

A MODELAGEM DINÂMICA COMO SUBSÍDIO TEÓRICO PARA A GERAÇÃO DE PREDIÇÕES AMBIENTAIS: UMA REVISÃO

Lucas Fernandes de Medeiros Barros¹

Vandré Soares Viégas²

Elizabeth Maria Feitosa da Rocha de Souza²

1. Universidade Federal do Rio de Janeiro – Instituto de Geociências – (lucas.fmb13@gmail.com)

2. Universidade Federal do Rio de Janeiro - Departamento de Geografia – (viegasvandre; elizabethmfr)@gmail.com

ABSTRACT

Seeking to understand the intense changes that have been occurring in terrestrial systems, specialists have focused on developing and improving dynamic simulation models, with the aim of modeling the real world, replicating landscape development trajectories, so that scenarios capable of predicting implications are recreated. future ecological activities. The present work seeks to construct a theoretical-conceptual survey on dynamic modeling of scenarios, clarifying the main methods, potentialities and impediments, and in what ways, dynamic models applied in Geographic Information Systems, can contribute as a new methodology for representing terrestrial phenomena to from its spatio-temporal dynamics. The methodology consisted of surveying works based on their objectives, methods and software used for dynamic modeling. As a result, it was possible to compile ways and methods aimed at studies of environmental dynamics, aimed at predictions, collaborating with geographic science by providing theoretical subsidies.

Keywords: Dynamic Modeling, Cellular Automata, Simulations

INTRODUÇÃO

Uma paisagem resulta de uma sucessão de estados evoluindo ao longo de um período de tempo (FORMAN & GODRON, 1986). A evolução de uma paisagem pode provocar diversos impactos aos sistemas ambientais ao redor. Buscando compreender as mudanças que vem ocorrendo nos sistemas terrestres, especialistas têm focado em desenvolver e aprimorar modelos de simulação dinâmica, com o objetivo de modelar as transformações, replicando trajetórias de desenvolvimento da paisagem, de maneira que são recriados cenários capazes de predizer implicações ecológicas futuras.

Modelos dinâmicos são especialmente concebidos para analisar e reproduzir, em um ambiente computacional, os padrões espaciais resultantes das mudanças da paisagem. (SOARES-FILHO, 2004). Segundo Haggett e Chorley (1967), um modelo

pode ser entendido como uma estruturação simplificada da realidade que supostamente apresenta, de forma generalizada, características ou relações importantes. Conforme definido por Christofolletti (1999), um modelo preditivo pode ser entendido como uma simulação do mundo real, onde é possível observar efeitos de condições reais de mudança, tendo a chance de prever um determinado comportamento, uma transformação ou evolução de uma determinada classe de uso da terra. Portanto, é possível afirmar de forma resumida que os modelos são aproximações da realidade, que não vão projetar o mundo real de maneira fidedigna, pois não é possível incluir todas as problemáticas e condicionantes reais, muitas dessas por serem abstratas. Mas ao mesmo tempo, é possível afirmar que os modelos preditivos abordados pela modelagem dinâmica apresentam uma importância relevante para estudos, pesquisas e compreensão da realidade de diversos ambientes e fenômenos. Seja ela a infraestrutura urbana ou uma área de proteção ambiental. Modelos dinâmicos podem surgir como uma metodologia integradora da ciência geográfica, à medida que é capaz de abranger a dicotomia entre o físico e o humano.

Contudo, os modelos espaço temporais reúnem alguns aspectos distintos, tais como: a escolha de conceitos adequados do espaço e do tempo; a opção de um nível adequado de abstração com o intuito de evidenciar as informações importantes do fenômeno de estudo e relevar às que não são de forma a considerar informações relevantes ao objeto de estudo e desconsiderar aquelas que não são propícias. Nesse sentido, o presente trabalho busca construir um levantamento teórico-conceitual sobre modelagem dinâmica de cenários, esclarecendo os principais métodos, potencialidades e impedimentos e de que maneiras, modelos dinâmicos aplicados em Sistemas de Informações Geográficas (SIG), podem contribuir como uma nova metodologia de representação fenômenos terrestres a partir de suas dinâmicas espaço-temporais.

METODOLOGIA

Visando compreender os principais métodos utilizados, a metodologia de trabalho consistiu no levantamento de artigos científicos nos principais sítios de divulgação científica, tais como o Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), a plataforma *ResearchGate* e a Revista Brasileira de Cartografia. Os dados foram, inicialmente, escolhidos por apresentar metodologias claras, nas quais se disponibilizam os métodos utilizados, softwares e objetivos. Tendo organizado as pesquisas, as mesmas foram tabuladas destacando autores, objetivos e métodos. Por se tratar de um elevado número de artigos, em 30 trabalhos, é feito um resumo

explicativo, apresentado pela Tabela 1, destacando os trabalhos mais atuais, enquanto as demais pesquisas levantadas aparecem como citações diluídas no trabalho.

TABELA 1 - TABELA RESUMIDA DE ARTIGOS LEVANTADOS

Autor (es)	Objetivo	Método (software)
CAMPOS et. al (2019)	Análise da dinâmica do uso e ocupação no entorno do centro educacional unificado campo limpo, São Paulo	Dinamica EGO Autômatos celulares / Cadeias de Markov
COUTO et. al (2019)	Analisar a dinâmica do uso e cobertura da terra entre os anos de 1988, 2001, 2011 e 2015, de modo a abarcar dois contextos da área de estudo: antes e pós-implantação da APA Pandeiros	<i>Land Change Modeler</i> Idrisi
GOMES et. al (2019)	Modelar e analisar o processo de desmatamento em uma região ecótona Amazônia / Cerrado entre os anos de 1997 e 2033	Dinamica EGO Autômatos Celulares
OLIVEIRA et. al (2019)	Avaliar os modelos de Redes Neurais Artificiais (RNA) e Random Forest (RF) na identificação de áreas suscetíveis a movimentos de massa na Bacia do Rio Fão, RS.	Redes Neurais Artificiais e <i>Random Forest</i>
PISANI et. al (2017)	Análise multitemporal dos valores do uso e cobertura da terra associados aos cenários de escoamento superficial a partir da Equação Universal de Perda de Solos Modificada	Dinamica Ego Autômatos celulares

Cabe destacar que a metodologia proposta busca responder questões inerentes à modelagem dinâmica. Dentre as principais perguntas destaca-se: quais os tipos de dados trabalhados? Apresentam um grau adequado de confiabilidade? Qual a metodologia mais comum? E a partir de então investigar possíveis métodos, suas potencialidades e desafios.

RESULTADOS

Analisando os artigos levantados, é possível notar uma gama de modelos dinâmicos disponíveis. Visando categorizar e quantificar os trabalhos levantados, construiu-se um gráfico que busca identificar os principais métodos utilizados em modelagem dinâmica dentre o universo de 30 artigos levantados. O gráfico explicativo é apresentado na Figura 1.

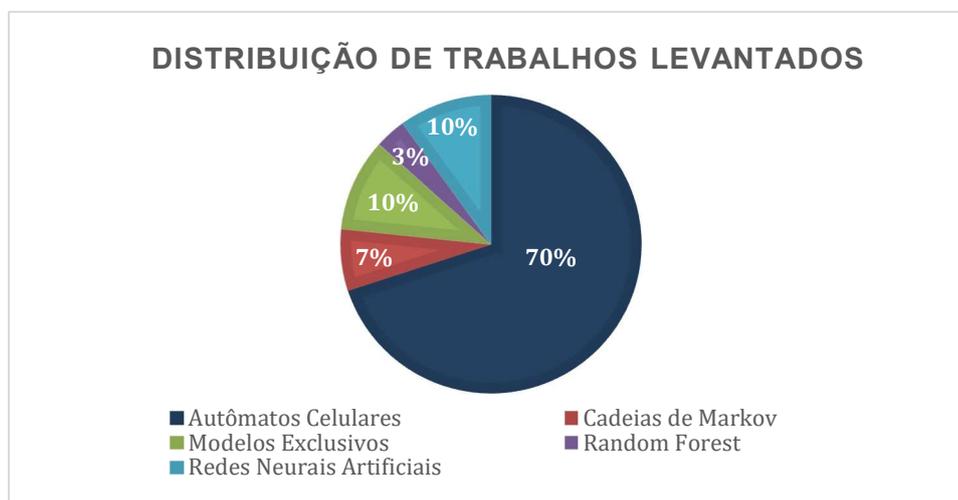


Figura 1 – Distribuição de Trabalhos Levantados

Identifica-se uma grande concentração de trabalhos, com relação a autômatos celulares (AC) e distribuição mais dispersa nos demais métodos. Identifica-se que, com relação a autômatos celulares, a maior concentração ocorre entre os anos de 2004 e 2010, enquanto a partir de 2015 a distribuição se torna mais igualitária, surgindo mais trabalhos voltados a Redes Neurais Artificiais e em Modelos Exclusivos, que significam modelos internos de softwares, tais como o *Land Change Modeler* do Idrisi.

No que diz respeito aos tipos de dados, encontra-se um padrão de recomendações, citados pela maioria dos autores, que buscam minimizar as incertezas do modelo final. Cita-se: a) Estarem todos os dados configurados no mesmo sistema de projeção cartográfica; b) Estarem todos os dados no mesmo formato (matricial ou vetorial); c) Caso o formato dos dados escolhidos for o matricial, os mesmos devem estar envolvidos pelo mesmo retângulo (coordenadas do canto superior e inferior devem ser iguais); d) É obrigatório o tamanho do pixel ser o mesmo em todas as matrizes para favorecer as análises posteriores; e) É importante ter os dados padronizados em uma mesma escala. Com os valores menores vão indicar pouca mudança e os valores maiores vão indicar muita mudança.

Além de todas as recomendações supracitadas, o modelo preditivo deve passar por um processo de validação estatística, buscando indicar um bom nível de confiabilidade. A avaliação dos resultados vai depender da metodologia que foi

empregue na construção do modelo de mudança. Feito todo esse processo, agora será abordado às principais metodologias utilizadas para a geração de modelos preditivos. É importante citar que um modelo dinâmico é constituído de pelo menos três elementos: variáveis, relacionamentos e processos, conforme afirmado por Pedrosa & Câmara (2004). Os Modelos de Simulação da Paisagem podem ser classificados como empíricos ou de sistemas, como apresentado pela Figura 2.

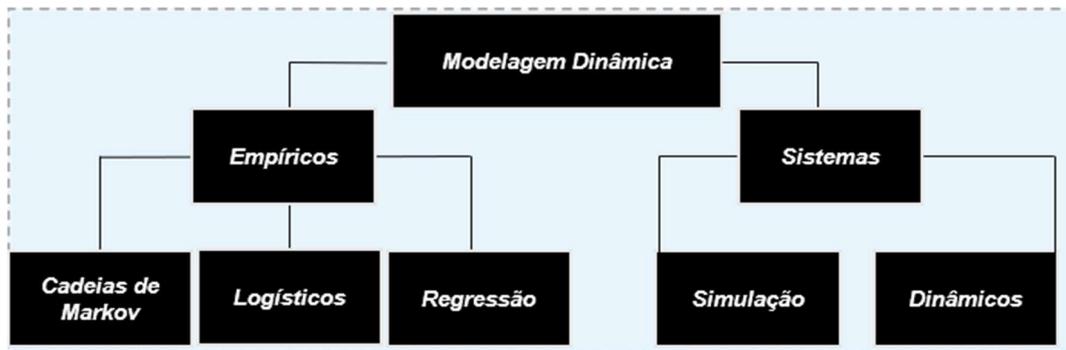


Figura 2 – Tipos de Modelos (Adaptado de Pedrosa & Câmara, 2004)

Os modelos empíricos, são caracterizados por apresentar 3 componentes essenciais: configuração inicial, função de mudança e configuração de saída. Modelos empíricos são qualificados pela simplicidade dos modelos matemáticos e pelo número reduzido de variáveis envolvidas. Os modelos empíricos mais conhecidos são: Cadeias de Markov, Modelos logísticos e os Modelos de regressão. Dentro de modelos de sistemas, o objetivo central é a descrição completa do sistema, ou seja, procuram representar as interações entre todos os seus componentes e atributos. Um ponto positivo dos modelos de sistemas está relacionado com a dimensão espacial, utilizando o método de vizinhança e também a integração de múltiplas escalas. Por vezes há uma convergência entre a compreensão de modelos dinâmicos e modelos de simulação, que também podem ser utilizados para predição de cenários, em fenômenos como o desmatamento, a expansão urbana ou a construção de rodovias diante de possibilidades de impactos. Soares-Filho et. al, (2004) apresenta um fluxograma metodológico (Figura 3), destacando que modelos atuais tendem a usar matrizes dinâmicas, nas quais as probabilidades de transição são recalculadas a cada nova iteração por submodelos acoplados.

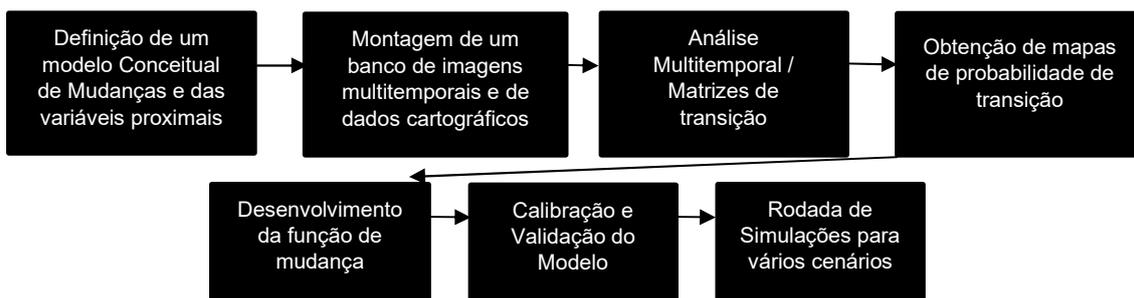


Figura 3 – Fluxograma de desenvolvimento e aplicação de um modelo de simulação (Adaptado de Soares-Filho et. al, 2004)

Vale a pena reforçar que o primeiro passo na construção de um modelo de simulação de mudanças passa pela definição de um modelo conceitual, no qual são definidas as classes de uma imagem e suas possíveis transformações. Para executar o processo da modelagem dinâmica, seja ele empírico ou de sistema, é preciso compreender os dados mínimos que são inseridos no software de processamento. Primeiramente como entrada, é utilizado um conjunto de mapas, preferencialmente de uso cobertura da terra, em tempos discretos T1 e T2, e um conjunto de variáveis cartográficas (estáticas e dinâmicas), onde as últimas são recalculadas em cada etapa do processo de modelagem (SOARES-FILHO, 2004). Outro dado muito importante utilizado para uma modelagem dinâmica são as condicionantes naturais ou construídas, como por exemplo o relevo, rodovias, áreas protegidas, massas d'água e etc. Essas variáveis são agrupadas através dos seus pesos de evidência, com o intuito de gerar os mapas de probabilidades de transição. Dentre os estudos levantados, pode-se citar alguns fenômenos que vem tendo destaque como objeto de estudo da modelagem dinâmica como o crescimento urbano, espalhamento de queimadas e mudanças de uso e cobertura do solo. Contudo, o processo de simulação e projeção de cenários futuros para uso e cobertura do solo urbano é um processo complexo e exige um conhecimento aprofundado das relações que levam às mudanças, assim como critérios de escolhas dos dados, como sistema de projeção e escala.

Com relação aos modelos empíricos levantados, nota-se que em sua dimensão procedural, possuem três componentes chaves: uma configuração inicial, uma função de mudança e uma configuração de saída. A principal característica dos dados utilizados na configuração inicial, se trata dos dados históricos, ou seja, todas as informações do passado do fenômeno de estudo. Estes dados históricos também são definidos como séries temporais. Neste caso, equações diferenciais (totais ou parciais) que incluem pelo menos um termo derivado no tempo e podem ser utilizadas para representar o modelo e o processo é classificado como determinístico. Quando variáveis aleatórias são utilizadas para explicar um sistema o processo é classificado como estocástico-probabilístico. Modelos empíricos são caracterizados pela simplicidade dos modelos matemáticos empregados e pelo número reduzido de variáveis envolvidas. Estes modelos são considerados adequados para a realização de predições, mesmo apresentando dificuldades em abordar a evolução espacial e identificar os aspectos do sistema. A seguir, o presente trabalho apresenta de forma objetiva, três tipos de

modelos denominados como empíricos: Cadeias de Markov, Modelos logísticos de Difusão e Modelos de Regressão.

O modelo conhecido como Cadeia de Markov apresenta uma equação matemática em seu processo, considerado estocástico com estados discretos. Seu principal parâmetro é o tempo, onde este pode ser discreto ou contínuo. Sua principal característica, está relacionada com o fato de que o próximo estado vai depender apenas do estado presente, não necessitando reconhecer os eventos passados. De forma resumida, este método compreende que a informação do passado está contida no estado atual do sistema. Com isso, as interações das classes são instantâneas, não importando o tempo de permanência das variáveis em cada estado. No modelo Cadeias de Markov às probabilidades de transição não mudam com o tempo, classificando seu processo como estacionário. As principais vantagens deste modelo, é a questão do seu processo operacional ser simples, junto com a facilidade de utilizar dados de sensoriamento remoto e SIG. Outro ponto positivo, é o fato de não precisar de muitos dados do passado para prever o futuro. Já as principais limitações do modelo matemático Cadeias de Markov envolve a questão de o mesmo não ser capaz de responder o motivo do fenômeno de estudo ocorrer e apresentar também uma limitação muito grande na questão espacial da ocorrência do fenômeno. Entretanto o modelo pode realizar previsões de quando o fenômeno pode ocorrer, desde que os processos sejam estacionários. Além disto, o modelo não suporta de imediato a inclusão de variáveis exógenas como variáveis socioeconômicas ou outras forças dirigidas, embora esta limitação possa ser superada. Com o passar do tempo, foram surgindo novos modelos matemáticos que superam às principais limitações do sistema de Cadeias de Markov.

Os Modelos Logísticos tem como objetivo representar fenômenos de interesse em que suas variáveis apresentam um ritmo crescente, onde iniciam de forma lenta e vão se intensificando, até que se estabilizam, o que significa que o nível de saturação adequado foi atingido. O processo de espalhamento nestes tipos de modelos pode se dar por expansão ou realocação. Conforme definido por Soares-Filho (1998), os modelos de difusão se espalham de uma região para outra, permanecendo na região original. E também importante citar que os modelos considerados de difusão por realocação, os objetos acabam se mudando para novas regiões, conseqüentemente, largando suas áreas de origem. A grande questão dos Modelos de difusão é que eles não explicam as causas de um fenômeno, mesmo que consigam integrar variáveis socioeconômicas e ecológicas. O maior benefício deste tipo de modelo é a de conseguir

prever o comportamento futuro do fenômeno de estudo. Em relação à dimensão espacial, este tipo de modelo não é o ideal, mesmo podendo integrar este modelo com um SIG.

Já os Modelos de Regressão, tem como objetivo identificar as ligações estatísticas e as variáveis independentes do fenômeno de estudo em questão. Com isso, esse modelo foi criado com o intuito de suportar o *input* de diversas variáveis diferentes. Mesmo com um vasto conteúdo de variáveis, as mesmas não são suficientes para entender o fenômeno de estudo, apenas servem como um referencial e um guia em busca dessa compreensão. Este motivo se dá pela questão de duas variáveis estatísticas nem sempre estarem interligadas. Conforme explicado por Lambin (1994), o autor cita um exemplo deste modelo onde é possível identificar que o crescimento populacional tem relação com o aumento do desmatamento de uma determinada região, contudo, o autor também define que um modelo de regressão não tem a capacidade de explicar os mecanismos que ligam estas variáveis.

Dentre os métodos de simulação e predições, há um forte destaque para os Autômatos Celulares. Os AC são grades com células regulares, nos quais cada célula possui um valor discreto e um tempo definido, podendo ser alterados em função da célula vizinha (WOLFRAM, 1983). Deve-se destacar que os processos físicos e urbanos possuem mecanismos distintos para aplicação de regras de transição. E que não existe um caminho único efetuar a modelagem de fenômenos espaciais dinâmicos. A escolha ideal para cada caso deve sempre ser decidida buscando responder o porquê, onde e quando para cada fenômeno de estudo em questão. Realizando também, a integração das escalas temporal e espacial articulada com o modelo matemático definido para descrever o fenômeno e prever sua evolução.

É importante salientar que dentre os softwares mais comuns, existe uma clara evolução de plataformas *Freeware* que envolvem linguagem de programação em sua estrutura operacional. Dentre as plataformas que mais foram citadas, o Dinamica EGO, aparece como aquele com maior número de aplicações nos últimos 5 anos. O software Dinamica EGO é uma plataforma sofisticada, gratuita e não comercial desenvolvido por pesquisadores da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), para atender diversos níveis de modelagens, com excelentes possibilidades para o projeto, desde o modelo espacial estático muito simples até modelos dinâmicos muito complexos, que podem, em última instância, envolver iterações aninhadas, transições múltiplas, feedbacks dinâmicos, e abordagem multi-escala, processos de decisão para bifurcando e juntando pipelines de execução e uma série de algoritmos espaciais complexos para

a análise e simulação de fenômenos espaço-tempo. O ambiente do software, escrito em C++ e Java, contém uma série de algoritmos chamados funtores. Cada functor executa uma operação. Outro ponto relevante, foram os algoritmos adicionados voltados para a análise espacial. O que ajuda ainda bastante na evolução dos estudos da modelagem dinâmica, visto que estes vão complementar as programações já consolidadas com o objetivo de atender as simulações espaciais, incluindo funções de transição, métodos de calibração e validação de modelos.

CONCLUSÕES

Em vista dos modelos dinâmicos levantados, foram percebidas diferenças entre as técnicas mais comuns. Com relação a distinções entre *Cadeia de Markov*, *Redes Neurais (LCM)* e *Autômatos Celulares* é que os dois primeiros modelos apresentam limitações de trabalho em grandes áreas, que podem ser exemplificadas de acordo com áreas de estudos levantadas, como por exemplo Regiões Metropolitanas, e a Amazônia Legal. Quando o objetivo está voltado para o planejamento das cidades, ou até mesmo, buscar tornar uma cidade inteligente, os Modelos de Simulação de Cenários Futuros por Autômatos Celulares, se apresenta como uma ferramenta potente e eficiente para o apoio ao processo de tomada de decisão, já que este tipo de modelo matemático auxilia na compreensão das dinâmicas que envolvem determinado território. Assim como, os modelos de Simulação de Cenários, que de acordo com os interesses dos responsáveis, podem auxiliar diversos setores, como por exemplo, planejamento urbano e de habitação, onde podem ser concretizadas as melhores decisões de uma problemática, seja ela urbana ou ambiental. Pois estes modelos acoplados com suas funções matemáticas, podem simular e analisar o andamento das políticas públicas e conseqüentemente, ajudar na tomada da melhor decisão.

É possível notar uma forte tendência de crescimento do uso da modelagem dinâmica nos últimos anos. Ao unir dados de diferentes origens em plataformas gratuitas, abertas e colaborativas, softwares dedicados a modelagem dinâmica têm tido bastante foco dos especialistas e gerado estudos cada vez mais complexos. Dessa maneira, o presente estudo buscou contribuir em forma de revisão teórica ilustrando as principais diferenças, semelhanças, potenciais e limitações de modelos dinâmicos, especialmente os modelos preditivos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CÂMARA, GIRO, A.M.V. (organizadores); apresentação de Michael Batty. Geoinformação em urbanismo: cidade real X cidade virtual. – São Paulo, Oficina de Textos, 2007.

CAMPOS, P; et. al, Autômato Celular Aplicado Na Análise Da Dinâmica Do Uso E Ocupação No Entorno Do Centro Educacional Unificado Campo Limpo, São Paulo - Brasil. In: ANAIS DO XIX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2019.

CARVALHO, G.; et. al, (2019) Cenários Futuros Para Cidades Inteligentes. São Paulo, 2019.

CARVALHO.M. S; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A.M.V., eds. (2002) Análise Espacial de dados geográficos. INPE, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

CHRISTOFOLETTI, A. Modelagem de sistemas ambientais. São Paulo: Edgard Blucher, 1999.

COUTO, T.F.; FONSECA, B.M.; Dinâmica do Uso e Cobertura da Terra da Bacia Hidrográfica do Rio Pandeiros/MG. Anais do XIX SBSR. INPE – Santos- SP (2019).

FORMAN, R.T.T. Interactions among landscape elements: a core of landscape ecology. In: TJALLINGII, S.P.; DEVEER, A.A., 1.ed. Perspectives in landscape ecology. Wageningen, Países Baixos, Pudoc, 1983, p.35-48.

FORMAN, R.T.T.; GODRON, M. Landscape Ecology. New York, John Wiley & Sons, 1986. 619p.

Forman, R.T.T. (1995). Some general principles of landscape and regional ecology. Landscape ecology, 10(3), 133-142.

GOMES, W.W. et. Modelagem do desmatamento na região ecótona entre os biomas Cerrado e Amazônia. In: ANAIS DO XIX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2019, Santos. **Anais eletrônicos**. São José dos Campos, INPE, 2019.

HAGGETT, P.; CHORLEY, R. J. Models, paradigms and the new Geography. In: CHORLEY, R. J.; HAGGETT, P. (Ed.). Models in Geography. Londres: Methuen e Co., 1967. p. 19-41.

LAMBIN, E.F., & STRAHLERS, A.H. (1994). Change-vector analysis in multitemporal space: a tool to detect and categorize land-cover change processes using high temporal-resolution satellite data. Remote sensing of environment, 48(2), 231-244.

LANG, S. BLASCHKE, T. Análise da Paisagem com SIG; Tradução: Hermann Kux, São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

OLIVEIRA, G.G. Modelagem De Áreas Suscetíveis A Movimentos De Massa Com Redes Neurais Artificiais (Rna) E Random Forest (Rf). In: ANAIS DO XIX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2019, Santos. Anais eletrônicos... São José dos Campos, INPE, 2019.

PEDROSA, B.M.; CÂMARA, G. Modelagem dinâmica e geoprocessamento. In: FULKS, S.D.; PEDROSA, B.M.; Modelagem Dinâmica e Geoprocessamento

PISANI, R. J. et. al. Simulação de cenários prospectivos de escoamento superficial associados ao uso e cobertura da terra na sub-bacia do rio Capivara, Botucatu-SP por meio de Modelagem Espacial Dinâmica, In: Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto -SBSR (2017) ISBN: 978-85-17-00088-1

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, et. al (2004) Modelagem de dinâmica de paisagem: concepção e potencial de aplicação de modelos de simulação baseados em autômato celular. In: Albernaz AL, Silva JMC, Valeriano D.

WOLFRAM, S. (1983) Statistical mechanics of cellular automata. Review of modern physics, v. 55