

USO DE AUTÔMATOS CELULARES PARA ENTENDIMENTO DOS IMPACTOS DA ELEVAÇÃO DO NÍVEL DO MAR NO LITORAL DO MARANHÃO

USE OF CELLULAR AUTOMATONS TO UNDERSTAND THE IMPACTS OF SEA-LEVEL RISE ON THE COAST OF MARANHÃO

Janaina Santos Bezerra 1

Denilson da Silva Bezerra 2

Resumo: Foi utilizado um modelo espacialmente explícito, baseado em autômatos celulares para identificar os potenciais impactos da elevação do nível médio do mar (ENMM) no litoral do Maranhão. A simulação considera 8 eventos de elevação de 0,125 a 1 m de acordo com uma progressão aritmética da razão 0,125 m para o intervalo de tempo de 2020 à 2100 (o intervalo temporal é dividido em 8 décadas: 1:2020-2030, 2:2030-2040, 3:2040-2050, 4:2050-2060, 5:2060-2070, 6: 2070-2080, 7:2080-2090 e 8:2090-2100). Os dados utilizados na presente pesquisa são oriundos do MapBiomas e do Zoneamento Ecológico e Econômico do Maranhão (ZEE/MA). No final da simulação (ano 2100), a área de mangue original (2.952 km²) foi reduzida para 1.777 km², representando uma perda de 39,95%. A simulação também mostrou significativa migração dos manguezais, e a perda modelada da área de mangue original foi compensada por uma adição líquida de 148 km² de novos mangues no interior, um aumento líquido de 5% na área de mangue total (3.107 km² em 2100). O experimento de modelagem sugere que as florestas de mangues podem potencialmente sofrer expansão de área em um eventual aumento do nível do mar na área de estudo. Estes resultados podem ajudar na identificação dos corredores migratórios para os mangues amazônicos e o desenvolvimento de estratégias de adaptação face a potenciais eventos de elevação do nível do mar no litoral maranhense.

Palavras-chave: Modelagem Espacialmente Explícita. Autômatos Celulares. Mudanças Climáticas.

Abstract: A spatially explicit model, based on cellular automata, was used to identify the potential impacts of rising mean sea level (ENMM) on the coast of Maranhão. The simulation considers 8 elevation events from 0.125 to 1 m according to an arithmetic progression of the ratio 0.125 m for the time interval from 2020 to 2100 (the time interval is divided into 8 decades: 1:2020-2030, 2:2030-2040, 3:2040-2050, 4:2050-2060, 5:2060-2070, 6:2070-2080, 7:2080-2090 and 8:2090-2100). The data used in this research come from MapBiomas and the Ecological and Economic Zoning of Maranhão (ZEE/MA). At the end of the simulation (year 2100), the original mangrove area (2,952 km²) was reduced to 1,777 km², representing a loss of 39.95%. The simulation also showed significant mangrove migration, and the modeled loss of original mangrove area was offset by a net addition of 148 km² of new mangroves inland, a net increase of 5% in total mangrove area (3,107 km² in 2100). The modeling experiment suggests that mangrove forests could potentially undergo area expansion in an eventual sea level rise in the study area. These results can help identify migratory corridors for the Amazonian mangroves and the development of adaptation strategies in the face of potential sea level rise events on the coast of Maranhão.

Keywords: Spatially Explicit Modeling. Cellular Automata. Climate changes.

1 - Graduanda do Curso de Matemática da Universidade Federal do Maranhão (UFMA).
Lattes: <http://lattes.cnpq.br/0228428128006904>. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1578-439X>.
E-mail: janaina.lsantos@hotmail.com

2 - Professor do Departamento de Oceanografia e Limnologia da Universidade Federal do Maranhão (DEOLI/UFMA). Docente permanente no programa de pós-graduação (mestrado acadêmico) em Desenvolvimento e Meio Ambiente (PRODEMA) e no programa de pós-graduação (mestrado acadêmico) em Geografia, ambos da UFMA.
Lattes: <http://lattes.cnpq.br/6162113647472848>. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9567-7828>.
E-mail: denilson.bezerra@ufma.br

Introdução

A matemática e a física são essenciais para a vida das pessoas tanto de forma direta como indireta principalmente nas suas aplicações em processo de modelagem por meio de equações. Porém, existem fenômenos da natureza que não conseguimos resolver por meio de equações, então aplicamos sistemas complexos. Um exemplo de sistema complexo são os autômatos celulares, sistemas complexos estes que há um grande número de agentes ou grade n-dimensional, onde contém células de comportamento idênticos. No presente trabalho propõe o uso de autômatos celulares como alternativa à modelagem como resposta de sistemas naturais.

De todos os efeitos provocados pelas alterações climáticas, a elevação do nível do mar é considerada o principal fator de vulnerabilidade das florestas de mangue. (SCHAEFFER-NOVELLI et al., 2000). Para a pesquisa atual, o conceito de vulnerabilidade adotado é o apresentado pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas - IPCC (2021), a saber: vulnerabilidade é o grau pelo qual um sistema é provável ou incapaz de lidar com os efeitos adversos das alterações climáticas, incluindo a variabilidade climática extrema.

SOARES (2009) propôs um modelo conceitual da resposta das florestas de mangue a um possível aumento do nível médio do mar induzido pelo aquecimento global. De acordo com este modelo, as respostas dependem das taxas de elevação do nível do mar, das taxas de sedimentação, da topografia da área e da disponibilidade de áreas adequadas para a migração de manguezais. FARACO et al. (2010) formularam uma metodologia para estimar o grau de vulnerabilidade combinada de manguezais e populações pesqueiras aos impactos das alterações climáticas no complexo de estuários de Paranaguá, no sul do Brasil. DANTAS et al (2011) propuseram usar o reflorestamento de mangue como ferramenta para proteger a bacia hidro Potiguar (nordeste brasileiro) de erosão generalizada e instabilidade costeira resultante das alterações climáticas e atividades humanas.

Embora alguns desses estudos relativos às mudanças no nível do mar e à dinâmica de mangues no Brasil tenham usado sensoriamento remoto e/ou ferramentas e técnicas de modelagem, nenhum deles tentou prever os impactos do clima projetado e da mudança no nível do mar nesses ecossistemas. O objetivo do presente estudo é simular a resposta dos mangues da Amazônia Oriental (região do golfo maranhense e das reentrâncias maranhenses) à ascensão do nível do mar, e produzir uma avaliação de vulnerabilidade para esta seção da costa brasileira. Usamos um modelo espacialmente explícito, baseado em autômatos celulares e sistema de informações geográficas (SIG), para identificar a intensidade da migração e/ou inundação destes manguezais para diferentes cenários do IPCC da ascensão do nível do mar eustático.

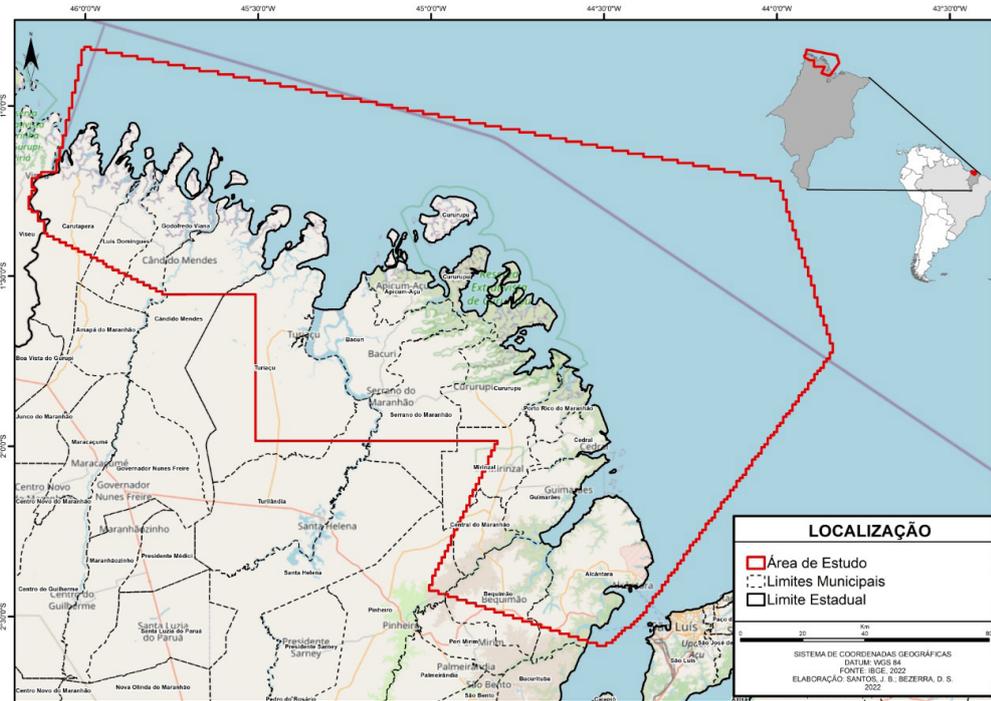
Procedimentos metodológicos

Área de estudo

A área objeto do experimento de modelagem computacional corresponde a área geográfica da Área de Proteção Ambiental das Reentrâncias Maranhenses (Figura 1). A APA das Reentrâncias maranhenses corresponde a um importante Sítio Ramsar¹ (área úmida de interesse internacional) presente no litoral do Maranhão, sua área geográfica corresponde a 2.680.911,2 ha.

1 Para mais informações sobre os Sítios Ramsar no território brasileiro, acesse: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/ecossistemas-1/areas-umidas/sitios-ramsar-brasileiros#:~:text=Sob%20o%20status%20de%20S%C3%ADtio,a%20benef%C3%ADcios%20decorrentes%20dessa%20condi%C3%A7%C3%A3o.>

Figura 1. Localização geográfica da Área de Proteção Ambiental das Reentrâncias Maranhenses



Fonte: Os autores (2022).

Modelo experimental (BR-MANGUE)

O modelo utilizado (br-mangue) foi preparado de acordo com os preceitos teóricos descritos por BEZERRA et al. (2014), que desenvolveu um modelo computacional para simular a resposta do ecossistema de mangue a elevação do nível médio do mar (ENMM). O modelo simula a ENMM para a área de estudo em 80 (noventa) etapas de elevação, distribuídas em 8 décadas, de 0,125 m a 1 m, de acordo com uma progressão aritmética de razão 0,125 por década, de 2020 a 2100 (o intervalo temporal é dividido em 8 décadas: 1:2020-2030, 2:2030-2040, 3:2040-2050, 4:2050-2060, 5:2060-2070, 6: 2070-2080, 7:2080-2090 e 8:2090-2100). O maior valor de elevação corresponde ao cenário mais alarmante do aumento do nível do mar no AR5-IPCC, ou seja, 1 m de elevação média global em 2100 (IPCC, 2013).

Foram realizados procedimentos de modelagem a fim de simular os seguintes eventos: (I) avanço do nível do mar sobre o continente; (II) deslocamento da área de influência das marés (DAIM); (III) acreção longitudinal do sedimento (formação de novos bancos de lama) em áreas adjacentes às florestas de mangue; (IV) as mudanças na extensão das áreas de mangue e/ou do mangue resistem a elevação (V) impacto dos entraves à migração landward e o desenvolvimento de novas zonas de mangue. Abaixo está uma descrição dos elementos do modelo br-mangue:

- **Área de mangue original** - corresponde à extensão de mangue existente em 2010 na área de estudo.
- **Diminuição do mangue** - corresponde à área da floresta de mangue que é suprimida em cada etapa de elevação.
- **Aumento de mangue** - corresponde às áreas de mangue jovens que conseguem migrar em cada evento de deslocamento da área de influência das marés;
- **Área remanescente do mangue** corresponde às áreas de mangue originais que não são afetadas pelo aumento da coluna de água ou das áreas de mangue que não são afetadas pela ENMM devido às altas taxas de sedimentação (horizontais e verticais).

O modelo computacional foi implementado usando-se o programa TerraME, uma caixa de ferramentas para modelagem espacialmente explícita integrada com bancos de dados geoespaciais. O TerraME suporta autômatos celulares, modelos baseados em agentes e modelos de rede executados em espaços de células 2D. O TerraME fornece uma interface para o banco de dados geográficos TerraLib, permitindo modelos de acesso direto a dados geoespaciais. Sua linguagem de modelagem tem funções internas que facilitam o desenvolvimento de modelos multidimensionais e de vários paradigmas para aplicações ambientais (mais informações em <http://www.terrame.org/Doku.php>). A implementação é baseada no modelo computacional de autômatos celulares (WOLFRAM, 1983), um sistema lógico que tem o conceito de célula como a unidade básica: cada célula tem um bairro de células e um estado discreto que pode variar durante a simulação, de acordo com suas regras de transição. O modelo foi implementado em linguagem LUA, que consiste em uma linguagem de programação poderosa, eficiente e leve, projetada para estender aplicações², a Figura 2 destaca um trecho do código³.

Figura 2. Modelo implementado em linguagem LUA

```

1 -- Sea-Level Rise Impacts on Mangrove Ecosystem
2 -- Case Study: Maranhense reentrances
3 -- Author: Denilson da Silva Bezerra
4 -- New version refactored by: Hélder Pereira Borges
5
6 -----uso e ocupação
7 MANGUE = 1
8 VEGETACAO_TERRESTRE = 2
9 SHAR = 3
10 AREA_ANTROPORIZADA = 4
11 SOLO_DESCOBERTO = 5
12 SOLO_DESCOBERTO_INUNDADO = 6
13 AREA_ANTROPORIZADA_INUNDADO = 7
14 MANGUE_MIGRADO = 8
15 MANGUE_INUNDADO = 9
16 VEGETACAO_TERRESTRE_INUNDADO = 10
17
18 -----tipo de solo
19 SOLO_MANGUE = 1
20 SOLO_MANGUE_MIGRADO = 3
21 CHANNEL_RIVER = 0
22
23 -----Model Parameters
24 areaCelula = 1 --0.09 -- Cell area in ha, areaCelula =/100*100
25 Initial_time = 1 -- Simulando de 2020 (data da imagem) a 2100 (dados do IPC registram a elevação até este ano). São 80 anos, sendo simulado 1 iteração por ano
26 Final_time = 8
27 Ra_elev = 0.125 -- Rate of sea-level rise (m) - veio do IPC: 0.90/88
28 alturaMare = 6 -- Tide height on the Maranhão Island (Ferreira, 1988).
29
30 -----Database Connection
31 Cs = CellularSpace{
32   dbType = "ado", --n obrigatorio
33   --database = "C:\\Magistério\\Pesquisa\\BR Mangue\\Bancos\\elevacaoNOVO.mdb",
34   database = "C:\\TerraMe\\Rec.mdb",
35   theme = "Cell_Usos",
36   select = { "ClasseSolos", "Alt2", "Usos" }
37 }

```

Fonte: Os autores (2022).

Banco de dados e espaço celular

O banco de dados geográfico e o espaço celular (Figura 3) foram criados em um sistema de informação geográfica desenvolvido pelo Instituto Nacional de pesquisa espacial (INPE), o TerraView 4.2.0 (disponível em <http://www.dpi.inpe.br/terralib5/wiki/doku.php?id=wiki:downloads>), com projeção/Datum: LatLong/WGS84. Adotando a resolução espacial de 1 km² (1 km x 1 km), o local de estudo foi representado por um espaço celular contendo 26.994 células (Figura 1a). Como um sistema de autômatos celulares, cada célula tem, em um determinado momento, um estado único e um conjunto de atributos que define este estado. Durante os procedimentos de simulação, os estados e atributos de cada célula podem mudar de acordo com as regras de transição. Com a célula analisada temos (i, j), as vizinhas diretas serão (i-1, j), (i+ 1, j), (i, j-1) e (i, j+ 1). Dessa forma, ao sair da célula (i, j) para se chegar na célula (i+ 1, j+ 1) são necessários dois estágios, passando-se por (i+ 1, j) ou (i, j+ 1) (Jesus e Kawano, 2002).

O estado inicial da célula corresponde às classes de cobertura terrestre (floresta de mangue, água, vegetação terrestre, áreas desenvolvidas e outras) na época inicial do ano

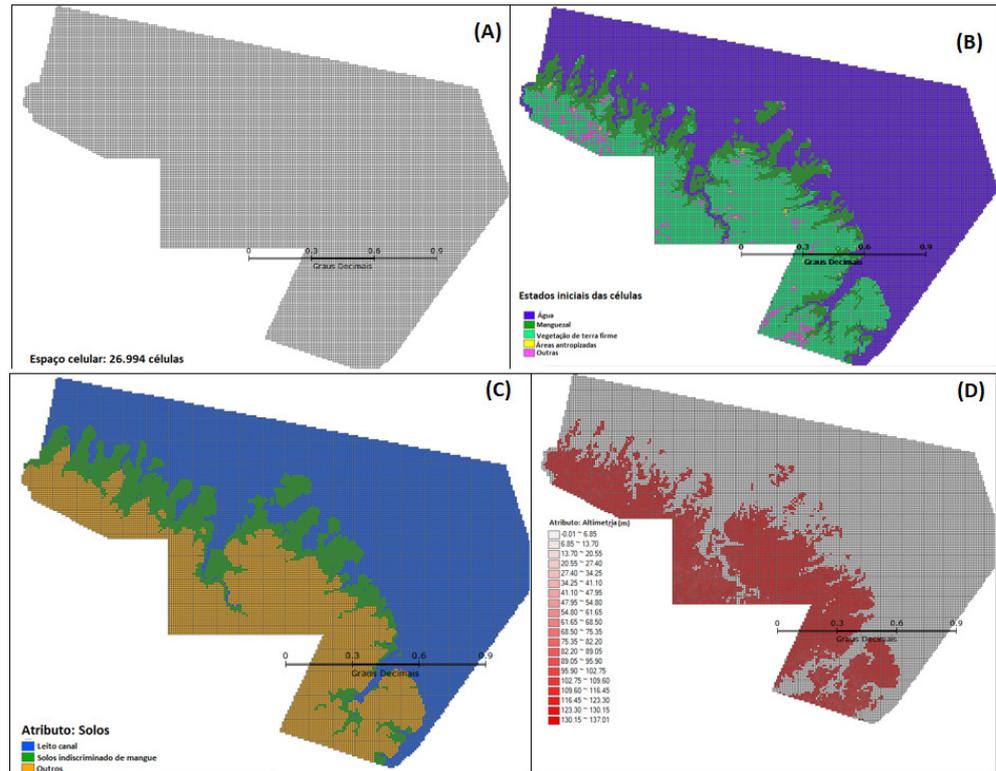
² Para mais informações da linguagem acessar <https://www.lua.org/portugues.html>

³ O código em linguagem LUA utilizado na presente pesquisa está disponibilizado como “material complementar”.

2010 (Figura 3B), e os atributos correspondem às classes solos e altimetria (Figura 3C e 3D, respectivamente).

Os dados utilizados para os estados e atributos provêm do mapeamento oficial conduzido pela empresa brasileira de pesquisa agropecuária (Embrapa), e está disponível no site do zoneamento ecológico-econômico do estado do Maranhão (<https://www.CNPM.Embrapa.br/projetos/macrozee/>).

Figura 3. (A) Espaço celular vazio (B); Estado inicial da célula; (C) Atributo celular de tipo de solo; (D) Atributo celular de altimetria

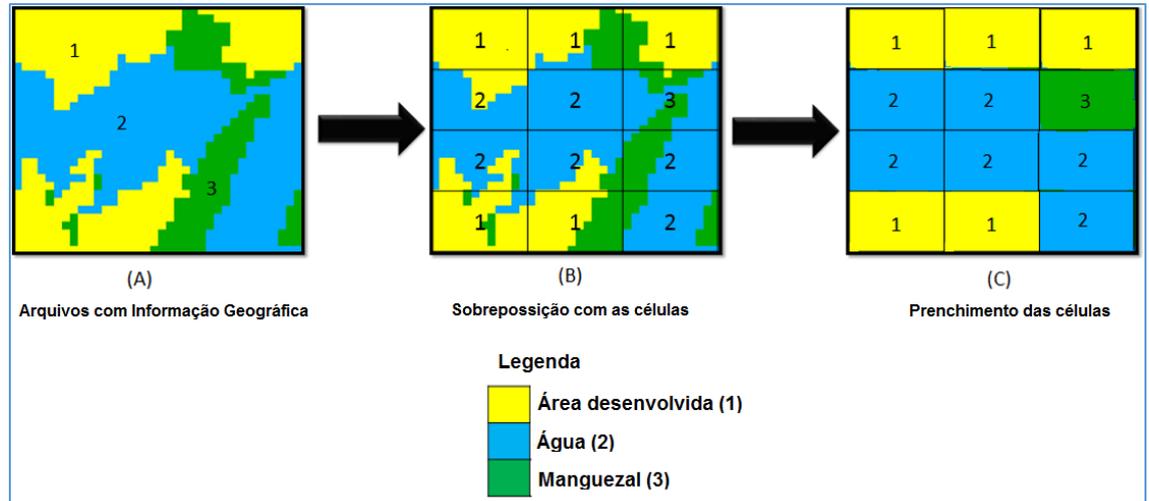


Fonte: Os autores (2022).

Inicialmente, o espaço celular estava vazio, sem nenhuma informação geográfica no banco de dados. Para preencher as células com valores de atributo, usamos o plugin “células de preenchimento” no software TerraView. O plugin “células de preenchimento” permite o cálculo de valores de atributo de tabelas associadas a camadas de tipo de célula. O objetivo é padronizar informações de várias fontes, em diferentes formatos (dados vetoriais e raster, além de outras camadas de células), agregando-os na mesma base espacial-temporal. Ele permite que atributos de tabelas dinâmicas e estáticas sejam calculados. Dependendo da representação geométrica e da semântica dos atributos de dados de entrada, diferentes operadores podem ser aplicados. Para esta pesquisa, o operador “classe majoritária” foi usado.

O espaço celular fica sobreposto nos arquivos com informações geográficas, e cada célula assumiu a informação geográfica que ocupou a maior parte da área celular (como descrito na Figura 4). Este procedimento foi usado para determinar os atributos das células em seus estados iniciais para o solo e altimetria. Para o atributo altimetria, o valor da célula final foi a média calculada de todos os valores de altimetria em cada célula.

Figura 4. Operador de classe majoritária: (A) Arquivos com informações geográficas (AIG); (B) sobreposição do espaço celular no AIG; (C) valores presentes em cada célula, resultantes do operador.



Fonte: Os autores (2022).

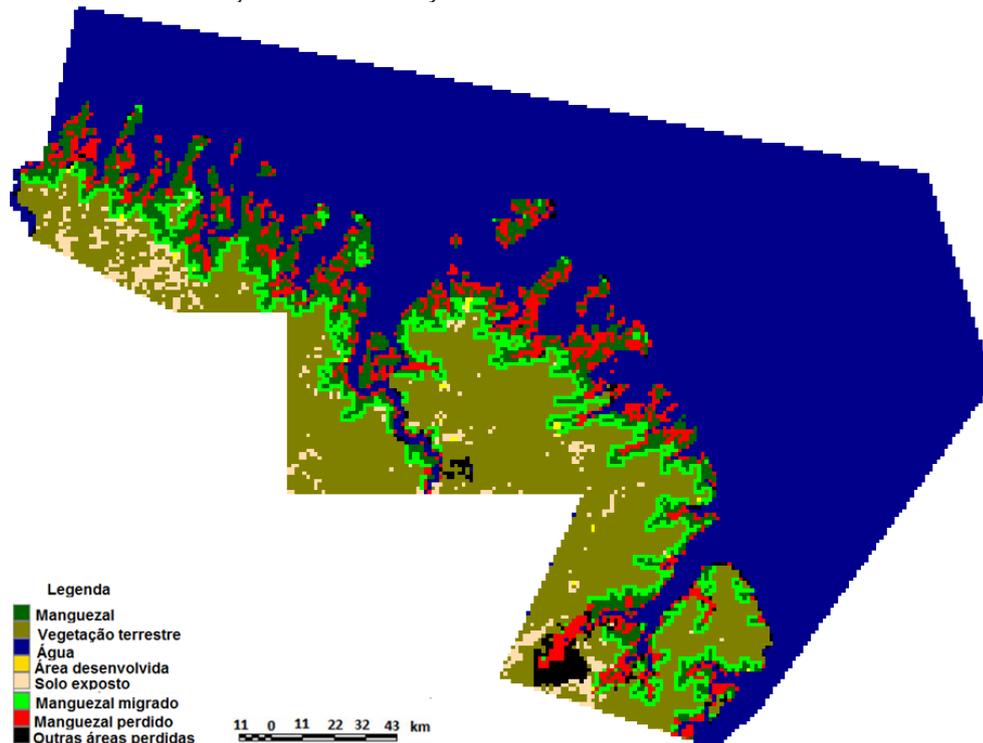
Resultados

Neste estudo, as condições iniciais para o modelo (correspondente ao ano 2020) são: mangue original, vegetação terrestre, água, áreas ocupadas e solo desencapado. Para esta condição inicial, a área de mangue calculada foi de 2.952 km², que corresponde a aproximadamente 11% da área de estudo.

No final da simulação (ano 2100), a área de mangue original foi reduzida para 1.777 km², uma perda de 39,95%, em comparação com a extensão de mangue inicial de 2.952 km². No entanto, esta perda de área de mangue original foi compensada pela extensa migração para o continente, o que resultou na adição de 1.330 km² de nova cobertura de mangue.

A área de estudo apresenta condições favoráveis para a migração de mangue ao continente, já que não existem barreiras significativas e sem insumos significativos de sedimentos. Além disso, a ocorrência de macro-marés (com variações diárias em torno de 5m) produz corredores migratórios ao longo dos muitos canais existentes, permitindo que os manguezais se movam à montante à medida que o nível do mar sobe. Portanto, embora os resultados da modelagem indiquem que há uma perda da área de mangue original da ENMM projetada, as condições locais favorecem a expansão de novas áreas de mangue para o continente (Figura 5).

Figura 5. Condição final após modelagem computacional na área de estudo (com base em um cenário de elevação 1 m em 2100)



Fonte: Os autores (2022).

A área de mangue total no final do exercício de modelagem em 2100 apresentou um valor de 3.107 km² (áreas de mangue original, menos a área de mangue perdido por inundação, frente a nova área de mangue migrado para o interior) que, quando comparado com a área de mangue original, indica um incremento de 148 km² desde o início até o final da simulação. Isso corresponde a um aumento na área de mangue total de 5%, indicando que os eventos de ENMM podem representar um impacto expansivo a área dos mangues da Amazônia Oriental. O que evidencia a expressiva capacidade de migração que os manguezais maranhenses possuem, essa informação é importante porque demonstra que os mangues do estado do Maranhão podem funcionar como um indicador natural potenciais eventos de elevação do mar, o que pode subsidiar ações de mitigação das mudanças climáticas na zonana costeira por parte dos tomadores de decisão.

Considerações Finais

Os resultados aqui apresentados sugerem que as florestas de mangue na Amazônia oriental podem potencialmente beneficiar-se da ascensão projetada do nível do mar. Estes manguezais podem usar os canais de maré existentes para migrar para o continente, à medida que o nível do mar sobe. Com base nessas descobertas, as políticas públicas brasileiras para a preservação de áreas adjacentes aos mangues amazônicos devem ser intensificadas, focalizando a identificação dos corredores migratórios para os manguezais e o desenvolvimento de estratégias de adaptação face à iminente ascensão no nível do mar. Neste contexto, devem ser desenvolvidos novos estudos que identifiquem áreas com potencial para serem colonizadas por manguezais em diferentes cenários de ENMM.

Referências

BEZERRA, D.S.; AMARAL, S.; KAMPEL, M.; ANDRADE, P.R. Simulating Sea-Level Rise Impacts on Mangrove Ecosystem adjacent to Anthropic Areas: the case of Maranhão Island, Brazilian Northeast. *Pan-American Journal of Aquatic Sciences*. 9(3): 188-198 (2014).

DANTAS, S.T.P.L., AMARO, V.E., COSTA, B.C.P. Mangrove reforestation as a mesotidial coastal protection and clean development mechanism on Macau-Serra oil field, Potiguar Basin, Northeast Brazil. *Journal of Coastal Research*, SI 64: 1268-1271 (Proceedings of the 11th International Coastal Symposium, Szczecin, Poland) (2011).

FARACO, L.F.D., ANGRETO-FILHO, J.M., LANA, P.C. Methodology for assessing the vulnerability of mangroves and fisherfolk to climate change. *Pan-American Journal of Aquatic Sciences*, 5(2): 205-223 (2010).

IPCC. *Climate Change 2013: the physical science basis*. Contribution of working group 1 to the fifth assessment report of the inter-governmental panel on climate change (Stocker, T.F., D. Qin, G.K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, and P.M. Midgley [eds.]). Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535pp (2013).

R.A. de Jesus, A. KAWANO. *Aplicação de autômatos celulares na propagação de ondas* / R.A. de Jesus, A. Kawano. – São Paulo: EPUSP, 2002. 16 p. – (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/314), 2002.

SCHAEFFER-NOVELLI, Y., CINTRÓN-MOLERO, G., SOARES, M.L.G., DE-ROSA, T. Brazilian Mangroves. *Aquatic Ecosystem Health and Management*, 3(4): 561-570 (2000).

SOARES, M.L.G. A conceptual model for responses of mangrove forest to sea level rise. *Journal of Coastal Research*, SI 56: 267-271 (2009).

WOLFRAM, S. Statistical mechanics of cellular automata. *Reviews of Modern Physics*, 55(3): 601-644 (1983).

Recebido em: 30 de novembro de 2022.

Aceito em: 20 de janeiro de 2023.