

MODELAGEM DE CENÁRIOS FUTUROS DA EXPANSÃO URBANA EM PARATY-RJ BASEADOS EM AUTÔMATOS CELULARES

Jéssica Silva Martins¹

Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)
Rio de Janeiro, RJ, Brasil



Elizabeth Maria Feitosa da Rocha de Souza²

Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)
Rio de Janeiro, RJ, Brasil



Monika Richter³

Universidade Federal Fluminense (UFF)
Angra dos Reis, RJ, Brasil



Enviado em 29 jul. 2023 | Aceito em 3 set. 2023

Resumo: Baseado em autômatos celulares, este trabalho visa a modelagem de cenários futuros da expansão urbana de Paraty, estado do Rio de Janeiro, devido à importância que este município tem conquistado em âmbito regional em virtude do desenvolvimento turístico e de seu recente crescimento urbano. A modelagem foi efetuada no software DINAMICA EGO com a inserção de variáveis que influenciariam no modelo de forma a atrair ou repelir manchas urbanas através do somatório dos pesos de evidência. Apoiado no resultado do processo realizado, gerou-se cenário para o ano de 2030, que seguiu a mesma tendência de concentração da ocupação no centro da cidade e arredores e de núcleos urbanos dispersos ao longo da BR-101. Em suma, a modelagem se mostrou satisfatória e coerente com as transições da ocupação observada em períodos passados, demonstrando também a importância do uso de ferramentas de análise do ordenamento do crescimento urbano, o que pode ser auxiliado pela aplicação das geotecnologias, assim como, para a gestão e planejamento da cobertura e uso da terra.

Palavras-chave: Modelos urbanos. Autômatos celulares. Geotecnologias. Simulação de cenários. Transição da cobertura da terra.

MODELING FUTURE URBAN EXPANSION SCENARIOS IN PARATY MUNICIPALITY USING CELLULAR AUTOMATA

Abstract: Based on cellular automata principles, this study aims to model future urban expansion scenarios within the municipality of Paraty, located in the state of Rio de Janeiro. This research is motivated by the municipality's regional significance, driven by tourism development and recent urban growth trends. The modeling process was executed using the DINAMICA EGO software, incorporating variables that exert influence on the model to either encourage or deter the proliferation of urban areas, as determined by the cumulative weight of evidence. Based on the results of this modeling process, a scenario was developed for the year 2030, which followed a consistent pattern of increased urban development in and around the city center, alongside dispersed urban centers along the BR-101 highway. In summary, the modeling approach has proven to be satisfactory and in alignment with historical patterns of urban expansion observed in previous periods. This underscores the significance of employing urban growth planning analysis tools, supported by geotechnologies, for effective land cover and land use management and planning.

Keywords: Urban models. Cellular automata. Geotechnologies. Scenario simulation. Transition of land cover.

MODÉLISATION DES SCÉNARIOS DE FUTURE EXPANSION URBAINE À PARATY, RJ, À L'AIDE DES AUTOMATES CELLULAIRES

Résumé: Basée sur les automates cellulaires, cette étude vise à modéliser les futurs scénarios d'expansion urbaine dans la municipalité de Paraty, située dans l'État de Rio de Janeiro. Ceci s'explique par son importance à l'échelle régionale, due au développement touristique et à la croissance urbaine récente. La modélisation a été réalisée à l'aide du logiciel DINAMICA EGO, en intégrant des variables qui influencent le modèle pour favoriser ou décourager les zones urbaines, grâce à la somme des poids de preuve. En se fondant sur les résultats de ce processus, un scénario a été élaboré pour l'année 2030, suivant la même tendance de concentration de l'occupation dans le centre-ville et ses environs, ainsi que des centres urbains dispersés le long de la BR-101. En résumé, cette modélisation s'est révélée satisfaisante et cohérente avec les transitions d'occupation observées au cours des périodes antérieures, démontrant également l'importance de recourir à des outils d'analyse pour la planification de la croissance urbaine, lesquels peuvent bénéficier de l'application des géotechnologies, ainsi que pour la gestion et la planification de l'occupation et de l'utilisation des terres.

Mots-clés: Modèles urbains. Automates cellulaires. Géotechnologies. Simulation de scénarios. Transition de l'utilisation des terres.

1. Doutoranda em Geografia pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3877-1620>. E-mail: martins.jess89@gmail.com
2. Doutora em Geografia pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Professora do Departamento de Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2672-8169>. E-mail: elizabethmfr@gmail.com
3. Doutora em Geografia pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Professora do Departamento de Geografia e Políticas Públicas da Universidade Federal Fluminense (UFF). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2129-4007>. E-mail: richtermonika11@gmail.com

Introdução

O município de Paraty, localizado ao sul do estado do Rio de Janeiro, possui peculiar uso da terra que abrange desde áreas naturais, históricas e culturais protegidas até a concentração de áreas urbanas. Considerada um dos 65 destinos indutores do turismo do Brasil, a cidade possui na atividade a sua principal economia e tem conquistado notoriedade em âmbito nacional e internacional devido ao seu patrimônio natural, histórico e cultural, sendo detentora de um dos principais remanescentes da Mata Atlântica do Brasil e tombada como Monumento Histórico Nacional pelo IPHAN e Patrimônio Mundial pela Unesco.

Esta notoriedade tem contribuído para o crescimento urbano do município, que ocorre de maneira desordenada, acarretando usos conflitantes e processos de gentrificação, evidenciando uma recomposição demográfica e consequente substituição social que não se limita apenas às áreas centrais. Regiões periféricas dotadas de belezas naturais e de fácil acesso são atrativas para grupos de investidores que, através da oferta de novos produtos imobiliários e hoteleiros, como segundas residências, condomínios fechados, hotéis e outros, voltados para classes de maior poder aquisitivo, contribuem para a reestruturação urbana e a fragmentação social. Tais investimentos estão a serviço de uma ordem privada cada vez mais rígida, ameaçando o equilíbrio do meio natural e segregando grupos sociais locais, como comunidades caiçaras, quilombolas e indígenas. Também é importante citar a rápida ocupação em áreas antes voltadas aos assentamentos rurais, como Taquari, São Roque, Barra Grande e outros, atualmente sob gestão da prefeitura.

Atualmente, Paraty reúne um arcabouço turístico em expansão, formado por variados atrativos naturais, culturais, gastronômicos; equipamentos como diversas opções de meios de hospedagens, oferta de restaurantes e lojas de souvenirs; eventos fixos como a Festa Literária Internacional de Paraty (FLIP), Festival da Cachaça, Bourbon Festival Paraty e outros. Também apresenta uma certa estrutura para o planejamento e organização da atividade turística, como secretaria e fórum de turismo e políticas públicas voltadas para o setor.

Contudo, o destino falha em diferentes aspectos, que não apenas interferem na competitividade e qualidade da cidade como um destino turístico, mas, sobretudo, limitam a qualidade de vida dos moradores locais, como saneamento básico precário, instabilidade no fornecimento de energia elétrica, ausência de elementos de acessibilidade, insegurança, carência de sinalização turística, inexistência de plano de marketing, etc. (MTUR, 2015). Todavia, devido às belezas naturais e ao grande apelo histórico-cultural de Paraty, tais falhas não impedem seu forte posicionamento turístico e clara notoriedade em âmbito nacional e internacional. Logo, o turismo é um evidente impulsionador do crescimento urbano em Paraty, de forma a atender as necessidades do crescente número de turistas na localidade, a exemplo da reabertura da RJ-165 (estrada Paraty-Cunha) permitindo maior fluxo turístico vindo do Vale do Paraíba (SP).

Desse modo, faz-se necessário que as políticas públicas e processos de tomada de decisão relativo ao planejamento e organização do turismo estejam alinhados aos de urbanismo e desenvolvimento para que ambos, turismo e crescimento urbano, não ocorram de forma desordenada, segregacionista e danosa aos turistas e principalmente aos moradores locais.

Assim, de forma a contribuir para a análise da relação entre turismo e expansão urbana, este trabalho visa à criação de cenários futuros do crescimento urbano projetados para o ano de 2030, por meio do modelo de autômatos celulares. Segundo Wolfram (1983), autômatos celulares são grades com células regulares, nas quais cada célula possui um valor discreto e um tempo definido, podendo estes serem alterados em função do valor das células vizinhas.

Para a criação dos cenários foram necessários um mapa inicial e um final e um conjunto de variáveis dinâmicas e estáticas, além da parametrização de algoritmos de transição, em escala

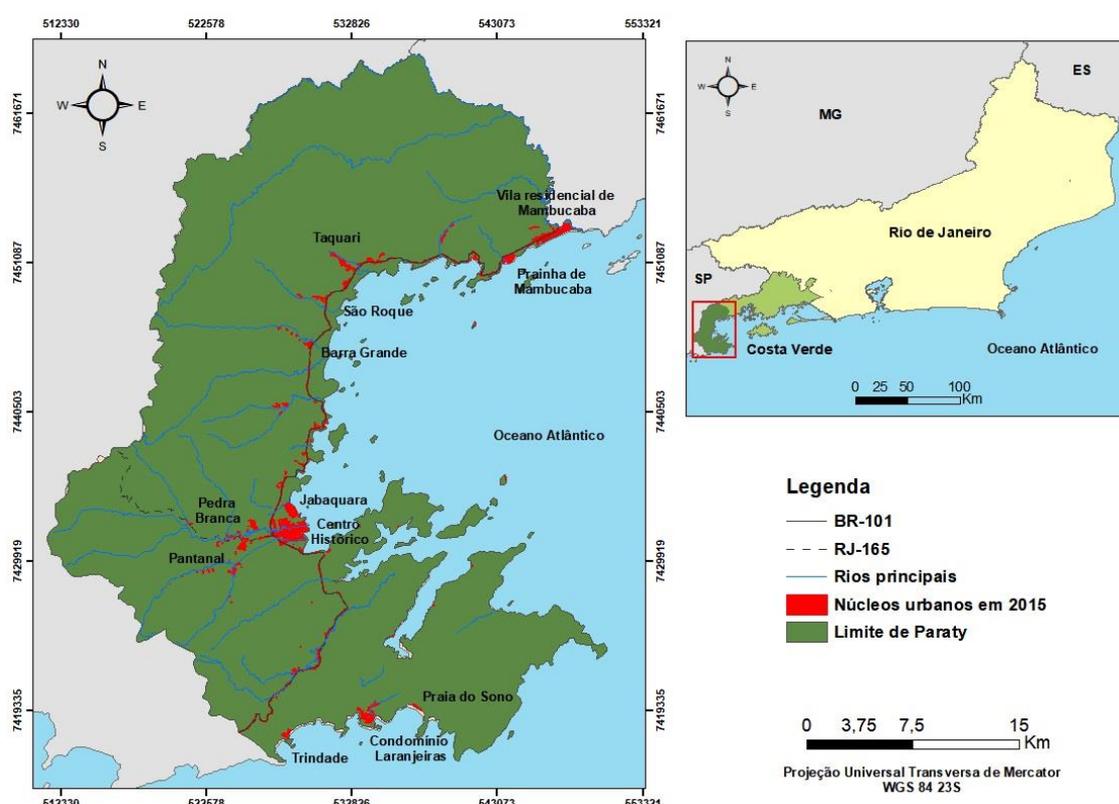
cartográfica compatível com o nível do detalhamento que discrimine as áreas urbanas em nível regional. Quanto à modelagem de aspectos urbanos foram integrados produtos de sensoriamento remoto, SIG e autômatos celulares. Esses recursos apoiam a tomada de decisão de administradores locais, envolvidos com o planejamento e gestão urbana, ambiental e turística.

A identificação de áreas suscetíveis à expansão urbana dá suporte ao planejamento do território, permitindo minimizar problemas relacionados aos usos conflitantes e maximizar os investimentos em ações com retorno para a sociedade. E, no que diz respeito ao patrimônio imaterial e ambiental de Paraty, é de grande valia para identificar investimentos que possam ameaçar comunidades tradicionais e sua forma de reprodução social e a fragmentação ou destruição de habitats importantes para manutenção da biodiversidade.

Breve aporte sobre a área de estudo

A área de estudo deste trabalho compreende o município de Paraty (Figura 1) que se localiza na Baía da Ilha Grande, ao sul do estado do Rio de Janeiro e na região turística da Costa Verde.

Figura 1 - Localização do município de Paraty



Fonte: Elaborado pelo(s) autor(es).

O município de Paraty possui uma área de 924,2 km² com densidade demográfica de 48,55 hab/km². Sua população em 2010 era de 37.533 pessoas, das quais 74% viviam em áreas urbanas e 26% em áreas rurais. No censo do ano 2000, a população era de 29.544 pessoas, no qual 52,39% residiam em áreas rurais e 47,61% em áreas urbanas. Nota-se que em um período de 10 anos, a população urbana ultrapassa a rural, sendo a diferença em 2000 de 4,78% e em 2010 de 48%. Já em

2022 a população alcançou 44.872 pessoas, o que representa um crescimento de 19,55% em relação a 2010 (IBGE, 2018, 2023).

A cidade passou por diversos ciclos econômicos e viveu um longo período isolada com um cenário econômico estagnado. Paraty só voltou a ser visada na década de 1970 com a abertura da rodovia BR-101 trecho Rio-Santos, e pelo decreto do IPHAN em 1966 ao declarar o município Monumento Histórico Nacional (TCE-RJ, 2006).

Atualmente, o município de Paraty integra um dos 65 destinos indutores do desenvolvimento turístico regional, sendo recentemente tombado como Patrimônio Mundial pela UNESCO na categoria de sítio misto - natural e cultural (PORTAL IPHAN, 2019). Segundo dados da Chias Marketing, em 2003 o município atingiu o número de 231.948 turistas com estimativas de alcançar 400.000 em 2006 (Turismoparaty, 2017), contingente este, muito superior ao atual número de habitantes.

Autômatos celulares e modelagem: caminhos para a construção de cenários

Neste trabalho foi utilizado para simulação da expansão urbana o modelo baseado em autômatos celulares (AC), devido a sua capacidade de representar de forma simples, sistemas dinâmicos complexos, capturando uma rica variedade de comportamento (BAR-YAM, 1997).

Wolfram (1983) descreve os AC como idealizações matemáticas de sistemas físicos em que o espaço e o tempo são discretos. Um AC consiste em uma rede uniforme regular (ou "matriz"), geralmente de extensão infinita, com uma variável discreta em cada célula. O estado de um AC é completamente especificado pelos valores das variáveis em cada célula. O AC evolui em intervalos de tempo discretos, no qual o valor da variável em uma célula é afetado pelos valores das variáveis das células em sua "vizinhança" no período anterior. A vizinhança de uma célula geralmente é considerada a própria célula e todas as células imediatamente adjacentes. As variáveis em cada célula são atualizadas simultaneamente ("de forma síncrona"), com base nos valores das variáveis em sua vizinhança no período anterior, e de acordo com um conjunto definido de "regras locais".

Baseado nos trabalhos de Couclelis (1985); Batty e Xie (1996) e Xie (1996), Almeida (2004) afirma que AC são sistemas formais baseados em grades, e em cada célula da grade é representado um processo de mudança, como um simples mapeamento do estado atual de uma célula e das suas vizinhas para o estado da mesma no instante de tempo seguinte. Em uma cidade, um modelo de AC evidenciará dinâmicas urbanas e será utilizado para investigar processos de mudanças.

Os AC fornecem uma representação de alta resolução da dinâmica espacial urbana. Consequentemente, oferecem as previsões mais realistas da evolução estrutural urbana e, em particular, são capazes de replicar as várias dimensões fractal das cidades atuais (WHITE, 1998).

Regras de transição são aplicadas em cada célula de um AC, podendo ser qualitativas ou quantitativas e estabelecem quando e porque o estado de uma célula se altera (PEDROSA & CÂMARA, 2004). Para explicar as regras de transição os mesmos autores utilizam um exemplo baseado em Câmara (1996):

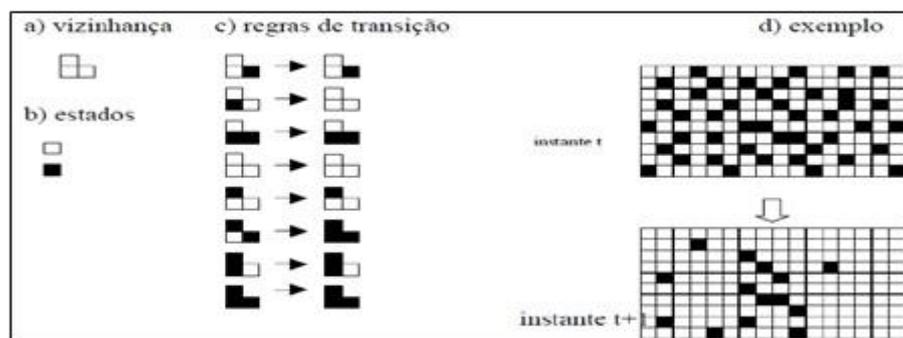
Neste exemplo, uma célula pode assumir dois estados (branco e preto) e sua vizinhança é definida sobre duas células adjacentes. As regras de transição especificam que o estado de uma célula num instante $t+1$ é igual ao dos seus vizinhos no instante t , se estes vizinhos tiverem os estados iguais; caso contrário, o estado da célula permanece o mesmo (PEDROSA & CÂMARA, 2004, p. 17).

Assim, os componentes básicos de um AC clássico são:

- Espaço euclidiano, dividido em um *array* de células;
- Uma vizinhança de tamanho e formato definidos (Figura 2a)

- Um conjunto de estados discretos (Figura 2b)
 - Um conjunto de regras de transição (Figura 2c)
 - Um conjunto de intervalos de tempo, com atualização simultânea das células (Figura 2d)
- (PEDROSA & CÂMARA, 2004, p. 18).

Figura 2 - Exemplo de autômato celular no qual a letra a) representa as duas células vizinhas da célula considerada; b) o conjunto de estados discretos, preto ou branco; c) o conjunto de regras de transição e d) a atualização simultânea das células após a aplicação das regras de transição



Fonte: Câmara 1996 apud Pedrosa e Câmara, 2001.

Tem-se a 1ª regra de transição de um AC (Figura 2c) representada na Figura 2d, na qual, a primeira célula da segunda linha do autômato tem, no instante t, o estado branco e suas vizinhas possuem estados diferentes (uma é branca e outra preta). Nesta forma, o estado da célula permanece o mesmo. A 2ª regra de transição segue o mesmo mecanismo, a segunda célula da segunda linha tem no instante t o estado preto e suas vizinhas, ambas o estado branco, logo o estado desta célula sofre uma transição para branco. O processo mantém o mesmo procedimento para as outras células até que todas tenham sido avaliadas (PEDROSA & CÂMARA, 2004).

Na modelagem com AC ação à distância não existe, pois a dinâmica inerente aos mesmos e que produz fenômenos emergentes a nível global é inteiramente um produto de decisões locais, e tudo o que se passa além da vizinhança reconhecidamente imediata é desconsiderado (BATTY, 2000).

Modelos de AC tornaram-se populares principalmente em razão da sua simplicidade operacional, por serem tratáveis e complexos o suficiente para simular mudanças inesperadas tais como em fenômenos emergentes. A flexibilidade destes modelos consiste em sua estrutura não sobrecarregada com suposições teóricas, e que é aplicável a um espaço representado como uma grade. Portanto, estes modelos articulam-se com dados matriciais, comumente usados em SIG (ALMEIDA *et al.*, 2003).

Costa (2010) afirma que investigações recentes em sistemas abertos e não lineares direcionaram o entendimento das cidades como sistemas complexos e evolucionários, compreendidas como sistemas auto-organizados, oportunos para a simulação computacional. Como o AC é caracterizado por fases de transições e podem gerar padrões complexos por meio de regras de transição simples, Liu (2009) relata que esta técnica parece ser ideal para modelar a complexidade dos sistemas urbanos.

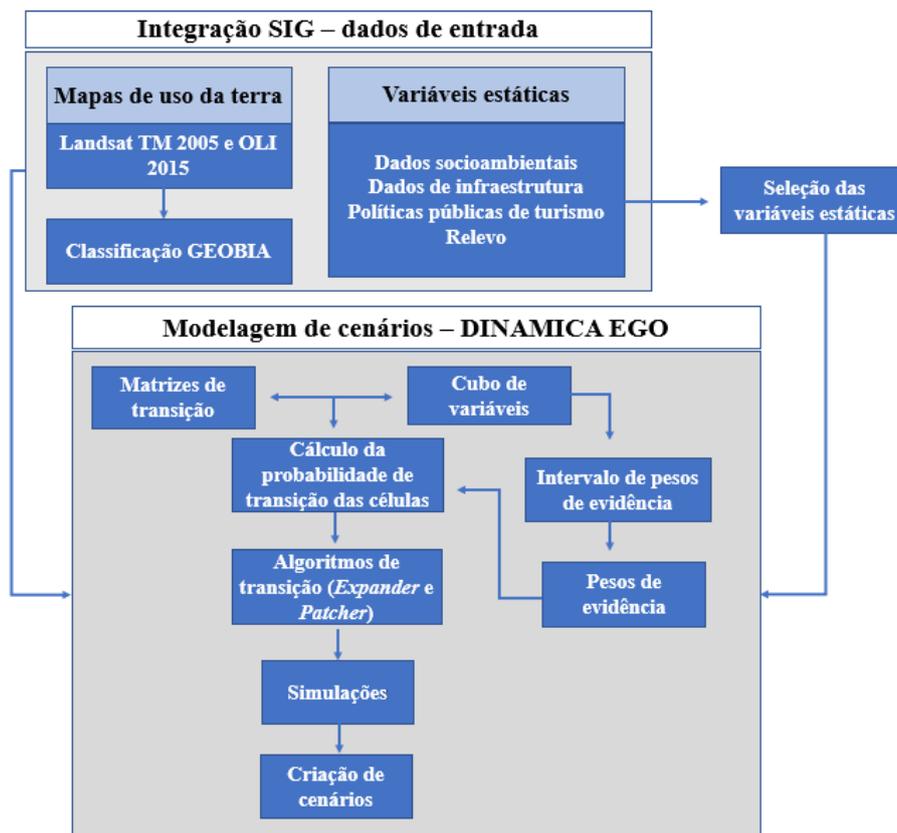
De acordo com Wu e Webster (1998 *apud* COSTA, 2010) a evolução do uso da terra em uma cidade auto-organizada, está intimamente ligado à história, em que a evolução passada influencia a futura através de interações locais entre as parcelas de terreno.

Aspectos metodológicos

O modelo de AC utilizado neste trabalho é o DINAMICA EGO, software desenvolvido pelo Centro de Sensoriamento Remoto da Universidade Federal de Minas Gerais (CSR – UFMG). Para operar o DINAMICA EGO, necessita-se de um mapa inicial de uso da terra e dois conjuntos de dados correspondentes às variáveis de entrada estáticas e dinâmicas. As variáveis estáticas equivalem a mapas de infra e superestrutura, tipos de densidade de ocupação urbana, relevo, zoneamento urbano e outros. Já as variáveis dinâmicas referem-se a mapas de distância a certos tipos de uso. Também há parâmetros obtidos pelo método de pesos de evidência e por regressão logística que em conjunto com os mapas supracitados são usados para o cálculo das probabilidades de transição das células (ALMEIDA, 2004).

O fluxograma (Figura 3) sintetiza as etapas necessárias para a criação e modelagem dos cenários futuros da expansão urbana em Paraty.

Figura 3 - Fluxograma metodológico



Fonte: Elaborado pelo(s) autor(es).

De acordo com Almeida (2004) o DINAMICA EGO é um modelo de AC baseado na vizinha de Moore (ou 8 células) e inclui os seguintes parâmetros:

- um arquivo contendo os valores dos pesos positivos de evidência ($W+$) ou os parâmetros (β_0, β_i) dos modelos de regressão logística, dependendo do método de estimativa adotado;
- as probabilidades globais de transição para cada mudança de uso do solo identificada no período de simulação considerado;

- c) o tamanho e a variância de manchas para cada transição;
- d) a proporção dos algoritmos de transição ou alocação (função *expander* e função *patcher*) também considerando-se cada transição; e,
- e) o número total de iterações (ALMEIDA, 2004, p. 183).

Essa plataforma contém uma série de algoritmos chamados “*functors*” que executam diferentes operações. Estas, como resultado, geram mapas de simulação da paisagem, mapas de probabilidade espacial de transição, que descrevem a probabilidade de uma célula em uma posição (x, y) mudar do estado i para o estado j (sendo i e j tipos de uso e cobertura da terra) e mapas das variáveis espaciais dinâmicas (SOARES FILHO *et al.*, 2002).

Cálculo das probabilidades espaciais de transição, as funções de transição, método de validação e os parâmetros de entrada para modelagem dos cenários

As probabilidades espaciais de transição são calculadas para cada célula no mapa e para cada transição especificada. Para tanto, dois métodos podem ser empregados utilizando as variáveis dinâmicas e estáticas: pesos de evidências e regressão logística. Posteriormente, esses mapas são utilizados pelas funções de transição na seleção de células a serem transicionadas (SOARES FILHO *et al.*, 2002; SOARES FILHO *et al.*, 2003).

O modelo DINAMICA EGO utiliza como regra de AC local, um mecanismo de transição composto por duas funções de transição complementares, o *expander* e o *patcher*. A função *expander* é destinada apenas à expansão ou contração de manchas previamente existente de uma determinada classe. A função *patcher* é projetada para formar ou gerar manchas a partir de células nucleadas. (SOARES FILHO *et al.*, 2003).

Em relação à validação, o método utilizado no DINAMICA EGO denomina-se *Calc Reciprocal Similarity Map*. Adaptado de Costanza (1989) e Hagen (2003), o modelo baseia-se em similaridade nebulosa (*fuzzy*) e no ajuste por múltiplas resoluções de acordo com janelas móveis. Assim, verifica-se a adequação espacial entre dois mapas por meio de uma função de decaimento exponencial ou constante em um tamanho de janela variável, utilizando os mapas inicial, final e simulado (CRS.UFMG, 2015).

Almeida *et al.* (2004) explicam que com a aplicação de janelas de pixels de tamanhos variados, relaxa-se a rigidez de correspondência entre realidade e simulações. Esse método também representa uma maneira conveniente de avaliar a adequação do modelo por meio da redução da resolução espacial. Os modelos que não combinam bem em alta resolução podem ter um ajuste apropriado em uma resolução mais baixa (CRS.UFMG, 2015).

Também segundo Novaes *et al.* (2013) esse tipo de validação contribui para realização de ajustes nos algoritmos *expander* e *patcher*, de forma que o padrão espacial do mapa simulado se assemelhe o máximo possível aos padrões contidos no mapa observado, que neste trabalho refere-se ao mapa de 2015. Os autores afirmam que mapas com índices de similaridade obtidos com decaimento exponencial próximos a 0,4 refletem um bom ajuste de compatibilidade entre o mapa simulado e o real.

No que concerne aos parâmetros de entrada para modelagem dos cenários, foi mapeada a cobertura da terra de Paraty de 2005 e 2015, período de maior crescimento urbano no município, segundo Martins (2018), de forma a calcular a matriz de transição considerando duas classes: natural e urbano. O mapeamento se deu por meio de classificação baseada em objetos (GEOBIA) de imagens *Landsat 5 TM* (para o ano de 2005) e *Landsat 8 OLI* (para o ano de 2015). As imagens *Landsat* se destacam por sua longa série histórica, disponibilizando imagens do *Landsat 5 TM* desde 1985.

A seleção das variáveis para alimentar o modelo foi realizada considerando os resultados alcançados por Martins (2018), o conhecimento prévio da localidade, a pesquisa bibliográfica e a análise das transições de mapas de cobertura e uso da terra pretéritos, classificados para um período de 30 anos, de 1985 a 2015, e divididos em períodos de 10 anos. As variáveis selecionadas se relacionam a fatores que regulam a ocupação no município, tais como a presença de unidades de conservação e fatores físicos e aspectos da paisagem (proximidade com o mar e outros). Dessa forma, foram selecionadas 8 variáveis com potencial para atrair ou repelir manchas urbanas, a saber: declividade, altimetria, distância das estradas principais, distância da hidrografia, distância do arruamento, distância da costa, zoneamento da APA de Cairuçu e distância do PARNA da Serra da Bocaina.

Deve-se ressaltar a importância da calibração de cenários pretéritos, de forma a compreender a evolução espaço-temporal da cobertura e uso da terra, e assim, calibrar com maior precisão cenários futuros. Tal método pode ser examinado em trabalhos como Almeida (2004), Pisani et al. (2016), Stanganini (2016) e outros. Em relação ao modelo de Paraty, as áreas urbanas se expandiram de forma moderada ao longo dos anos, se comparadas ao crescimento de municípios vizinhos, como Angra dos Reis e Ubatuba. Sendo assim, as variáveis analisadas neste modelo para a expansão urbana não sofreram mudanças significativas que resultassem em exclusão das variáveis ou mudança de padrão, como, por exemplo, mudança de atração para repulsão ou a variável ter deixado de exercer influência sobre o fenômeno em estudo.

A escolha do cenário futuro para o ano de 2030 buscou compatibilidade com a Agenda 2030, que é um plano de ação global, estabelecido pela Assembleia Geral das Nações Unidas, propondo 17 objetivos de desenvolvimento sustentável, abrangendo as dimensões econômica, social e ambiental, a exemplo de questões como urbanização, meio ambiente, justiça social e outros (BRASIL, 2016).

Resultados e discussão

Calculadas as matrizes de transição, obteve-se como resultado as matrizes de passo único (período completo) e múltiplo (unidade de tempo – neste estudo refere-se a cada ano). A única transição considerada para este modelo foi da classe natural para urbano que apresentou uma matriz de passo único, ou seja, de 10 anos, de 0.00484 e de passo múltiplo de 0.00048 por ano. Assim, a expansão de áreas urbanas, neste período de tempo, ocorre a uma taxa líquida de 0,048% ao ano.

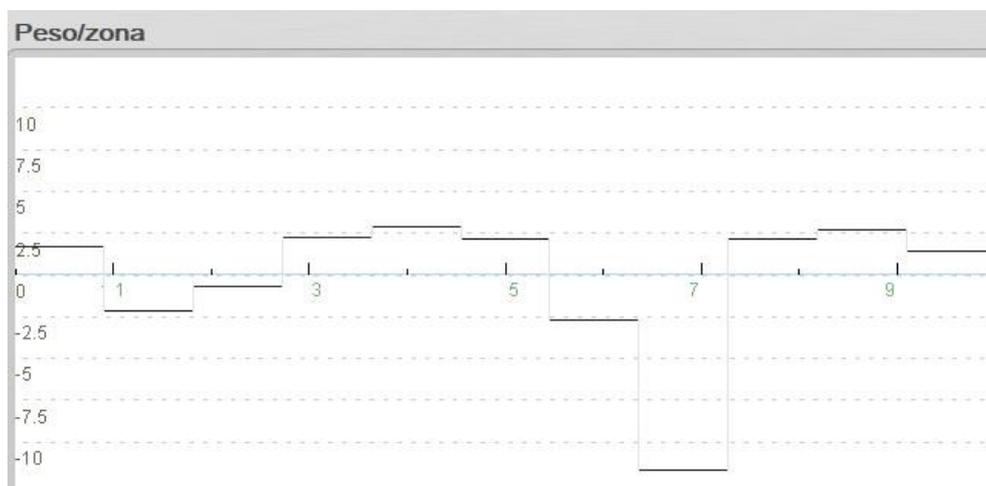
Pesos de evidência para as diferentes variáveis

Neste item é apresentado o gráfico de cada variável relacionando os intervalos de distância em metros (*range*) com os pesos de evidência (*weight*). Quanto maior e mais positivo se torna o valor, maior é a atração para manchas urbanas e quanto maior e mais negativo o valor, maior é o efeito repelente. Já os valores próximos de zero não exercem efeito sobre o modelo. Assim, combinando os pesos de evidência das diferentes variáveis é possível calcular para cada célula mapas de probabilidade de transição.

- Zoneamento da APA de Cairuçu

Seguindo o plano de manejo da APA de Cairuçu (Figura 04), as classes zona de conservação costeira (1), zona de conservação da zona rural (2), zona de preservação da vida silvestre (6) e zona de sítio histórico (7) apresentaram valores negativos, repelindo as manchas urbanas. Do contrário, as classes zona de expansão das vilas caiçaras (3), zona de expansão residencial e turística (4), zona de marinas (5), zona de uso agropecuário (8), zona de uso comunitário (9) e zona de uso conflitante (10) demonstraram valores positivos, favorecendo as manchas urbanas.

Figura 04 - Pesos de evidência (APA de Cairuçu)



- Altimetria

Em relação à altimetria (Figura 05), nota-se que as cotas mais baixas entre 0 m a 67 m, exercem maior influência para a expansão urbana. Posteriormente, há uma demasiada variação no gráfico, alternando valores positivos e negativos, até se estabilizar nas cotas superiores a 100 m com valores negativos, que repelem a expansão urbana. Vale lembrar que o município de Paraty possui um relevo escarpado, logo variáveis geomorfológicas, como altitude, declividade, orientação das vertentes, são de grande importância para compreensão do arranjo espacial local, porém, para outras áreas de estudo, podem não ter influência significativa.

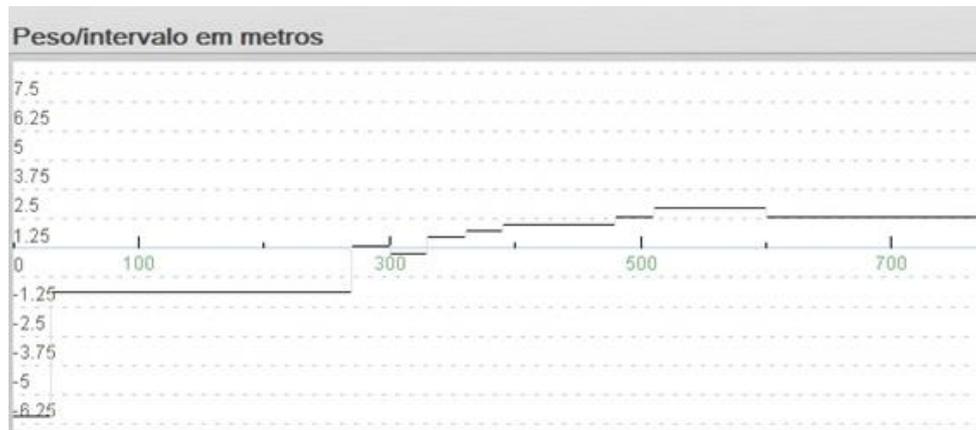
Figura 05 - Pesos de evidência (altimetria)



- PARNA Serra da Bocaina

A variável distância do PARN da Serra da Bocaina (Figura 06), unidade de proteção integral e, portanto, com restrições quanto a ocupação, apresentou valores de repulsão das manchas urbanas até 330 m. Após o referido intervalo, tem-se valores positivos, isto é, de atração para manchas urbanas.

Figura 06 - Pesos de evidência (distância do Parna da Serra da Bocaina)



- Declividade

É notória a influência da declividade (Figura 07) para a expansão urbana em Paraty. Entre os valores de 0% a 6%, no qual o relevo varia de plano a ondulado, a expansão urbana mostra-se favorável. Posteriormente, com 8% e 9%, passa a não influenciar no modelo, e a partir de 10% com o relevo moderadamente ondulado a forte ondulado (15% – 45%) apresenta apenas valores negativos, repelindo as manchas urbanas, ressaltando que áreas com declividade entre 25° e 45° são consideradas áreas de uso restrito.

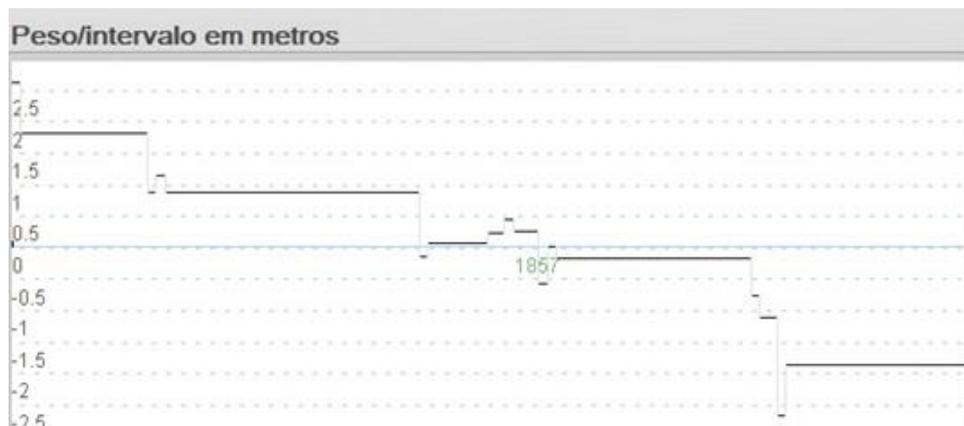
Figura 07 - Pesos de evidência (declividade)



- Estradas principais

A variável distância das estradas principais, considerando a BR-101 e RJ-165 (Figura 08), apresentou valores positivos até 1440 m. Após esse intervalo os pesos diminuem, influenciando menos na atração de manchas urbanas até 1890 m, quando os valores se tornam negativos e passam a repelir as manchas urbanas.

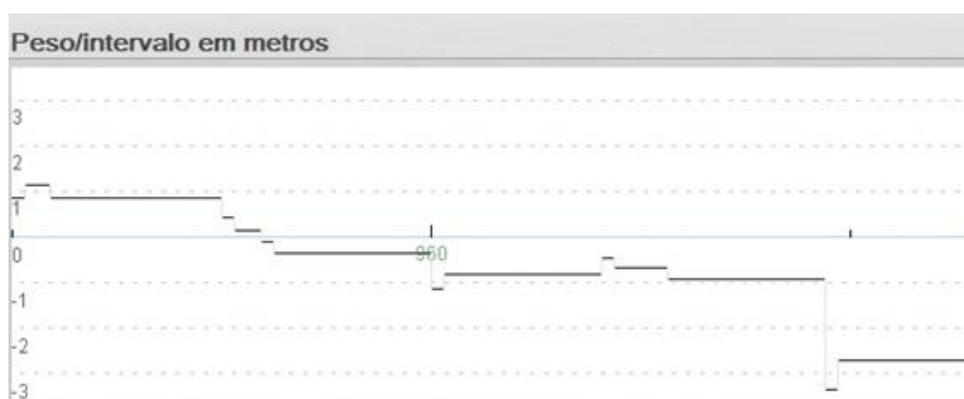
Figura 08 - Pesos de evidência (distância das estradas principais (BR-101 e RJ-165))



- Hidrografia

A variável distância da hidrografia (Figura 09) demonstrou atração para manchas urbanas até 570 m dos rios, após esse intervalo, há apenas pesos negativos, repelindo as manchas urbanas, possivelmente devido à expansão urbana que ocorre, em grande parte, próxima de áreas de rios, visto o encaixe das ocupações nas pequenas planícies costeiras, acompanhando os rios que drenam para o mar. Como exemplo, pode-se citar a ocupação das margens dos rios Matheus Nunes e Perequê-Açu, no Centro de Paraty, assim como as ocupações próximas de rios em Taquari, Barra Grande, São Gonçalo e outros.

Figura 09 - Pesos de evidência (distância da hidrografia)



- Distância da Costa

Percebe-se que a proximidade com o mar (Figura 10) é um fator de atração para manchas urbanas, exercendo influência positiva a partir de 30 m até aproximadamente 4300 m. Os intervalos mais distantes da costa, a partir de 4600 m apresentam valores negativos, repelindo as manchas urbanas, provavelmente pela presença do PARNA da Serra da Bocaina.

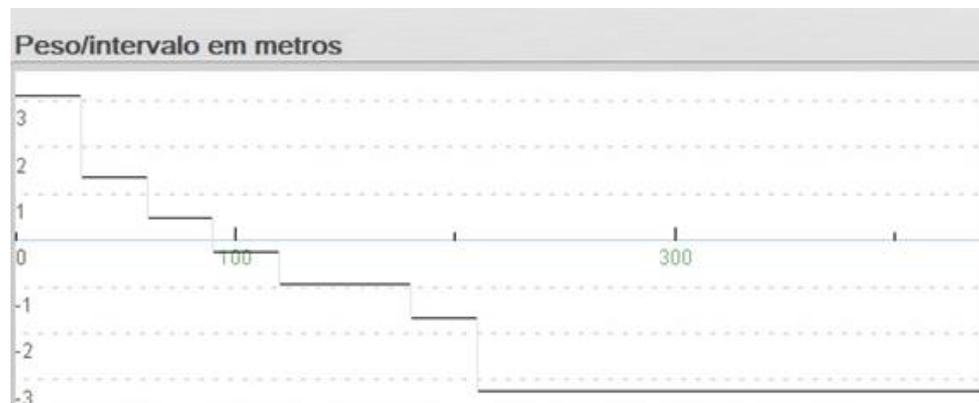
Figura 10 - Pesos de evidência (distância da costa)



- Arruamento

A variável distância do arruamento (Figura 11) apresentou intervalos com pesos positivos até 90 m, atraindo as manchas urbanas. A partir de 90 m, os pesos tornam-se negativos, logo, os demais intervalos repelem as manchas urbanas.

Figura 11 - Pesos de evidência (distância do arruamento)



- Distância de áreas urbanas

A variável distância de áreas urbanas (Figura 12) é incorporada pelo próprio DINAMICA EGO como uma variável dinâmica, assim denominada devido à sua atualização durante a iteração. Os primeiros intervalos demonstram uma associação positiva, atraindo as manchas urbanas até 810 m, após este intervalo os pesos diminuem e a partir de 2340 m tornam-se negativos, ou seja, repelem manchas urbanas.

Figura 12 - Pesos de evidência (distância de áreas urbanas)



Parametrização do modelo de simulação 2005 – 2015

No DINAMICA EGO é possível testar diversos parâmetros de simulação da cobertura e uso da terra de forma a encontrar aqueles que melhor se ajustem a área e ao objetivo do estudo. Uma das maneiras de configurar o modelo é alterar os intervalos de evidência e seus respectivos pesos de evidência.

Também se deve parametrizar os dados de entrada dos algoritmos de transição *expander* e *patcher*, como o *mean patch size*, *patch size variance* e o *patch isometry* que permitem a formação de uma variedade de tamanhos e formas de manchas de mudança. O tamanho médio das manchas e a variância são medidas em hectares e a isometria é um valor que varia de 0 a 2 e corresponde à forma das manchas. À medida que esse valor diminui as manchas tornam-se mais lineares, à medida que aumenta, tornam-se mais isométricas, isto é, arredondadas.

Outro aspecto a ser parametrizado é a porcentagem de células a serem alteradas por transição. Essa porcentagem é dividida para duas matrizes: *Modulated Changes and Complementary Changes*. A primeira é passada para o *functor expander* e a segunda para o *patcher*. Por exemplo, inserindo o valor de 0.2 significa que 20% das mudanças vão para *expander* e o restante para o *patcher*.

As simulações a seguir (Figuras 13 e 14) resultam de alguns testes modificando o intervalo de evidência, a porcentagem de células a serem alteradas pela matriz de transição e os parâmetros de entrada dos algoritmos de transição. Os parâmetros de cada simulação são apresentados na Tabela 01, sendo "tam. med" o tamanho médio da mancha, "var" variância e "iso" isometria. A coluna Intervalo refere-se ao incremento (tamanho do buffer) dos intervalos de evidência.

Tabela 01 – Parâmetros de simulação

Simulações	Intervalo	Matriz de transição	Expander			Patcher		
			Tam. Med.	Var.	isso.	Tam. med.	Vais sols o.	
A	30	Apenas o patcher				0.36	0.72	1
B	30	Apenas o expander	0.36	0.72	1			
C	30	80%	5.52	300	1	5.52	300	1
D	1	20%	0.72	1.44	0	0.72	1.44	0
E	1	20%	0.72	1.44	2	0.72	1.44	2
F	Categóricas	10%	0.72	1.44	1	0.72	1.44	1

Fonte: Elaborado pelo(s) autor(es).

As simulações a seguir representam o centro histórico e arredores do município de Paraty. De forma a ilustrar como operaram os algoritmos de transição, responsáveis por identificar células com maiores probabilidades de transição, utilizou-se na simulação A apenas o algoritmo *patcher* e na simulação B apenas o *expander*.

Como já explicado:

a função *expander* executa transições de um estado *i* para um estado *j* apenas nas vizinhanças adjacentes de células com estado *j*. E a função *patcher* realiza transições de um estado *i* para um estado *j* apenas nas vizinhanças adjacentes de células com estado diferente de *j*. (ALMEIDA ET AL. 2004).

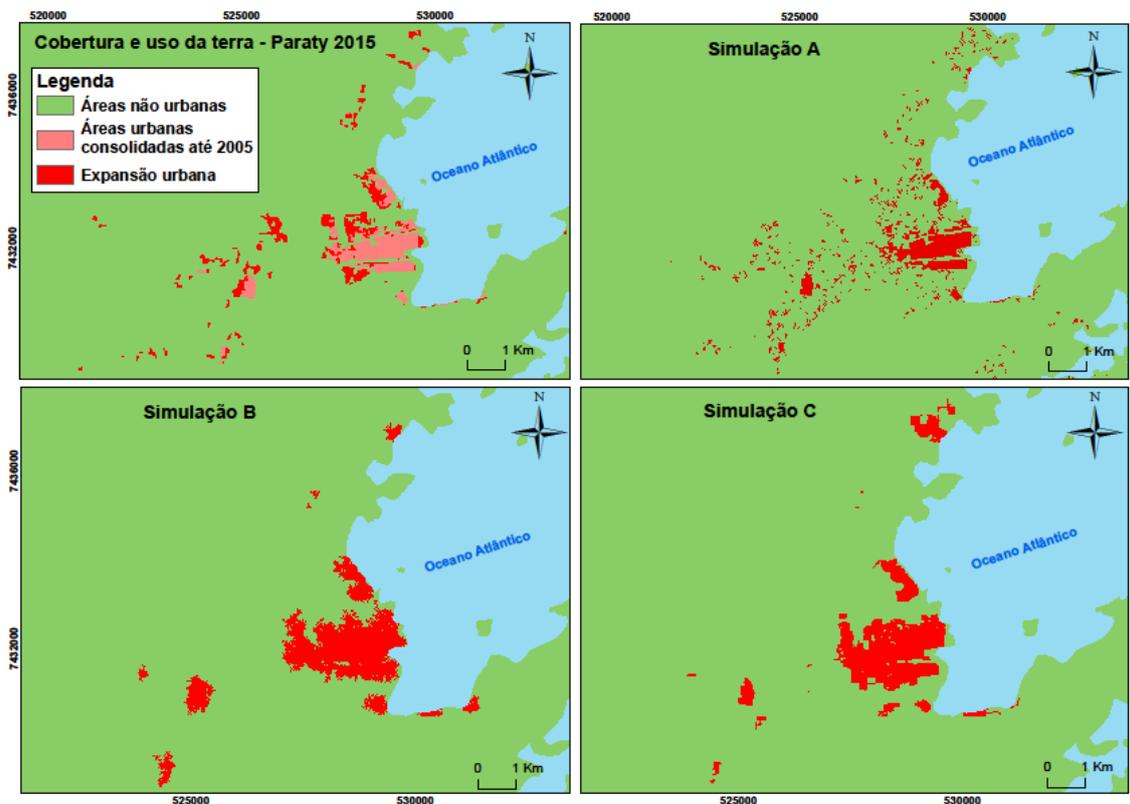
Nota-se que na simulação A as novas manchas foram geradas de forma difusa, em áreas onde antes não haviam manchas urbanas. Já a simulação B formou manchas onde existiam previamente manchas urbanas, logo ocorre uma forte expansão de borda. Nesses exemplos considerou-se o tamanho do pixel para definição do tamanho médio e variância das manchas que foram testados de forma heurística. Os pixels das imagens *Landsat 5* e *8* possuem resolução espacial de 30 m (900 m²), em hectare, corresponde a 0.09, assim atribuindo o valor 0.36 para o tamanho médio da mancha e 0.72 para a variância, considerou-se que, no geral, formam-se manchas 4 vezes maiores que o tamanho do pixel com uma variação de até 8 vezes o tamanho do pixel. Em relação à forma das manchas, considerou-se o valor 1, nem tanto alongada, nem tanto arredondada.

Na simulação C utilizou-se os dois algoritmos de transição, sendo 80% da quantidade de transições realizadas pelo *expander* e 20% pelo *patcher*. Já para o tamanho médio e variância das manchas, trabalhou-se com as métricas da paisagem realizadas no software *Fragstats*. Como resultado obteve-se um tamanho médio de 5.52ha e coeficiente de variação de 300. A isometria também se atribuiu o valor 1.

Percebe-se na que simulação C as bordas das manchas são menos irregulares devido ao maior tamanho das manchas. Também há maior fragmentação das manchas em relação à simulação B em função do algoritmo *patcher*, assim como manchas maiores, como a localizada na Barra do Corumbê, no norte da imagem, devido ao maior valor da variância.

Nas três simulações (A, B e C) utilizou-se como incremento para formação dos intervalos de evidência o valor 30 para as variáveis de distância, o que significa que serão construídos buffers de no mínimo 30 m, no qual será identificado o número de ocorrências de determinado evento modelado dentro desses buffers.

Figura 13 - Simulações A, B e C comparadas com a cobertura da terra de Paraty – 2015



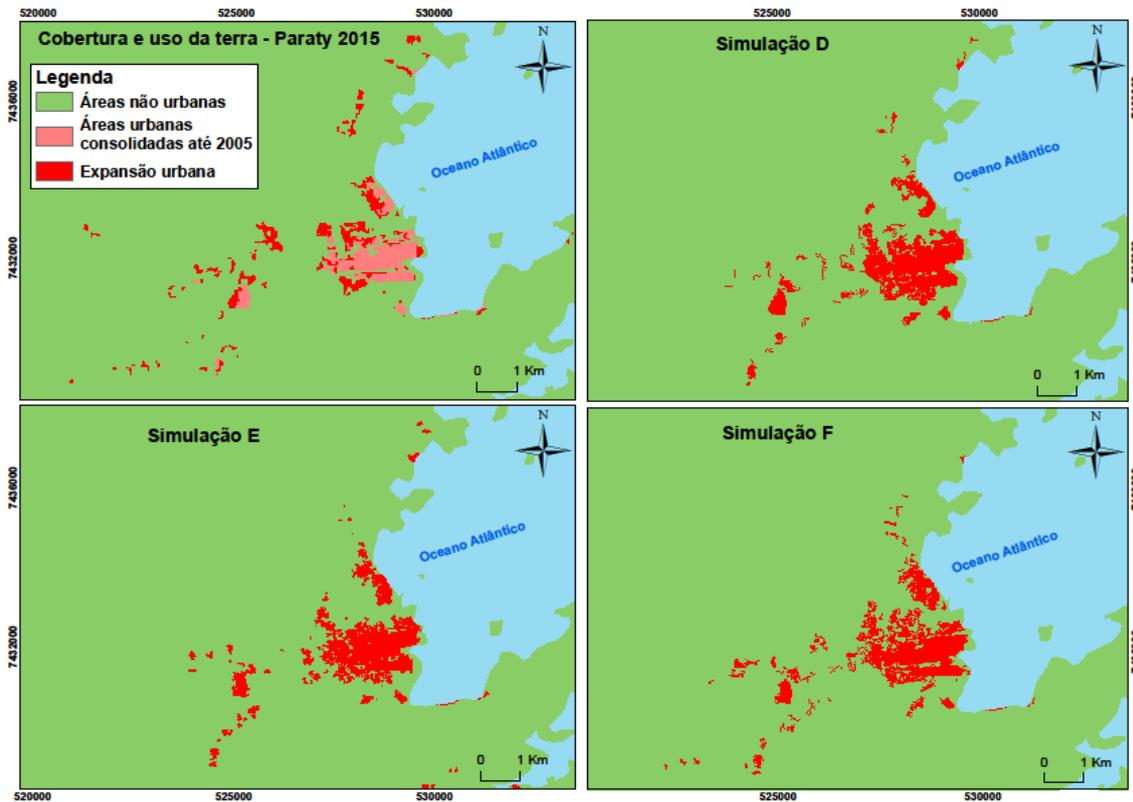
Fonte: Elaborado pelo(s) autor(es).

A seguir tem-se mais três simulações: D, E e F, nas quais foram utilizados os dois algoritmos de transição – *patcher* e o *expander*. Nas simulações D e E testou-se a influência da isometria na formação das manchas, considerando 20% da quantidade de transições para o *expander* e 80% para o *patcher*. No que concerne ao tamanho das manchas, estabeleceu-se 0.72ha como tamanho médio e 1.44ha como variância, isto é, no geral formam-se manchas com 8 pixels, podendo variar para até 16 pixels. Na simulação D considerou-se a isometria 0 e na E, isometria 2.

Assim, na simulação D formaram-se manchas mais lineares, enquanto na E as manchas são mais isométricas e compactas. Em relação ao incremento do intervalo de evidência utilizou-se o valor 1 para a criação dos buffers, logo, são criados buffers menores do que os das simulações anteriores.

Na simulação F atribuiu-se 10% da quantidade de transição para o algoritmo *expander* e 90% para o *patcher*. Para o tamanho médio das manchas, variância e isometria, estabeleceu-se 0.72ha, 1.44ha e 1, respectivamente. Já o incremento dos intervalos de evidência, considerou-se todas as variáveis como categóricas.

Figura 14 - Simulações D, E e F comparadas com a cobertura da terra de Paraty – 2015



Fonte: Elaborado pelo(s) autor(es).

A fim de identificar qual(is) simulação(ões) possuem maior correspondência espacial com o mapa de cobertura da terra de Paraty 2015, foi realizado o processo de validação através do modelo *Calc Reciprocal Similarity Map*.

Validação com o modelo *Calc Reciprocal Similarity Map*

Como já mencionado, o modelo *Calc Reciprocal Similarity Map* (Tabela 02) corresponde à similaridade atingida ao comparar os mapas simulados com os mapas observados (classificados) utilizando índices da paisagem, como número de manchas para cada classe de uso, além do ajuste por múltiplas resoluções com janelas móveis.

Assim, considerando o limiar de 0.4, pode-se considerar que o modelo apresentou um resultado satisfatório a partir das simulações D, E e F, com destaque para a simulação F por apresentar valor mais próximo de 1 na janela 5x5 e 11x11. Logo, o cenário futuro para 2030 foi construído com os mesmos parâmetros dessa simulação. Vale ressaltar que

o crescimento urbano depende de inúmeros outros fatores não incluídos no modelo, como dados sociais, políticas públicas, economia e etc., e que esses nem sempre são passíveis de serem premeditados. Logo, as variáveis selecionadas neste estudo foram suficientes para explicar a localização da maior parte das mudanças.

Também se observa que o modelo alcançou uma validação melhor com a atribuição de maior porcentagem para o algoritmo *patcher*, possivelmente em razão da expansão de núcleos urbanos isolados da mancha urbana principal. O mesmo ocorreu com a formação de manchas urbanas de maneira mais linear do que isométrica.

Tabela 02 - Validação com o modelo *Calc Reciprocal Similarity Map* com janelas móveis

Simulações	Janela 5x5	Janela 11x11
Simulação A	0.18	0.33
Simulação B	0.35	0.45
Simulação C	0.30	0.38
Simulação D	0.54	0.67
Simulação E	0.52	0.63
Simulação F	0.65	0.73

Fonte: Elaborado pelo(s) autor(es).

Cenário de expansão urbana para 2030

Em relação às variáveis, percebe-se que as áreas com maior probabilidade de transição concentram-se ao redor da BR-101, a oeste do Centro de Paraty, em derredor de alguns rios e vias de acesso como em São Gonçalo, Taquari, São Roque, Barra Grande e outros; e a linha de costa, que se apresenta como um critério considerável para atração de manchas urbanas.

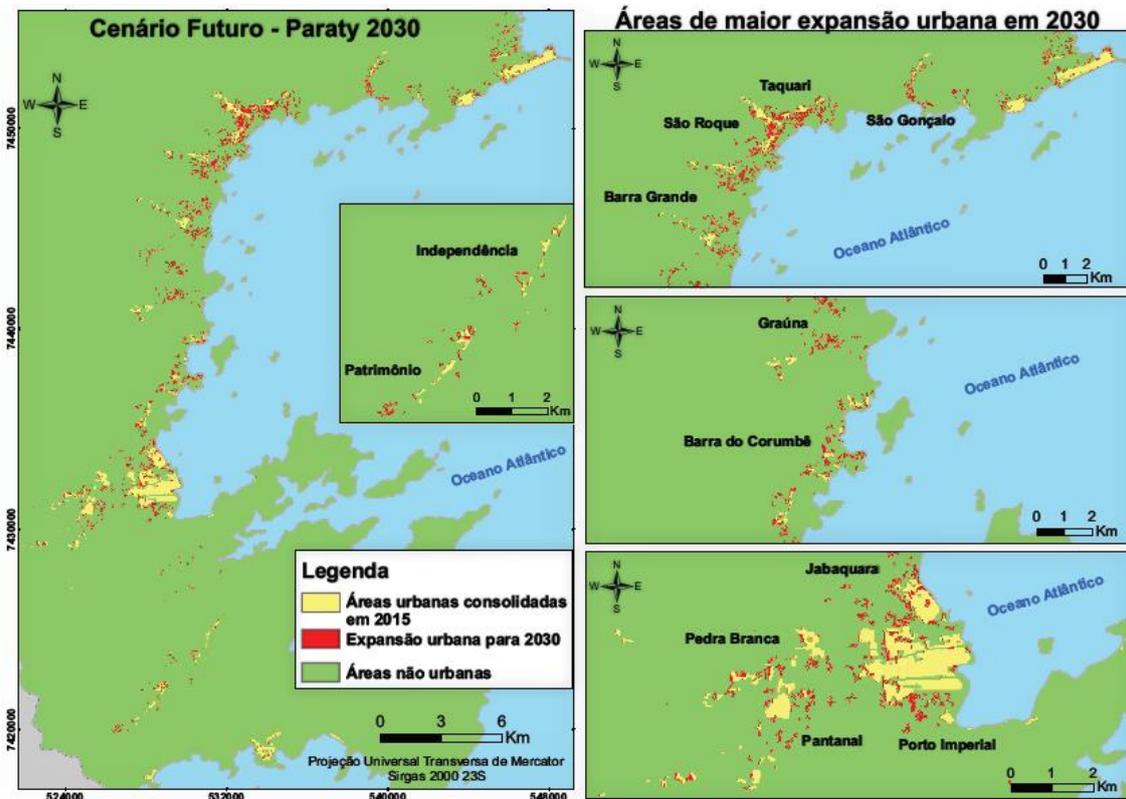
No que concerne ao mapa de simulação da expansão urbana em Paraty para o ano de 2030 (Figura 15), é notório o maior crescimento das manchas urbanas ao norte do município, que no geral formam-se de forma difusa e linear, próximas a rodovias e estradas, sendo a principal a BR-101. No tocante ao aumento de manchas urbanas em área, em 2015, somam 7,97 km² do município, já em relação à simulação para 2030, as áreas urbanas representam 14,62 km² do território, ou seja, no período de 15 anos haveria a expansão de 6,65 km² de áreas urbanas, como demonstrado na Tabela 03.

Tabela 03 - Simulação da expansão urbana em Paraty para o ano de 2030

Ano	Área (km ²)
2005	3,70
2015	7,96
2030	14,62

Fonte: Elaborado pelo(s) autor(es).

Figura 15 - Projeção para a expansão urbana em Paraty para o ano de 2030 destacando as áreas de maior expansão



Fonte: Elaborado pelo(s) autor(es).

Em suma, o resultado das simulações conduziu a expansão urbana de forma bastante coerente com a transição da cobertura da terra observada no período de 2005 a 2015 em relação às manchas urbanas. Ou seja, os cenários apresentaram a expansão significativa do centro de Paraty e imediações com destaque para o bairro Jabaquara, Porto Imperial e Vila Colonial. O modelo também indicou o crescimento de bairros de fácil acesso ao centro da cidade, como Pantanal e Pedra Branca e de diversos núcleos urbanos dispersos principalmente ao norte do município, como na divisa com Angra dos Reis, na Prainha de Mambucaba, em Taquari, São Roque, Graúna, Barra do Corumbê e ao sul do município, como os bairros Independência e Novo Horizonte.

Considerações finais

O presente estudo buscou identificar a extrapolação de aspectos do crescimento urbano de Paraty no tempo, como taxa de crescimento e a direção das transições urbanas, através da modelagem de cenário futuro de médio prazo. Para tanto, utilizou-se como método geotecnologias como o processamento digital de imagens e os SIG, que se mostraram satisfatórios para o alcance dos objetivos deste trabalho, considerando a resolução da imagem utilizada e as características da localidade estudada.

Os cenários futuros foram criados a partir de modelos baseados em autômatos celulares com a introdução de variáveis que pudessem explicar o fenômeno estudado, como aspectos naturais, características do relevo, infraestrutura urbana, instrumentos de políticas ambientais e outros. Apesar de as variáveis consideradas no modelo terem apresentado resultado satisfatório, outras variáveis poderiam ter sido consideradas, e podem ser utilizadas em trabalhos futuros, para explicar a

expansão urbana em Paraty, como, por exemplo, a orientação do relevo, já que a vista para o mar é um critério considerável para o processo de ocupação urbana na cidade.

Em relação à modelagem, esta mostrou-se satisfatória para explicar a expansão urbana em Paraty, contudo pode-se variar os parâmetros de entrada do modelo para testar outros tamanhos e formas de mudança de maneira a encontrar cenários ainda mais próximos da realidade de Paraty. Também se nota que as simulações apresentaram melhores resultados com a utilização do *functor patcher*, o que pode ser explicado devido à expansão de núcleos urbanos dispersos da mancha urbana central, logo, as variáveis selecionadas para o modelo explicam não apenas a expansão de áreas urbanas anteriormente existentes, mas a formação de novas manchas urbanas devido à presença de um conjunto de variáveis que atraem tal crescimento.

Assim, a modelagem da expansão urbana por meio de autômatos celulares no software DINAMICA EGO mostrou-se uma ferramenta interessante para a modelagem de cenários futuros, devido à sua capacidade de simular processos dinâmicos, que pode ser útil como instrumento de gestão e planejamento da cobertura e uso da terra e como ferramenta preditiva para as futuras transformações espaciais.

Referências

- ALMEIDA, C. M. (2004). 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). 321 f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.
- ALMEIDA, C. M.; BATTY, M.; MONTEIRO, A. M. V.; CÂMARA, G.; SOARES-FILHO, B. S.; CERQUEIRA, G. C.; PENNACHIN, C. L. (2003). Stochastic cellular automata modeling of urban land use dynamics: empirical development and estimation. *Computers, Environment and Urban Systems*, v. 27, n. 5, p. 481-509.
- BAR-YAM, Y. (1997). *Dynamics of Complex Systems*. Addison-Wesley. 1ª edição. Disponível em: < <https://fernandonogueiracosta.files.wordpress.com/2015/08/yaneer-bar-yam-dynamics-of-complex-systems.pdf/> > Acesso em: 30/09/2016.
- BATTY, M. (2000). GeoComputation using cellular automata. In: Openshaw, S.; Abrahart, R. J.ed. *Geocomputation*. New York: Taylor & Francis. Cap. 5, p. 95-126.
- BRASIL, 2016. Transformando Nosso Mundo: a agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável. Disponível em: < https://www.mds.gov.br/webarquivos/publicacao/Brasil_Amigo_Pesso_Idosa/Agenda2030.pdf /> Acesso em 10/12/2017.
- COSTA, J. P. O. H. (2010). Criação de cenários de expansão urbana com recurso a autómatos celulares no apoio ao planeamento e gestão territorial: Cabeceiras de Basto (Norte de Portugal). 124 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica e Ordenamento do Território) - Faculdade de Letras da Universidade do Porto, Porto.
- CSR.UFMG. Disponível em: < <https://csr.ufmg.br/dinamica/> > Acesso em: 05/12/2017.
- LIU, Y. (2009). *Modelling Urban Development with Geographical Information Systems and Cellular Automata*. New York: Taylor & Francis Group. Disponível em: < [file:///C:/Users/marti/Desktop/Modelling%20Urban%20Development%20\(1\).pdf/](file:///C:/Users/marti/Desktop/Modelling%20Urban%20Development%20(1).pdf/) > Acesso em: 28/11/2017.
- MARTINS, J. S. (2018). Simulação da Expansão Urbana em Paraty Baseada em Autômatos Celulares. 182 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- PEDROSA, B. M.; CÂMARA, G. (2004). Modelagem dinâmica e geoprocessamento. In: DRUCK, S.; CARVALHO, M. S.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V. (Orgs). (2004). *Análise Espacial de Dados Geográficos*. Brasília: EMBRAPA. Disponível em: < <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/analise/cap6-dinamica.pdf/> > Acesso em: 25/11/2017.
- PORTAL.IPHAN, 2019. Disponível em: < <http://portal.iphan.gov.br/noticias/detalhes/5164/paraty-e-ilha-grande-rj-ganham-titulo-de-patrimonio-mundial-da-unesco/> > Acesso em 26/07/2020
- SOARES-FILHO, B. S.; CERQUEIRA, G. C.; PENNACHIN, C. L. (2002). DINAMICA – a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. *Ecological Modelling*, v. 154, p. 217-235.
- SOARES-FILHO, B. S.; CERQUEIRA, G. C.; PENNACHIN, C. L. (2003). Stochastic cellular automata modeling of urban land use dynamics: empirical development and estimation. *Computers, Environment and Urban Systems*, v. 27, n. 5, p. 481-509.
- SOARES-FILHO, B. S.; FILHO, L. C.; CERQUEIRA, G. C.; ARAÚJO, W. L. (2003). Simulating the spatial patterns of change through the use of the dinamica model. *Anais XI SBSR, Belo Horizonte, INPE*, p. 721-728, 05-10 abril. Disponível em: < file:///C:/Users/marti/Desktop/Simulating_the_spatial_patterns_of_change_through_.pdf/ > Acesso em: 03/10/2017.
- TRIBUNAL DE CONTAS DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. Estudo socioeconômico 2006 Paraty. Secretaria-Geral de Planejamento, 2006. Disponível em: < www.tce.rj.gov.br/documents/.../Estudo%20Socioeconomico%202006%20paraty.pdf/ > Acesso em: 07/04/2017.
- TURISMOPARATY. Disponível em: < <http://turismoparaty.blogspot.com/> > Acesso em: 07/04/2017.

WHITE, R. (1998). Cities and Cellular Automata. Discrete Dynamics in Nature and Society, Vol. 2, pp. 111-125.

WOLFRAM, S. (1983). Statistical mechanics of cellular automata. Reviews of Modern Physics, vol. 55, p. 601-644, jul. Disponível em: < <https://www.stephenwolfram.com/publications/cellular-automata-complexity/pdfs/statistical-mechanics-cellular-automata.pdf> /> Acesso em: 05/11/2017.