# Modelo de Simulação Para Ocupação Irregular Utilizando Ferramenta GIS

Renan Procópio Duarte, Rodrigo dos Santos Borges, Marcelo Panaro de Moraes Zamith, Ricardo Cordeiro Corrêa

***Resumo:*** *As ocupações de espaços urbanos representam uma das dinâmicas mais importantes, pois envolve questões relacionadas a sustentabilidade. Uma das ferramentas que destaca na correta compreensão das dinâmicas são os sistemas de simulação, com especial atenção para o modelo matemático que é o coração do sistema de simulação. Dentro esses modelos, os baseados em Autômatos Celulares ganharam grande destaque por sua capacidade de imitar sistemas complexos e dinâmicos através de regras matemáticas. Nesse sentido, é proposto neste trabalho um modelo de Autômato Celular capaz de simular a expansão urbana em áreas de preservação ambiental. Integrado a ferramenta QGIS, permitindo a simulação da ocupação irregular no Parque Chico Mendes situado no município do Rio de Janeiro.*

***Palavras-chaves:*** *Ocupações de espaços urbanos, sustentabilidade, Chico Mendes.*

***Abstract:*** *Occupations of urban spaces represent one of the most important dynamics which involves issues related to sustainability. One of the tools stand out in the correct understanding of the dynamics is the simulation systems, with special attention to the mathematical model that is the core of the simulation system. With this in mind, Cellular Automata has gained great prominence for its ability to imitate complex and dynamic systems through mathematical rules. In this sense, we propose in this work a novel Cellular Automaton model which is able to mimic urban expansion in areas of environmental preservation. Integrating it with QGIS tool, allowing the irregular occupation of Chico Mendes Park at Rio de Janeiro city.*

***Keywords:*** *Occupations of urban spaces, sustainability, Chico Mendes.*

## Introdução

A expansão dos espaços urbanos é uma questão de grande relevância para a humanidade, pois envolve, entre outras questões, a sustentabilidade. Com grande parte da população mundial vivendo em cidades, surgem problemas e desafios para o bom ambiente urbano e para a saúde do planeta. Uma das estratégias de retenção da ocupação humana sobre áreas naturais, tem sido sua proteção legal através da criação de áreas de preservação ambiental. Ainda assim, tal estratégia tem sido desafiada por conta da ocupação irregular de inúmeras áreas protegidas.

As ocupações irregulares representam um problema de menor amplitude em países desenvolvidos, é uma realidade no Brasil, em especial na cidade do Rio de Janeiro, devido a sua geografia o que confere a seu espaço grande diversidade de formas naturais, muitas delas atualmente protegidas como unidades de conservação.

A ocupação desenfreada em tais locais, afeta diretamente o meio ambiente e compromete a sustentabilidade da cidade. Para isso, um bom entendimento das dinâmicas urbanas envolvidas nas ocupações irregulares é fundamental e, nesse sentido, a simulação computacional emerge como uma ferramenta essencial.

Um bom sistema de simulação é fundamental, uma vez que permite entender os fenômenos envolvidos na dinâmica da ocupação ao longo do tempo e seus impactos, bem como previsões futuras das dinâmicas urbanas.

Dentre os componentes de um sistema de simulação, o modelo matemático representa o núcleo do sistema. Apesar de existir vários modelos matemáticos, uma família de modelos de grande destaque na simulação de fenômenos urbanos é o Autômato Celular, pois é capaz de reproduzir sistemas complexos e dinâmicos, como os comportamentos envolvidos na ocupação de espaços urbanos de preservação ambiental, em que fatores relacionados a área de preservação ambiental e no entorno dessa área são fundamentais para ocupação do espaço.

Assim, este trabalho propõe um modelo de Autômato Celular capaz de reproduzir os fenômenos urbanos relacionados à ocupação irregular de espaços de preservação ambiental, integrado à ferramenta aberta QGIS.

Para isso, foi utilizado o cenário do parque natural municipal Chico Mendes no município do Rio de Janeiro. A escolha se deu por conta de sua localização em área de grande expansão da mancha urbana da cidade, além de, por conta de seu tamanho reduzido, proporcionar maior possibilidade de precisão, em um modelo que ainda está em estágio de amadurecimento. Outro fator da escolha se deu pela grande base de dados, fundamental para a realização de uma simulação.

O modelo de Autômato Celular proposto neste trabalho requer a discretização do espaço e do tempo, no qual o espaço é constituído por uma malha de células regulares, que representam a área da cidade em metros.

O passo de tempo é dado em anos. As células podem assumir apenas dois estados, espaço ocupado ou desocupado. O modelo proposto neste trabalho foi utilizado dentro da ferramenta QGIS, a permite que o modelo de autômato celular proposto neste trabalho seja implementado, testado e validado, além de oferecer suporte a várias análises estatísticas da simulação de uma forma simples.

Os resultados alcançados mostram que o modelo proposto neste trabalho é robusto e capaz de reproduzir os fenômenos urbanos relacionados à ocupação irregular de áreas urbanas de preservação ambiental, reproduzindo os dados qualitativamente e quantitativamente.

Por fim, esse trabalho é dividido em Seções, onde a Seção 2 apresenta a Fundamentação Teórica, incluindo o modelo de AC proposto neste trabalho e a motivação para o estudo. A Seção 3 descreve e discute o modelo proposto neste trabalho. O estudo de caso representado pelo Parque Chico Mendes é mostrado pela Seção 4. A Seção 5 discute os resultados alcançados com as simulações. Por fim, as conclusões e trabalhos futuros são apresentados pela Seção 6.

## Fundamentação Teórica

O Autômato Celular (AC) é uma técnica capaz de simular sistemas dinâmicos e complexos, onde a partir de interações locais emerge um comportamento global, que é difícil de ser descrito por outras técnicas.

Os AC foi proposto no início da década de 50 pelo matemático alemão Stanislaw Ulam e pelo matemático húngaro Jonh Von Neumann, que trabalhavam no desenvolvimento de um sistema que fosse capaz de se autorreplicar e reproduzir mecanismos autorreprodutivos.

Ulam estudava a evolução de construções geométricas, em relação à formação de cristais, e utilizava para isso uma malha de células com características geradas por regras locais simples e sugeriu a Von Neumann que utilizasse esses mesmos princípios. A malha utilizada por Ulam era um espaço bidimensional dividido em células que podiam estar em um dos dois estados: ligado ou desligado e que dada uma condição inicial ao sistema, a evolução era baseada em regras de vizinhança, ou seja, o estado de cada célula em um determinado instante de tempo dependia tanto do estado da célula quanto de sua vizinhança no instante de tempo anterior. Ulam observou que esse mecanismo criava estruturas complexas e em algumas ocasiões autossimilares. Utilizando esses princípios Von Neumann verificou que esse mecanismo simples era capaz de gerar estruturas de grande complexidade. Contudo, o trabalho John Von Neumann só foi conhecido pelas mão de Arthur W. Burk em 1966 após a morte de Von Neumann [McIntosh 2009].

Dentre os trabalhos de grande relevância, os AC elementares ganham grande destaque, onde o matemático Wolfram [Wolfram 1983] desenvolveu um amplo estudo sobre ACs unidimensionais, suas regras e estatísticas relacionadas. Mostrou ainda nesse trabalho que diversos padrões da natureza são capazes de serem reproduzidos com o emprego de regras matemáticas.

Um outro trabalho de grande impacto na comunidade foi conhecido como game of life, que consiste em um grade regular bidimensional e suas células pode assumir um dos dois estados: “vivo” ou “morto”. E, com um conjunto de regras é possível fazer surgir padrões que se repetem ao longo do tempo a partir da interação local, onde cada célula considera seu próprio estado e o estado de oito vizinhos adjacentes [Bays 2010].

Os ACs são definidos como uma grade regular de células, que evoluem a cada passo de tempo discreto, com o valor da variável que se deseja calcular, sendo a variável de interesse da célula determinada pelos valores das variáveis nas células vizinhas. As

variáveis em cada célula são, de forma geral, atualizadas simultaneamente com base nos valores das variáveis da sua vizinhança no passo de tempo anterior e de acordo com um conjunto de regras locais.

Formalmente, os ACs são um conjunto ($L$, $S$, $N$ e $f$), onde:

- $L$ representa a discretização em uma grade regular, formada por células ($c$) de dimensão espacial ;
- $S$ é o conjunto finito de estados que a célula pode assumir;
- $N$ é a vizinhança adotada, tal que $c \epsilon L \Rightarrow N(c) \epsilon L$ , e,
- $f:(S,N) \rightarrow S$ é a função de transição.

Em um AC, a grade regular de células é definida como uma discretização do domínio de dimensão , onde seus elementos, as células, preenchem o domínio por inteiro e com a translação da grade em direções independentes, obtém-se a mesma grade. O domínio pode ser de diferentes dimensões (1D, 2D e 3D), conforme ilustrado na Figura 1. Diferentes topologias também podem ser adotadas, como mostra a Figura 2.

**Figura 1: Exemplos de dimensões de um AC.**

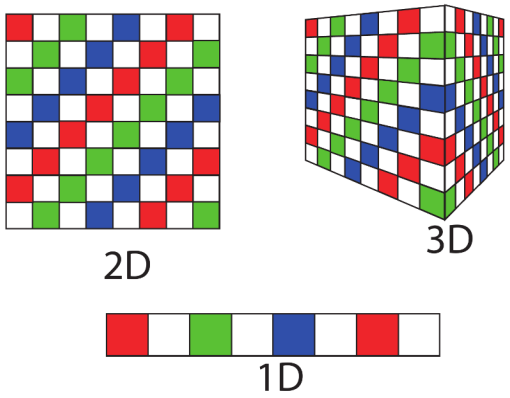
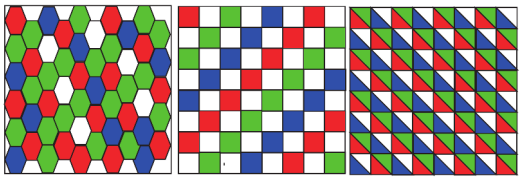
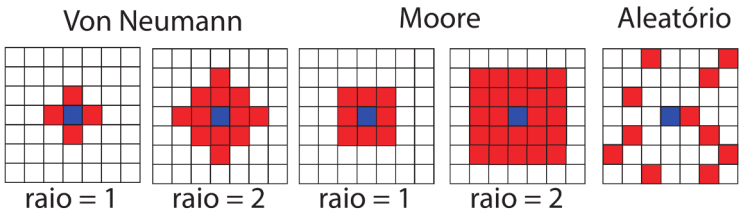



**Figura 2: Exemplos de topologias de um AC.**



A definição de vizinhança é dependente do problema modelado, considerando a representação mais adequada. Assim, a Figura 3 mostra os tipos mais usuais de vizinhança para modelos de AC, com diferentes áreas de influência, definidas pelo raio.

**Figura 3: Tipos de vizinhança mais comuns em ACs bidimensionais.**




Logo, dado uma célula e um raio , o conjunto de vizinhos é definido como:

$$N(c)=\{r \epsilon L ; (c+r) \epsilon L\}$$

ou seja, dada uma célula, a sua vizinhança também pertence ao domínio. Neste sentido, surge uma questão em relação a vizinhança das células da borda do domínio, pois não há uma vizinhança direta. Para as células da borda do domínio é necessário adotar alguma política de vizinhança para garantir a aplicação das regras de mudança de estado, uma vez que não possuem todos os vizinhos. É o problema da condição de contorno [Schiff 2011].

A literatura considera três condições de contorno clássicas aplicadas aos ACs: condições de contorno periódicas, reflexivas e constantes, como mostra a Figura 4 para um problema 1D. Outras condições podem ser consideradas de acordo com o problema modelado.

**Figura 4: Condições de contorno mais comuns.**

(a) Periódica.

(b) Reflexiva.

(c) Constante.

## Modelo de AC para crescimento urbano

O avanço tecnológico aliado à flexibilidade dos ACs em imitarem sistemas complexos e dinâmicos permitiu descrever diversos fenômenos urbanos [Hoekstra, Kroc e Sloot 2010]. Dentre as dinâmicas urbanas simuladas pelos ACs, o crescimento urbano é de suma importância tanto para implantação de políticas públicas quanto tomada de decisões estratégicas.

O ambiente urbano é um sistema altamente complexo e dinâmico, uma vez que os grupos de pessoas interagem entre si e com os ambientes urbanos e vice-versa. As mudanças ocasionadas no ambiente acabam por influenciar os grupos e pessoas que por ali vivem [Barros 2012,Heppenstall et al. 2011].

Os modelos que tratam de crescimento urbano buscam definir se um determinado espaço urbano é ou não ocupado. Os modelos não tratam do tipo da ocupação. Assim, é possível acompanhar o padrão de como os centros urbanos evoluem no tempo. Devido a característica dos fenômenos urbanos serem altamente complexos, é necessário adotar alguns relaxamentos nas características do AC [Santé et al. 2010]. Esses relaxamentos são aplicados *i*) no uso de malhas com diferentes discretizações; *ii*) na vizinhança considerada; e, *iii*) sobre as regras de transição.

Usualmente, os ACs empregam uma discretização única, definida a priori a simulação. Os fenômenos urbanos requerem diferentes discretizações durante a simulação, especialmente para representar áreas com espaços menores. Algumas áreas urbanas apresentam o uso ou ocupação do solo em regiões pequenas, enquanto outros pontos da cidade trabalham com espaços maiores. Dessa forma, a simulação deve trabalhar com as diferentes discretizações a fim de melhor representar.

A mudança em relação às vizinhanças é um tipo de relaxação no qual existem inúmeros estudos [Stevens e Dragićević 2007,Yüzer 2004,Li e Yeh 2001,Cheng e Masser 2004]. Alguns destes estudos [Caruso, Rounsevell e Cojocaru 2005,Cheng e Masser 2004] modificam o tipo de vizinhança, i.e., quais células vizinhas irão influenciar no estado futuro de uma célula analisada. Outro tipo de estudo, foca na utilização de mais modelos

de vizinhança para uma representação mais rica da simulação. Nesses casos, também há uma prática de definir pesos para evidenciar a influência que um tipo de vizinhança exercerá sobre a célula analisada.

Como o novo estado da célula é dada por regras de transição. É nesta que reside um dos maiores desafios na utilização de AC na modelagem urbana, para reproduzir os fenômenos desejados é necessário trabalhar com mais de uma regra além de regras mais sofisticadas, diminuindo a simplicidade do AC e adicionando maior complexidade computacional.

Em [Santé et al. 2010], os autores dividem as regras de transições em alguns grupos: o primeiro grupo, conta com regras simplistas, como por exemplo, uma regra baseada no número de células vizinhas que apresentam o uso de terra; já o segundo grupo, conta com o uso de métodos probabilísticos para definir se uma célula muda para um uso de terra específico, que pode ser baseada nela mesma, na vizinhança ou até em relação a outros fatores restritivos. O terceiro grupo de regras de transição busca reproduzir padrões espaciais de crescimento urbano, um exemplo desta abordagem é que leva em conta o crescimento a partir de um ponto específico da cidade; o quarto grupo, ganhou mais ênfase nos anos 2000, com aumento da pesquisa em aprendizado de máquina. Nesse grupo, há métodos de inteligência artificial que inferem ou reconstroem as regras de transição.

Essas mudanças, ou relaxações, aumentam a capacidade representativa do AC de fenômenos complexos sem descaracterizá-lo a ponto de o mesmo não poder mais ser definido como um AC. No entanto, quanto mais complexo o modelo fica, mais complicado também é calibrar AC. Em geral, a calibragem é baseada em duas abordagens: tentativa e erro, a qual é a mais comum, e técnicas estatísticas.

Neste artigo é proposto uma extensão do trabalho desenvolvido He, C. et al. [He et al. 2006], onde foi apresentado um modelo de AC aplicado ao crescimento urbano, considerando características como recursos hídricos, tipo da expansão e políticas públicas de urbanização. Entretanto, o modelo não contempla ocupações irregulares, realidade comum nas cidades brasileiras [Peixotom, Prado e Franco 2020].

Desta forma, este trabalho propõe uma abordagem para modelar a expansão de centros urbanos, considerando a característica de ocupação irregular. Assim sendo, a modelagem requer um relaxamento nas regras de proibição de ocupação.

A extensão proposta neste trabalho busca modelar o comportamento de ocupação irregular, fenômeno usual nos centros urbanos brasileiros. E, para isso, o modelo deve considerar restrições de ocupação devem ser tratadas como probabilidades com valores entre 0 e .

A modelagem adotada neste trabalho utilizou uma malha regular com discretização de metros cada célula. Cada célula pode assumir os estados de ocupado ou desocupado. Ocupada significa que a célula é urbanizada e desocupada é região de não urbanizada, representa nesse trabalho uma área do Parque Chico Mendes no Rio de Janeiro. A condição de contorno é constante e a vizinhança de Moore com raio um. Logo, cada célula é influenciada por ela mesma e outros oito vizinhos. Por fim, a regra de transição é probabilista e dada pela seguinte Equação:

$$P_{x,y}^{t+1} = \left( \sum_{i=1}^{m-2} W_i S_{i,x,y} + W_{m-1} N_{x,y} - W_m I_{x,y} \times \prod_{r=1}^{\square} EC^t_{r,x,y}{}^{\square} \times \prod_{l=1}^{\square} PC^t_{l,x,y} V^t_{x,y}{}^{\square} \right) \quad (1)$$

onde $P_{x,y}^{t+1}$ é comparado a um valor de limiar gerado aleatoriamente para cada célula $(x, y)$ dado por $\alpha$ em um instante de tempo $t$. Logo, se $P_{x,y}^{t+1} < \alpha$ a célula será ocupada, caso contrário não é ocupada. $\sum_{i=1}^{m-2} W_i S_{i,x,y}$ representa o *i*-ésimo atributo da célula $(x, y)$, como sustentabilidade, transporte, educação, ou outro atributo importante para a simulação; esses atributos são mapeados em valores numéricos e dado pelo índice *i*. $W_i$ é o vetor de pesos que atribuí a importância do atributo $i$ na célula $(x, y)$. $N_{x,y}$ representa a densidade que cada célula vizinha influência na célula analisada e $W_{m-1}$ é o peso da vizinhança, é a parte da regra do AC que considera a ocupação ou não de uma vizinhança. $I_{x,y}$ representa a força de uma célula $(x, y)$ não se tornar ocupada, descreve uma força de resistência em mudar de estado dado que não está ocupada.

$\prod_{r=1}^{\square} EC^{t}_{r,x,y}$ define a restrição da célula mudar de estado através de um vetor de atributos de índice $r$ e restringe a ocupação em função de fenômenos naturais, como lagos, rios e montanhas. $\prod_{l=1}^{\square} PC^{t}_{r,x,y}$ define a restrição política de ocupação. Nesse caso e para o nosso problema, $P \epsilon [0:1]$ é uma probabilidade que define uma probabilidade da restrição $C^{t}_{l,x,y}$ ser cumprida ou não, ou seja, valores próximos de zero indicam que ocupações irregulares têm uma probabilidade menor de acontecer. Ao passo que valores próximos de 1 representam grande probabilidade de ocupação.

E, por fim, $V^{t}_{x,y}$ descreve uma perturbação da célula $(x, y)$ no instante de tempo $t$, descrita pela Equação:

| | |
|---|---|
| $V_{x,y} = 1 + ¿$ | (2) |

**Estudo de caso: Parque Chico Mendes**

A simulação envolve os dados reais e a integração da ferramenta QGIS [QGIS 2020], que permite acessar os dados para a simulação e tem integração direta com python, onde o modelo foi implementado.

A simulação é realizada em uma região de interesse definida pela ferramenta GIS. Sobre essa região, é construída a malha do AC, utilizando células de metros. Além da região de interesse, uma camada de borda é necessária. Definida neste trabalho como área de amortização.

A área de amortização representa a área urbanizada no entorno da região de interesse, que neste trabalho é o Parque Chico Mendes. A área de amortização provê dados para simulação, tem uma representação na malha, mas a regra de transição não se aplica sobre essas células.

Os dados fornecidos pela área de amortização são comodidades/serviços (ou características). Esses dados são utilizados pelas regras de transição sobre as células da

região de interesse. O tamanho da área de amortização foi determinado a fim de compreender algumas das características escolhidas para fazer parte do estudo.

**Figura 5: Área do Parque, em lilás, e de Amortização, em vermelho.**

Com as duas áreas definidas, o foco foi escolher quais atributos são importantes na simulação. De acordo com vários trabalhos [Simmonds 1999,Tanguay et al. 2010,Shepherd 1998], um fator essencial é a mobilidade. Mobilidade nesse caso, engloba tanto o deslocamento para trabalho, o deslocamento para utilizar serviços, como supermercados, shopping centers, serviços públicos, entre outros, e também o deslocamento recreativo.

Um outro atributo, foi o acesso a algum tipo de serviço de saúde. A utilização deste atributo se dá pelo fato de que saúde é um direito universal [Assembly 1948], e o acesso ao mesmo é considerado como um agente enriquecedor do entorno da área a qual a unidade de saúde está localizada. Assim como o fato de ter acesso facilitado (em relação a distancia) a alguma área de saúde, um outro elemento importante é o número de unidades de saúde disponível dentro de uma distancia dada. Além disso, ele figura como um dos principais indicadores no grupo social e institucional [Tanguay et al. 2010].

Como terceiro objeto de estudo, o atributo escolhido foi as unidades de ensino, seja ela uma unidade de educação básica à uma unidade de educação superior. Ou seja, foi

considerado desde unidades de educação infantil (creche) a universidades. Todavia, não foi discriminado o nível de ensino da unidade, i.e., uma universidade é vista da mesma forma que uma creche, pois ambas são unidades de ensino. Assim como o indicador de saúde, este indicador também figura entre os mais utilizados no grupo social e institucional em outros trabalhos [Tanguay et al. 2010].

**Parâmetros**

A simulação tem como base uma divisão regular da área de estudo e área de amortização do estudo, *i.e.*, uma malha, ou matriz, de células regular de $50 \times 50$ metros, totalizando uma área de $2.500\,m^2$ em cada célula. Essa escolha foi dada de acordo com a literatura [Santé et al. 2010]. Entretanto, pode ser alterado com o intuito de ter uma visão mais macro do problema, ou com maior granularidade. A troca em relação a diminuição do tamanho da célula se dá no aumento do custo computacional de realizar a simulação. Uma vez que a discretização refinada implica num aumento do número de células da malha.

Como o AC é um modelo inteiro, por mais refinada que seja a célula sempre existirá uma diferença entre a representação por malha e o mundo real. Essa diferença é considerada como um erro numérico [Zamith et al. 2015]. O erro máximo em cada célula, considerando a discretização de $50 \times 50$ metros, é de $2.499\,m^2$, no qual apenas $1\,m^2$ do parque estaria dentro da célula, e portanto esta célula seria classificada como área do parque. Outro erro causado pelo moledo inteiro é a região de interesse. A Figura 5 ilustra que a região de interesse é definida com base nos extremos do parque, de forma a englobar toda sua área.

Após o recorte, há um cálculo que define o número mínimo de células necessárias para abranger a área do parque. Uma discretização mais refinada implica em um número maior de células e também em um erro menor. O mesmo efeito ocorre ao desconsiderar a área da Lagoinha das Taxas, devido ao fato de não ser possível a ocupação em termos de moradia da mesma.

Os parâmetros da simulação são: um conjunto de pesos, indicadores de distribuição de unidades de saúde, unidade de ensino e mobilidade, a distância relativa que cada célula

analisada encontra-se dessas unidades/serviços, uma variável de inercia e uma referente a saída do AC. Estas serão mais detalhadas à frente.

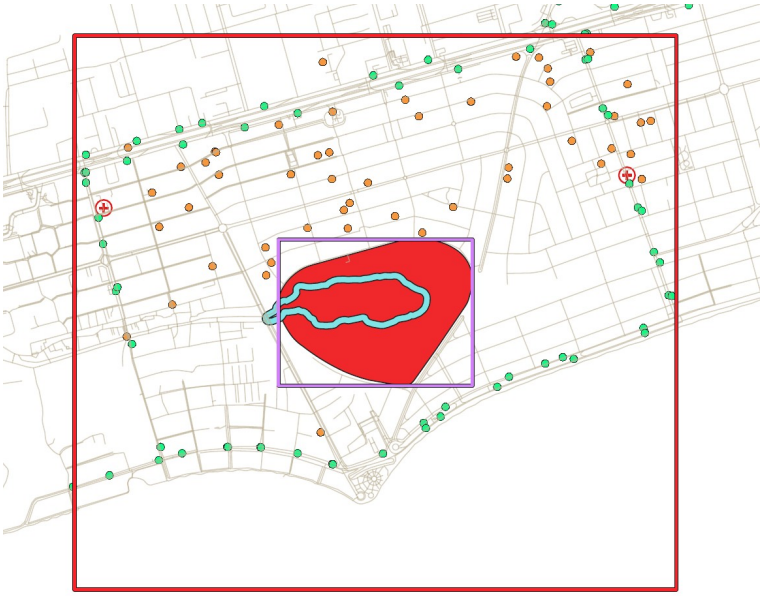
O conjunto de pesos são variáveis que determinam a influência de cada uma das demais variáveis na tomada de decisão de ocupação de uma determinada célula. Existem cinco pesos definidos no início de cada simulação, agrupados em 2 grupos: o primeiro grupo refere-se a influência da distribuição de comodidades em relação a célula e também a ocupação das outras células ao redor da célula sob análise, esse agrupamento pode ser visto na primeira parte da equação 2; e o segundo grupo, que é composto apenas por um peso, que é independente do grupo acima, e determina o quanto a distância para essas comodidades influenciará na decisão, sendo definida na equação 2 como .

Os quatro pesos referentes ao primeiro grupo têm uma somatória igual a 1, *i.e.*, todos os quatro pesos somados devem dar o valor de 1. Já o valor do segundo grupo de peso, varia entre 0 e 1, em que 0 define que a distância para as comodidades/serviços não influenciará na possível ocupação da célula e 1 que ela influenciará em sua máxima importância, definida por uma função a qual calcula a média das distâncias de cada comodidade/serviço em relação a célula sob estudo.

Os indicadores de distribuição compõem uma variável do sistema dinâmico, eles são três, como mostrado na Figura 6 e são representados por *S* na Equação 2, uma para cada comodidade/serviço, e todos eles são calculados da mesma forma: dentro da área de amortização existem os pontos de ônibus com a informação de quais linhas passam no mesmo, as unidades de saúde as e unidades de ensino, e todas elas podem ser quantificadas, ou seja, pode-se conhecer o número total dessas comodidades/serviços.

Logo, os indicadores desses serviços são calculados a partir de quantos destes estão disponíveis para a célula analisada em relação ao número total desses serviços. Por exemplo, o indicador de mobilidade é definido por quantas linhas de ônibus tem ponto de parada no entorno da célula analisada dividido pelo número total de linhas que passam pela área de amortização da simulação. O mesmo vale para unidades de saúde e unidades de ensino, dando assim uma porcentagem que é relativa a quantidade de cada serviço.

**Figura 6: Parada de ônibus, em verde; unidades de ensino, em laranja; unidades de saúde, em cruz.**



Completando as variáveis referentes ao primeiro grupo de pesos, o número de células vizinhas urbanizadas e também a inércia. A vizinhança é definida pela porcentagem de células urbanizada na vizinhança, e o indicador de vizinhança varia entre 0 e 1, onde 0 significa não ter vizinhos ocupados e significa que todos os vizinhos estão ocupados. Já a inércia é definida 0 e 1, onde 1 significa máxima resistência à ocupação e 0 uma grande propensão a ser ocupada.

## Resultados alcançados

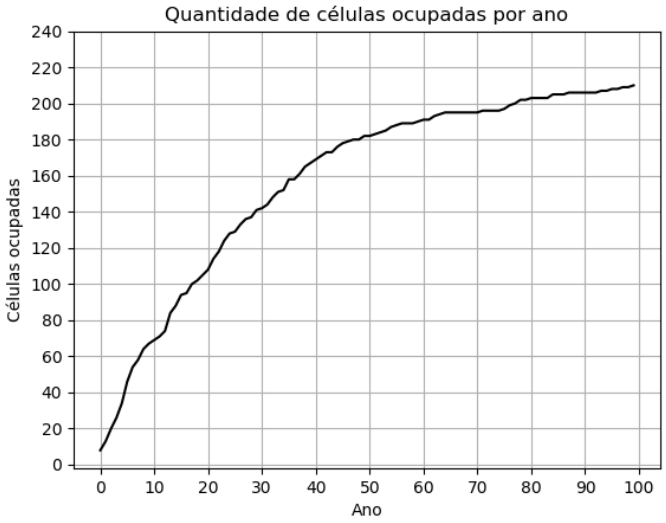
Para o experimento realizado, foi utilizada a vizinhança de Moore de raio 1 no AC, o tamanho da célula foi definido como sendo de 50 × 50 metros, a área de amortização de 20 vezes o tamanho da célula, conforme ilustrado pela Figura 5, a distância para o cálculo da variável *EC* é baseada na distância de Manhattan. O conjunto de pesos do grupo 1 foram os seguintes: 0,4 para a vizinhança, 0,3 para unidades de ensino, 0,2 para mobilidade e 0,1 para unidades de saúde. A inércia foi definida como 0,65 e o peso da influência das distâncias como 0,9.

Pela natureza da simulação computacional, o tempo também é representado de forma discreta, então cada passo da simulação é equivalente a um ano. Com o intuito de

previsão, foi simulado um espaço temporal equivalente a 100 anos e o resultado é dado em número de células ocupadas por ano. No gráfico apresentado pela Figura 7, podemos ver o crescimento anual no número de células ocupadas por ano da área que a simulação entende como sendo a área do parque, representado pelo retângulo lilás na Figura 5.

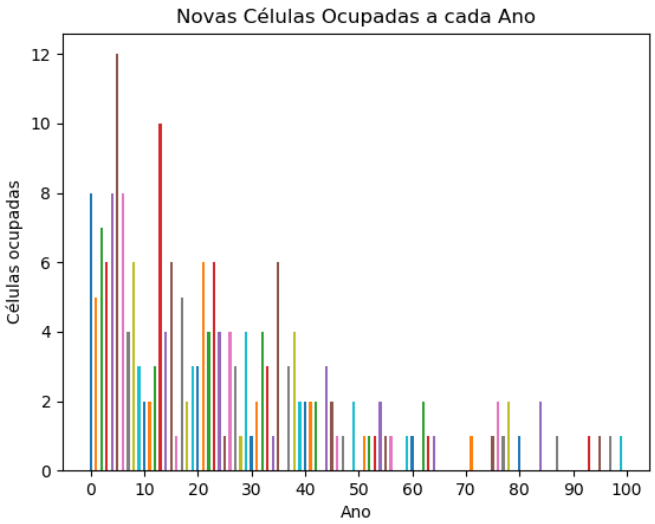
Neste experimento, o número de células que estão sujeitas a ocupação é de, no máximo, 240 células, dado pela área do parque representada em número de células de $50 \times 50$ metros. A área da Lagoinha das Taxas já foi desconsiderada pelo mesmo processo de marcação que originou a área.

**Figura 7: Número acumulativo de células ocupadas durante a simulação.**




Observando a Figura 7, podemos perceber que há uma ação de ocupação mais rápida no início da simulação, *i.e.*, nos primeiros 60 anos e tende a estabilizar após o ano da simulação, momento em que a curva apresenta uma menor inclinação. Na Figura 8, pode-se observar com mais nitidez esse fenômeno de queda no número de novas ocupações em áreas do parque perto da marca dos anos 60. Nas lacunas em branco da Figura, marca o ano da simulação a qual ocorreu nenhuma ocupação em áreas do parque.

**Figura 8: Número de células ocupadas a cada ano durante a simulação.**



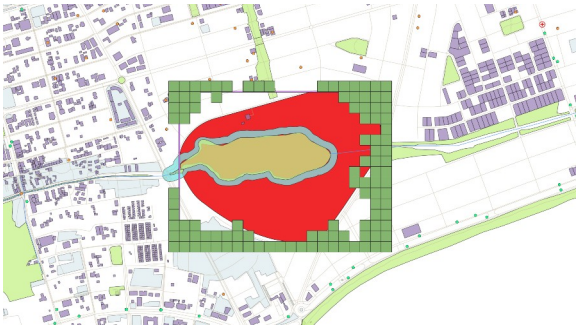

Um ponto a ser destacado, é que nesse projeto não utilizamos a ideia de ocorrer desocupação da área já ocupada, seja ela na área "legalizada" ou na área ambiental protegida do parque Chico Mendes. A ideia da simulação era mostrar um cenário no quais ocupações desordenadas poderiam fazer a área do parque diminuir com o passar do tempo.

Com o auxílio da ferramenta QGIS [QGIS 2020], podemos ver geograficamente a evolução da simulação. Os quadrados verdes no mapa na Figura 9 representam as células ocupadas no tempo da simulação. Ao observarmos a Figura 9a, podemos ver que a ocupação começa pelas bordas, este fenômeno é esperado pelo fato de haver mais comunidades/serviços perto da borda, *i.e*, com a distância menor para estas comodidades/serviços existe uma maior probabilidade de ocupação. Este resultado também é corroborado pelo modelo de crescimento urbano para cidades da América Latina, desenvolvido por Griffin e Ford [Griffin e Ford 1980], no qual as novas moradias irradiam da periferia já existente, nesse caso, de onde já existe ocupação.

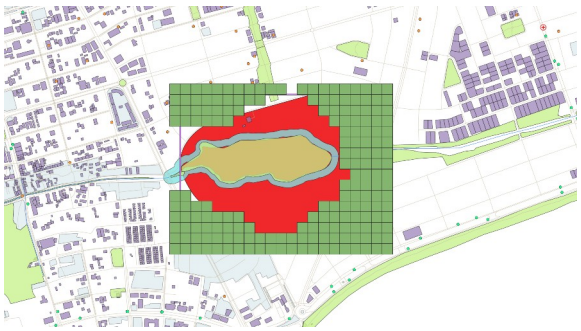
**Figura 9: Ocupação do Parque Chico Mendes no tempo *t=5*, *t=20*, *t = 50* e *t = 80*, células ocupadas em verde.**

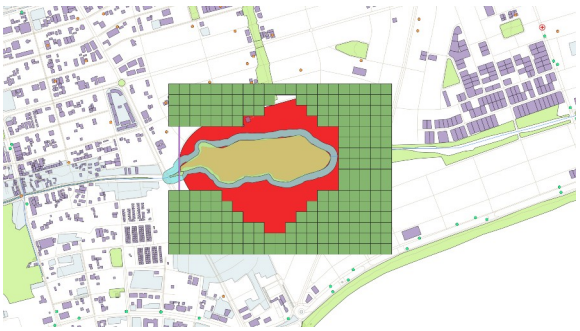
| **(a)** Ocupação em $t = 5$ | **(b)** Ocupação em $t = 20$ |
|---|---|

**(c)** Ocupação em $t = 50$



**(d)** Ocupação em $t = 80$

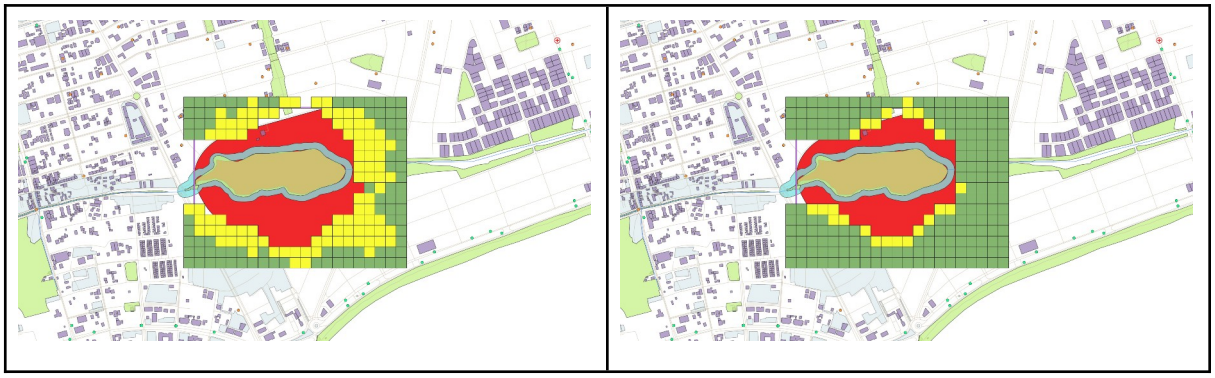




Observando a Figura 9b, nota-se um rápido crescimento na ocupação da área do parque, como a Figura 8 já indicava, isto tende a ter relação com a influência dos vizinhos, uma vez que a cada iteração da simulação mais células são ocupadas. Esse processo acelerado de ocupação permanece sendo visto na Figura 9c, que marca 50 instantes de tempo (ou ano) e será melhor notado na Figura 10a, e por fim, podemos visualizar uma queda na taxa de ocupação na Figura 9d, devido a uma grande porção, cerca de 85%, da área sujeita a ser ocupada encontrando-se já ocupada.

**Figura 10: Ocupação do Parque Chico Mendes nos intervalos de tempo de 15~50 e 50~90, novas ocupações em amarelo.**

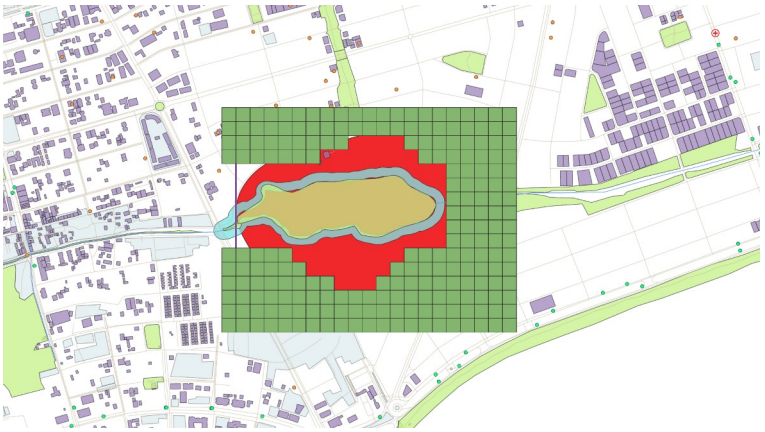
| **(a)** Novas ocupações entre $t = 15$ e $t = 50$ | (b) Novas ocupações entre $t = 50$ e $t = 90$ |
|---|---|



A mudança na taxa de ocupação produzida pela simulação pode ser verificada pela Figura 10. A imagem 10a representa a condição inicial da simulação até a metade do tempo simulado e se considerarmos estes instantes de tempo apresentados, o número de células ocupadas quase que dobrou, registrando um aumento de 93,6% de células ocupadas. Já na Figura 10b mostra um decréscimo nesta taxa de ocupação, a qual nesse intervalo é de 13,2% .

Por fim, na Figura 11 representa o estado final da simulação, que não difere da Figura 9d, ou seja, após um certo tempo de simulação, o crescimento dos espaços ocupados diminui, mas ainda sim a ocupação chega 87,5% das células totais que demarcam a área do parque Chico Mendes considerada na simulação. Ao analisar essa última figura, pode-se concluir que a área a qual foi menos ocupada é área sul do parque que tem saída para a praia do Pontal, e consequentemente, encontra-se mais distantes dos recursos urbanos, como transporte, educação e saúde.

**Figura 11: Resultado final da simulação, células ocupadas em verde.**



## Conclusões

Neste trabalho, abordamos a expansão dos espaços urbanos, especificamente em áreas de preservação ambiental. Tal estudo é importante devido ao fato de que a ocupação destes espaços afetam diretamente o meio ambiente, assim também influenciando a sustentabilidade da cidade.

Uma das formas de preparar políticas públicas é realizar uma simulação, a qual permite entender os fenômenos envolvidos na dinâmica da ocupação ao longo do tempo e seus impactos. Uma família de modelos de grande destaque é a do AC, pois são capazes de reproduzir sistemas complexos e dinâmicos.

Com este intuito, propomos uma abordagem que busca modelar o comportamento da ocupação irregular, fenômeno usual nos centros urbanos brasileiros, baseada no sistema dinâmico proposto por [He et al. 2006]. Todavia, o modelo deve considerar que as restrições de ocupação devem ser tratadas como probabilidades que variam em valores entre 0 e .

Os resultados obtidos através do modelo de simulação proposto demonstra que a ocupação ilegal começaria pelas bordas, o que é verificado na literatura de modelos de crescimento urbano, onde há maior disponibilidade dos serviços de transporte e educação. Entretanto, com o passar do tempo, podemos observar que há ocupação em áreas interiores do parque Chico Mendes, devido ao processo de expansão urbana natural, no qual novos assentamentos encontram-se na periferia dos já existentes.

Um outro ponto dos resultados, é a parte visual, que foi feita na ferramenta QGIS [QGIS 2020], que torna de fácil identificação as áreas ocupadas, o que oferece ao gestor uma melhor possibilidade de tomada de decisão.

Como trabalhos futuros, uma melhor adaptação da área da simulação em relação a área real do objeto de estudo o que fará os resultados da simulação ainda mais semelhante a um futuro cenário real.

**Referências**

ASSEMBLY, U. G. Universal declaration of human rights. UN General Assembly, New York, NY, USA:, v. 302, n. 2, 1948.

BARROS, J. Exploring urban dynamics in latin american cities using an agent-based simulation approach. In: Agent-based models of geographical systems. [S.l.]: Springer, 2012. p. 571–589.

BAYS, C. Introduction to cellular automata and conway's game of life. In: Game of Life Cellular Automata. [S.l.]: Springer, 2010. p. 1–7.

CARUSO, G.; ROUNSEVELL, M.; COJOCARU, G. Exploring a spatio-dynamic neighbourhood-based model of residential behaviour in the brussels periurban area. International Journal of Geographical Information Science, Taylor & Francis, v. 19, n. 2, p. 103–123, 2005.

CHENG, J.; MASSER, I. Understanding spatial and temporal processes of urban growth: cellular automata modelling. Environment and Planning B: Planning and Design, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 31, n. 2, p. 167–194, 2004.

GRIFFIN, E.; FORD, L. A model of latin american city structure. Geographical review, JSTOR, p. 397–422, 1980.

HE, C. et al. Modeling urban expansion scenarios by coupling cellular automata model and system dynamic model in beijing, china. Applied Geography, Elsevier, v. 26, n. 3-4, p. 323–345, 2006.

HEPPENSTALL, A. J. et al. Agent-based models of geographical systems. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2011.

HOEKSTRA, A. G.; KROC, J.; SLOOT, P. M. Simulating complex systems by cellular automata. [S.l.]: Springer, 2010.

LI, X.; YEH, A. G.-O. Calibration of cellular automata by using neural networks for the simulation of complex urban systems. Environment and Planning A, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 33, n. 8, p. 1445–1462, 2001.

MCINTOSH, H. V. One dimensional cellular automata. [S.l.]: Luniver Press, 2009.

PEIXOTOM, G.; PRADO, A.; FRANCO, P. Áreas às margens do Parque Chico Mendes são loteadas por construções irregulares da milícia no Rio. [S.l.], 2020. Disponível em: https://g1.globo.com/rj/rio-de-janeiro/noticia/2020/08/12/parque-chico-mendes-tem-areas-loteadas-por-construcoes-irregulares-da-milicia.ghtml. Acessado em 29 de novembro de 2020.

QGIS. A Free and Open Source Geographic Information System. [S.l.], 2020. Disponível em: https://www.qgis.org/en/site/. Acessado em 29 de novembro de 2020.

SANTÉ, I. et al. Cellular automata models for the simulation of real-world urban processes: A review and analysis. Landscape and Urban Planning, v. 96, n. 2, p. 108–122, 2010. ISSN 01692046.

SCHIFF, J. L. Cellular automata: a discrete view of the world. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011. v. 45.

SHEPHERD, S. Towards the sustainable city: The impact of land use–transport interactions. a comparison of the impact of the initial and final coefficients on location choice on transport strategies and land use scenarios. Institute of Transport Studies, University of Leeds, 1998.

SIMMONDS, D. C. The design of the DELTA land-use modelling package. Environment and Planning B: Planning and Design, v. 26, n. 5, p. 665–684, 1999. ISSN 02658135.

STEVENS, D.; DRAGIĆEVIĆ, S. A gis-based irregular cellular automata model of land-use change. Environment and Planning B: Planning and Design, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 34, n. 4, p. 708–724, 2007.

TANGUAY, G. A. et al. Measuring the sustainability of cities: An analysis of the use of local indicators. Ecological Indicators, v. 10, n. 2, p. 407 – 418, 2010. ISSN 1470-160X. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X09001277.

WOLFRAM, S. Statistical mechanics of cellular automata. Reviews of modern physics, APS, v. 55, n. 3, p. 601, 1983.

YÜZER, M. A. Growth estimations in settlement planning using a land use cellular automata model (lucam). European Planning Studies, Taylor & Francis, v. 12, n. 4, p. 551–561, 2004.

ZAMITH, M. et al. A new stochastic cellular automata model for traffic flow simulation with drivers' behavior prediction. Journal of computational science, Elsevier, v. 9, p. 51–56, 2015.