da brisa marítima.

Por conseguinte, o aumento das frequências de eventos extremos nos centros urbanos favorece a ocorrência de desastres naturais, decorrentes principalmente de processos de inundação e movimentação de massas. Tucci (1995) justifica as inundações urbanas pelo processo de impermeabilização provocado, pois o montante de água que infiltraria no solo ou ficaria retido nas plantas passa a escoar diretamente pela superfície. Miller et al. (2014), por meio de modelagem hidrológica, relacionaram eventos de inundação com o uso e ocupação do solo, e afirmaram que o processo de impermeabilização do solo, causado pela expansão urbana, proporciona eventos de resposta cada vez mais rápida ao início da precipitação com picos de

escoamento muito maiores. Isso justifica os atuais problemas de inundação urbana, visto a insuficiência ou subdimensionamento das redes de drenagem.

Ademais, o crescimento urbano e concomitante aumento populacional exige maior aporte de recursos hídricos para as cidades. Sendo assim, a exploração de águas subterrâneas tem sido fundamental para lograr a distribuição de água para consumo humano nos centros urbanos. Logo, uma preocupação bastante importante é a disponibilidade de água para consumo nos próximos anos. Costa et al. (2013) monitoraram a expansão urbana e crescimento populacional aliados ao consumo de recursos hídricos no município de São Carlos – SP. Ficou destacado o grande crescimento populacional e consequentes aumentos de áreas impermeabilizadas, de consumo de água e da preocupação com a disponibilidade de água para as futuras gerações quando projetados cenários futuros. Vale ainda ressaltar, conforme Morote e Hernández (2015), a necessidade de aumento do uso dos recursos hídricos na geração de energia para atender os excedentes populacionais de acordo com a expansão urbana. Isso é um fator que demandará mais intervenções e alterações de ecossistemas naturais e, por conseguinte, gerar-se-ão novos impactos ambientais.

O avanço da urbanização, sua escala e velocidade não constituem problema em si, não fosse o modo como ocorreu. Deve-se estar atento para esse processo, pois a sustentabilidade do aglomerado urbano/metropolitano, em sua componente físico-urbanística, relaciona-se com as seguintes variáveis: a forma de ocupar o território; a disponibilidade de insumos para seu funcionamento (disponibilidade de água); a descarga de resíduos (destino e tratamento de esgoto e lixo); o grau de mobilidade da população no espaço urbano (qualidade do transporte público de massa); a oferta e o atendimento às necessidades da população por moradia, equipamentos sociais e serviços; e a qualidade dos espaços públicos. Dessa forma, as políticas que sustentam o parcelamento, uso e ocupação do solo e as práticas urbanísticas que viabilizam estas ações têm papel efetivo na meta de conduzir as cidades no percurso do desenvolvimento sustentado (GROSTEIN, 2001).

Dessa maneira, o grande desafio para proporcionar à população dos centros urbanos melhores condições e qualidade de vida é conseguir realizar o processo de urbanização de forma

organizada e planejada. Teza e Baptista (2005) afirmam que os grandes centros mundiais atualmente sofrem com as consequências de seu mau planejamento urbano, de seu deficiente ordenamento territorial e de seu errôneo modelo de desenvolvimento.

Deep e Saklani (2014) concordam com esses argumentos e acrescentam que a expansão urbana deve ser monitorada na tentativa de se projetar um habitat urbano sustentável. Além disso, Kourtit et al. (2015) sugerem que o maior desafio não é interromper o processo de urbanização ou a migração das pessoas, mas sim saber gerenciá-los e governá-los através de uma constante e contínua tarefa de antecipar as possíveis mudanças nas circunstâncias correntes.

No Brasil, a Constituição Federal em seu artigo 182 estabelece as diretrizes para o planejamento urbano, objetivando a sustentabilidade da expansão urbana. Ainda, exige dos municípios com mais de vinte mil habitantes a elaboração do Plano Diretor como ferramenta da política urbana, a fim de ordenar o pleno desenvolvimento das funções sociais da cidade e garantir o bem-estar de seus habitantes. A regulamentação do artigo 182 da Constituição Federal é feita pela Lei 10.257 de 2001, a qual ainda coloca como ferramenta da política urbana, além do plano diretor, o zoneamento ambiental, controle de uso e ocupação do solo, entre outros (BRASIL, 2001).

Nesse sentido, o desenvolvimento de estudos aplicados à identificação e entendimento do processo de expansão urbana e sua evolução no espaço e no tempo podem oferecer recursos técnico-científicos importantes para fundamentar as decisões das políticas de gestão e planejamento urbano. Atualmente muitos trabalhos têm sido desenvolvidos nessa linha de pesquisa, principalmente com a elaboração e aplicação da modelagem espacial por meio da utilização de recursos computacionais e técnicas de análise espacial. Tais trabalhos baseiam-se em modelos matemáticos específicos, oferecendo resultados bastante satisfatórios. No próximo subcapítulo serão apresentados alguns desses estudos recentes.

2.2. MODELOS ESPACIAIS APLICADOS AO ESTUDO DA EXPANSÃO URBANA

A utilização dos recursos computacionais de sensoriamento remoto tem se expandido bastante nos últimos tempos, principalmente com as ferramentas de análise espacial, na tentativa de representar o mundo real com o auxílio de modelos matemáticos e computacionais. Manzato (2007) cita uma tendência das aplicações de análise espacial em modelos estáticos. Ressalta, todavia, a necessidade de representar os fenômenos de maneira dinâmica, especialmente nos estudos para planejamento urbano.

Nesse caso, a aplicação da modelagem dinâmica possibilita, ao contrário dos modelos estáticos, caracterizar fenômenos espaciais que se comportam de maneira dinâmica. É o caso do processo de expansão urbana, o que possibilita a geração de cenários múltiplos, baseando-se em variáveis reais diversas, e, por conseguinte, transformar-se em uma ferramenta de apoio na tomada de decisões. Segundo Filho et al. (2004), os modelos espaciais podem simular as mudanças dos atributos do meio ambiente através do território geográfico e auxiliar no entendimento dos mecanismos causais e dos processos de desenvolvimento de sistemas ambientais e, assim, determinar como eles evoluem diante de um conjunto de circunstâncias.

Dessa forma, muitos trabalhos têm sido desenvolvidos utilizando-se a modelagem dinâmica espacial, no sentido de identificar as tendências do crescimento urbano e relacionando-o não só com os aspectos ambientais, como também econômicos e sociais, como apresentado por Brueckner (2000), Jaeger e Schwick (2014), Phillips (2015) e Amato et al. (2015). Todos mostram a necessidade de uma boa política de gestão das áreas urbanizadas a fim de minimizar os efeitos negativos do seu processo de crescimento em busca de cidades mais sustentáveis.

A utilização de geotecnologias (sensoriamento remoto, sistemas de informação geográfica, etc.) e técnicas de análise espacial, como a modelagem espacial, auxilia o monitoramento da expansão urbana e pode fundamentar as decisões de gestão urbana, proporcionando o desenvolvimento sustentável das cidades por meio das políticas de planejamento urbano. Importante ressaltar que o emprego desses recursos vem se expandindo nos últimos tempos. Dentro dessa área de estudo, apesar da reconhecida complexidade na

dinâmica dos processos de mudança dos usos do solo e expansão do perímetro urbanizado relacionados tanto com o sistema natural quanto o antrópico, a modelagem espacial por meio de Autômatos Celulares (CA, do inglês: *Cellular Automata*) tem proporcionado bons resultados na previsão de cenários (Almeida et al., 2005; Xiao et al., 2006; Manzato e Rodrigues da Silva, 2010; Guan et al., 2011; Ajauskas et al., 2012; Lagarias, 2012; Caneparo e Ricobom, 2014; Osman et al., 2015).

Caneparo e Ricobom (2014) desenvolveram mapas preditivos do uso e ocupação do solo do perímetro urbano da cidade de Paranaguá-PR por meio da geração de modelo têmporo-espacial, aplicando as técnicas de Cadeia de Markov e Autômatos Celulares. O estudo utilizou dados de uso e ocupação do solo dos períodos de 1980, 1996 e 2003, além de imagens de satélite SPOT-5, Google Earth, CBERS e IKONOS referentes aos anos de 2005, 2006, 2009 e 2010, respectivamente. A modelagem, desenvolvida no software IDRISI, inicialmente gerou as regras de transição pela aplicação da Cadeia de Markov. Nesse caso, dados de 1980 e 1996 determinaram modelo de transição para 2003, de 1996 e 2003 para 2006 e de 2003 e 2006 para 2009. A segunda etapa aplicou Autômatos Celulares para modelar a mudança espacial das classes de uso e ocupação do solo mapeadas. Nessa etapa, ainda no software IDRISI, utilizou-se mapa de uso e ocupação do solo de um período anterior (t_0) e, aplicado a matrizes de transição determinadas pela cadeia de Markov, foram obtidos mapas preditivos de uso e ocupação dos solos para os períodos de 2003, 2006 e 2009. Os mapas preditivos gerados passaram por processo de validação, baseando-se nos dados reais das imagens de satélite disponíveis, obtendo-se resultados de alto desempenho, com elevado índice de concordância para quase todas as classes de ocupação analisadas, o que comprova a aplicabilidade dos métodos na geração de mapas preditivos.

Um dos modelos baseados em CA que se tornou bastante popular na modelagem e simulação da expansão urbana e mudanças de usos do solo é o modelo SLEUTH. As iniciais que compõem o nome desse modelo referem-se a: “Slope” (declividade), “Land use” (uso do solo), “Exclusion” (áreas de exclusão que não podem se desenvolver ou serem ocupadas), “Urban growth” (crescimento urbano), “Transportation” (transporte) e “Hillside” (encostas). Basicamente, esses aspectos compõem os dados de entrada do modelo, proporcionando considerar não só as relações de vizinhança das células, mas também a influência do meio ambiente em torno da célula na determinação das regras de transição (CHAUDHURI e CLARKE, 2013).

Poelmans e Rompaey (2009) estudaram os padrões de expansão urbana em áreas fragmentadas, especificamente da região de Flanders–Brussels, na Bélgica. Segundo os autores, diversos modelos têm sido aplicados com sucesso na modelagem de padrões de expansão e posterior previsão de cenários, como equações de regressão logística, autômatos celulares e o SLEUTH. Porém, os autores afirmam que esses modelos apresentaram bons resultados em estudos sobre grandes áreas urbanas ou aglomerados urbanos, com espaços bem definidos do que é urbano e não urbano. Sendo assim, o objetivo específico foi examinar o potencial dos modelos espaciais aplicados a áreas urbanas fragmentadas. O estudo foi desenvolvido com base em imagens de satélite dos períodos de 1976 e 1988 para calibração do modelo e 2000 para validação. A modelagem foi desenvolvida utilizando-se o Geomod Model, com resolução de 30 metros, o qual determina os padrões de transição por probabilidades de transição e apresentou alta porcentagem de acerto no processo de validação. Ainda, por meio do software IDRISI, os autores relacionaram as novas áreas urbanas previstas com a acessibilidade ao sistema de transportes e concluíram que além das relações de vizinhança, a acessibilidade é um fator determinante para o processo de expansão urbana.

Osman et al. (2015) aplicaram a metodologia dos autômatos celulares do modelo SLEUTH com o objetivo de simular o crescimento urbano na região do Cairo entre os períodos de 2015 e 2035. A modelagem desenvolvida utilizou dados de imagens de satélite Landsat, referentes aos anos de 1984, 2000 e 2013. Para preparar os dados requeridos pelo modelo, foi utilizado o software ArcGIS 10.1. A modelagem consistiu na elaboração de três diferentes cenários. O primeiro cenário levou em conta os padrões históricos de expansão urbana, de forma a preservar as condições existentes; o segundo se caracterizou por um cenário compacto de crescimento, com restrições robustas de crescimento nas áreas periféricas; e o terceiro cenário foi desenvolvido levando em conta o processo de planejamento urbano, com forte proteção dos recursos naturais e como se as obrigações da política urbana fossem fortemente realizadas.

A elaboração dos diferentes cenários no trabalho de Osman et al. (2015) permitiu a comparação dos resultados do crescimento urbano de forma a entender como a introdução de ações de planejamento urbano interfere na distribuição espacial do espalhamento urbano, diminuição de áreas rurais e outros fatores importantes do processo de gestão urbana. Ao comparar os resultados obtidos pelos diferentes cenários, perceberam-se aglomerações de “clusters” urbanos, formando áreas urbanas homogêneas maiores e diminuição da disponibilidade de áreas para a agricultura. Ainda, de acordo com a distribuição espacial dos

resultados, percebeu-se forte influência da disponibilidade de infraestrutura de transportes na evolução do processo de espalhamento urbano, principalmente em áreas já urbanas, por proporcionar facilidades ao processo de industrialização e comércio. Os autores citam a eficiência da aplicação do modelo SLEUTH nos estudos de processos de expansão urbana, visto o grande número de variáveis embutidas, mas sugere que se atente também para as influências dos aspectos sociais, econômicos e culturais nos processos de previsão de cenários futuros.

Sendo assim, percebe-se um grande avanço na aplicação de CAs em modelagens urbanas nas últimas décadas. Peres e Polidori (2009) exploraram a possibilidade de aplicação dos CAs para estudos de simulação de crescimento urbano e trouxeram uma revisão interessante sobre alguns modelos desenvolvidos nas últimas décadas, utilizando-se os CAs, como: *The Island Model*, *Urban Growth Model*, *SimLand*, “DUEM” (Modelo de Evolução e Dinâmica Urbana). Ainda apresentaram a aplicação de um novo modelo chamado SACI (Modelo de Simulação do Ambiente da Cidade), construído a partir da ideia de uso conjunto de teoria de grafos, autômato celular, geotecnologias e modelagem adaptativa. Esse modelo, segundo os autores, tem sido aplicado com sucesso como ferramenta científica nos estudos do ambiente urbano.

Nesse sentido, a utilização de modelos baseados em CAs em estudos de sistemas complexos, dos quais suas variáveis não são independentes umas das outras e a ação de uma pode afetar o comportamento da outra, se apresentam como ótima ferramenta na modelagem dinâmica e podem gerar bons resultados nos estudos direcionados ao contexto urbano (Almeida et al., 2005, Rafiee et al., 2009; Deep e Saklani, 2014; Rienow e Goetzke, 2015). Como o estudo desenvolvido neste trabalho também foi baseado em CAs, no próximo subcapítulo estão apresentados os principais conceitos dessa ferramenta.

2.3.CELLULAR AUTOMATA (CA)

Os CAs são sistemas dinâmicos discretos e são frequentemente descritos como contrapartes às equações diferenciais parciais, que têm a capacidade de descrever sistemas dinâmicos contínuos (MELLOTI, 2009). Conforme apresentado anteriormente, o estudo de

fenômenos complexos de modelagem dinâmica, como no caso da expansão urbana, é uma área intimamente ligada aos CAs.

O desenvolvimento do conceito de Autômatos Celulares é atribuído a John Von Neumann e Stanislaw Ulam, em meados dos anos de 1940, com o objetivo de promoverem um modelo matemático para estudos de comportamento de sistemas complexos na tentativa de demonstrar que o princípio de máquinas auto reprodutivas era possível.

Em 1970, baseando-se nos estudos de Neuman e Ulam, o pesquisador inglês John Horton Conway criou o Jogo da Vida, o qual é um autômato celular, ou seja, um sistema de rede em que o estado de cada ponto da rede é determinado pelas regras locais. Ele simula, por meio de um algoritmo simples, a dinâmica da evolução de uma sociedade de organismos vivos, ou seja, simula processos de nascimento, sobrevivência e morte. As regras para evolução do Jogo da Vida são muito simples: (1) o destino de um indivíduo vivo depende dos seus oito vizinhos mais próximos; ele morrerá na próxima etapa se houver menos de dois (sobre-exposição) ou mais de três vizinhos vivos; outros casos permanecerão vivos; (2) em um local morto, um novo indivíduo nascerá na próxima etapa se houver exatamente três vizinhos vivos. (BAK et al., 1989; MOTA, 2005).

Em se tratando das dimensões e formato, os CAs podem trabalhar em uma estrutura unidimensional, bidimensional e tridimensional. Ainda, mantendo-se a forma dos CAs, podem apresentar células de diferentes formatos, como triangular, quadrangular e hexagonal. As Figuras 1 e 2 exemplificam essas características.

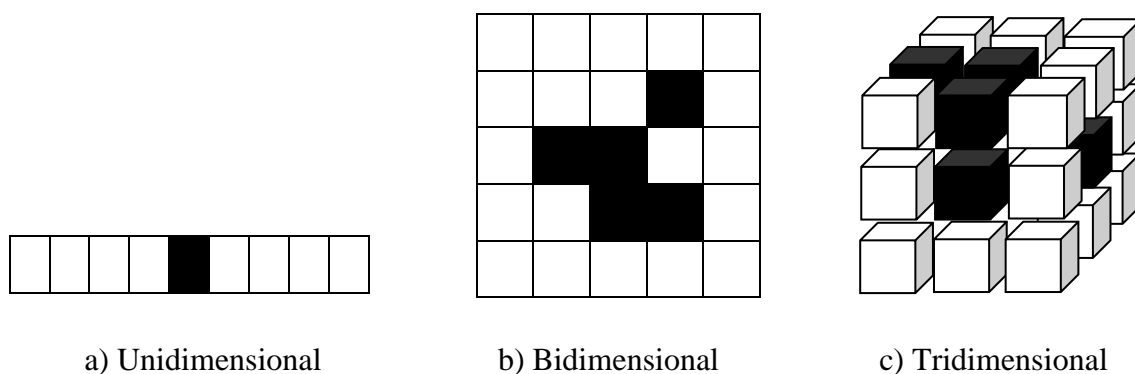


Figura 1. Exemplos de dimensões de Autômatos Celulares

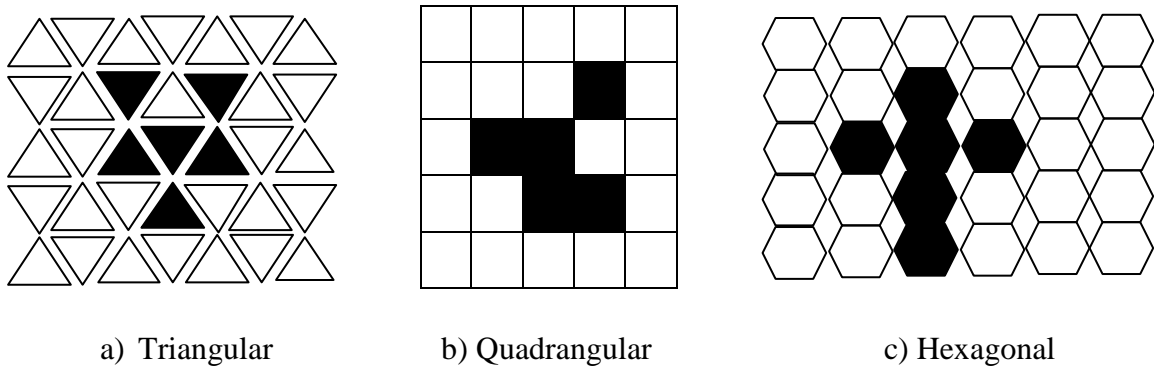


Figura 2. Exemplos de formatos de Autômatos Celulares

De acordo com os trabalhos apresentados por Silva (2002), Mota (2005), Manzato (2007), Castro e Castro (2008), Liu (2009), Costa (2010) e Oliveira et al. (2010), os CAs possuem cinco características básicas.

- 1) **Células e Rede de Células:** a célula é a unidade básica no espaço celular e sua rede forma o território estudado;
- 2) **Estados:** define os atributos do sistema, no qual cada célula tem pelo menos um estado (por exemplo, em modelos urbanos: urbano, não urbano, tipo de uso e ocupação do solo, etc.) e o comportamento de cada célula é definido por um conjunto de regras de transição;
- 3) **Vizinhança:** é o conjunto de células com que a célula em questão interage e, conforme ocorre no mundo real, o espaço envolvente e a sua evolução ao longo do tempo explicam os comportamentos. As relações de vizinhança têm um papel importante no CA. Os tipos de vizinhança mais comuns são a de Neumann, a de Moore e a Arbitrária, conforme detalhado a seguir e exemplificado na Figura 3:
 - Neumann: apenas células à direita, esquerda, acima e abaixo são consideradas como vizinhas;
 - Moore: inclui-se à estrutura de Neumann as células diagonais (esta foi a estrutura utilizada neste trabalho);
 - Arbitrária: os vizinhos são escolhidos por algum critério determinístico ou randômico.

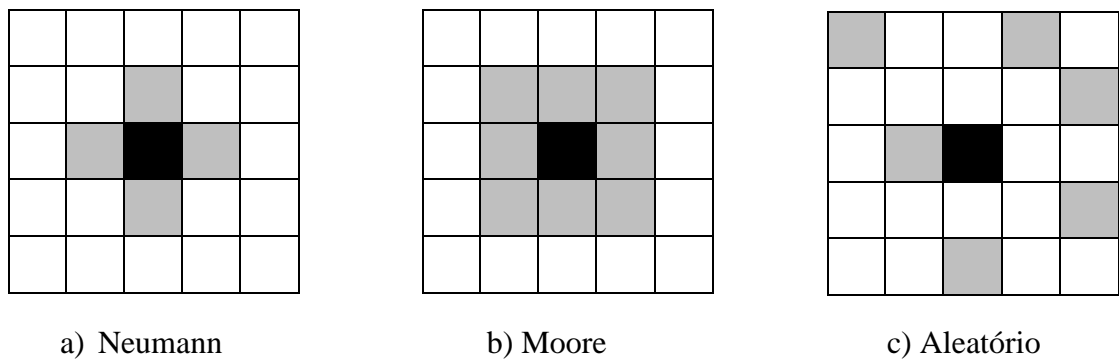


Figura 3. Tipo de vizinhança dos CAs

- 4) **Regras de transição:** definem como o estado da célula muda em resposta a seu estado atual e aos estados das células vizinhas. Em geral, as regras podem ser determinísticas ou estocásticas, associadas ao comportamento de cada célula e não há limite para o número de regras.
- Determinística: abordagem tradicional dos modelos de CA, destaca-se pela sua simplicidade e por permitir a reprodução plena das suas modelagens;
 - Estocástica: abordagem em que é introduzida uma perturbação aleatória com o objetivo de reproduzir aspectos não explicáveis pelos modelos;
- 5) **Tempo ou Sequência de períodos temporais discretos:** especifica a dimensão temporal para o CA. Quando ativado, o CA se comporta de modo iterativo de um período temporal para o seguinte, atualizando o espaço de maneira sincrônica.

Ainda em relação às regras de transição, embora os tipos básicos de regras possam ser definidos como determinísticos ou estocásticos, estruturas mistas também podem ser empregadas, como é o caso das regras de transição obtidas por redes neurais artificiais (RNAs). Nesta abordagem, os valores dos parâmetros são determinados automaticamente a partir de treinamento da rede neural com os dados disponíveis. Vale ressaltar que essa abordagem é determinística na adoção dos pesos das conexões entre os nós, entretanto o processo de treinamento incorpora, de alguma maneira, a distribuição estocástica dos dados (Manzato, 2007). Alguns estudos (ver, por exemplo, RAMOS e RODRIGUES DA SILVA, 2007) mostram que o desempenho dos modelos desenvolvidos com base em RNAs é superior ao

obtido com outras abordagens. O próximo subcapítulo apresenta os principais conceitos sobre RNAs, uma vez que os modelos aqui desenvolvidos utilizaram essa estrutura.

2.4. REDES NEURAIS ARTIFICIAIS (RNAs)

A expressão *Rede Neural* é atribuída à tentativa dos modelos concebidos a partir dessa estrutura imitarem a capacidade que o cérebro humano possui de reconhecer, associar e generalizar padrões (VELLASCO, 2007). Ainda, de acordo com Fernandes et al. (1996), as Redes Neurais são capazes de aprender com a experiência e fazer generalizações baseadas no seu conhecimento previamente acumulado e, conforme Manzato (2007), têm a capacidade de reconhecer e classificar padrões por meio de processos de treinamento ou aprendizagem. Sendo assim, aparecem como uma alternativa promissora na busca de determinação de padrões e previsão de novos cenários.

De acordo com Vellasco (2007), as Redes Neurais constituem uma técnica estatística não-linear, capaz de resolver uma variedade de problemas complexos, o que torna o método extremamente útil quando não é possível definir um modelo explícito ou uma lista de regras. Dessa forma, como ocorre no processo de expansão urbana, não existe um modelo explícito ou lista de regras de crescimento, logo a Rede Neural aparece como potencial ferramenta na determinação das regras de transição na modelagem desse processo.

A primeira publicação, aqui encontrada, relacionada à neurocomputação data de 1943, por meio do artigo elaborado por McCulloch e Pitts (1943). Os autores realizaram o primeiro trabalho inspirado em neurônio biológico, o que resultou na primeira concepção de neurônio artificial (Silva et al., 2010).

Em 1949, foi proposto o primeiro método de treinamento para a RNA, regra de aprendizado de Hebb e, posteriormente, diversos pesquisadores deram continuidade aos estudos de modelagem matemática fundamentados no neurônio biológico. Em 1958 surgiu o primeiro neurocomputador, desenvolvido por Frank Rosenblatt, denominado *Mark I – Perceptron*. Porém, a grande evolução ocorreu em 1969 com a publicação do livro *Perceptron – an*

introduction to computational geometry, por Minsky e Papert, que mostrou a inviabilidade da rede em desenvolver correta classificação de padrões para classes não linearmente separáveis.

A partir de então, poucos estudos foram desenvolvidos sobre o tema, até final dos anos de 1980. Com o surgimento de computadores de maior capacidade de processamento e criação de algoritmos de otimização mais eficientes e robustos, surgiram novas descobertas sobre o tema, permitindo-se a partir da década de 1990 incrementar a eficiência no treinamento das redes neurais artificiais em diversas aplicações, podendo então utilizá-las também na classificação de padrões de regressão linear. Para mais informações sobre RNAs, ver também os trabalhos de Silva et al. (2004), Vellasco (2007), Silva et al. (2010).

A Rede Neural é um sistema computacional que busca simular o cérebro humano e é composta por uma rede de neurônios interconectados e organizados em camadas, normalmente uma de entrada e uma de saída. Entre elas é possível ter uma ou mais camadas intermediárias. Nesse caso, todos os neurônios da camada de entrada se conectam aos neurônios da(s) camada(s) intermediária(s) e esses aos da camada de saída, conforme representado na Figura 4.

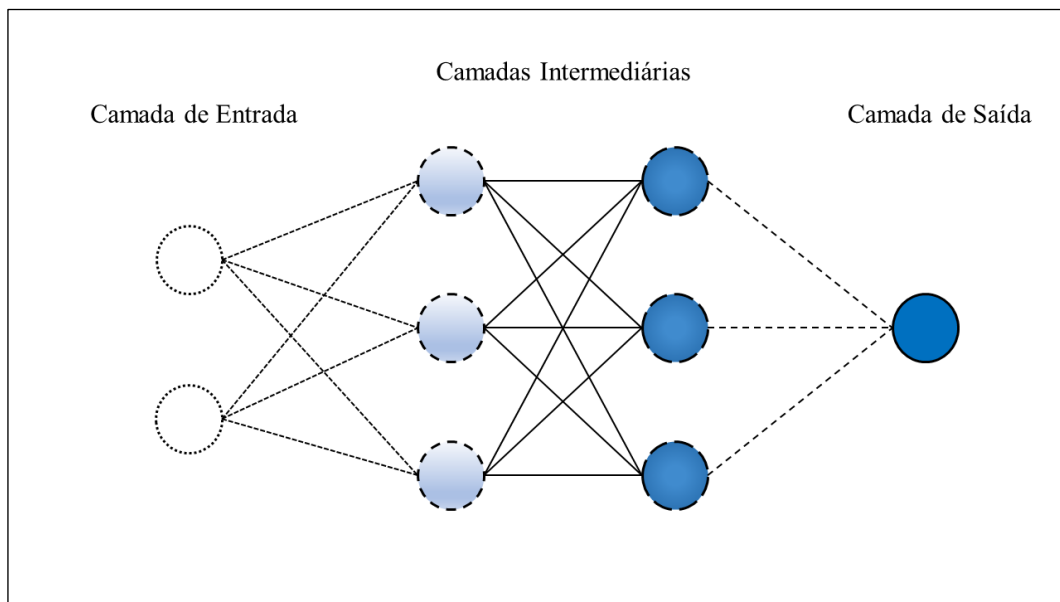


Figura 4. Estrutura Básica de um RNA (Adaptado de Silva et al., 2004).

A camada de entrada é responsável pelo recebimento de informações (dados) advindos do meio externo, as intermediárias são as compostas por neurônios que possuem a responsabilidade de extrair as características do processo ou sistema e, por fim, a camada de

saída é responsável pela produção e apresentação dos resultados finais da rede. A disposição dos neurônios pode formar diferentes arquiteturas de redes neurais artificiais, divididas entre redes de camadas simples, redes de camadas múltiplas, redes recorrentes e redes reticuladas (Cardon e Muller, 1994; Vellasco, 2007; Silva et al., 2010).

As RNAs, de maneira geral, além dos componentes físicos como conexões e elementos de processamento, representados pelos nós e arestas, possuem também outros componentes não físicos, como padrões e funções. Os padrões são entendidos como os dados de entrada da rede, representando uma codificação que corresponde a certa modelagem da realidade de uma aplicação definida para a RNA. As funções são modelos matemáticos utilizados no treinamento e reconhecimento de padrões.

Segundo Manzato (2007), as RNAs possuem alguns elementos principais: conjunto de elementos de processamento, estado de ativação, função de saída para cada elemento de processamento, ligações entre elementos de processamento, propagação e função de combinação, ativação, aprendizagem e ambiente onde o sistema opera. Ainda, o autor apresenta alguns detalhes desses elementos:

- **Elementos de processamento:** são os principais elementos de uma RNA e estão relacionados à sua tipologia, ou seja, a especificação do número de neurônios que constituirá a rede, bem como a sua organização das camadas.
- **Estado de ativação:** cada neurônio em uma RNA tem um estado de ativação associado, o qual depende do que se procura representar com o modelo. Em geral, o estado de ativação pode ser representado por uma função contínua ou discreta.
- **Função de saída de cada elemento de processamento:** os neurônios produzem um sinal de saída que está relacionado com sua ativação por meio de uma função de transferência (função saída). Esta função tem o objetivo de controlar a intensidade da função de ativação para se obter o desempenho desejado na rede.
- **Ligações entre elementos de processamento:** as ligações entre os neurônios são representadas por uma matriz de pesos e definem o conhecimento do sistema. Pesos positivos são ligações que excitam, gerando um reforço na ativação e, pesos negativos, inibem a ativação do neurônio.

- **Propagação da função de combinação:** são as regras com as quais os valores de entrada de um neurônio são combinados com os valores da respectiva matriz de pesos para produzir a entrada líquida.
- **Aprendizagem:** processo em que a rede extrai informações relevantes dos exemplos a ela apresentados, criando uma representação própria para o problema.

A utilização das RNAs para a obtenção de regras de transição em modelos baseados em CA possui uma vasta lista de aplicações encontradas na literatura internacional para representar os fenômenos urbanos (ver, por exemplo, Wu, 2002, Yeh e Li, 2003, Mas et al., 2004, Gleriani, 2005, Guan et al., 2005, Rocha et al., 2007, Yang et al., 2008, Mahajan e Venkatachalam, 2009, Basse et al., 2014, Pijanowski et al., 2014, Qiang e Lam, 2015).

Seguindo essa linha de modelagem, o trabalho aqui desenvolvido também procurou combinar os recursos de RNA com CA para modelar processos urbanos, mais especificamente a questão da expansão urbana. No entanto, uma questão pouco explorada na literatura e que constituiu a contribuição dessa pesquisa refere-se à análise da resolução espacial (isto é, o tamanho da célula) utilizada nos modelos baseados em tais recursos. Sendo assim, é apresentada no capítulo 4 a metodologia utilizada, a qual compreende a preparação dos dados e a definição das variáveis, além do detalhamento dos modelos desenvolvidos.

3. METODOLOGIA

Este capítulo apresenta os dados utilizados para o desenvolvimento deste trabalho e descreve os materiais e métodos utilizados nos processos de preparação de dados, definição das variáveis e modelos utilizados para o desenvolvimento da modelagem espacial da expansão urbana da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP).

3.1.DADOS UTILIZADOS

A modelagem espacial da expansão urbana da área de estudo selecionada, a saber: a RMSP, foi desenvolvida com base nos dados de contorno do perímetro urbanizado referentes aos anos de 1881, 1905, 1929, 1949, 1974 e 2005 (Figura 5), organizados pelo *Lincoln Institute of Land Policy* (ANGEL et al., 2010).

O *Lincoln Institute of Land Policy* é uma organização privada, independente e apartidária, fundada em 1946 por John C. Lincoln, cuja missão é ajudar a resolver desafios econômicos, sociais e ambientais globais para melhorar a qualidade de vida através de abordagens criativas no uso, tributação e gestão do solo.

Segundo a instituição, seu trabalho visa subsidiar as decisões públicas sobre políticas do solo através da pesquisa, treinamento e comunicação eficaz. O trabalho do referido instituto está dividido em cinco áreas principais: Planejamento e Morfologia Urbana; Avaliação e Tributação; Iniciativas Internacionais e Institucionais; Programa para a República Popular da China; e Programa para a América Latina e o Caribe.

O *Lincoln Institute of Land Policy* foi posteriormente fundado como escola em 1974 e tornou-se o principal beneficiário de fundos para desenvolver programas multidisciplinares de ensino, pesquisa e publicações. O Instituto Lincoln tem como foco a valorização imobiliária e políticas tributárias, planejamento e desenvolvimento urbano, economia do solo e direitos de

propriedade. Para ampliar seu trabalho internacionalmente, o Instituto criou o Programa para a América Latina e Caribe em 1993 e o Programa para a República Popular da China em 2003.

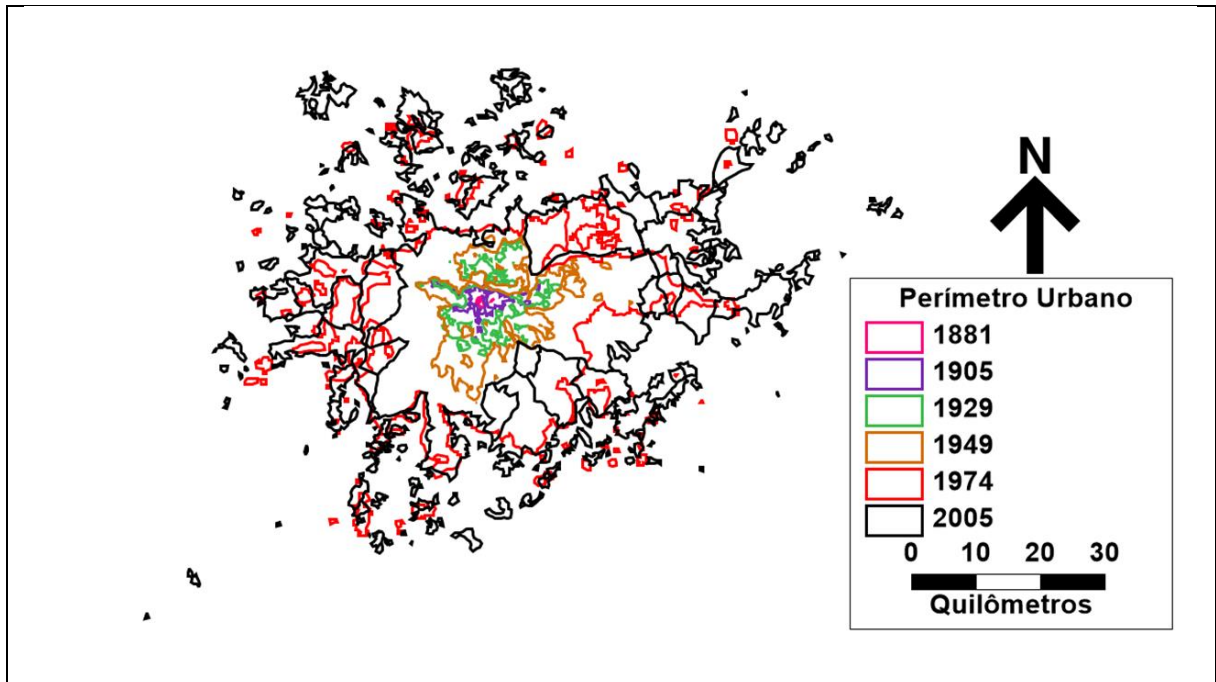


Figura 5. Contorno do perímetro urbano dos períodos de dados utilizados

Para o desenvolvimento da modelagem espacial, os referidos dados de contorno do perímetro urbanizado foram inicialmente obtidos no formato de bases de dados georreferenciadas do tipo vetorial. Posteriormente, por meio da criação de um Grid, tais dados foram rasterizados conforme é apresentado na sequência, no item 3.2. Ademais, foi utilizada uma imagem de satélite obtida do Google Earth referente ao ano de 2015 como informação de apoio às análises desenvolvidas. Essa imagem está ilustrada na Figura 6 e serviu como referência não só na determinação de áreas de restrições de expansão urbana, como também na análise dos resultados de previsão apresentados por cada um dos modelos.

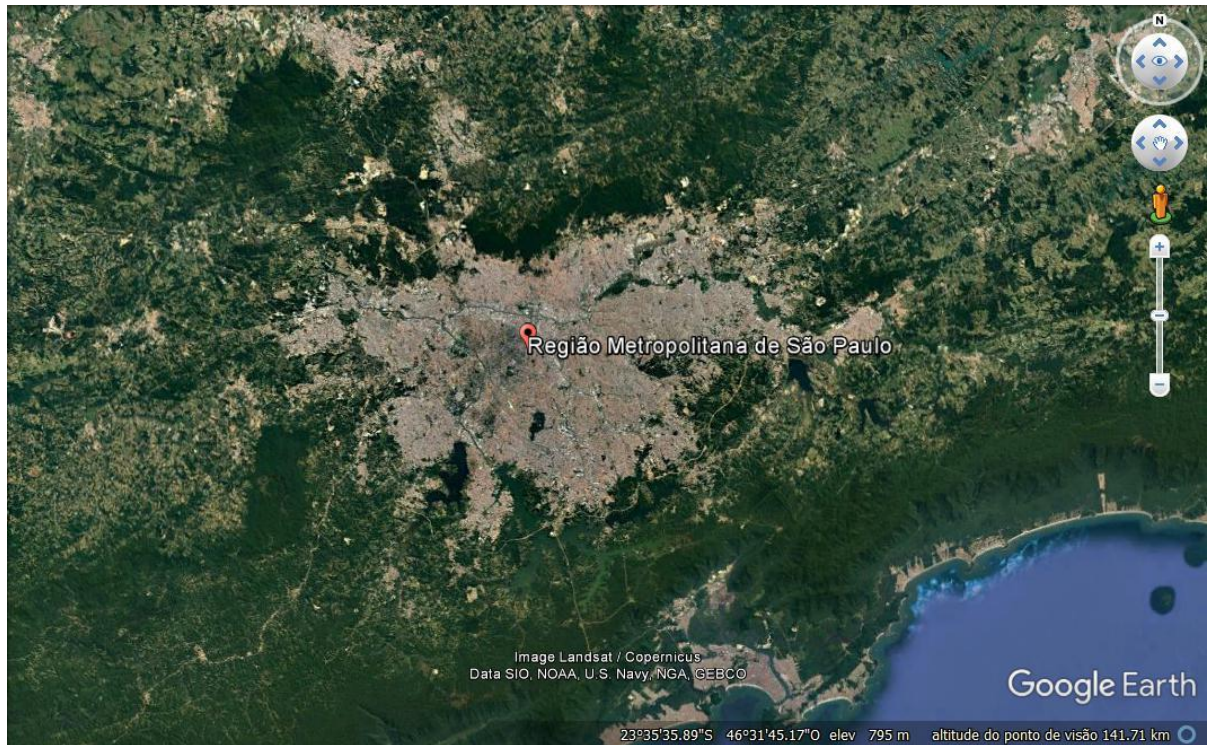


Figura 6. Imagem de satélite referente ao ano de 2015

3.2. PREPARAÇÃO DOS DADOS

A etapa de preparação dos dados teve o objetivo de adequar e formatar os dados adquiridos por meio do Instituto Lincoln de forma a possibilitar o desenvolvimento da modelagem espacial, utilizando-se dos recursos e ferramentas computacionais para tal.

Os dados de contorno do perímetro urbanizado da RMSP referentes aos anos de 1881, 1905, 1929, 1949, 1974 e 2005 se apresentavam, originalmente, no formato vetorial. Sendo assim, esses dados foram rasterizados por meio da criação de um Grid (ou seja, uma grade de células de formatos regulares), representado nas Figuras 7, 9 e 10, utilizando o software de sistemas de informação geográfica (SIG) Maptitude versão 2015.

Por meio desse procedimento, definiu-se o inicialmente, para um protótipo, o tamanho das células de 1000 por 1000 metros, obtendo-se um Grid com 23.690 células abrangendo a área de estudo (Figura 7). A escolha inicial do tamanho do Grid é justificada pelo tempo de processamento necessário e qualidade do resultado desejado.

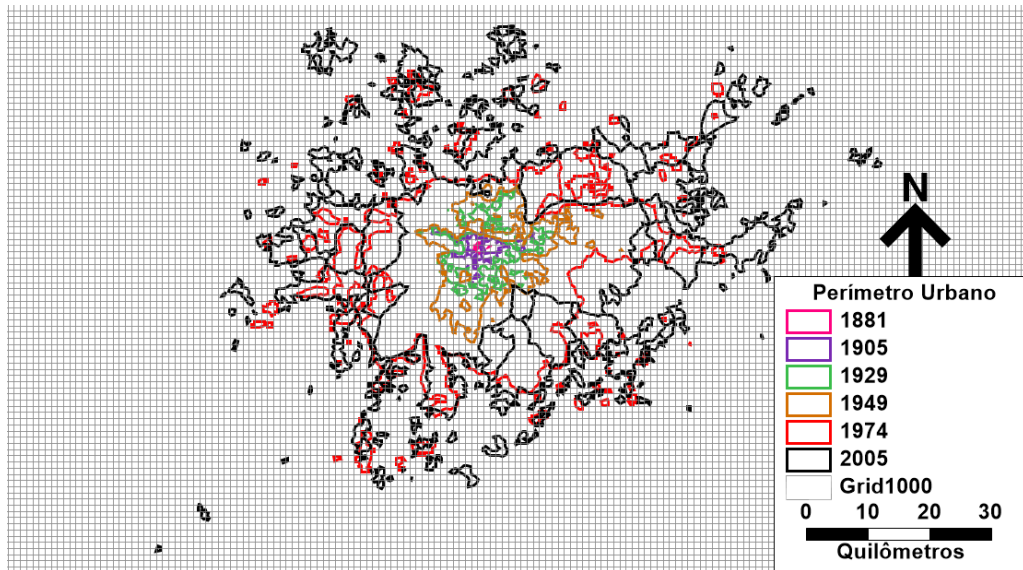


Figura 7. Representação do Grid 1000 com os contornos de perímetro urbano

Posteriormente, ainda com o Grid de 1000 por 1000 metros foram inseridas áreas de restrição para expansão urbana, baseando-se na imagem do Google Earth, levando em conta a presença da Serra da Cantareira, as Represas Billings e Guarapiranga, além dos Reservatórios de Taiáçueba e Jundiá (Figura 8). Com isso, obteve-se um Grid com 23.417 células conforme ilustra a Figura 9, permitindo uma melhor adequação da área de estudo com a realidade ao se desenvolver a modelagem espacial.

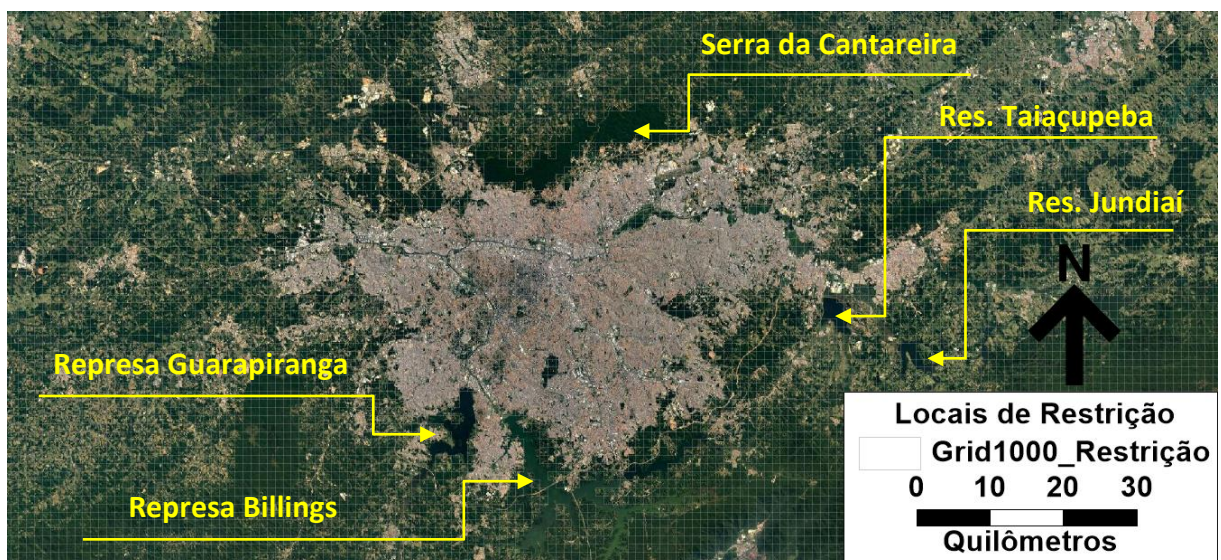


Figura 8. Localização das áreas de restrição.

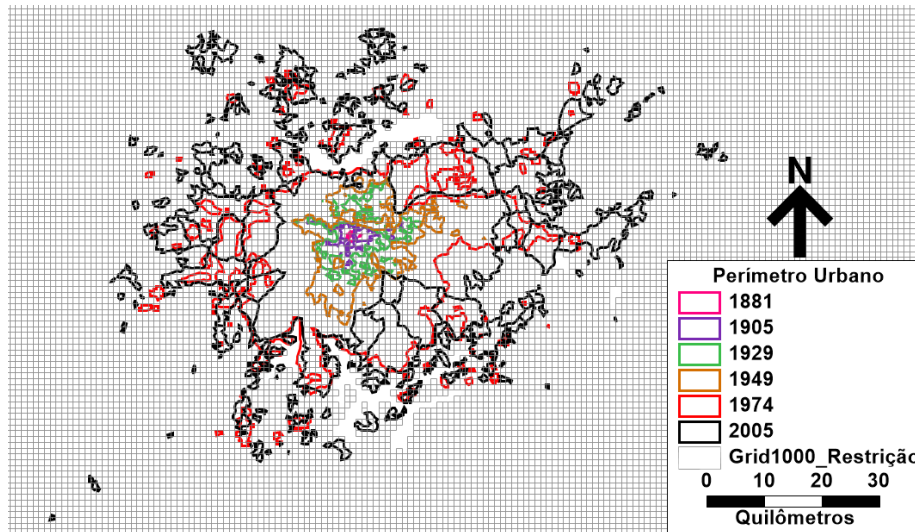


Figura 9. Representação do Grid 1000 com restrição com os contornos de perímetro urbano

A partir da análise dos resultados apresentados pelo protótipo (ver Massabki et al., 2017), novos Grids foram criados já com as áreas de restrições inseridas a fim de analisar o impacto da resolução espacial na modelagem, conforme o objetivo deste trabalho. Mais especificamente, um conjunto de três novos Grids foram considerados, sendo cada Grid diferenciado pelo seu respectivo tamanho das células. Dessa forma, foram gerados Grids cujo tamanho das células mediam 1000 por 1000 metros, 800 por 800 metros e 600 por 600 metros.

Vale ressaltar que a diminuição do tamanho das células do Grid proporciona, conseqüentemente, o aumento no número de células, o que também exige maior esforço de processamento computacional. Na tentativa de minimizar esses efeitos, foram excluídas parte das regiões periféricas da área de estudo consideradas no protótipo e que claramente não seriam relevantes para a modelagem aqui desenvolvida. Portanto, o Grid de 1000 por 1000 metros resultou em um conjunto de 12.753 células, o Grid de 800 por 800 metros com 20.311 células e o Grid de 600 por 600 metros com 35.268 células. A representação desses Grids está na Figura 10, juntamente com os contornos de perímetro urbanizado de cada período.

Na etapa subsequente do processo de preparação dos dados, baseando-se nos contornos do perímetro urbanizado de cada período, as células dos respectivos Grids situadas na parte interna e/ou interceptadas pelos referidos contornos receberam a identificação “Urbano” e, as demais, “Não Urbano”. Desta maneira, ficou definida a variável básica dos

modelos, referida ao “Estado” de cada célula. Esse procedimento é ilustrado pelas Figuras 11, 12 e 13 para cada um dos Grids aqui analisados.

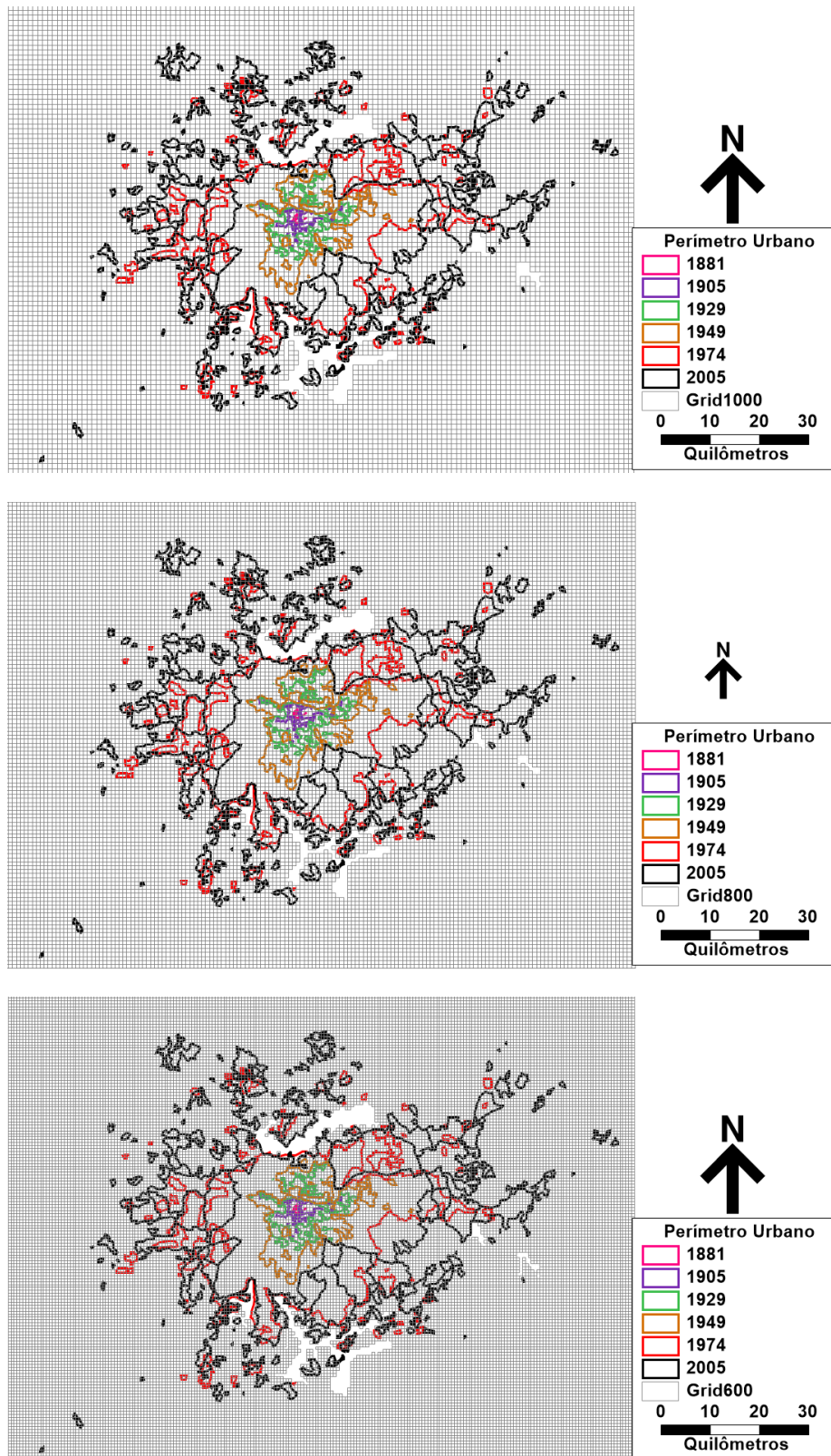


Figura 10. Representação dos Grids 1000, 800 e 600 com os contornos de perímetro urbanizado

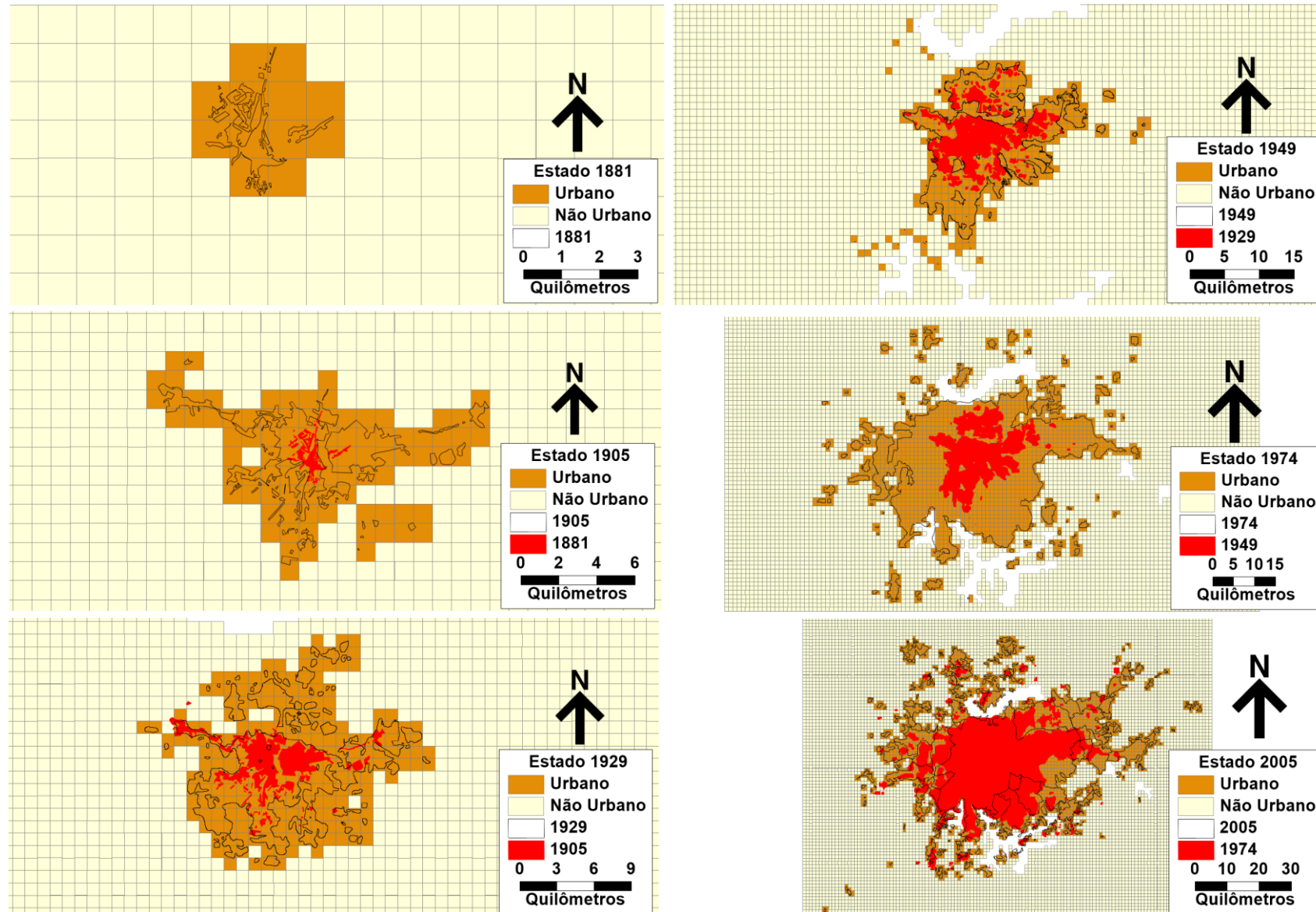


Figura 11. Rasterização dos contornos do perímetro urbano para os períodos de 1881, 1905, 1929, 1949, 1974 e 2005 – Grid de 1000 por 1000 metros.

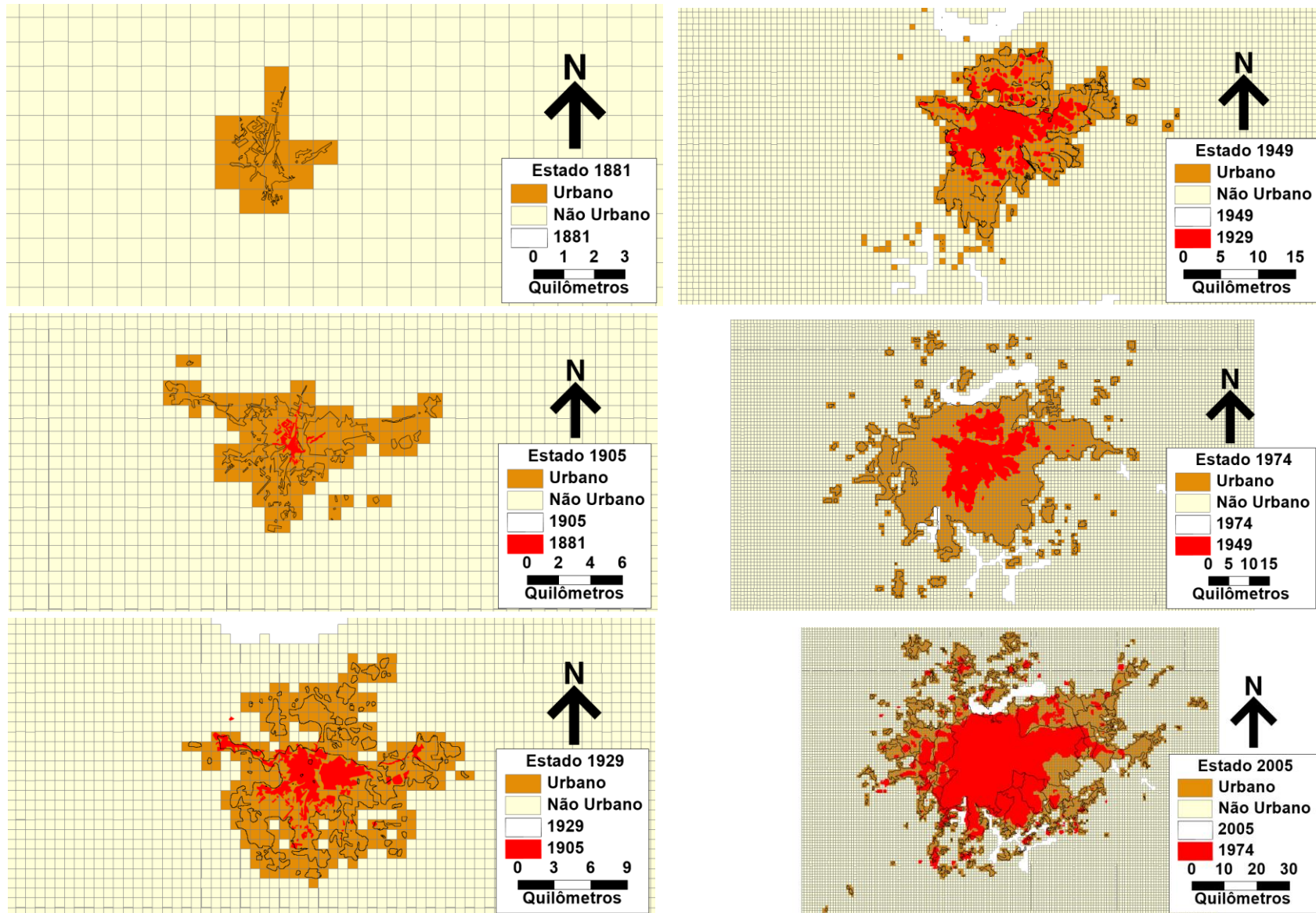


Figura 12. Rasterização dos contornos do perímetro urbano para os períodos de 1881, 1905, 1929, 1949, 1974 e 2005 – Grid de 800 por 800 metros.

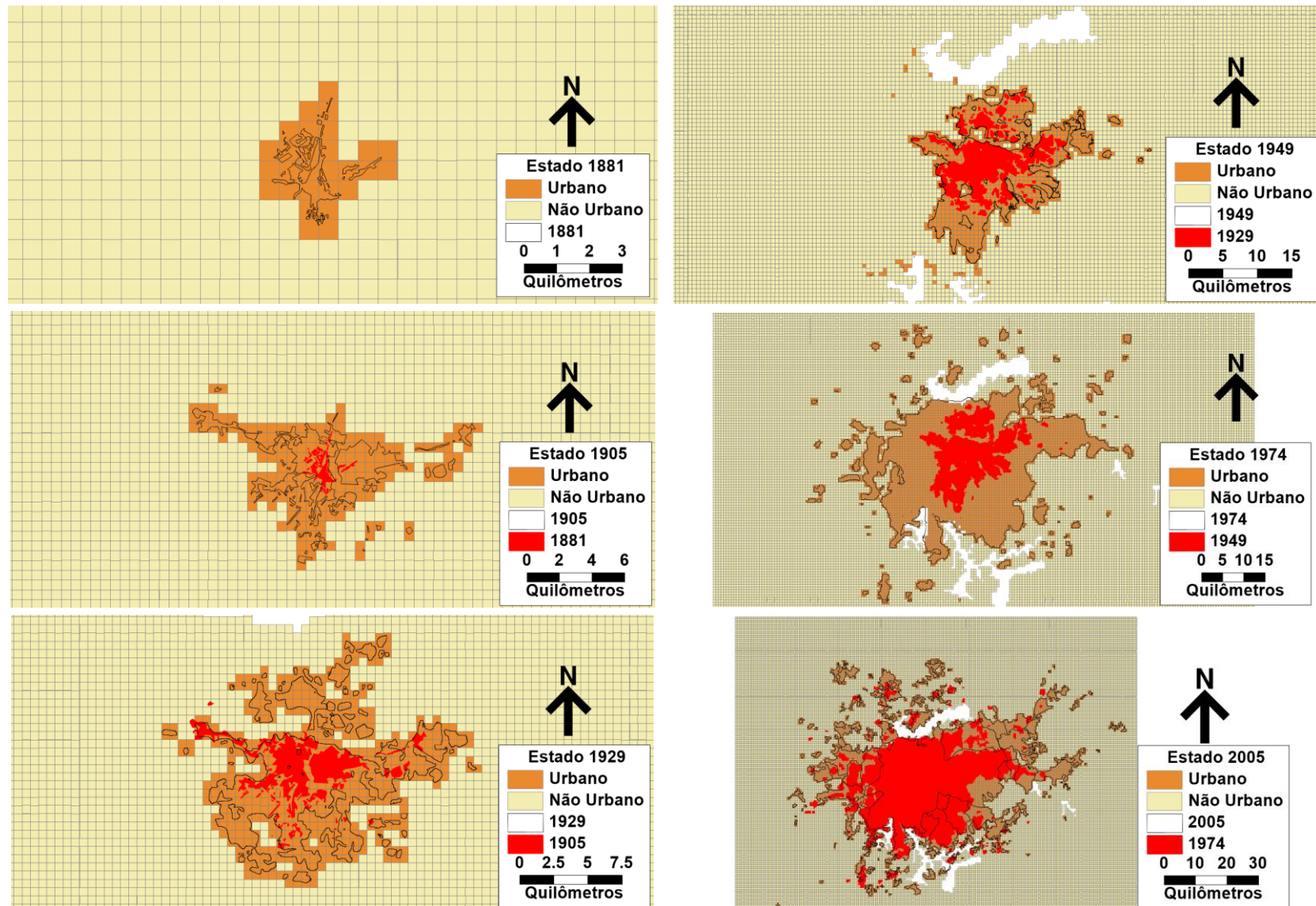


Figura 13. Rasterização dos contornos do perímetro urbano para os períodos de 1881, 1905, 1929, 1949, 1974 e 2005 – Grid 600 por 600 metros.

Na etapa final de preparação dos dados, para o desenvolvimento da modelagem espacial da expansão urbana da RMSP conforme as características básicas dos Autômatos Celulares, foram definidas as seguintes variáveis auxiliares: Número de Vizinhos Urbanos e Número de Vizinhos Não Urbanos para cada uma das Células do Grid. Essas variáveis, juntamente com a variável básica dos modelos (Estado da célula), compõem os dados para simular o comportamento das células no espaço e no tempo, bem como em relação às suas vizinhas.

3.3.DEFINIÇÃO DOS MODELOS

Conforme discutido, uma das características da modelagem baseada em CAs é o estabelecimento de regras de transição. Neste estudo, as regras de transição foram obtidas por meio de Redes Neurais Artificiais (RNA) com auxílio do software EasyNN. A partir da combinação das três variáveis definidas anteriormente (estado da célula, número de vizinhos urbanos e número de vizinhos não urbanos), foi possível a elaboração de quatro modelos para a análise da expansão urbana da RMSP, conforme a Tabela 1.

Tabela 1. Estrutura dos modelos desenvolvidos

Modelos	Variáveis consideradas
A	Estado, Número de Vizinhos Urbanos e Número de Vizinhos Não Urbanos
B	Estado, Número de Vizinhos Não Urbanos
C	Estado, Número de Vizinhos Urbanos
D	Estado

É importante ressaltar que o Modelo D considera apenas o Estado da Célula e, portanto, não atende aos preceitos da aplicação dos autômatos celulares por não possuir relações de vizinhança. Tal fato é confirmado pelo baixo rendimento apresentado por esse modelo na modelagem desenvolvida com o protótipo (Massabki et al., 2017). Sendo assim, o Modelo D foi desconsiderado no desenvolvimento das fases seguintes deste trabalho.

Considerando o conjunto de dados disponíveis em diferentes períodos, três estruturas de modelagem foram adotadas baseando-se em uma adaptação dos modelos desenvolvidos por Manzato e Rodrigues da Silva (2010). Inicialmente foram consideradas estruturas de modelagem com quatro períodos de entrada (IN) e um período de saída (OUT). Daí a denominação desse modelo como Modelo “4 IN 1 OUT”. Em seguida, foi retirado um período de entrada, nesse caso o período de 1881, por se tratar do período mais antigo, com o objetivo de tentar melhorar o desempenho na determinação das regras de transição. Dessa forma, foi elaborado um modelo com três períodos de entrada e um período de saída, ou seja, Modelo “3 IN 1 OUT”. Também, foi explorado o modelo “T, T+25”, o qual apresenta apenas um período de entrada e um de saída. No entanto, dados de vários períodos diferentes são incorporados verticalmente, formando blocos. As Figuras 14, 15 e 16 ilustram as respectivas estruturas exploradas.

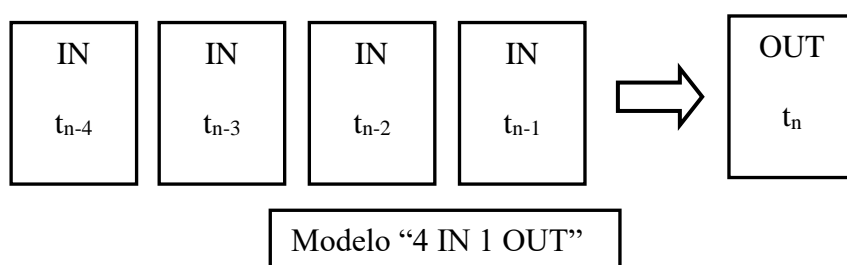


Figura 14. Estrutura do Modelo “4 IN 1 OUT”

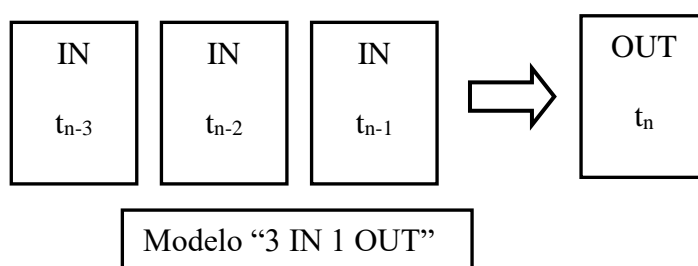


Figura 15. Estrutura do Modelo “3 IN 1 OUT”

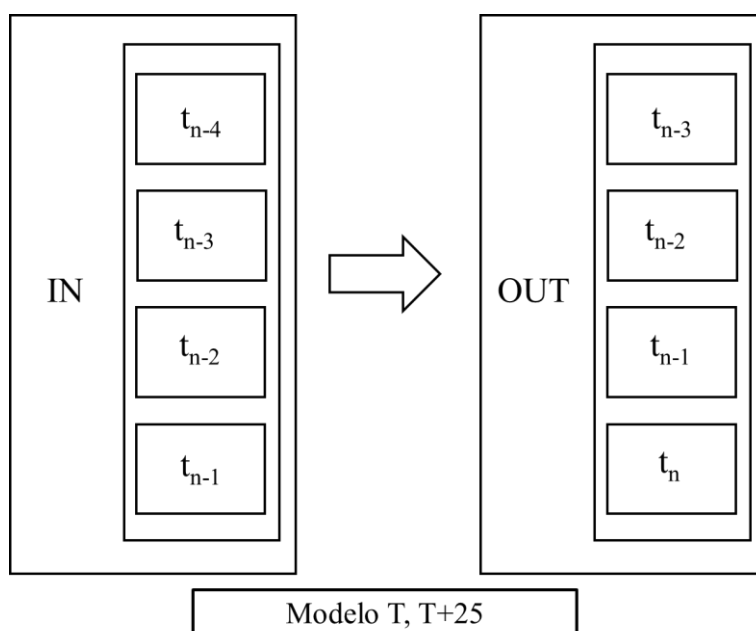


Figura 16. Estrutura do Modelo T, T+25

A justificativa para a exploração dessas estruturas reside no fato de que o processo de modelagem por RNAs é baseado nas relações internas entre os dados, permitindo a extração das regras de transição. Assim, diferentes estruturas de organização dos dados produzem diferentes regras de transição. Cabe ao analista, na sequência, avaliar a melhor estrutura por meio do desempenho dos modelos.

Duas fases principais existem, portanto, no processo de modelagem: uma de treinamento e outra de validação. Há ainda uma terceira fase, a de previsão, que permite projetar o cenário em estudo para um período futuro. No caso aqui estudado, esse período correspondeu ao ano de 2030, pois relaciona-se com o intervalo médio de tempo entre os períodos utilizados na modelagem, que é de aproximadamente 25 anos.

De acordo com a disponibilidade dos dados utilizados neste trabalho e as estruturas de modelagem exploradas, as referidas fases foram organizadas conforme ilustram as Tabelas 2, 3 e 4.

Tabela 2. Fases da modelagem e períodos utilizados – Modelo “4 IN 1 OUT”

Fases	IN	IN	IN	IN	OUT
	t_{n-4}	t_{n-3}	t_{n-2}	t_{n-1}	t
Treinamento	1881	1905	1929	1949	1974
Validação	1905	1929	1949	1974	2005
Previsão	1929	1949	1974	2005	2030

Tabela 3. Fases da modelagem e períodos utilizados – Modelo “3 IN 1 OUT”

Fases	IN	IN	IN	OUT
	t_{n-3}	t_{n-2}	t_{n-1}	t
Treinamento	1905	1929	1949	1974
Validação	1929	1949	1974	2005
Previsão	1949	1974	2005	2030

Tabela 4. Fases da modelagem e períodos utilizados – Modelo “T, T+25”

Fases	IN	OUT
	t_{n-1}	t_n
Treinamento	1881	1905
	1905	1929
	1929	1949
	1949	1974
Validação	1974	2005
Previsão	2005	2030

Ainda em relação à fase de treinamento, é necessário separar o conjunto dos dados (ou seja, número total de células de cada Grid) em duas amostras: uma de treinamento e uma de validação interna da RNA. No caso aqui estudado, foram utilizados 70% dos dados como treinamento e 30% como validação interna. Além disso, as RNAs foram construídas com uma camada intermediária e o número de neurônios nesta camada foi gerado automaticamente pelo software EasyNN, assim como os valores de Momentum e Learning Rate (parâmetros que permitem ao algoritmo obter e avaliar o erro de maneira iterativa, procurando convergir para o erro mínimo global). Essas informações estão resumidas na Tabela 5.

Por fim, a fase de validação refere-se à verificação do desempenho dos modelos desenvolvidos e já treinados. Para tanto, de acordo com cada estrutura de modelagem (Tabelas 2, 3 e 4) foram aplicados os dados entrada (“IN”) resultando como dado de saída (“OUT”) o ano de 2005, que serve de referência para a avaliação dos modelos. O desempenho de cada modelo foi definido pela avaliação da variável “Estado”, calculando-se a porcentagem de acertos de células estimadas como “urbanas” ou “não urbanas” segundo cada modelo para 2005, comparadas à situação real em 2005. No próximo capítulo estão apresentados os resultados obtidos.

Tabela 5. Informações das RNAs de cada modelo desenvolvido

Modelos	Nº de neurônios		Momentum	Learning rate
	Entrada	Intermediária		
GRID 1000 - MODELO 4 IN 1 OUT				
A	12	7	0.8	0.6
B	8	5	0.8	0.6
C	8	5	0.8	0.6
GRID 800 - MODELO 4 IN 1 OUT				
A	12	7	0.8	0.6
B	8	5	0.8	0.6
C	8	5	0.8	0.6
GRID 600 - MODELO 4 IN 1 OUT				
A	12	7	0.8	0.6
B	8	5	0.8	0.6
C	8	5	0.8	0.6
GRID 1000 - MODELO 3 IN 1 OUT				
A	9	5	0.8	0.6
B	6	4	0.8	0.6
C	6	4	0.8	0.6
GRID 800 - MODELO 3 IN 1 OUT				
A	9	5	0.8	0.6
B	6	4	0.8	0.6
C	6	4	0.8	0.6
GRID 600 - MODELO 3 IN 1 OUT				
A	9	5	0.8	0.6
B	6	4	0.8	0.6
C	6	4	0.8	0.6
GRID 1000 - MODELO T, T+25				
A	3	2	0.8	0.6
B	2	2	0.8	0.6
C	2	2	0.8	0.6
GRID 800 - - MODELO T, T+25				
A	3	2	0.8	0.6
B	2	2	0.8	0.6
C	2	2	0.8	0.6

4. RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos pela modelagem espacial desenvolvida neste trabalho. Os resultados são apresentados e analisados de forma separada, primeiramente os modelos aplicados nos estudos preliminares: Grid de 1000 por 1000 metros sem restrições e Grid de 1000 por 1000 metros com restrições e, posteriormente, os modelos aplicados com variações do tamanho de Grid, separados em Grid de 1000 por 1000 metros, de 800 por 800 metros e de 600 por 600 metros.

4.1.MODELAGEM PRELIMINAR

4.1.1. GRID 1000 SEM RESTRIÇÃO

Em se tratando do desempenho de cada modelo apresentado na Tabela 6, pode-se afirmar que o Modelo C, baseado no Estado da célula e na relação com o Número de Vizinhos Urbanos, apresentou melhor desempenho, com 94% de acertos. Em seguida observam-se os resultados dos Modelos A (baseado no Estado, Número de Vizinhos Urbanos e Número de Vizinhos Não Urbanos) e B (baseado no Estado e Número de Vizinhos Não Urbanos) com o mesmo desempenho de 86% de acertos.

No pior caso está o Modelo D, que apresentou uma porcentagem de acertos bastante baixa, ou seja, apenas 14%. É interessante destacar que o fato desse modelo D apresentar um desempenho baixo era esperado, uma vez que ele não incorpora relações de vizinhança, sendo isso contrário ao que é preconizado pela modelagem baseada em CA. No entanto, esse modelo serviu como uma referência básica para avaliar o processo de modelagem ao incluir e combinar as outras variáveis (Número de Vizinhos Urbanos e Número de Vizinhos Não Urbanos) nos modelos desenvolvidos.

Tabela 6. Desempenho dos modelos no Grid 1000

Modelos	Porcentagem de acertos
A	86%
B	86%
C	94%
D	14%

A Tabela 7 apresenta os resultados parciais do modelo C (melhor desempenho), comparando-se os dados de Estado das células, previstos pelo modelo com os reais para o ano de 2005.

Tabela 7. Análise parcial do desempenho do modelo C no Grid 1000 com estrutura 4 IN 1 OUT

	Real Urbano	Real Não Urbano
Previsto Urbano	71,44	2,14
Previsto Não Urbano	28,56	97,86

Considerando-se que o Modelo C foi o de melhor desempenho, as análises subsequentes deste estudo foram desenvolvidas a partir dos seus resultados. Primeiramente, é importante analisar como tais resultados estão distribuídos espacialmente. Assim, conforme mostrado na Figura 17, foi gerado um mapa com os Estados estimados por esse modelo representando as células classificadas como urbanas e não urbanas para 2005, comparadas com o contorno do perímetro urbanizado baseado no dado real de 2005.

Percebe-se que o resultado do modelo é bastante consistente quanto à previsão dos padrões de expansão urbana. Uma observação interessante, apresentada na Figura 17, foi a tendência de ocupação urbana conforme a área em destaque. Essa resposta do modelo está de acordo com os dados utilizados na fase de treinamento, visto que nesta fase foi utilizado como dado de saída do modelo o ano de 1974. Conforme ilustrado no detalhe da Figura 17, essa tendência ocorreu em 1974. Ou seja, o modelo foi capaz de capturar esse comportamento espacial.

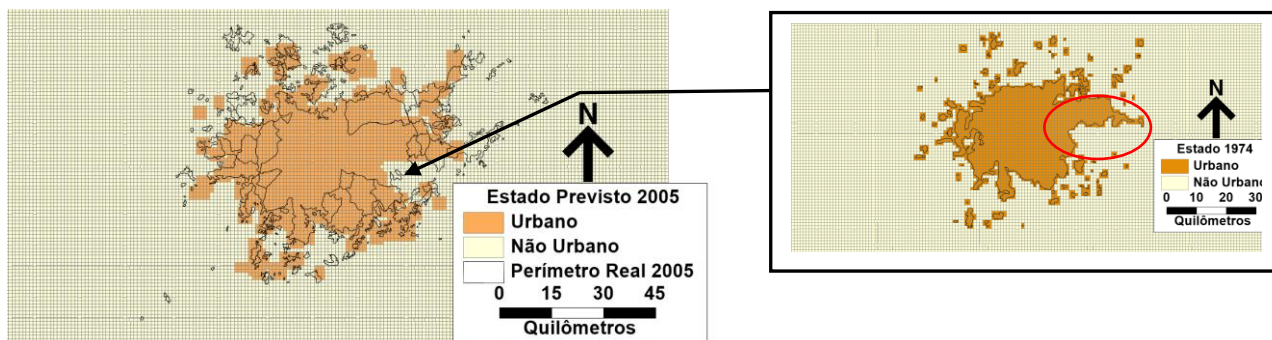


Figura 17. Estado previsto para o ano 2005 e perímetro real do ano 2005

Por outro lado, observando-se a Figura 17, são verificadas algumas discrepâncias entre o Estado previsto pelo modelo e o contorno real, principalmente nas regiões de borda. Esse fato pode ser melhor visualizado por meio da Figura 18, em que foram destacadas as células cujo Estado estimado em 2005 é diferente do Estado real em 2005. Até certo ponto, essas discrepâncias são esperadas, pois estão relacionadas ao processo de estabelecimento das regras de transição por meio de RNAs.

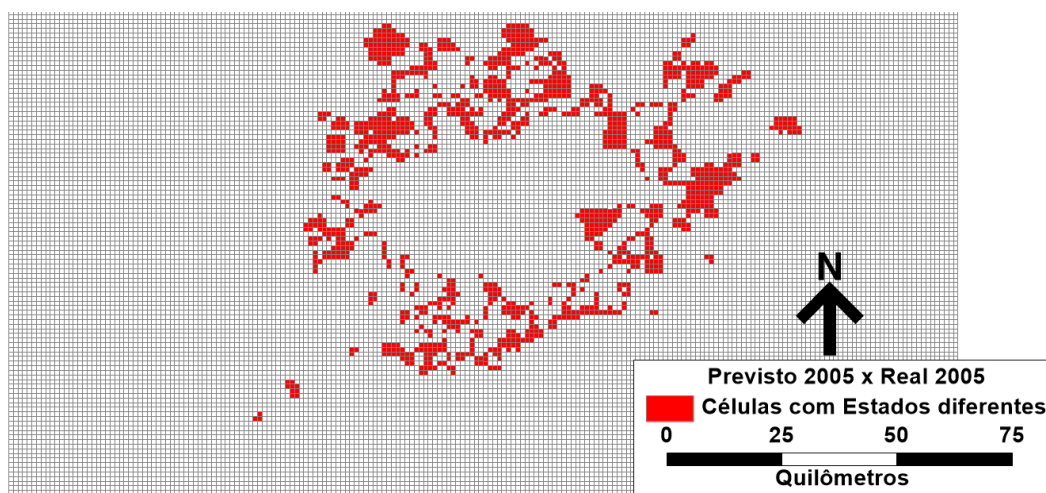


Figura 18. Células com Estado estimado em 2005 diferente do Estado real em 2005

Em se tratando da projeção da expansão urbana da RMSP para o ano de 2030, a Figura 19 compara os resultados previstos pelo Modelo C com a imagem de satélite obtida pelo Google Earth para o ano de 2015. Para facilitar essa análise, no topo da Figura 19 está apresentada apenas a imagem de satélite da região de estudo e, na parte de baixo, o resultado do modelo sobreposto à mesma imagem.

Embora essa imagem seja referente ao ano de 2015 (ou seja, não corresponde ao período de projeção do modelo), ela permite destacar algumas questões pertinentes.

A primeira trata de o modelo prever um crescimento da área urbanizada no sentido da oferta de transportes, principalmente na direção das Rodovias Presidente Dutra (nordeste), e Régis Bittencourt (sudoeste). Esses destaques estão marcados em preto na Figura 19. Mesmo não se considerando a oferta de transportes no processo de modelagem aqui desenvolvido, foi possível observar que o padrão de expansão urbana apresentou uma tendência de acompanhar a disponibilidade de infraestruturas de transporte. Constatações para esse fato, ou seja, a inter-relação entre uso e ocupação do solo e transportes, podem ser encontradas abundantemente na literatura (ver, por exemplo, de la Barra, 1989; Wilson, 1998; Putman, 2007).

Observa-se também que o modelo prevê uma expansão da ocupação urbana ao norte, sobre a Serra da Cantareira (destacado em amarelo na Figura 19). Apesar da dificuldade prática e legal de se ocupar essa região de serra, os padrões de expansão apresentados pela modelagem podem significar um processo de sobrecarga da região, com a redução da cobertura vegetal e aumentando os impactos negativos associados à erosões e inundações de áreas urbanas.

Por fim, ao sul da área de estudo e marcado em vermelho na Figura 19, a modelagem prevê uma expansão urbana sobre áreas de represamento de água, com destaque às Represas de Guarapiranga e Billings. Esse resultado pode indicar sobrecarga urbana sobre as áreas de reservatório, as quais requerem cuidados especiais para a conservação da cobertura vegetal em torno dos reservatórios e gestão do uso e ocupação do solo na vizinhança, garantindo a proteção desses recursos hídricos contra processos de assoreamento ou quaisquer tipos de poluição que possam afetar a qualidade das águas.

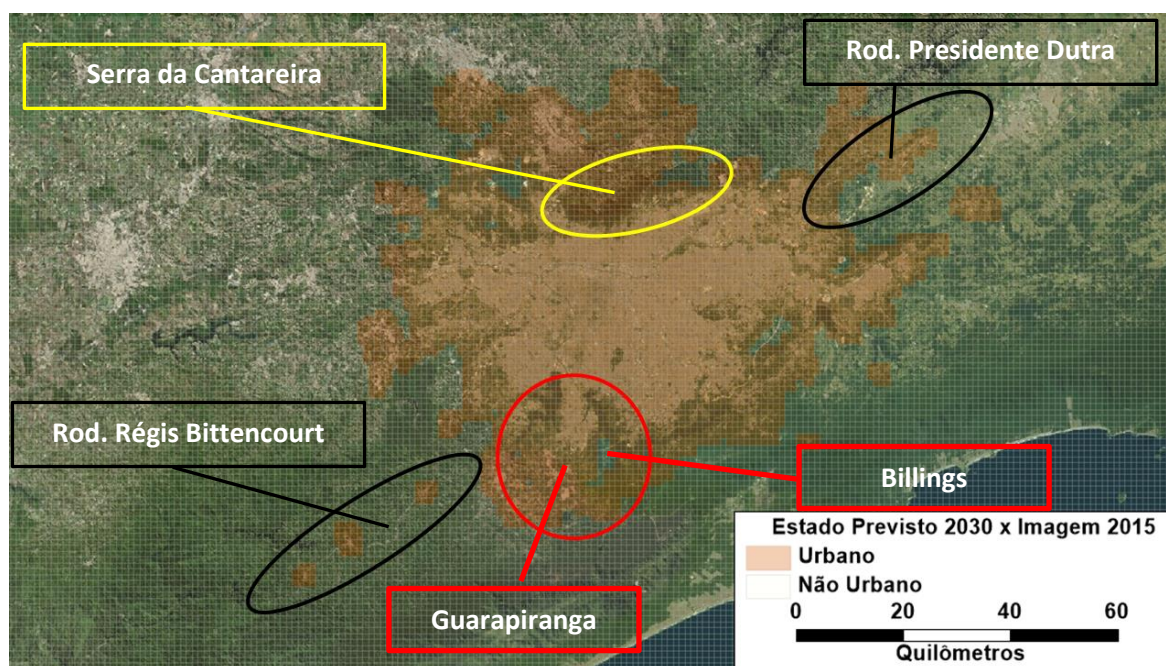
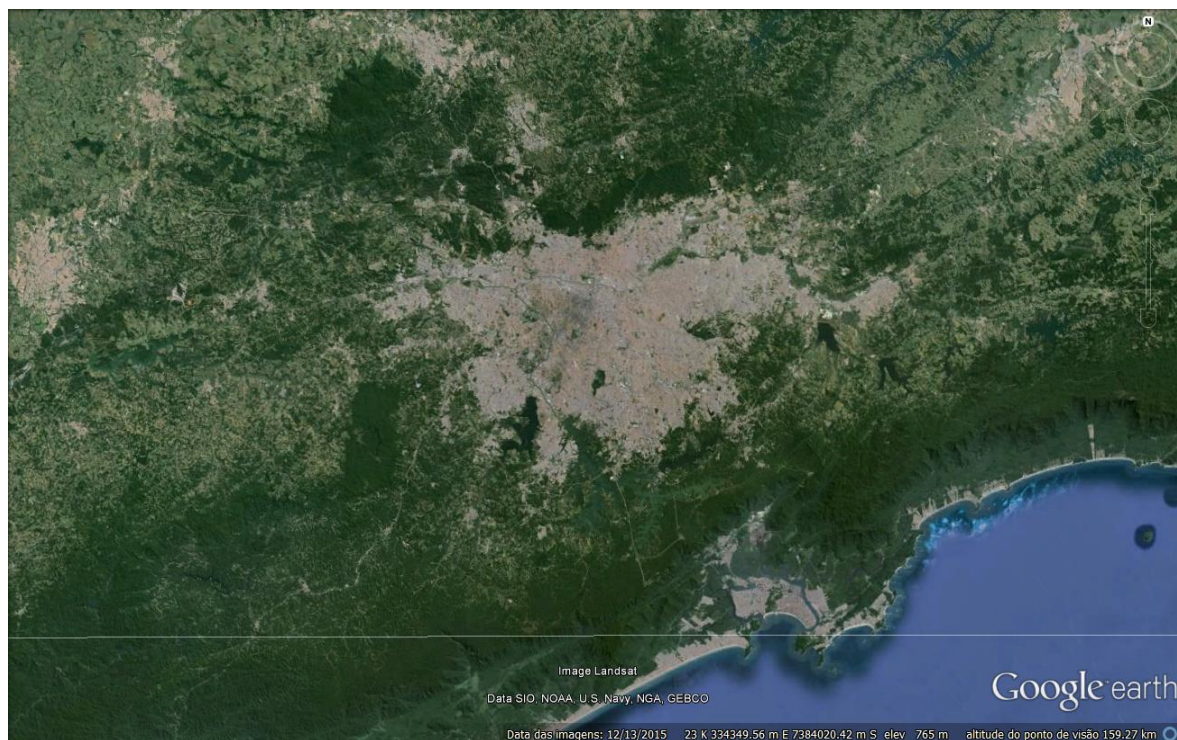


Figura 19. Estado previsto para o ano de 2030 e Imagem do Google Earth referente ao ano de 2015

4.1.2. GRID 1000 COM RESTRIÇÃO

Os resultados apresentados pela modelagem com o Grid 1000 sem restrição, item 4.4.1, mostraram a dificuldade do Modelo D (baseado no Estado da célula) em interpretar a evolução da expansão urbana no tempo, justificado principalmente por não incorporar as relações de vizinhança as quais preconizam a modelagem baseada em CAs. Sendo assim, para o caso do Grid 1000 com restrição, foram aplicados na modelagem apenas os modelos A (baseado no Estado, Número de Vizinhos Urbanos e Número de Vizinhos Não Urbanos), B (baseado no Estado e Número de Vizinhos Não Urbanos) e o C (baseado no Estado da célula e Número de Vizinhos Urbanos).

Dessa forma, em se tratando dos resultados obtidos, os três modelos aplicados apresentaram desempenho bastante próximos. Conforme a Tabela 8, os modelos A e C apresentaram melhor desempenho, ambos com 94,47% de acertos, seguidos pelo Modelo B com desempenho de 93,29%.

Observa-se que, de maneira geral, o desempenho dos modelos desenvolvidos com restrição foi superior aos sem restrição. Ainda, ao analisar a distribuição espacial dos resultados, principalmente dos modelos A e C, observa-se também uma grande similaridade com o resultado apresentado pelo modelo sem restrição de maior desempenho, no caso o modelo C. As Figuras 20 e 21 apresentam a distribuição espacial dos resultados dos modelos A e C com restrição, e do modelo C sem restrição, referenciados com o perímetro urbanizado real para o ano de 2005, a fim de representar suas similaridades.

Tabela 8. Desempenho dos modelos no Grid 1000 com restrição

Modelos	Porcentagem de acertos
A	94,47%
B	93,29%
C	94,47%

Tabela 9. Análise parcial do desempenho dos modelos no Grid 1000

GRID	Estrutura	Modelo	Previsto	Real Urbano	Real Não Urbano
1000	4IN 1OUT	C	Urbano	71,71	1,83
			Não Urbano	28,29	98,17
		A	Urbano	71,80	1,84
			Não Urbano	28,20	98,16

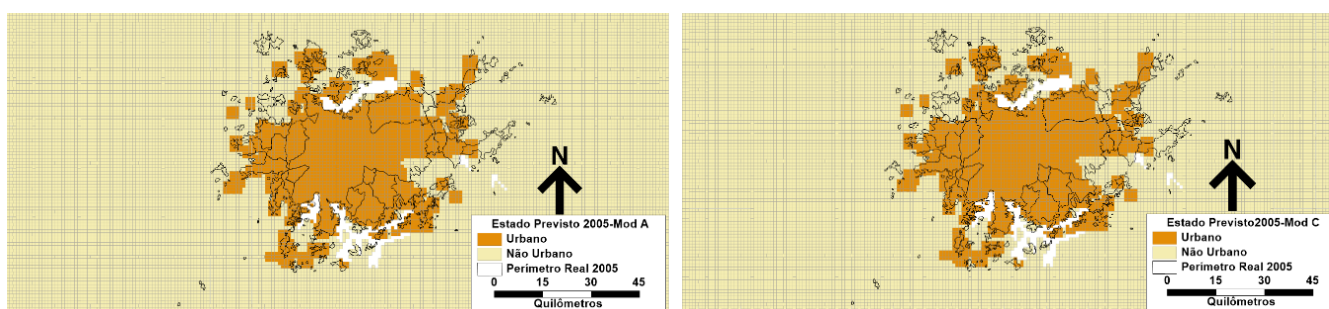


Figura 20. Distribuição espacial dos resultados com restrição para ano 2005, modelos A e C

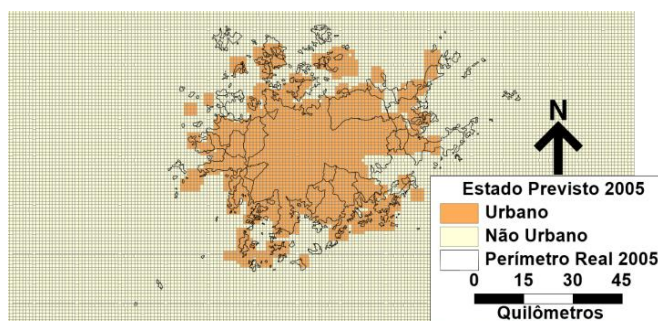


Figura 21. Distribuição espacial dos resultados sem restrição para ano 2005, modelo C

Observando-se a Figura 22, em que foram destacadas as células cujo Estado estimado em 2005 é diferente do Estado real em 2005, assim como ocorrido na modelagem sem restrição, são verificadas algumas discrepâncias entre o Estado previsto pelo modelo e o Estado real, principalmente nas regiões de borda. Tais discrepâncias, conforme explicado anteriormente, são esperadas, pois estão relacionadas ao processo de estabelecimento das regras de transição por meio de RNAs.

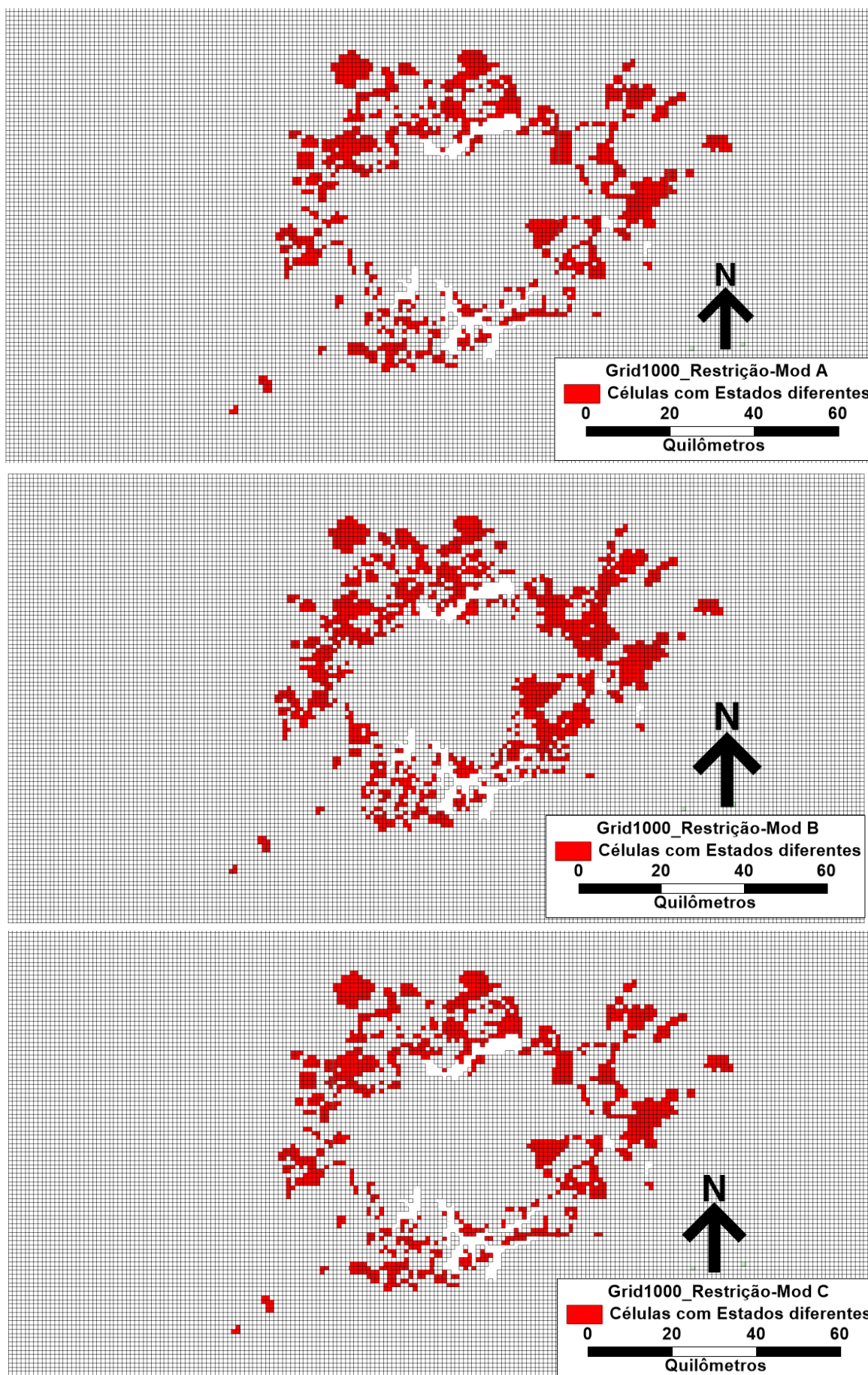


Figura 22. Células com Estado estimados diferentes do Real para o ano de 2005

Os resultados da fase de previsão do cenário para o ano de 2030, apresentados pelos modelos A e C, Figura 23, da mesma forma que os obtidos na fase de validação para o ano de 2005, apresentam resultados bastantes similares ao obtidos pela modelagem sem restrição com o modelo C, de maior desempenho. Todavia, ao sobrepor os resultados de previsão na imagem de satélite do Google Earth, ano 2015, além das observações apresentadas para o modelo sem restrição, fica claro o aumento do desempenho da modelagem espacial pela inclusão das restrições de crescimento nas áreas da Serra da Cantareira e dos reservatórios de água em torno da área de estudo, o que concorda com as expectativas tratadas após a modelagem com Grid 1000 sem restrição quanto à possibilidade de melhorar o desempenho dos modelos por meio da inclusão das restrições.

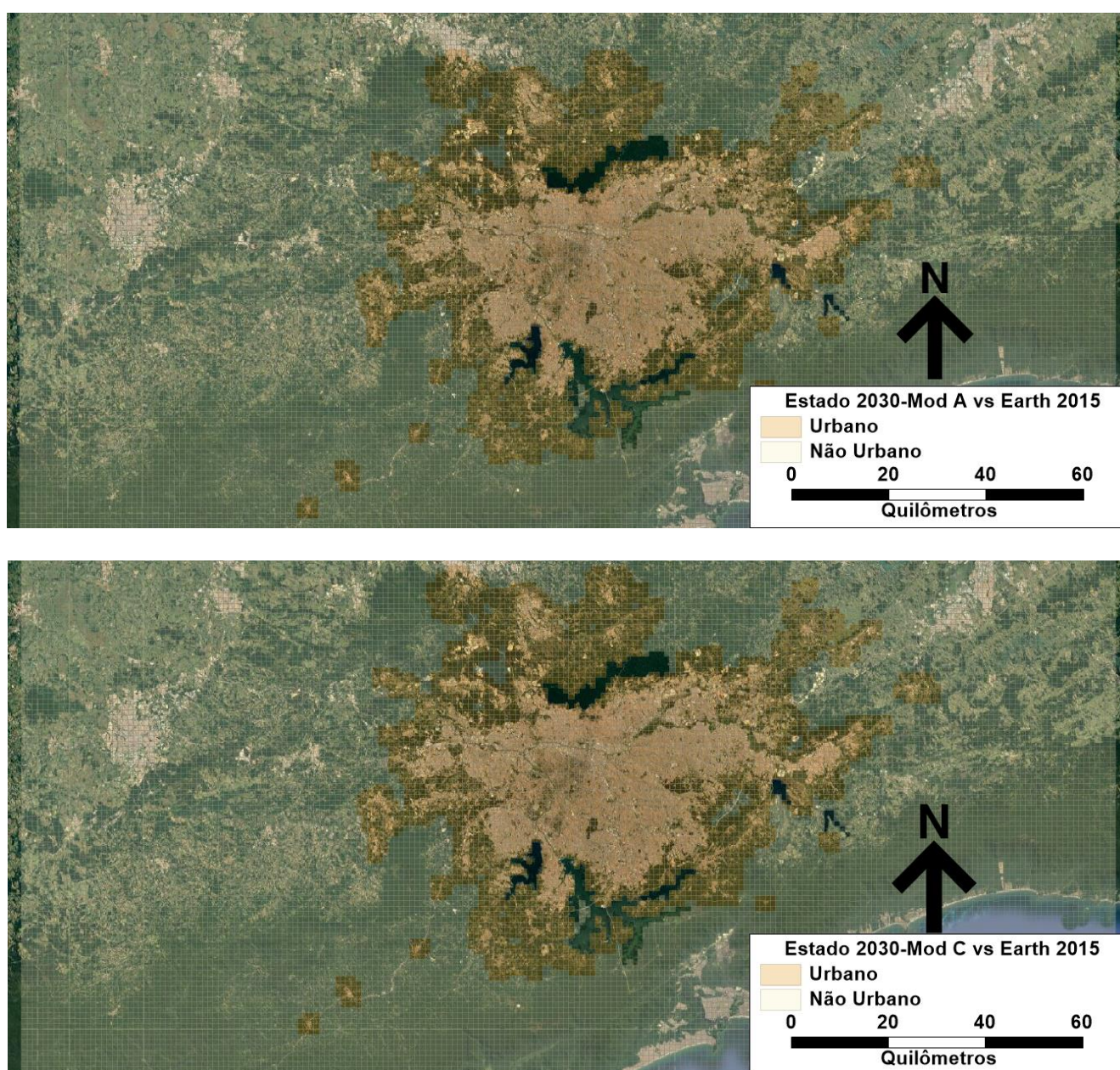


Figura 23. Cenário previsto para 2030 pelos modelos A e C sobrepostos a imagem de satélite do ano de 2015.

4.2.MODELOS COM BASE NO GRID 1000

Neste subcapítulo são apresentados os resultados obtidos pela modelagem desenvolvida com introdução de três diferentes estruturas, “4 IN 1 OUT”, “3IN 1 OUT e “T, T₊₂₅”, explicados no subcapítulo 3.3, aplicados no Grid de 1000 por 1000 metros. Esses resultados relacionam-se com o passo de validação para a análise do desempenho dos modelos e, posteriormente, é realizada a previsão para o cenário de ocupação urbana para o ano de 2030, utilizando-se o modelo de maior desempenho global.

Em se tratando dos resultados apresentados por todas as estruturas e modelos desenvolvidos, é importante ressaltar que o acerto global representa as células cujo Estado previsto pelo modelo é igual ao Estado real das células, considerando-se os dados de 2005 (fase de validação). A relação Real U (Real Urbano) e Previsto U (Previsto Urbano) representa a relação das células previstas pelo modelo como Urbano que realmente são urbanas, ou seja, Estado previsto igual ao real do ano de 2005. A relação Real nU (Real Não Urbano) e Previsto nU (Previsto Não Urbano) são as células previstas como Não Urbano cujo Estado real também é Não Urbano. Ademais, a relação Real U (Real Urbano) e Previsto nU (Previsto Não Urbano) se refere às células previstas como Não Urbanas cujos dados reais são Urbano e a relação Real nU (Real Não Urbano) e Previsto U (Previsto Urbano) refere-se às células previstas pela modelagem como Urbano e os dados reais são Não Urbano.

O desempenho de cada modelo baseado no Grid de 1000 por 1000 metros, aplicados nas diferentes estruturas de modelagem, é apresentado na Tabela 10. Pode-se afirmar que o Modelo C, baseado no Estado da célula e na relação com o Número de Vizinhos Urbanos, assim como verificado nos estudos preliminares, apresentou melhor desempenho em todas as estruturas de modelagem, com 90,09% de acertos Global nas estruturas “4 IN 1 OUT” e “T, T₊₂₅” e com 90,08% na estrutura “3 IN 1 OUT”. Dentre os resultados de melhor desempenho, sugere-se que o “4 IN 1 OUT” seja escolhido com o modelo em destaque por apresentar resultado parcial de acerto na previsão de células com Estado Urbano iguais ao Estado real. Em seguida, observam-se que os resultados dos Modelos A (baseado no Estado, Número de Vizinhos Urbanos e Número de Vizinhos Não Urbanos) e B (baseado no Estado e Número de Vizinhos Não Urbanos) apresentam desempenho inferior ao Modelo C, porém bastante próximos.

Sendo assim, após análise dos resultados apresentados na Tabela 10 e relacionando-os com os obtidos nos estudos preliminares, verifica-se que a alteração de estrutura de modelagem pouco influenciou nos desempenhos obtidos. Ou seja, de uma maneira geral, os resultados apresentados com a introdução

de novas estruturas de modelagem são bastante semelhantes aos resultados apresentados nos estudos preliminares, tanto para os acertos globais quanto os parciais. A distribuição espacial dos resultados e erros de previsão podem ser visualizados nas Figuras 24 e 25.

Tabela 10. Análise do desempenho dos modelos no Grid 1000

GRID	Estrutura	Modelo	Acertos Global	Previsto	Real Urbano	Real Não Urbano
1000	4IN 1OUT	A	90,00	Urbano	71,50	3,77
				Não Urbano	28,50	96,24
		B	89,79	Urbano	70,73	3,76
				Não Urbano	29,27	96,22
		C	90,09	Urbano	72,25	2,91
				Não Urbano	27,75	96,11
	3IN 1OUT	A	90,06	Urbano	71,85	3,79
				Não Urbano	28,15	96,21
		B	90,03	Urbano	71,72	3,79
				Não Urbano	28,28	96,21
		C	90,08	Urbano	72,25	3,89
				Não Urbano	27,75	96,11
T, T+25	A	90,06	Urbano	71,88	3,77	
			Não Urbano	28,12	96,20	
	B	87,56	Urbano	53,54	0,96	
			Não Urbano	46,46	99,04	
	C	90,09	Urbano	72,23	3,89	
			Não Urbano	27,75	96,11	

Observando-se a Figura 25, em que foram destacadas as células cujo Estado estimado em 2005 é diferente do Estado real em 2005, assim como ocorrido nas modelagens anteriores, são verificadas algumas discrepâncias entre o Estado previsto pelo modelo e o contorno real, principalmente nas regiões de borda. Tais discrepâncias, conforme explicado anteriormente, são esperadas, pois estão relacionadas ao processo de estabelecimento das regras de transição por meio de RNAs.

Em se tratando da fase de previsão, para o ano de 2030, foi aplicado o modelo C da estrutura “4 IN 1 OUT”, por ter apresentado o melhor desempenho. A Figura 26 mostra a distribuição espacial dos resultados apresentados para o ano 2030, sobreposto à imagem de satélite do Google Earth, ano 2015.

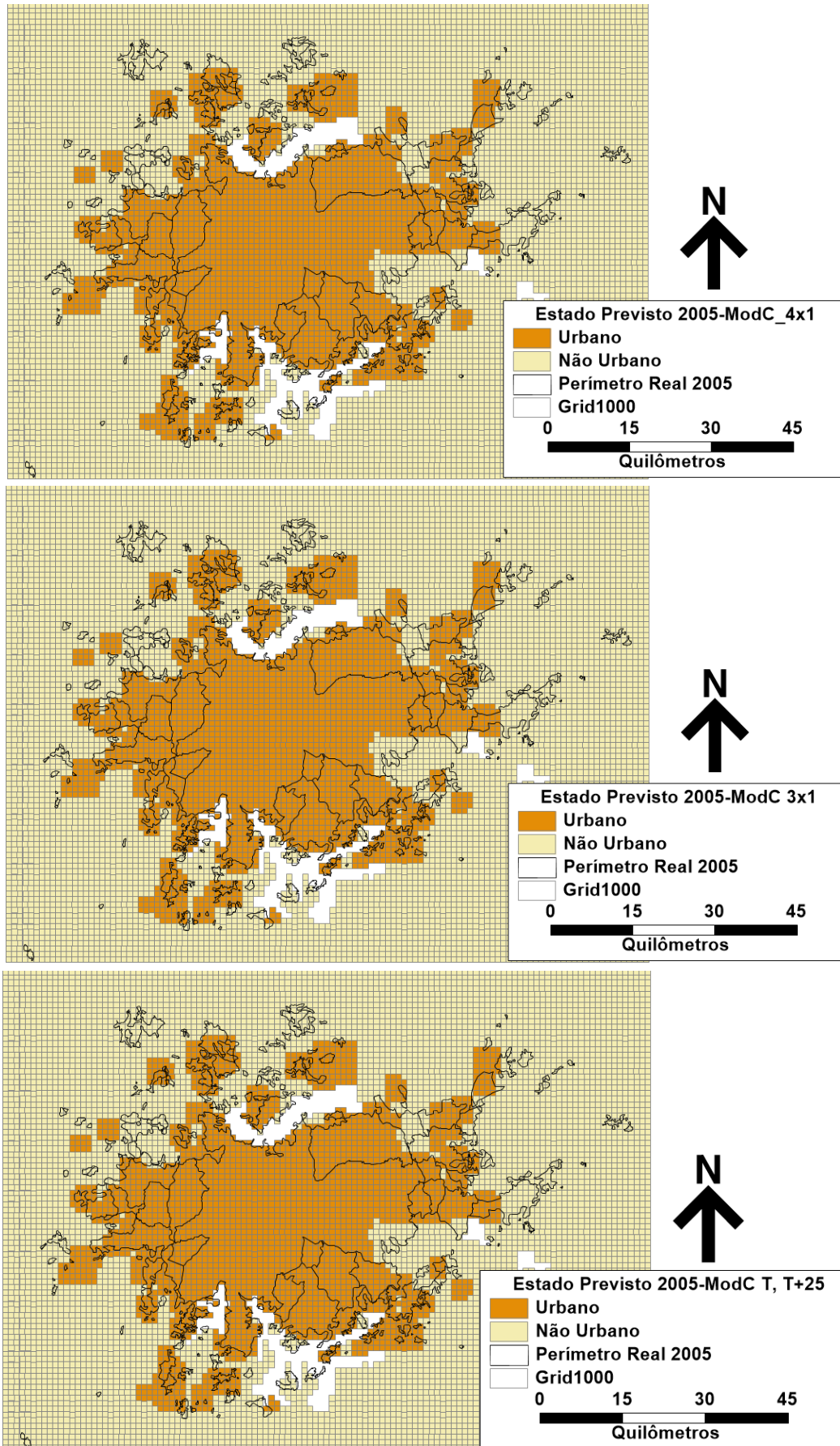


Figura 24. Distribuição espacial dos resultados obtidos pelos Modelos de maior desempenho nas diferentes estruturas de modelagem, Grid 1000 por 1000 metros.

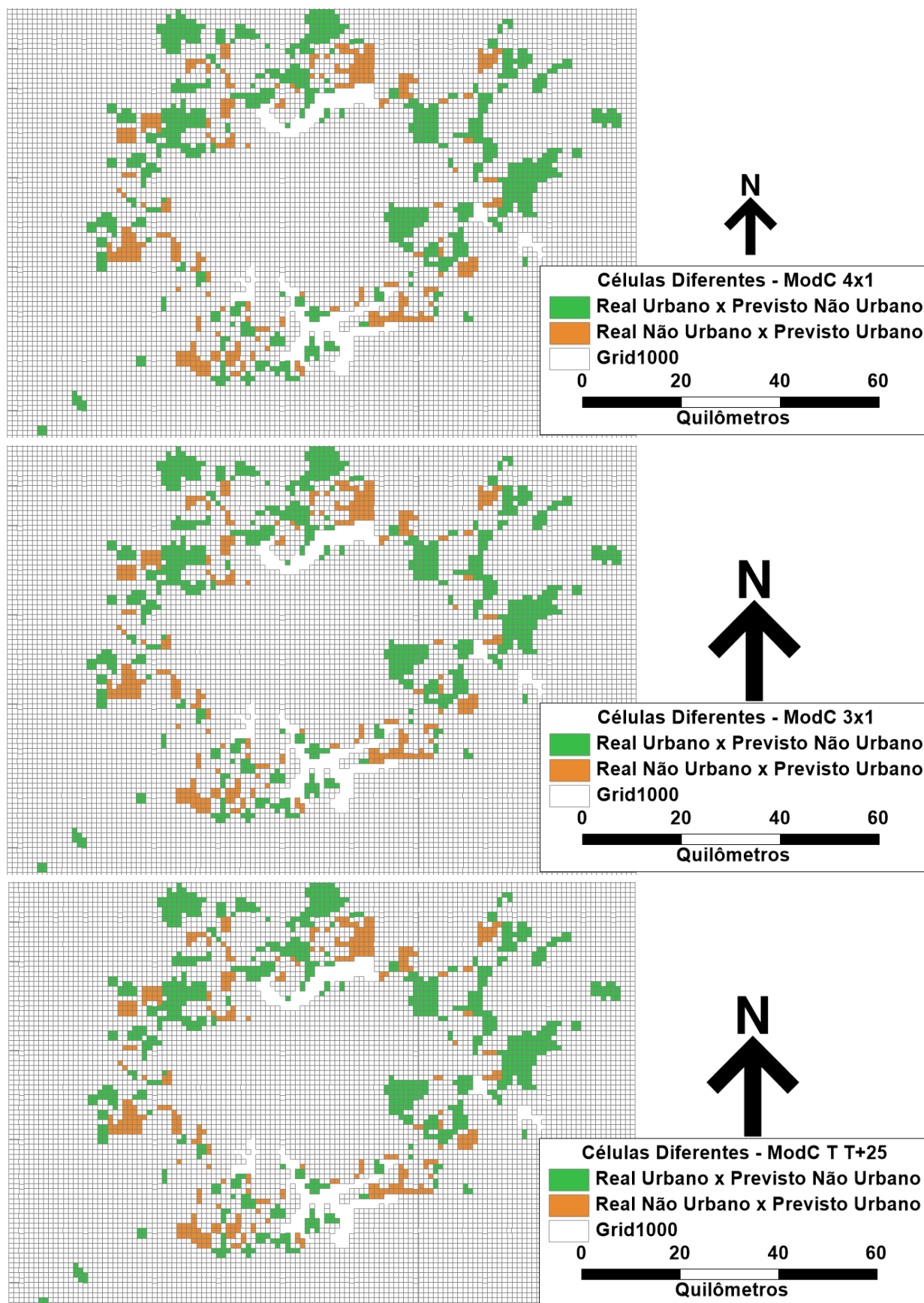


Figura 25. Células com Estado estimados diferentes do Real para o ano de 2005, nas diferentes estruturas de modelagem nas diferentes estruturas de modelagem, Grid 1000 por 1000 metros

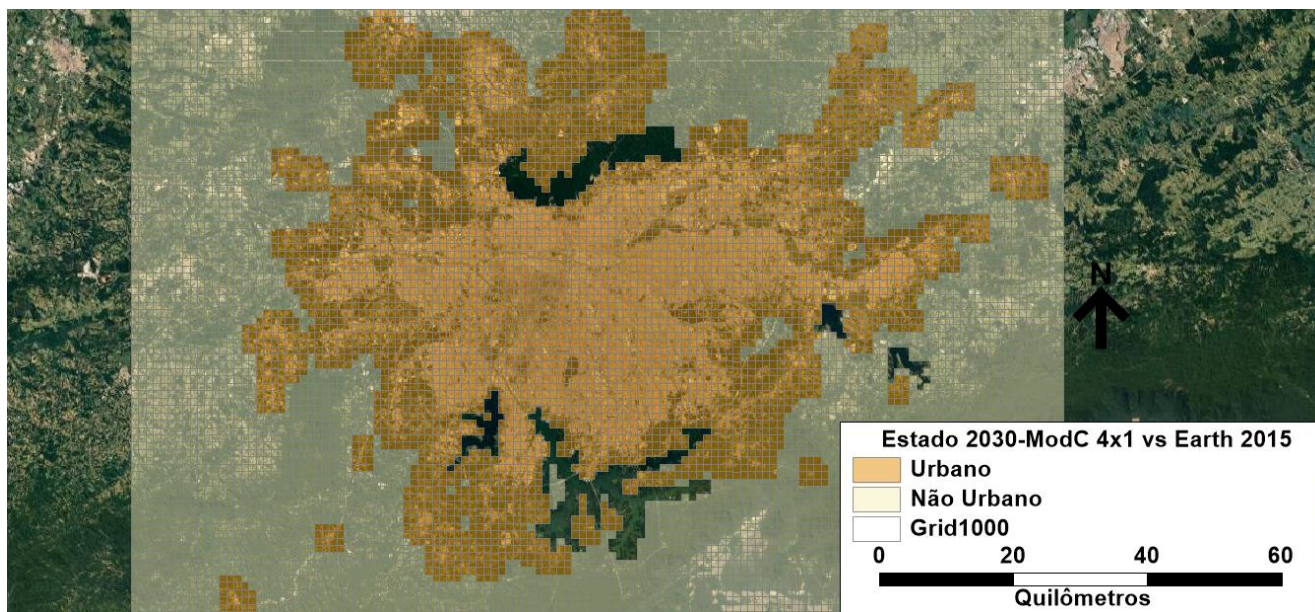


Figura 26. Cenário previsto para 2030 pelos modelos A e C sobreposto a imagem de satélite do ano de 2015.

4.3.MODELOS COM BASE NO GRID 800

O desempenho de cada modelo no Grid de 800 por 800 metros, aplicados nas diferentes estruturas de modelagem, é apresentado na Tabela 11. Assim como observado nas modelagens anteriores, pôde-se verificar que o Modelo C, baseado no Estado da célula e na relação com o Número de Vizinhos Urbanos, apresentou, em geral, melhor desempenho.

Todavia, para o Grid de 800 por 800 metros, estrutura “T, T+25”, o modelo A teve melhor desempenho global com 90,25% de acertos, seguido pelo modelo C, ainda na mesma estrutura, contando com 90,23% de acertos. Na estrutura “3 IN 1 OUT”, a porcentagem de acertos foi igual a 90,22%. Vale ressaltar que os resultados são bastante próximos e que, seguindo o padrão dos resultados obtidos anteriormente, o modelo C se apresenta com destaque.

As Figuras 27 e 28 apresentam, respectivamente, a distribuição espacial dos resultados da previsão e as discrepâncias obtidas na fase de validação. Verifica-se que os resultados obtidos com o Grid 800 por 800 metros apresentam os mesmos padrões observados nas modelagens anteriores e, portanto, tanto a introdução de novas estruturas de modelagem quanto a diminuição do tamanho do Grid não influenciaram positivamente no desempenho da modelagem.

Tabela 11. Análise do desempenho dos modelos no Grid 800

GRID	Estrutura	Modelo	Acertos Global	Previsto	Real Urbano	Real Não Urbano
800	4IN 1OUT	A	89,72	Urbano	65,10	2,48
				Não Urbano	34,90	97,52
		B	85,54	Urbano	40,18	0,10
				Não Urbano	59,82	99,90
		C	89,75	Urbano	65,23	2,50
				Não Urbano	34,77	97,51
	3IN 1OUT	A	90,23	Urbano	69,36	3,17
				Não Urbano	30,63	96,83
		B	90,18	Urbano	69,34	3,22
				Não Urbano	30,66	97,78
		C	90,22	Urbano	69,61	3,25
				Não Urbano	30,39	97,75
T, T+25	A	90,25	Urbano	69,59	3,21	
			Não Urbano	30,41	96,79	
	B	87,81	Urbano	52,61	1,04	
			Não Urbano	47,39	98,96	
	C	90,23	Urbano	69,65	3,25	
			Não Urbano	30,35	96,75	

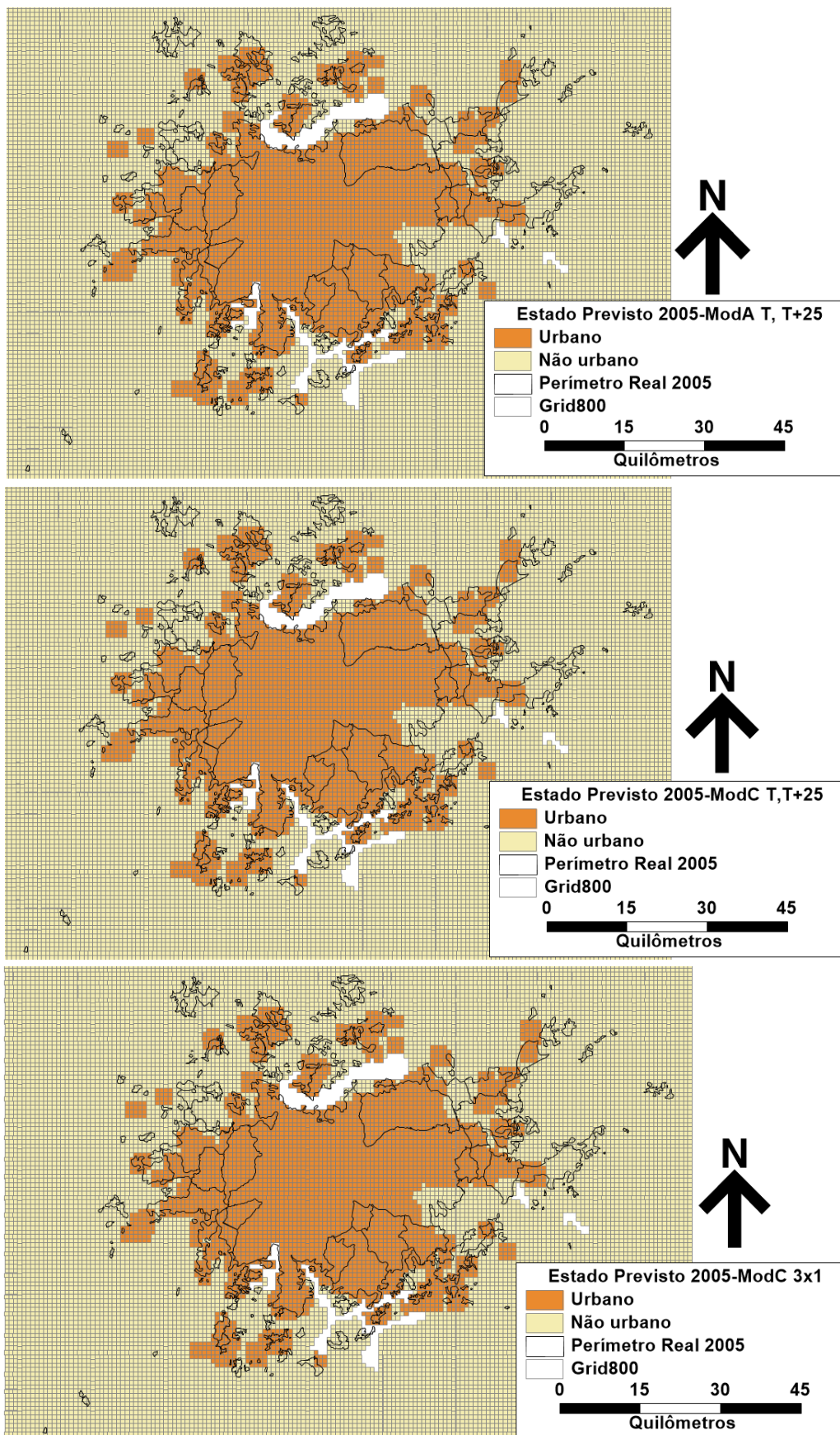


Figura 27. Distribuição espacial dos resultados obtidos pelos Modelos de maior desempenho nas diferentes estruturas de modelagem, Grid 800 por 800 metros.

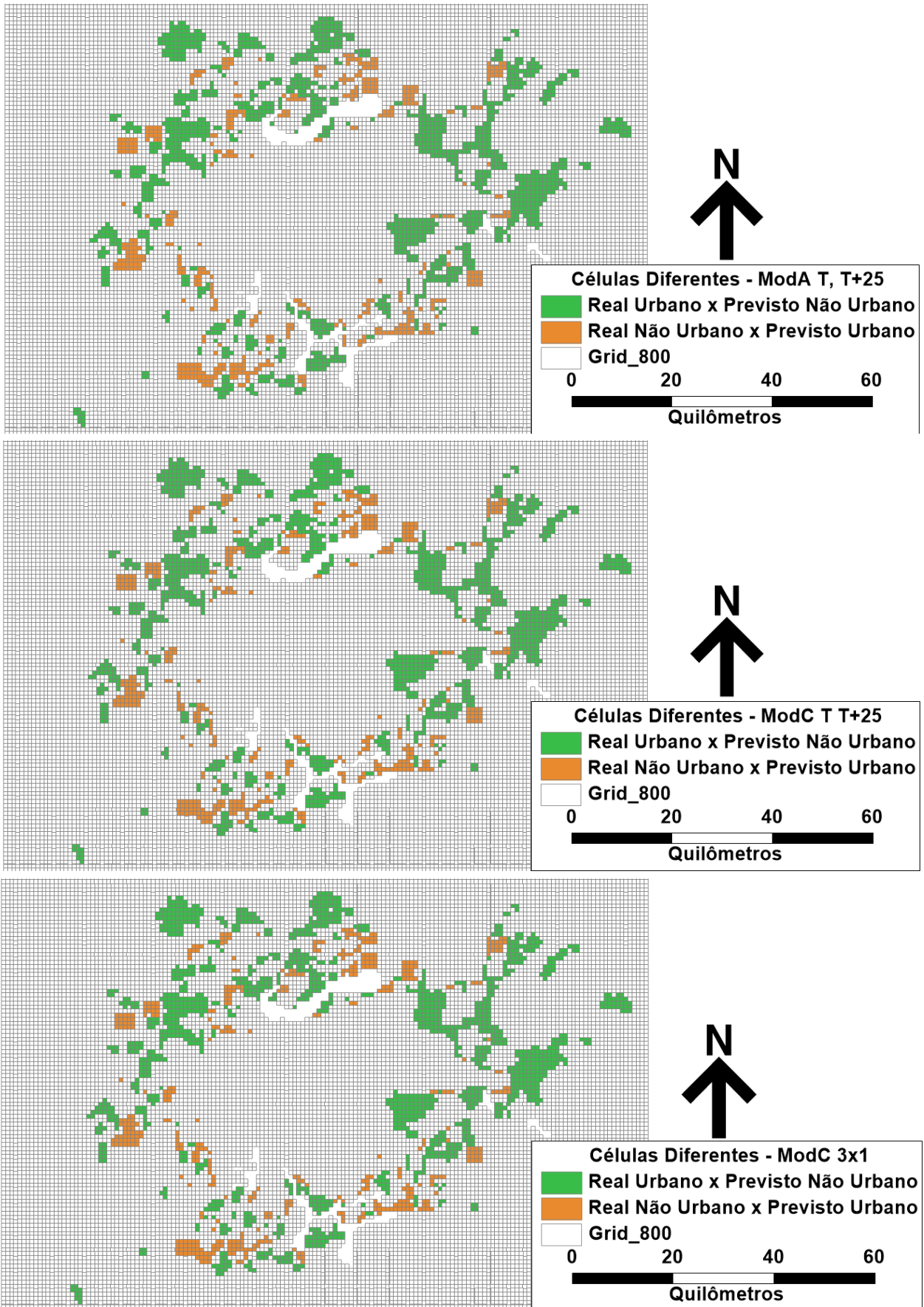


Figura 28. Células com Estado estimados diferentes do Real para o ano de 2005, nas diferentes estruturas de modelagem, Grid 800 por 800 metros

Em se tratando da fase de previsão, para o ano de 2030, foi aplicado o modelo A da estrutura “T, T + 25”, por ter apresentado o melhor desempenho. A Figura 29 mostra a distribuição espacial dos resultados apresentados para o ano 2030, sobreposto à imagem de satélite do Google Earth, ano 2015.

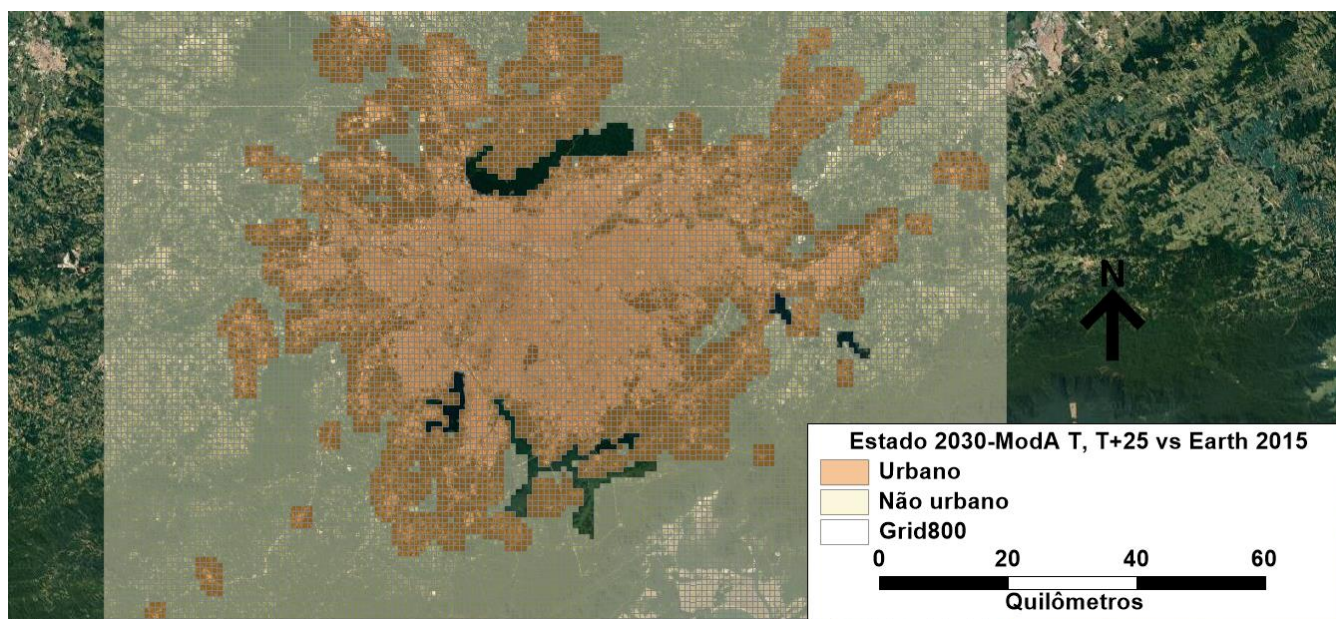


Figura 29. Cenário previsto para 2030 pelo Modelo C, estrutura “3 IN 1 OUT”, sobreposto a imagem de satélite do ano de 2015.

4.4.MODELOS COM BASE NO GRID 600

Em se tratando do Grid de 600 por 600 metros, não foi possível obter resultados para a estrutura “T, T + 25”, visto a exigência de processamento computacional envolvida, relacionada ao aumento significativo do número de dados na montagem das RNAs.

Dos resultados obtidos pelas demais estruturas de modelagem, apresentados na Tabela 12, o Modelo C, baseado no Estado da célula e na relação com o Número de Vizinhos Urbanos, assim como verificado nos estudos preliminares, apresentou o melhor desempenho em todas as estruturas de modelagem, com 90,14% de acerto global na estrutura “3 IN 1 OUT” e 89,78% na estrutura “4 IN 1 OUT”. As Figuras 30 e 31 apresentam a distribuição espacial dos resultados da previsão e as

discrepâncias obtidas na fase de validação. Os resultados obtidos com o de Grid 600 por 600 metros apresentam os mesmos padrões observados nas modelagens anteriores e, portanto, pode-se verificar que a introdução de novas estruturas de modelagem e a diminuição do tamanho do Grid também não influenciaram positivamente no desempenho da modelagem.

Em relação à fase de previsão, para o ano de 2030, foi aplicado o modelo C da estrutura “4 IN 1 OUT”, por ter apresentado o melhor desempenho. A Figura 32 mostra a distribuição espacial dos resultados apresentados para o ano 2030, sobreposto à imagem de satélite do Google Earth, ano 2015.

Tabela 12. Análise do desempenho dos modelos no Grid 600

GRID	Estrutura	Modelo	Acertos Global	Previsto	Real Urbano	Real Não Urbano
600	4IN 1OUT	A	89,26	Urbano	57,95	1,39
				Não Urbano	42,05	98,61
		B	89,52	Urbano	61,44	2,20
				Não Urbano	38,56	97,90
		C	89,78	Urbano	62,72	2,14
				Não Urbano	37,28	97,86
	3IN 1OUT	A	89,76	Urbano	62,53	2,10
				Não Urbano	37,47	97,90
		B	90,07	Urbano	65,52	2,60
				Não Urbano	34,48	97,40
		C	90,14	Urbano	66,26	2,73
				Não Urbano	33,74	97,27

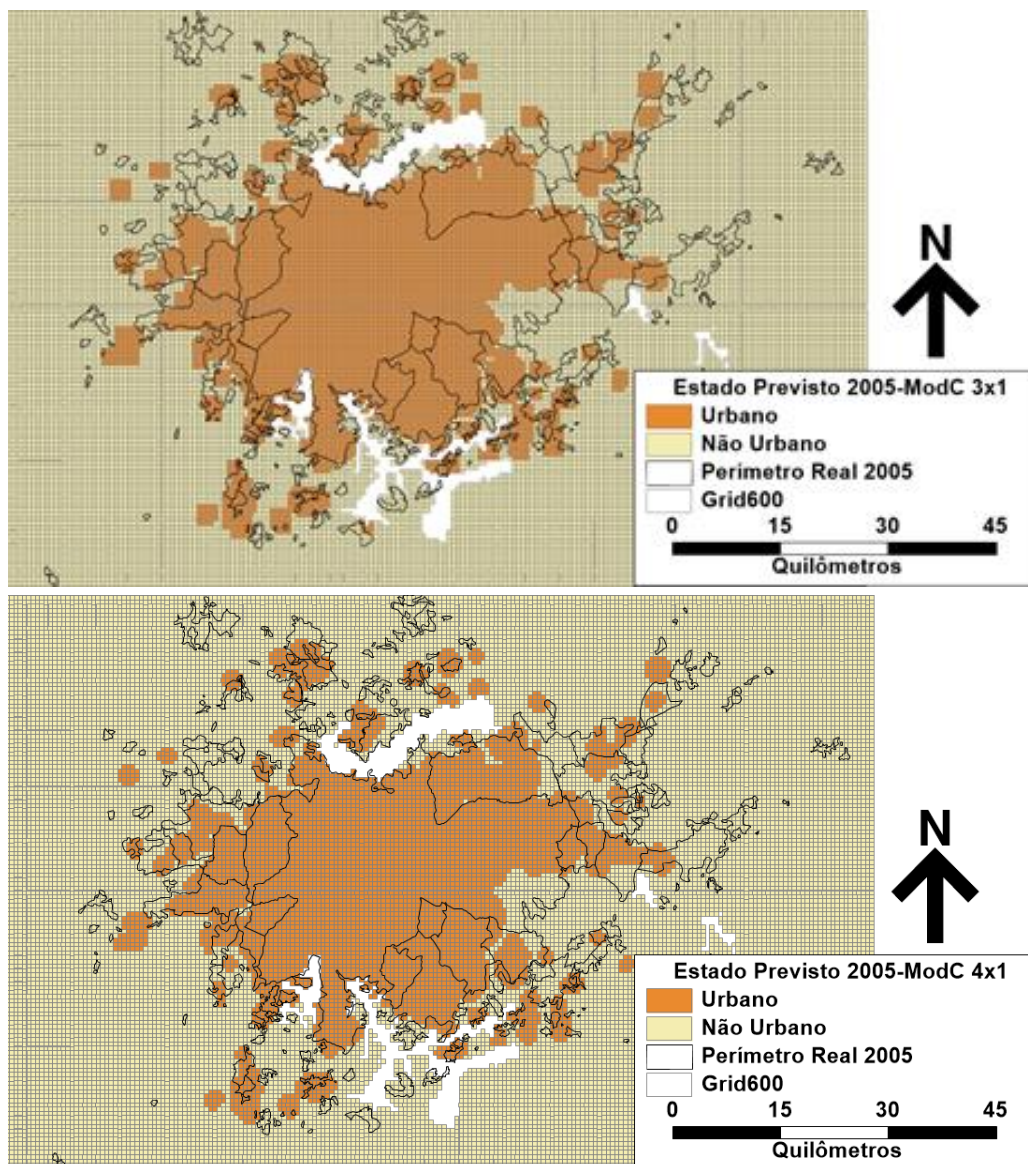


Figura 30. Distribuição espacial dos resultados obtidos pelos Modelos de maior desempenho nas diferentes estruturas de modelagem, Grid 600 por 600 metros.

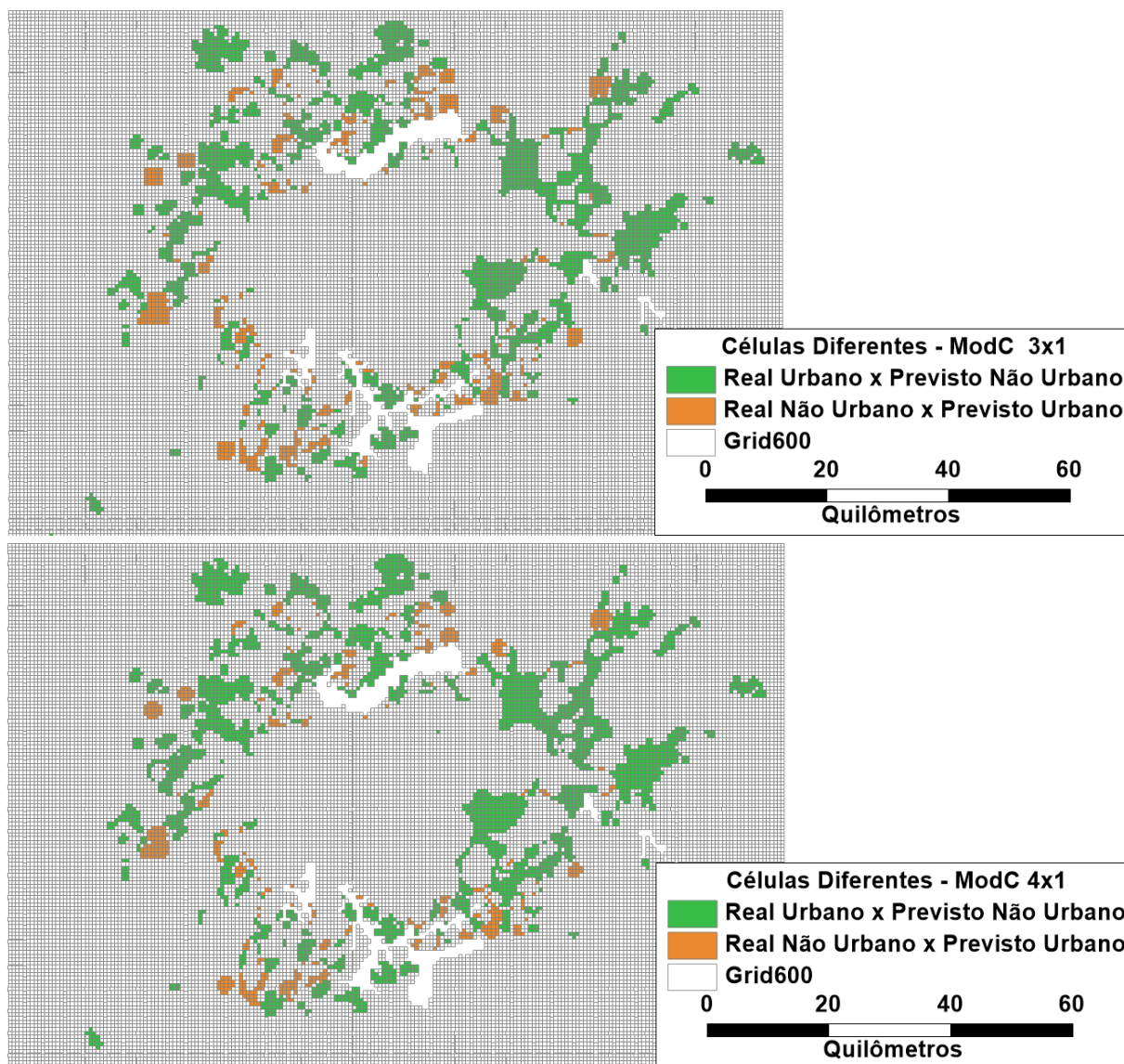


Figura 31. Células com Estado estimados diferentes do Real para o ano de 2005, nas diferentes estruturas de modelagem, Grid 600 por 600 metros

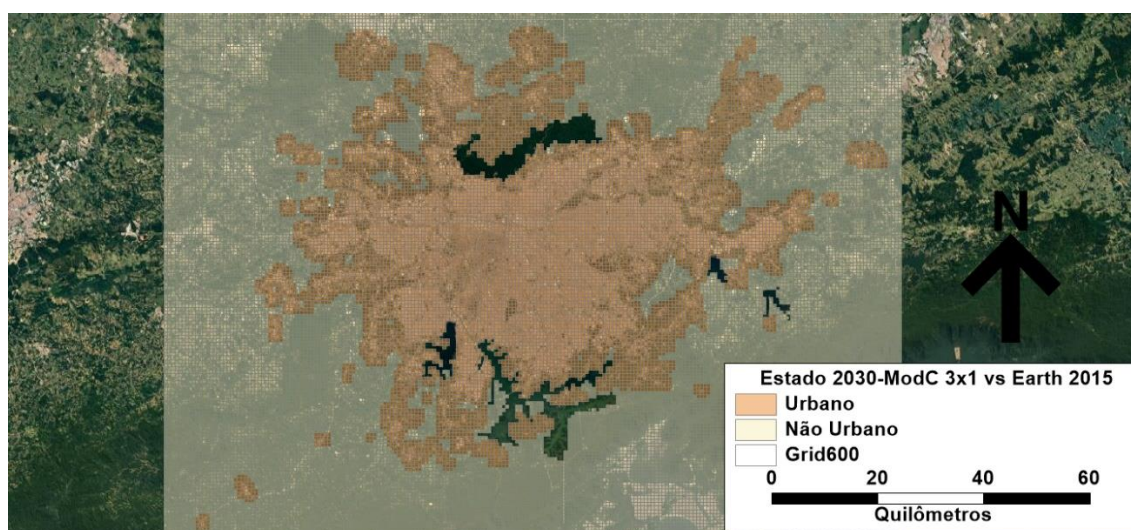


Figura 32. Cenário previsto para 2030 pelo Modelo C, estrutura “3 IN 1 OUT”, sobreposto a imagem de satélite do ano de 2015.

4.5.SINTESE DOS RESULTADOS

A Tabela 13 apresenta uma síntese dos resultados obtidos na modelagem desenvolvida com as três diferentes estruturas “4 IN 1 OUT”, “3IN 1 OUT e “T, T+25”, aplicando-se os Modelos A (baseado no Estado, Número de Vizinhos Urbanos e Número de Vizinhos Não Urbanos), B (baseado no Estado e Número de Vizinhos Não Urbanos) e C (baseado no Estado e Número de Vizinhos Urbanos).

Tabela 13. Análise do desempenho dos modelos nos Grids 1000, 800 e 600

GRID	Estrutura a	Modelo	Acertos Global	Real U Previsto U	Real nU Previsto nU	Real U Previsto nU	Real nU Previsto U
1000	4IN 1OUT	A	90,00	71,50	96,24	28,50	3,77
		B	89,79	70,73	96,22	29,27	3,76
		C	90,09	72,25	96,11	27,75	2,91
	3IN 1OUT	A	90,06	71,85	96,21	28,15	3,79
		B	90,03	71,72	96,21	28,28	3,79
		C	90,08	72,25	96,11	27,75	3,89
	T, T+25	A	90,06	71,88	96,20	28,12	3,77
		B	87,56	53,54	99,04	46,46	0,96
		C	90,09	72,23	96,11	27,75	3,89
800	4IN 1OUT	A	89,72	65,10	97,52	34,90	2,48
		B	85,54	40,18	99,90	59,82	0,10
		C	89,75	65,23	97,51	34,77	2,50
	3IN 1OUT	A	90,23	69,36	96,83	30,63	3,17
		B	90,18	69,34	97,78	30,66	3,22
		C	90,22	69,61	97,75	30,39	3,25
	T, T+25	A	90,25	69,59	96,79	30,41	3,21
		B	87,81	52,61	98,96	47,39	1,04
		C	90,23	69,65	96,75	30,35	3,25
600	4IN 1OUT	A	89,26	57,95	98,61	42,05	1,39
		B	89,52	61,44	97,90	38,56	2,20
		C	89,78	62,72	97,86	37,28	2,14
	3IN 1OUT	A	89,76	62,53	97,90	37,47	2,10
		B	90,07	65,52	97,40	34,48	2,60
		C	90,14	66,26	97,27	33,74	2,73

Em resumo, os resultados obtidos nas diferentes estruturas de modelagem com base nos diferentes tamanhos de Grid apresentaram desempenhos bastante próximos, assim como os padrões de erros de previsão do estado das células, os quais ocorreram sobretudo nas regiões de borda, assim como observado nas modelagens preliminares. Ainda, dentre os resultados obtidos, destacaram-se para o Grid de 1000 por 1000 metros, o modelo C nas estruturas “4 IN 1 OUT” e “T, T+25”, com 90,09% de acertos global; para o Grid de 800 por 800 metros foi o modelo A na estrutura “T, T+25”, com 90,25% de acertos global; e finalmente, para o Grid de 600 por 600 metros, o modelo C na estrutura “3 IN 1 OUT”, com 90,14% de acertos global.

Ademais, para os resultados parciais, percebe-se que a diminuição do tamanho do Grid proporcionou resultados bastante semelhantes, com pequena variação no desempenho na previsão de células com estado urbano iguais aos reais, e concomitante concentração de erros de previsão nas regiões de borda dos Grids.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O objetivo deste trabalho foi analisar os impactos da resolução espacial na modelagem da expansão urbana da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) por meio de autômatos celulares (CA, do inglês: *Cellular Automata*) combinados com redes neurais artificiais (RNA). Para isso, três diferentes resoluções espaciais foram exploradas, a partir da criação de Grids com os seguintes tamanhos: 1000 por 1000 metros, 800 por 800 metros e 600 por 600 metros. De acordo com os dados disponíveis e as fases requeridas no processo de modelagem com RNAs, três estruturas de modelos foram concebidas, a saber: a estrutura 4 IN 1 OUT, a estrutura 3 IN 1 OUT e a estrutura T, T +25. Além disso, considerando as variáveis criadas para representar as características do espaço em estudo e as relações de vizinhança, três modelos foram propostos. O modelo A considerou as variáveis Estado, Número de Vizinhos Urbanos e Número de Vizinhos Não Urbanos; o modelo B considerou as variáveis Estado e Número de Vizinhos Não Urbanos; e o modelo C considerou as variáveis Estado e Número de Vizinhos Urbanos.

A partir da análise dos resultados obtidos, tanto na fase de validação quanto de previsão, para todas as estruturas de modelagem utilizadas e respectivas variáveis, foi observado que o aumento da resolução espacial por meio da diminuição do tamanho do Grid não impactou o desempenho dos modelos. Conforme observado, os acertos globais dentre todos os modelos permaneceram sempre muito próximos. Dentre os modelos em destaque, foi possível observar um percentual de acertos global de 90,09% com base no Grid de 1000 por 1000 metros; 90,25% com base no Grid de 800 por 800 metros; e 90,14% com base no Grid de 600 por 600 metros. Da mesma maneira, os acertos parciais, principalmente na relação das células previstas como estado urbano com as células cujo estado real também era urbano, permaneceram semelhantes.

De acordo com a disponibilidade de dados, duas recomendações se destacam na tentativa de continuar a investigação deste trabalho. A primeira seria a introdução de dados mais recentes de contorno de perímetro urbanizado, aplicados principalmente na fase de treinamento das redes neurais para determinação das regras de transição. Isso poderia melhorar o desempenho da modelagem por meio de informações sobre a dinâmica urbana da área estudada. A segunda recomendação seria considerar menores intervalos de tempo entre períodos de observação de dados, como por exemplo, a cada 10 ou 15 anos.

Os modelos aqui desenvolvidos também proporcionaram resultados para uma fase de previsão, projetada para o ano de 2030. Esses resultados evidenciaram padrões de expansão urbana futuros que tendem a acompanhar as redes de infraestrutura de transportes. Além disso, os resultados dessa previsão podem fornecer subsídios à identificação de áreas mais suscetíveis de sobrecarga urbana e servir de apoio aos processos de planejamento urbano, a fim de torná-lo mais sustentável.

Destaca-se também que este estudo foi desenvolvido considerando a expansão urbana da RMSP como um fenômeno dependente somente de seus dados históricos de perímetro urbanizado. Ou seja, o estudo desconsiderou a evolução das regiões vizinhas, mas isso está justificado pela ausência de tais dados. É esperado que todo um conjunto de cidades e/ou regiões adjacentes se desenvolva concomitantemente, porém em magnitudes distintas, e se juntem em um determinado período futuro. Mesmo assim, considera-se que a área de estudo aqui analisada foi significativa, uma vez que compreendeu o conjunto municípios da RMSP, e produziu resultados relevantes quanto à metodologia empregada.

Em síntese, espera-se que as investigações aqui desenvolvidas contribuam para o entendimento dos processos de expansão urbana, fornecendo subsídios ao planejamento urbano com uma ferramenta para o desenvolvimento urbano mais sustentável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AJAUSKAS, R., MANZATO, G. G., SILVA, A. N. R., The definition of functional urban regions: Validation of a set of spatial models with recent census data and analysis of an additional model specification, **Proceedings of CAMUSS**, Oporto, Portugal, 2012.

ALMEIDA, C. M., MONTEIRO, A. M. V., CÂMARA, G., Modelos de Simulação e Prognósticos de Mudanças de Uso do Solo Urbano: Instrumento para o Subsídio de Ações e Políticas Públicas Urbanas, **XI Encontro Nacional da Associação Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Planejamento Urbano e Regional – ANPUR**, Salvador, 2005.

ALMEIDA, C. M., MONTEIRO, A. M. V., CÂMARA, G., FILHO, B. S. S., CERQUEIRA, G. C., PENNACHIN, C. L., BATTY, M., Modelos celulares de dinâmicas espaço-temporais urbanas, Capítulo 3, p. 1-35, 2003, Disponível em <http://www.dpi.inpe.br/cursos/tutoriais/modelagem>, acesso em 08/11/2015.

AMATO, F., PONTRANDOLFI, P., MURGANTE, B., Supporting planning activities with the assessment and the prediction of urban sprawl using spatio-temporal analysis, **Ecological Informatics**, 30, p. 365-378, 2015.

ANDRADE, H., O clima urbano – Natureza, escalas de análise, e aplicabilidade, **Finisterra**, XL, 80, p. 67-91, Lisboa, 2005.

ANGEL, S., PARENT, J., CIVCO, D. L. E BLEI, A. M., **Atlas of Urban Expansion**, Lincoln Institute of Land Policy, Cambridge, MA, 2010. online at: <http://www.lincolninst.edu/subcenters/atlas-urban-expansion/>.

BASSE, R. M., OMRANI, H., CHARIF, O., GERBER, P. AND BÓDIS, K., Land use changes modelling using advanced methods: cellular automata and artificial neural networks. The spatial and explicit representation of land cover dynamics at the cross-border region scale. **Applied Geography**, 53, p.160-171, 2014.

BAK, P., CHEN, K., CREUTZ, M. Self-organized criticality in the Game of Life. **Nature**, 342(6251), p.780-782, 1989.

BIAS, E. S., BAPTISTA, G. M. M., LOMBARDO, M. A., Análise do fenômeno de ilhas de calor urbanas, por meio da combinação de dados Landsat e Ikonos, **Anais XI SBSR**, 05, INPE, p. 1741–1748, Belo Horizonte, 2003.

BRASIL, Lei 10.257 de 10 de Julho de 2001, Regulamenta os arts. 182 e 183 da Constituição Federal, estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências, Disponível em http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/LEIS_2001/L10257.htm, acesso em 06/09/2016.

BRUECKNER, J. K., Urban Sprawl: Diagnosis and Remedies, **International Regional Science Review**, 23 (2), p. 160–171, 2000.

CANEPARO, S. C., RICOBOM, A. E., A cartografia prospectiva e a geração de mapas preditivos do uso e cobertura da terra – estudo de caso: perímetro urbano de Paranaguá – Paraná – Brasil, **Revista R'aega**, 31, p. 227-259, 2014.

CARDON, A., MULLER, D. N., Introdução às Redes Neurais Artificiais, Curso de Pós Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1994.

CARVALHO, M., M., **Clima urbano e vegetação: estudo analítico e prospectivo do Parque das Dunas em Natal**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2001.

CASTRO. M., L., A., CASTRO, R., O., Autômatos celulares: Implementações de Von Neumann, Conway e Wolfram, **Revista de Ciências Exatas e Tecnologia**, 3, p. 89-106, 2008.

CASTRO, L. N., ZUBEN, F. J. V., Redes Neurais Artificiais, apostila DCA/FEEC/Unicamp, ftp://ftp.dca.fee.unicamp.br/pub/docs/vonzuben/ia006_03/topico5_03.pdf, acesso em 30/10/2015.

CHAUDHURI, G. E CLARKE, K. C., The SLEUTH Land Use Change Model: A Review, **The International Journal of Environmental Resources Research**, 1(1), 88-104, 2013.

CHEN, S., LI, W. B., DU, Y. D., MAO, C. Y., ZHANG, L., Urbanization effect on precipitation over the Pearl River Delta based on CMORPH data, **Advances in Climate Change Research**, 6 (1), p. 16-22, 2015.

COSTA, J., P., O., H., **Criação de cenários de expansão urbana com recurso a autómatos celulares no apoio ao planeamento e gestão territorial: Cabeceiras de Basto (Norte de Portugal)**, Dissertação (Mestrado), Universidade do Porto, Porto, 2010.

COSTA, C. W., DUPAS. F. A., CESPEDES, J. C., SILVA, L. F., Monitoramento da expansão urbana, cenários futuros de crescimento populacional e o consumo de recursos hídricos no município de São Carlos-SP, **Geociências**, 32, p. 63-80, UNESP, São Paulo, 2013.

DEEP, S., SAKLANI, A., Urban sprawl modeling using cellular automata, **The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences**, 17, 179–187, 2014.

DE LA BARRA, T., Integrated land use and transport modelling. **Decision chains and hierarchies**, vol. 12, Cambridge, New York: Cambridge University Press, 1989.

FEITOSA, S. M. R., GOMES, J. M. A., NETO, J. M. M., ANDRADE, C.S. P., Consequências da urbanização na vegetação e na temperatura da superfície de Teresina – PI, **REVSBAU**, 6 (2), p. 58-75, Piracicaba, 2011.

FILHO, A. J. P., Chuvas de verão e as enchentes na grande São Paulo: El Niño, brisa marítima e ilha de calor, **Congresso Brasileiro de Meteorologia**, São Paulo, 2000.

FILHO, B. S. S., CERQUEIRA, G. C., ARAÚJO, W. L., VOLL, E., **Modelagem de dinâmica de paisagem: Concepção e potencial de aplicação de modelos de simulação baseados em autômato celular**, MEGADIVERSIDADE, Vol. 3, Minas Gerais, 2004.

FERNANDES, L. G. L., NAVAU, P. O. A., PORTUGAL, M. S., Previsão de séries de tempo: redes neurais artificiais e modelos estruturais, **Pesquisa e Planejamento Econômico**, 26 (2), p. 253-276. 1996.

GARTLAND, L., **Como mitigar zonas de calor em áreas urbanas**, Tradução: Gonçalves, H., Oficina de Textos, 2010.

GLERIANI, J. M., Cellular automata and neural networks as a modelling framework for the simulation of urban land use change, **XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Goiânia, Brasil, 16-21, p. 3697-3705, 2005.

GROSTEIN, M. D., *Metrópole e Expansão Urbana: a persistência de processos “insustentáveis”*, **São Paulo em Perspectiva**, 15 (1), p. 13-19, 2001.

GUAN, D., LI, H., INOHAE, T., SU, E., NAGAIE, T., HOKAO, K., Modeling urban land use change by the integration of cellular automaton and Markov model, **Ecological Modelling**, 222, p. 3761-3772, 2011.

GUAN, Q., WANG, L. AND CLARKE, K.C., An artificial-neural-network-based, constrained CA model for simulating urban growth, **Cartography and Geographic Information Science**, 32(4), p.369-380, 2005.

HAAS, J., BAN, Y., Urban growth and environmental impacts in Jing-Jin-Ji, the Yangtze River Delta and the Pearl River Delta. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, 30, p. 42-55, 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE), **Arranjos Populacionais e Concentrações Urbanas do Brasil**, 2ª Edição, Rio de Janeiro, 2016.

JAEGER, J. A. G., SCHWICK, C., Improving the measurement of urban sprawl: Weighted Urban Proliferation (WUP) and its application to Switzerland, **Ecological Indicators**, 38, p. 294– 308, 2014.

JAUREGUI, E., ROMALES, E., Urban effects on convective precipitation in Mexico City, **Atmospheric Environment**, 30 (20), p. 3383-3389, 1996.

KOURTIT, K., NIJKAMP, P., In praise of megacities in a global world, **Regional Science Policy and Practice**, 5, p. 167–182, 2013.

KOURTIT, K., NIJKAMP, P., PARTRIDGE, M. D. Challenges of the New Urban World, **Applied Spatial Analysis and Policy**, 8 (3), p. 199–215, 2015.

LIU, Y., *Modelling Urban Development with GIS and Cellular Automata*, Boca Raton, **CRC Press**, 2009.

LAGARIAS, A., Urban sprawl simulation linking macro-scale processes to micro-dynamics through cellular automata, an application in Thessaloniki, Greece, **Applied Geography**, 34, p. 146-160, 2012.

- MAHAJAN, Y., VENKATACHALAM, P., Neural network based cellular automata model for dynamic spatial modeling in GIS, **Computational Science and Its Applications–ICCSA 2009**, p.341-352, 2009.
- MANZATO, G. G., **Regiões Urbanas Homogêneas e Oferta de Transporte**, Dissertação (Mestrado), Universidade de São Paulo – USP, São Carlos, 2007.
- MANZATO, G. G., RODRIGUES DA SILVA, A. N., Spatial-temporal combination of variables for monitoring changes in metropolitan areas, **Applied Spatial Analysis and Policy**, 3, p. 25–44, 2010.
- MAS, J. F., PUIG, H., PALACIO, J. L, SOSA-LÓPEZ, A., Modelling deforestation using GIS and artificial neural networks, **Environmental Modelling & Software**, 19(5), p.461-471, 2004.
- MASSABKI, J. A. R., PEIXOTO, A. S. P., KAISER, I. M., MANZATO, G. G., Modelagem dos padrões da expansão urbana da Região Metropolitana de São Paulo baseada em Autômatos Celulares, **URBE: Revista Brasileira de Gestão Urbana**, 9 (supl.1), p. 361-371, 2017.
- MCCULLOCH, W. S., PITTS, W., A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity, **The Bulletin of Mathematical Biophysics**, 5(4), p. 115-133, 1943.
- MELOTTI, G., **Aplicação de Autômatos Celulares em Sistemas Complexos: Um Estudo de Caso em Espalhamento de Epidemias**, Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte, 2009.
- MILLER, J. D., KIM, H., KJELDSSEN, T. R., PACKMAN, J., GREBBY, S., DEARDEN R., Assessing the impact of urbanization on storm runoff in a peri-urban catchment using historical change in impervious cover, **Journal of Hydrology**, 505, p. 59-70, 2014.
- MONTE-MÓR, R. L., As teorias urbanas e o planejamento urbano no Brasil. Economia regional e urbana: Contribuições teóricas recentes. Belo Horizonte: Editora UFMG, p. 61-85, 2006
- MOROTE, A. F., HERNÁNDEZ, M., Urban sprawl and its effects on water demand: A case study of Alicante, Spain, **Land Use Policy**, 50, p. 352–362, 2015.

MOTA, R., G., **Aplicação de Autômatos Celulares em Sistemas Complexos: Um Estudo de Caso em Espalhamento de Epidemias**, Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis, 2005.

NONOMURA, A., KITAHARA, M., MASUDA, T., Impact of land use and land cover changes on the ambient temperature in a middle scale city, Takamatsu, in Southwest Japan, **Journal of Environmental Management**, 90, p. 3297–3304, 2009.

OLIVERA, G. M. B., OMAR, N., OLIVEIRA, P. P. B, **Computação e Evolução em Autômatos Celulares Unidimensionais**, Universidade Makenzie, São Paulo, p. 39-55, 2010.

OKE, T. R., **Boundary layer climates**, 2nd Edition, Taylor e Francis Group, 1987.

OSMAN, T., DIVIGALPITIYA, P., ARIMA, T., Modeling urban growth scenarios in Cairo Metropolitan Region 2035, **Proceedings of CUPUM**, p. 213-218, 2015.

PERES, O. M., POLIDORI, M. C., Modelos Urbanos baseados em Autômatos Celulares: integrando ambiente natural e o crescimento urbano, **Anais do XXIX Congresso da Sociedade Brasileira de Computação**. I Workshop de Computação Aplicada ao Meio Ambiente da Sociedade Brasileira de Computação. Bento Gonçalves: SBC. 2009.

PHILLIPS, L. R., A comparative study of growth management effectiveness and urban sprawl in two thoroughbred landscapes in the U.S., **Applied Geography**, 65, p. 58-69, 2015.

PIJANOWSKI, B. C., TAYYEBI, A., DOUCETTE, J., PEKIN, B. K., BRAUN, D, PLOURDE, J., A big data urban growth simulation at a national scale: configuring the GIS and neural network based land transformation model to run in a high performance computing (HPC) environment, **Environmental Modelling & Software**, 51, p.250-268, 2014.

POELMANS, L., ROMPAEY, A. V., Detecting and modelling spatial patterns of urban sprawl in highly fragmented areas: A case study in the Flanders–Brussels region, **Landscape and Urban Planning**, 93, p. 10–19, 2003.

PUTMAN, S. H., *Integrated Urban Models: Policy Analysis of Transportation and Land Use (RLE: The City)*, vol. 1, Abingdon: Routledge, 2007.

QIANG, Y., LAM, N. S., Modeling land use and land cover changes in a vulnerable coastal region using artificial neural networks and cellular automata, **Environmental Monitoring and Assessment**, 187(3), p.57, 2015.

RAFIEE, R., MAHINY, A., S., KHORASANI, N., DARVISHSEFAT, A., A., AFSHIN DANEKAR, A., Simulating urban growth in Mashad City, Iran through the SLEUTH model (UGM), **Cities**, 26, p. 19–26, 2009.

RAMOS, R. A. R., RODRIGUES DA SILVA, A. N. A spatial analysis approach for the definition of metropolitan regions - the case of Portugal, **Environment and Planning B: Planning and Design**, 34 (1), p. 171-185, 2007.

REIS, D.S., O rural e urbano no Brasil, **XV Encontro Nacional de Estudos Populacionais**, ABEP, Caxambú-MG, 2006.

RIENOW, A., GOETZKE, R., Supporting SLEUTH – Enhancing a cellular automaton with support vector machines for urban growth modeling, **Computers, Environment and Urban Systems**, 49, p.66–81, 2015.

ROCHA, J., FERREIRA, J. C., SIMOES, J., TENEDÓRIO, J. A., Modelling coastal and land use evolution patterns through neural network and cellular automata integration, **Journal of Coastal Research**, 50, p.827-831, 2007.

RODRIGUEZ-POSE, A., KETTERER, T. D., Do local amenities affect the appeal of regions in Europe for migrants? **Journal of Regional Science**, 52, 535–561, 2012.

SILVA, A.N.R., RAMOS, R. A. R., SOUZA, L.C. L., RODRIGUES, D. S., MENDES, J. F. G., **SIG – Uma Plataforma para Introdução de Técnicas Emergentes no Planejamento Urbano, Regional e de Transportes: Uma ferramenta 3D para Análise Ambiental Urbana, Avaliação Multicritério, Redes Neurais Artificiais.**, São Carlos, Edição dos Autores, 2004.

- SILVA E., A., Cenários da expansão urbana na área metropolitana de Lisboa, **Revista de Estudos Regionais – Região Lisboa e Vale do Tejo**, 5, p. 23-41, 2002.
- SILVA, I. N., SPATTI, D. H., FLAUZINO, R. A., **Redes Neurais Artificiais para engenharia e ciências aplicadas, curso prático**, São Paulo, Artiber, 2010.
- SHAHRAKI, S. Z., SAURI, D., SERRA, P., MODUGNO, S., SEIFOLDDINI, F., POURAHMAD, A., Urban sprawl pattern and land-use change detection in Yazd, Iran, **Habitat International**, 35, p. 521-528, 2011.
- SHALABY, A., TATEISHI, R, Remote sensing and GIS for mapping and monitoring land cover and land-use changes in the Northwestern coastal zone of Egypt, **Applied Geography**, 27, p. 146-160, 2007.
- TAHA, H., Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat, **Energy and Buildings**, 25, p. 99-103, 1997.
- TEZA, C. T. V., BAPTISTA, G. M. M. Identificação do fenômeno ilhas urbanas de calor por meio de dados ASTER on demand 08 – Kinetic Temperature (III): metrópoles brasileiras. **Anais do XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, INPE, Goiânia, Brasil, p. 3911-3918, 2005
- TUCCI, C. E. M., Inundações Urbanas, Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995.
- UN (2015) United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, (ST/ESA/SER.A/366).
- VELLASCO, M. M. B. R, Redes Neurais Artificiais, Laboratório de Inteligência Artificial da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Notas de Aula, 2007.
- WILLEMS, P., NIELSEN, K. A., OLSSON, J., NGUYEN V.T. V., Climate change impact assessment on urban rainfall extremes and urban drainage: Methods and shortcomings, **Atmospheric Research**, 103, p. 106–118, 2012.
- WILSON, A. G., Land-use/transport interaction models: Past and future. **Journal of transport economics and policy**, 32(1), p. 3-26, 1998.

WU, F., Calibration of stochastic cellular automata: the application to rural-urban land conversions, **International Journal of Geographical Information Science**, 16(8), p.795-818, 2002.

XIAO, J., SHEN, Y., GE, J., TATEISHI, R., TANG, C., LIANG, Y., HUANG, Z. Evaluating urban expansion and land use change in Shijiazhuang, China, by using GIS and remote sensing. **Landscape Urban Planning**, 75, p. 69–80, 2006.

YANG, Q., LI, X., SHI, X., Cellular automata for simulating land use changes based on support vector machines, **Computers & geosciences**, 34(6), p.592-602, 2008.

YEH, A.G.O, LI, X., Simulation of development alternatives using neural networks, cellular automata, and GIS for urban planning. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, 69(9), p.1043-1052, 2003.