

MODELAGEM DA DINÂMICA ESPACIAL URBANA POR MEIO DE AUTÔMATOS CELULARES – UMA ABORDAGEM PROGNÓSTICA PARA 2030 NA ÁREA DE PLANEJAMENTO 4 / RIO DE JANEIRO

Vandré Soares Viégas¹

Lucas Fernandes de Medeiros Barros²

Carla Bernadete Madureira Cruz³

Elizabeth Maria Feitosa da Rocha de Souza⁴

297

Resumo.

A urbanização demanda por novas metodologias de análise que possam contribuir e antecipar ações de planejamento urbano. Modelos de simulação que utilizam autômatos celulares, ganham destaque pela construção de cenários “e se?”. O trabalho objetiva a simulação de um cenário para 2030 na Área de Planejamento 4 da cidade do Rio de Janeiro. A metodologia foi realizada no *software* Dinâmica EGO. São inseridos mapas de uso e cobertura da terra para os anos de 2010 e 2015, obtidos junto ao Instituto Pereira Passos, além de variáveis explicativas. O modelo de 2015 atingiu uma precisão geral de 94%. A tendência para 2030 mostra transições urbanas em direção a áreas sujeitas a inundação, numa taxa de 29% em 15 anos, favorecido pela proximidade com corpos hídricos. Unidades de Conservação atuam como limitantes da expansão. A Barra da Tijuca é projetada como a Região Administrativa mais propensa a novas construções.

Palavras-chave: Autômatos Celulares, Mudança da cobertura da terra, modelo de simulação, Dinâmica EGO, Rio de Janeiro;

MODELING OF URBAN SPACE DYNAMICS THROUGH CELLULAR AUTOMATA - A PROGNOSTIC APPROACH FOR 2030 IN THE PLANNING AREA 4 / RIO DE JANEIRO

Abstract.

Urbanization demands new analysis methodologies that can contribute and anticipate urban planning actions. Simulation models that use cellular automata are highlighted by the construction of “what if” scenarios. The work aims to simulate a scenario for 2030 in Planning Area 4 in the city of Rio de

¹Mestre em Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, viegasvandre@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2880-8314>

²Graduando em Ciências Matemáticas e da Terra, Universidade Federal do Rio de Janeiro, lucas.fmb13@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7979-010X>

³Professora Dra. Titular do Departamento de Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, carlamad@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3903-3147>.

⁴Professora Dra. Titular do Departamento de Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, elizabethmfr@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2672-8169>.

Janeiro. The methodology was carried out using the Dinamica EGO software. Maps of land use and coverage for the years 2010 and 2015, obtained from the Pereira Passos Institute, are included, as well as explanatory variables. The 2015 model achieved an overall accuracy of 94%. The trend towards 2030 shows urban transitions towards areas subject to flooding, at a rate of 29% in 15 years, favored by the proximity to water bodies. Conservation Units act as limiting expansion. Barra da Tijuca is designed as the Administrative Region most prone to new construction.

Keywords: Cellular Automata, Land-Cover Change, Simulation Model, Dinamica EGO, Rio de Janeiro

MODELADO DE LA DINÁMICA ESPACIAL URBANA MEDIANTE AUTOMATIZACIONES CELULARES - UN ENFOQUE PRONÓSTICO PARA 2030 EN EL ÁREA DE PLANIFICACIÓN 4 / RÍO DE JANEIRO

Resumen.

La urbanización demanda nuevas metodologías de análisis que puedan aportar y anticipar acciones urbanísticas. Los modelos de simulación que utilizan autómatas celulares se destacan por la construcción de escenarios "qué pasaría si". El trabajo tiene como objetivo simular un escenario para 2030 en el Área de Planificación 4 de la ciudad de Río de Janeiro. La metodología se llevó a cabo utilizando el software Dinamica EGO. Se incluyen mapas de uso y cobertura del suelo para los años 2010 y 2015, obtenidos del Instituto Pereira Passos, así como variables explicativas. El modelo de 2015 logró una precisión general del 94%. La tendencia hacia 2030 muestra transiciones urbanas hacia áreas sujetas a inundaciones, a una tasa del 29% en 15 años, favorecidas por la proximidad a cuerpos de agua. Las Unidades de Conservación actúan como una expansión limitante. Barra da Tijuca está diseñada como la Región Administrativa más propensa a nuevas construcciones.

Palabras clave: Autómatas celulares, Cambio de Cobertura Terrestre, Modelo de Simulación, Dinamica EGO, Río de Janeiro;

Introdução

A compreensão sobre a dinâmica ambiental demanda a compreensão sobre sua dinâmica espacial e requer uma visão integrada dos sistemas naturais e de suas interações com os fatores socioeconômicos e políticos (SOARES-FILHO, 1998). Assumir a abordagem sistêmica, ou seja, entender o meio ambiente como um conjunto de partes com interdependência entre seus componentes e atributos, permite que se considere as relações existentes entre o comportamento dos elementos da natureza (físico, químicos e biológicos) com o homem e a sociedade, diante de sua estrutura política social e econômica (HARDT & LOPES, 1990).

O meio ambiente enquanto estrutura complexa e multivariada, necessita de uma abordagem ampla que revele todas as nuances atuantes. O uso das técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicadas como ferramentas de análise espacial podem preencher essa lacuna, à medida que as geotecnologias podem abranger, praticamente de forma simultânea, espaço, tempo e dimensões taxonômicas, trazendo capacidade preditiva à pesquisa ambiental (XAVIER DA SILVA, 2015).

Nesse sentido, com o avanço das geotecnologias, as técnicas utilizadas têm sido cada vez mais empregadas para ações de planejamento, manejo e gestão ambiental, à medida que são capazes de trabalhar com dados de diferentes origens e integrá-los de forma hierárquica e organizada em consonância a um determinado objetivo. O espaço geográfico, a partir de sua complexidade e dinâmica, exige do especialista uma combinação de métodos, técnicas e conceitos convergentes, a partir de modelos ambientais operacionais (XAVIER DA SILVA, 2015).

Efetivos avanços na representação espacial de modelos, inicialmente focados em áreas urbanas, ocorreram ao final dos anos 80, quando modelos de autômatos celulares (AC) começaram a ser utilizados em larga escala (ALMEIDA, 2003). Segundo Wolfram (1983), autômatos celulares são idealizações matemáticas de sistemas físicos, no qual espaço e tempo são discretos, consiste de uma grade regular uniforme (pixel no sensoriamento remoto), com uma variável discreta em cada localidade. As variáveis em cada célula são atualizadas simultaneamente, baseando-se nos valores das variáveis da sua vizinhança

no passo de tempo precedente, e de acordo com um conjunto predefinido de “regras locais” (WOLFRAM, 1983).

Com o advento das técnicas de sensoriamento remoto, a modelagem dinâmica ganhou grandes subsídios que permitiram aos especialistas adquirirem cada vez mais capacidade de adequar os modelos aos fenômenos que ocorrem de fato no mundo real. Analisar o histórico de crescimento da mancha urbana no passado, e as condições que favoreceram sua expansão, tanto quanto a pressão antrópica em componentes naturais do terreno, permite aos especialistas responderem perguntas clássicas da geografia como “porquê”, “quando” e “onde” de forma a que se possa descrever qualitativamente um fenômeno e prever sua evolução, integrando suas escalas temporais e espaciais.

O presente trabalho pretendeu aplicar e avaliar modelos dinâmicos de cenários, por meio de autômatos celulares, simulando a dinâmica de crescimento antrópico para Área de Planejamento 4, município do Rio de Janeiro, no período 2015-2030 utilizando como base a identificação de variáveis condicionantes de formação da paisagem no tempo presente (2010-2015).

Metodologia

A Área de Planejamento 4, representada na Figura 1, está localizada no município do Rio de Janeiro e compõe parte da Zona Oeste carioca, sendo caracterizada por uma divisão setorial que conta atualmente com 19 bairros divididos em três Regiões Administrativas: Barra da Tijuca, Cidade de Deus e Jacarepaguá. Os recortes espacial e temporal definidos para o estudo se baseiam no ritmo de crescimento acentuado de mudanças ocorridas na AP 4 desde os anos 2000, mas que tiveram maiores incrementos, até então, com a chegada de grandes eventos na Cidade do Rio de Janeiro, como a Copa do Mundo (2014) e os Jogos Olímpicos e Paraolímpicos (2016).



Figura 1 - Áreas de Planejamento do Município do Rio de Janeiro - Destaque AP 4 (Fonte: Os autores)

A metodologia proposta se baseia no modelo de mudanças no uso e cobertura da terra (*Land-Use and Cover Change - LUCC*), pré-definido no software Dinamica EGO, uma plataforma *freeware*, concretizada por pesquisadores da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) construído em linguagem computacional C++, que disponibiliza uma série de operações complexas, por meio de uma série de *functors* (functores) e modelos pré-estabelecidos. No caso da operação *LUCC*, o Dinamica conta com 10 passos sugeridos que variam desde a investigação de matrizes de transição, categorização de possíveis variáveis explicativas, validação e simulação de cenários.

Como arquivos de entrada - *classificações de uso e cobertura da terra em tempos discretos (T1 e T2)* - o trabalho utiliza como base dados secundários de classificação de uso e cobertura da terra, obtidas na plataforma Data Rio, dados do Instituto Pereira Passos (IPP). O fluxograma metodológico aplicado no trabalho é apresentado pela Figura 2.

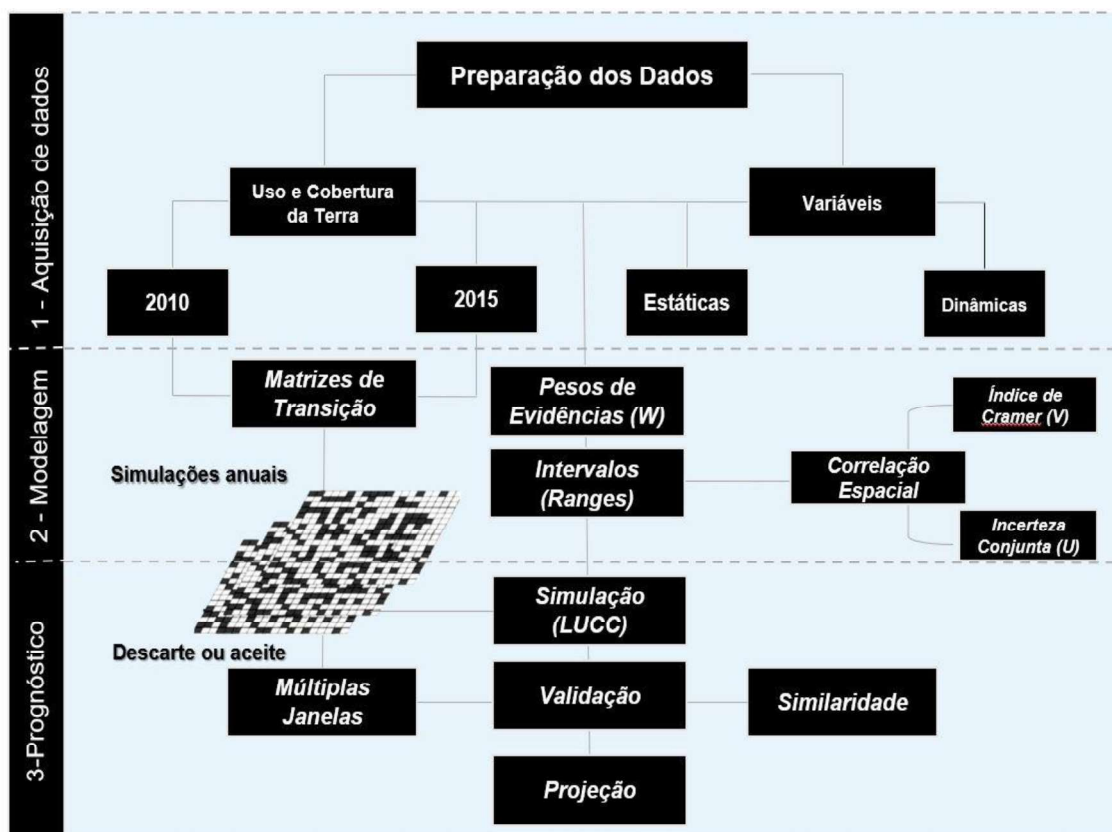


Figura 2 - Fluxograma de Trabalho (Fonte: Os autores)

Como etapa prévia à inserção de dados no modelo, é preciso generalizar a classificação obtida ao nível de detalhamento necessário para o estudo. O arquivo de origem conta com um total de 16 classes de uso, que foram reclassificados e generalizados em 5 grupos menores. A generalização de classes de usos do solo do IPP foi necessária uma vez que a complexidade do modelo tende a aumentar de acordo com a quantidade de classes utilizadas, visto que cada uso contém, invariavelmente, uma regra própria que está associada ao desenvolvimento de vários parâmetros (BATTY et. al, 1999). Os usos da terra foram generalizados para macro classes afins, com o intuito de facilitar a análise de transições, bem como se adequar ao nível de detalhe pretendido. Desta maneira as classes utilizadas no trabalho foram agrupadas em: **Classe 1** – Áreas agrícolas e cobertura gramíneo lenhosa; **Classe 2:** Áreas urbanas; **Classe 3** – Cobertura arbórea e arbustiva; **Classe 4:** Afloramentos rochosos e depósitos sedimentares/áreas sujeitas à inundação e, por fim, **Classe 5** – Corpos Hídricos.

Para modelar a expansão antrópica é necessário organizar um conjunto de variáveis explicativas, subdivididas entre estáticas e dinâmicas, para todo o conjunto territorial da AP 4. Os dados são então categorizados em áreas de influência (*buffer*), capazes de recobrir toda a área de estudo, processo realizado no QuantumGIS 3.14. Posteriormente todos as variáveis identificadas são convertidas para formato *raster*, com as mesmas referências cartográficas, e agregadas num único arquivo denominado “*cube map*”.

A pergunta prévia que orienta a etapa de escolha das variáveis foi: quais as possíveis feições são mais influenciadoras das alterações da paisagem na AP 4? Nesta etapa considera-se estudos anteriores como Barros et. al, (2019) e Viégas et. al, (2018). Pelos testes e bibliografia supracitadas, as variáveis estáticas escolhidas no trabalho foram: declividade, hidrografia, lagoas, relevo, rodovias e unidades de conservação. A Figura 3 ilustra algumas das variáveis utilizadas, em termos de suas representações de distâncias, no formato *raster*, para a AP4.

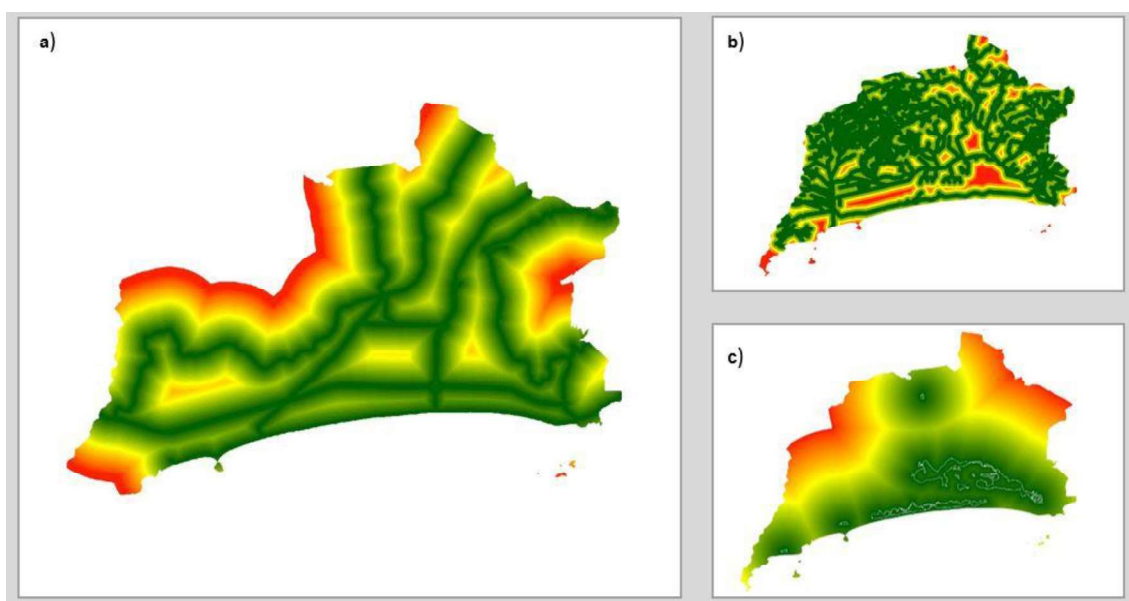


Figura 3 – Variáveis Estáticas (Legenda: buffer das variáveis, cor verde representa as distâncias iniciais, amarelo e vermelho os últimos limiars de intensidade da distância a – Rodovias, b – Hidrografia, c – Lagoas)

O trabalho adotou o método de pesos de evidências, baseado no teorema da probabilidade condicional de *Bayes* que, basicamente, se refere a propensão que um

dado uso (*p.ex. cobertura gramíneo lenhosa para urbano*), posto que uma evidência, também chamada variável explicativa (*p.ex. proximidade com estradas*), já ocorreu (ALMEIDA, 2003). Contudo, o Teorema de Bayes requer que as variáveis inseridas no modelo sejam independentes entre si. No Dinamica EGO, esta avaliação pode ser feita por meio dos índices de Cramer (V) e Incerteza de informação conjunta. Segundo Bonham-Carter (1994), os valores variam de 0 a 1, de acordo com o grau de correlação, de maneira que valores acima de 0,5 devem ser descartados. Dessa maneira excluiu-se a variável dinâmica *distância a corpos hídricos*, por apresentar correlação (0.56) com a variável dinâmica *hidrografia*.

Na última etapa metodológica, deve-se considerar que o Dinamica EGO apresenta dois algoritmos voltados à transição de usos, as funções *expander* e *patcher*. O primeiro processo é dedicado apenas à expansão ou contração de manchas já existentes de certa classe, enquanto o segundo processo foi feito para gerar ou formar novas manchas através de um mecanismo de sementeira (SOARES-FILHO, 2009). Com relação ao *expander*, os valores escolhidos se basearam numa série de testes e em recomendações estabelecidas em Soares-Filho (2009), mantendo 20% das mudanças e destinando 80% para o *patcher*. Com relação às novas manchas os valores inseridos referem-se a métricas da paisagem dispostas pelo tamanho médio da mancha, coeficiente de variância e isometria. Os valores de mancha foram calculados pelo software gratuito *Fragstats*, enquanto a isometria que varia de 0 a 2, foi estabelecida após testes. Os valores são dispostos na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros de Transição do uso da terra para a AP 4 entre 2010 e 2015

Parâmetros	Classes Transição 2010 – 2015 AP 4				
	1	2	3	4	5
Tamanho médio da mancha (ha)	2,7	22,7	15,5	4,2	0,9
Variância (ha)	254,8	1980,1	1610,9	607,0	1790,0
Isometria	1	1	1	1	1

A validação final do modelo para o ano de 2015, em comparação com a paisagem observada, é realizada dentro do espaço do Dinamica utilizando abordagem de similaridade *fuzzy*, que leva em consideração a incerteza da localização de uma categoria dentro da vizinhança de células (SOARES-FILHO et al, 2009),. Contudo, este modelo de validação só conta com as vizinhanças alteradas no modelo e não a paisagem como um todo, lacuna preenchida pela escolha do método de Exatidão Global.

Resultados

Em primeira análise, os produtos gerados pelo modelo correspondem às porcentagens de transições que ocorrem no espaço de tempo estudado, como apresentado na Tabela 2. As matrizes de passos múltiplos, permitem verificar quais transições ocorreram entre 2010 e 2015 e suas respectivas taxas líquidas por unidade de tempo, no caso anualmente.

Tabela 2 – Matrizes de Transição 2010 – 2015

Transições	Mudanças Anuais (2010 - 2015)
Afloramentos rochosos e depósitos sedimentares/áreas sujeitas à inundação (4) para Urbano (2)	2,4%
Agrícolas / Gramíneo Lenhosa (1) para Urbano (2)	2,1 %
Agrícolas / Gramíneo Lenhosa (1) para Cobertura arbórea e arbustiva (3)	1,7%
Cobertura arbórea e arbustiva (3) para Agrícolas / Gramíneo Lenhosa (1)	0,4%

Pelas transições observadas é possível destacar que o crescimento urbano na AP 4, no período analisado, avança em direção a áreas sujeitas à inundação (2,4% ao ano) – *onde são as alterações de fato, em comparação com afloramentos rochosos e depósitos sedimentares* - e na ocupação de áreas que, anteriormente, possuíam uso agrupado agrícola e cobertura gramíneo lenhosa (2,1%). O desmatamento também é percebido

em taxas menores, o que pode ser explicado pelo elevado número de áreas protegidas na Área de Planejamento.

Tendo em vista os resultados expressos na Tabela 2, investiga-se quais as variáveis explicativas tiveram maior peso positivo (**W+**), ou seja, que favoreceram a transição para os usos que tiveram maiores alterações. Tendo como base a alteração de maior grau, **Classe 4 - Afloramentos rochosos e depósitos sedimentares/áreas sujeitas à inundaçã**o para **Classe 2 - Áreas Urbanas**, a Tabela 3 demonstra a influência da variável dinâmica “Distância à Corpos Hídricos”, tendo sua representação explicada por ter sido a variável que mais favoreceu a transição. Cabe destacar que os valores de distância dispostos são atribuídos por equações internas, disponíveis em Soares-Filho et. al (2009) que consideram variações gráficas de acordo com os usos, pixel a pixel.

Tabela 3 - Valores de pesos de evidência para a transição 4 - 2 com relação a variável dinâmica “Distância à Corpos Hídricos”

Sequência	Distância à Corpos Hídricos (metros)	W+
1	0-20	0.202
2	20-50	0.397
3	50-380	0.210
4	380-390	-0.006
5	390-470	-0.012

Pelos valores apresentados é possível inferir que a presença de corpos hídricos atua como uma variável ambiental que favorece a transição analisada. Considerando que a Classe 4 agrupa as regiões sujeitas à inundação e por verificação das predições, é possível notar que de fato a distância a corpos hídricos atua positivamente à medida que as maiores alterações ocorreram as margens da lagoa de Jacarepaguá. A maior parte de áreas sujeitas à inundação, modificadas, ocorrem no bairro do Recreio dos Bandeirantes, e também possuem forte relação com a variável estática “proximidade com rodovias” apresentando peso de evidência 0.349 para uma distância entre 10 e 20 metros de distância.

Os pesos de evidência também foram capazes de evidenciar a importância da variável estática “distância a áreas previamente desmatadas” com relação a transição entre a Classe 3 - Cobertura arbórea e arbustiva e a Classe 1 – Áreas Agrícolas / Gramíneo Lenhosa. O gráfico gerado pelo Dinamica EGO é representado pelo **eixo X** – Distância em Metros e pelo **eixo Y** – (W+) peso de evidência (Figura 4).

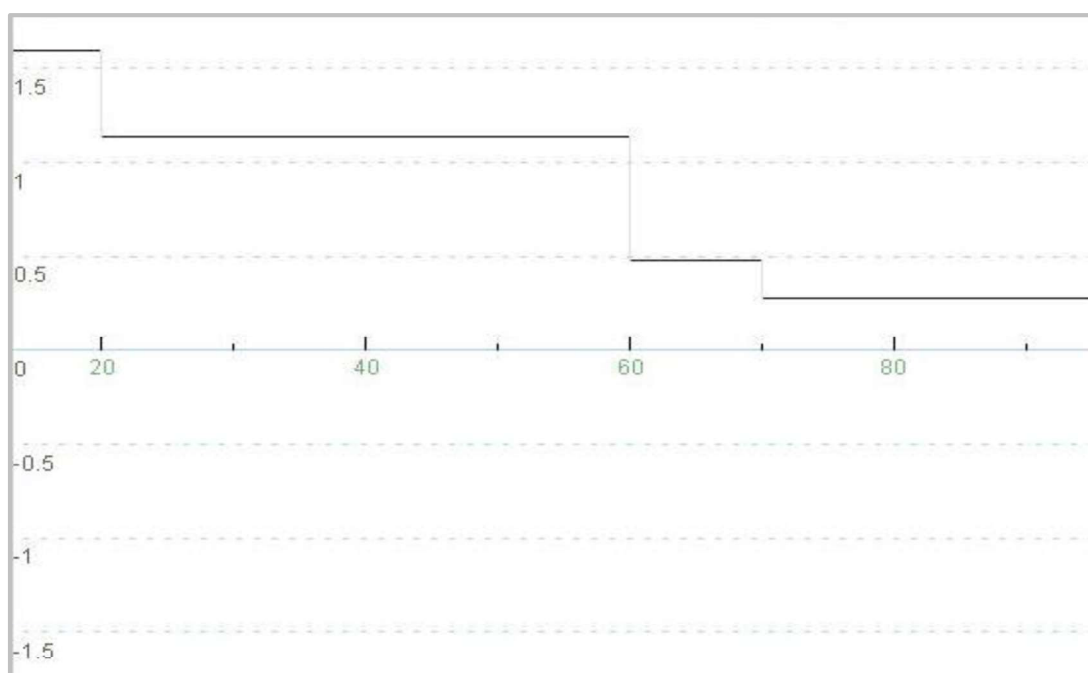
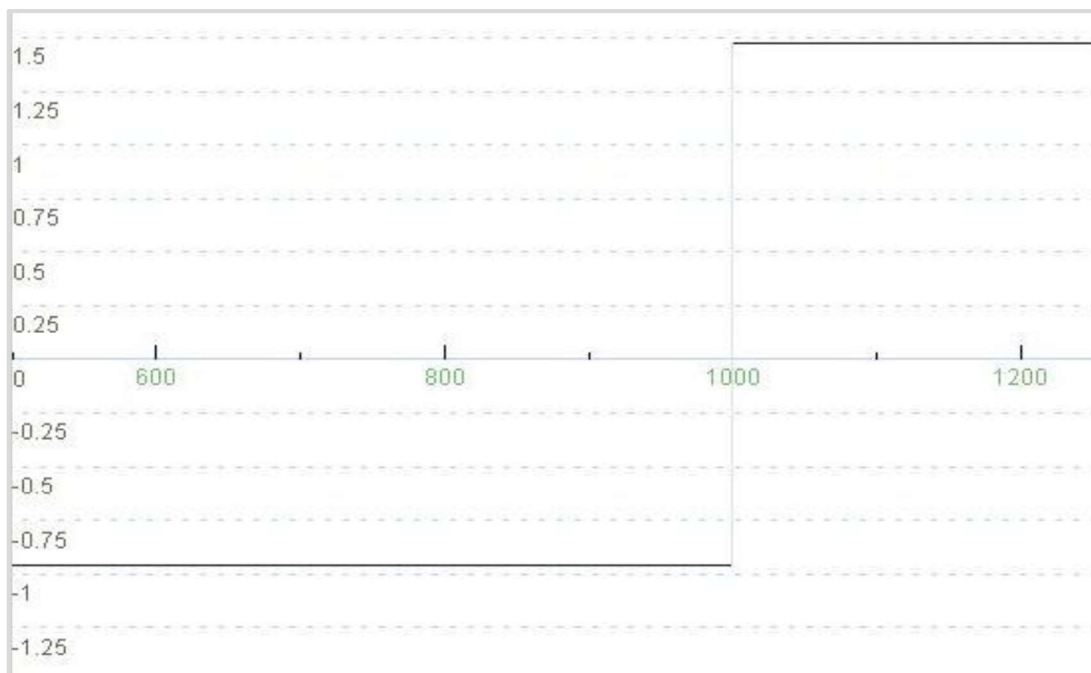


Figura 4 – Transição entre floresta e áreas agrícolas x áreas previamente desmatadas (Legenda – Eixo X: Distância em metros, Eixo Y: Pesos de Evidência)

O gráfico mostra os limiares de cada peso frente à distância. Conforme vai havendo um distanciamento da classe de análise, muda-se o Peso (W), tal como na Tabela 3. A Variável dinâmica *Unidades de Conservação*, também apresentou resultados interessantes. Ao analisar a transição entre a cobertura arbórea e arbustiva com áreas urbanas, ou seja desmatamento visando novas construções, percebe-se que as áreas protegidas servem como uma barreira para a expansão urbana à medida que apresenta um peso de evidência negativo constante que somente tem algum tipo de alteração a partir de 1 km de distância das Unidades de Conservação, tal como apresentado pela Figura 5. É possível inferir que tais unidades protetivas da AP 4 têm tido seus limites

respeitados pelas transições visualizadas nos anos escolhidos. Contudo, é importante ressaltar que este é um modelo baseado nos padrões atuais de preservação, segundo o cenário escolhido – aquele em que as regras ambientais não seriam modificadas nos próximos 10 anos.



**Figura 5 – Transição entre áreas urbanas e florestas x unidades de conservação
(Legenda – Eixo X: Distância em metros, Eixo Y: Pesos de Evidência)**

Na etapa de simulação LUCC, o primeiro teste consistiu em projetar o ano de 2015 com os dados de entrada do mapa inicial (2010) e as variáveis explicativas. O modelo de simulação comparativo com a realidade é apresentado na Figura 6.

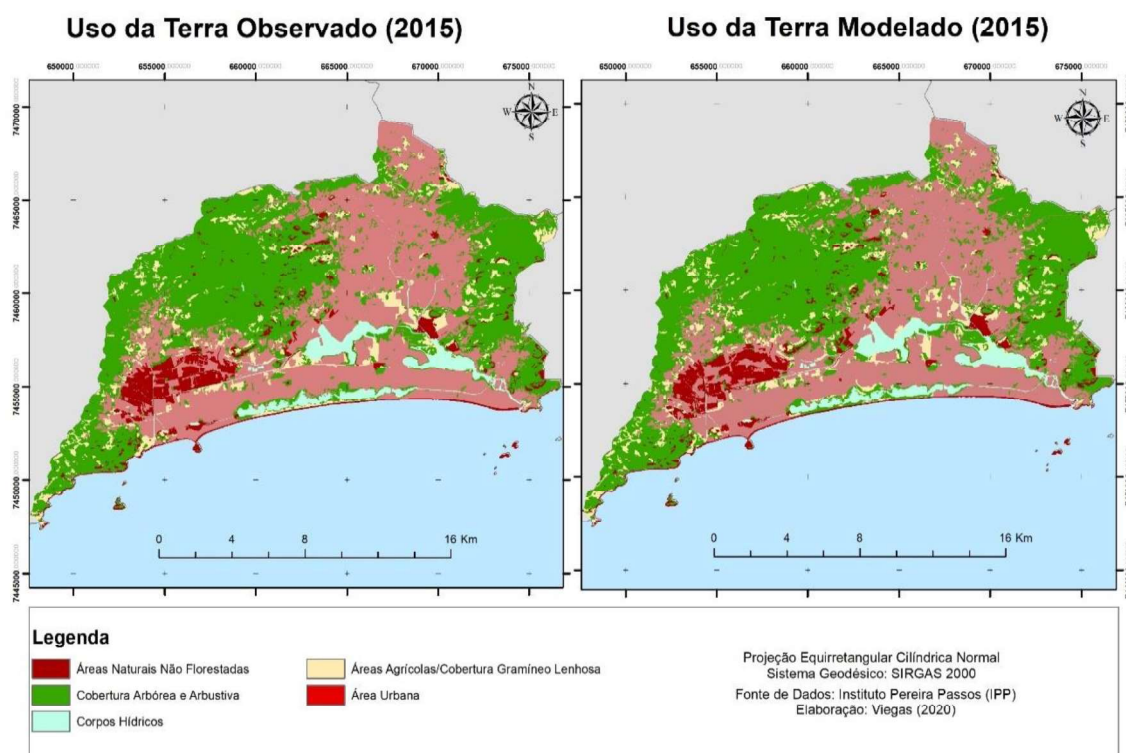


Figura 6 – Predição de uso da terra 2015 em comparação ao real (Uso da Terra observado – dados do Instituto Pereira Passos)

Em termos visuais é possível identificar uma boa adequação do modelo com o real, passando por duas etapas de validação. A primeira etapa de validação foi baseada na metodologia *fuzzy*, proposta por Hagen (2003), e leva em consideração a incerteza da localização de uma categoria dentro da vizinhança de 11 x 11 células, atingindo concordância de **75%** para as áreas em que houve transição, destaca-se que segundo Almeida (2003), um modelo pode ser considerado satisfatório se obtiver valores acima **45%** pelo método de decaimento exponencial. Visando compreender a exatidão de todo o modelo, incluindo áreas onde não houve transição, optou-se pelo método de exatidão global, cálculo que é feito pelo somatório da diagonal de acertos, dividido pelo total de acerto geral. A exatidão encontrada para o modelo de 2015 foi de **94%**, como apresentado pela tabela 4, valores em Km². A previsão para 2015 se adequa ao mapa de referência, por ambos os métodos de avaliação e atende a proposta da pesquisa, tendo os parâmetros embasado a simulação para 2030.

Tabela 4 – Tabela de Validação Global

Rótulos de Linha	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5	Total Geral (Km ²)
Classe 1	20,8311	2,7533	0,7617	0,0168	0,0003	24,3632
Classe 2	2,6114	102,3509	2,7634	1,4984	0,022	109,2461
Classe 3	2,7714	3,395	120,1724	0,1675	0,0033	126,5096
Classe 4	0,1985	1,6327	0,1858	18,8054	0	20,8224
Classe 5	0,0011	0,009	0,0026	0,002	12,8284	12,8431
Total Geral	26,4135	110,1409	123,8859	20,4901	12,854	293,7844

Tendo como base os parâmetros que obtiveram a melhor adequação para o ano de 2015 foi calculada uma nova matriz de transição, entre o intervalo 2015 (mapa real) e 2030 (simulação). As tendências observadas para a AP 4, tal como observado pela Tabela 2, mantém a transição da Classe 4, em particular áreas sujeitas à inundação, como a área que tende a sofrer maior alteração antrópica, cerca de **29%** em 15 anos. A transformação de áreas agrícolas e cobertura gramíneo lenhosa para solo urbano, totalizam **26%** no mesmo período. Buscando compreender as alterações por Região Administrativa (RA), foram cálculos os totais de área para cada uso em Km² para os anos de 2015 e 2030, verificando possíveis acréscimos ou decréscimos. Os resultados, expressos na Tabela 5 evidenciam reduções acentuadas tanto para a Classe 1 quanto para a Classe 2 em todas as RA. Também são verificadas tendências de desmatamento próximo a Cidade de Deus, e projeções de possíveis novas expansões urbanas na Barra da Tijuca, com ritmo mais equilibrado nas demais Regiões Administrativas

Tabela 5 – Alterações de uso global entre 2015 e 2030 por Região Administrativa

Classe / RA	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5
Barra da Tijuca	-41,0%	20,4%	15,4%	-35,8%	0%
Cidade de Deus	-100%	2,1%	-96,0%	0%	0%
Jacarepaguá	-30,9%	5,8%	0,4%	-0,8%	0%

O mapa do prognóstico final, representado pela Figura 6 permite verificar tendências de adensamento urbano, considerando as variáveis explicativas utilizadas no trabalho. Ao efetuar uma comparação com o ano de 2015, as tendências espaciais e as relações com

seu entorno ficam bastante claras principalmente nas áreas mais modificadas, como áreas sujeitas à inundação e agrícolas / cobertura gramíneo lenhosa (Figura 7)

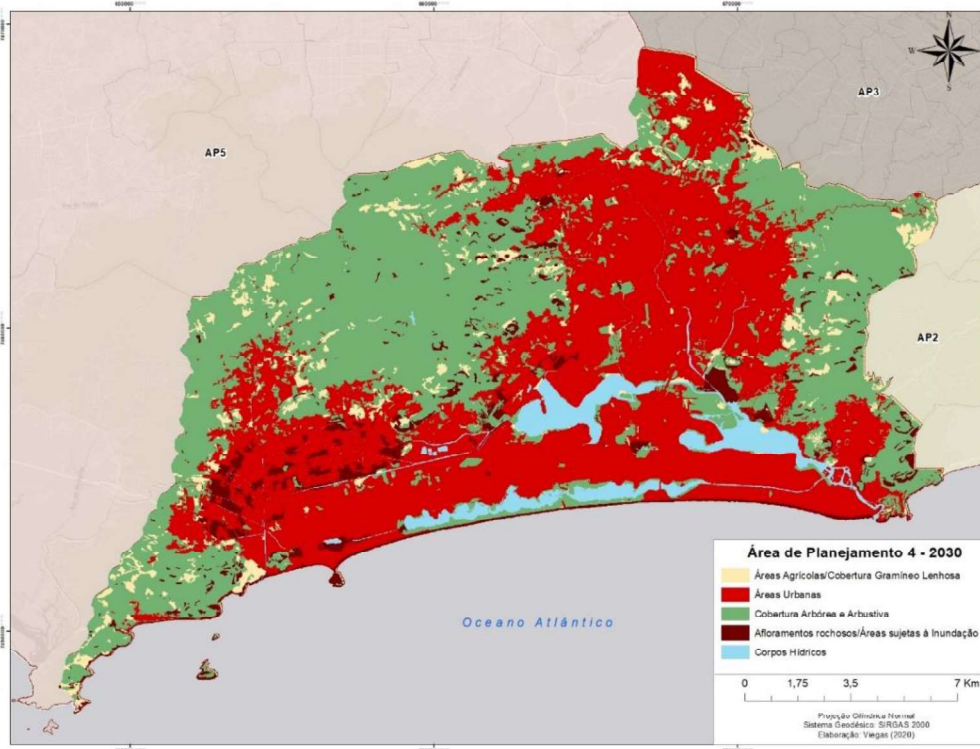


Figura 6 – Mapa Prognóstico para a AP 4 em 2030

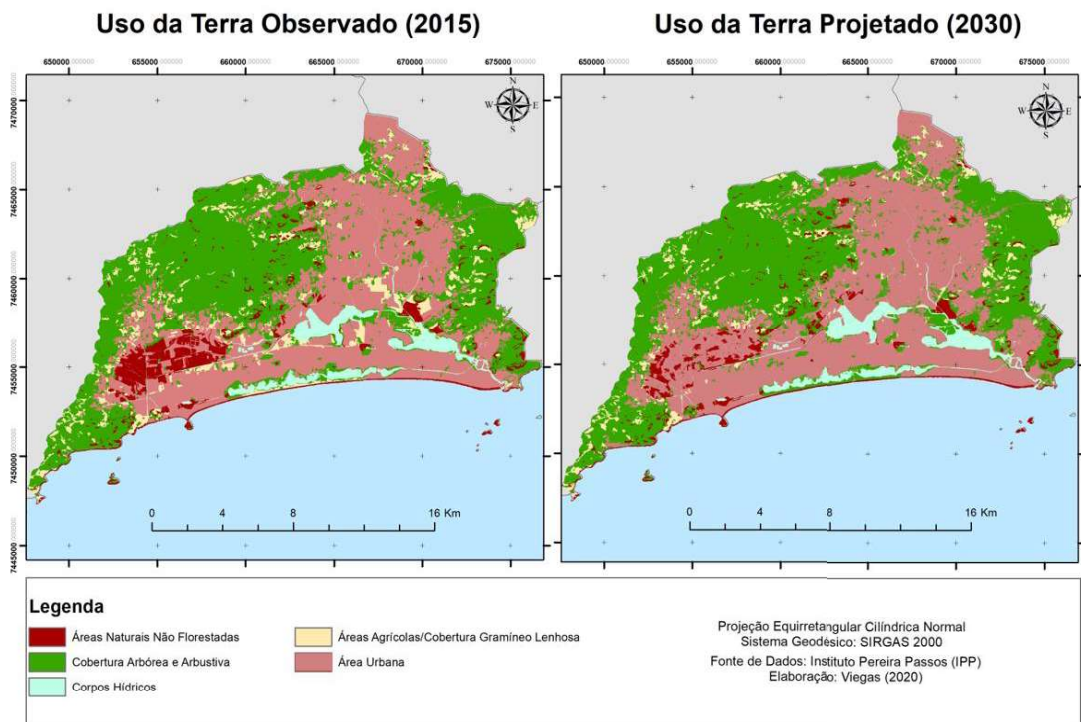


Figura 7 – Uso da Terra Observado e Projetado para o ano de 2030. (Uso da Terra observado – dados do Instituto Pereira Passos)

VIEGAS et al., *Modelagem da Dinâmica Espacial Urbana por Meio de Autômatos Celulares – Uma Abordagem Prognóstica para 2030 na Área de Planejamento 4 / Rio De Janeiro.*

CONCLUSÕES

O destaque dado aos autômatos celulares em modelos de simulação de alterações no uso e cobertura da terra se justifica pela grande aplicabilidade dada ao planejamento ambiental, à medida que é possível simular e prever alterações ou impactos antes que os mesmos ocorram. O modelo LUCCE dentro do ambiente do Dinamica EGO se apresentou como uma nova ferramenta, verificada por meio de resultados estimulantes, que pode ser usada como subsídio para estudos diversos, desde modelos de expansão urbana, desmatamento, quanto para avaliação ou mitigação de impactos antes que os mesmos ocorram. O Dinamica pode colaborar de maneira relevante por ser um software gratuito, que lida com uma grande quantidade de dados aliado a um baixo poder de processamento e resultados aprimorados.

Quanto as variáveis explicativas, dinâmicas e estáticas, as mesmas se mostraram adequadas principalmente pela percepção das respostas positivas dadas pelos pesos de evidência em cada transição analisada. Contudo, considera-se o fato que nem todas as variáveis podem ser modeladas, como transições de cunho político, mudanças de legislação e interesses particulares na área, o que poderia adequar ainda mais o modelo. Por fim, a projeção para o ano de 2030 na AP 4 indica tendências de construções em torno de áreas sujeitas a inundação, e em áreas agrícolas e cobertura gramíneo lenhosa, tendo como fator atrativo a presença de corpos hídricos, a proximidade com estradas. Reforça-se que um modelo é uma representação aproximada da realidade e reflete possíveis cenários e expectativas que podem ser adotadas segundo diversos interesses e aplicações.

Referências Bibliográficas

- ALMEIDA, C. M. de. Modelagem da dinâmica espacial como uma ferramenta auxiliar ao planejamento: simulação de mudanças de uso da terra em áreas urbanas para as cidades de Bauru e Piracicaba (SP), Brasil. 2003. 351f. Tese Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2003.
- BARROS, L.F.M.; et. al, (2009) Estratégia Para o Mapeamento da Expansão Urbana na Área De Planejamento 4 Do Município Do Rio De Janeiro - Uma Aplicação Do Modelo Preditivo Por Autômatos Celulares. 10ª semana de Integração Acadêmica da UFRJ
- BATTY, M. et al. Modeling urban dynamics through GIS-based cellular automata. *Computers, Environment and Urban Systems*, v. 23, p. 205-233, 1999.
- BONHAM-CARTER, G. F. *Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS*. Ontario: Pergamon, 1994
- HAGEN, A., (2003). *Fuzzy set approach to assessing similarity of categorical maps. International Journal of Geographical Information Science*, 17, 235-249
- HARDT, L.P.A.; LOPES, J.A.V. I (1990) Interpretação e síntese de resultados em estudos e relatórios de impacto ambiental. In: Seminário sobre avaliação e relatório de impacto ambiental, 1, 1990, Curitiba.p162-167
- SOARES-FILHO, B.S. (1998). Modelagem da dinâmica da paisagem de uma região de fronteira de colonização amazônica. São Paulo, 1998. 299p
- SOARES-FILHO, B.S. RODRIGUES, H.O. COSTA, W.L. *Modeling Environmental Dynamics with Dinamica EGO*. Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/282782423>. Acesso em jul. 2020
- VIÉGAS, V.S. et. al, (2018) Detecção de Mudanças nas Áreas Construídas Da Ap4/Rio De Janeiro, entre 2000 e 2015. *Rev. Tamoios*, São Gonçalo (RJ), ano 14, n. 2, pág. 25-37, jul-dez
- WOLFRAM, S. “*Statistical mechanics of cellular automata*”. *Review of modern physics*, v. 55,
- XAVIER DA SILVA J.; MARINO, T.B.; GOES, M.H.B. *Geoprocessing and spatial planning: some concepts and applications*, p. 335-347. *The Routledge Handbook of Planning Research Methods*. New York: Routledge, 2015.