



Exposição e vulnerabilidade climática na porção leste do Arquipélago de Marajó/PA

Wilson Cabral de Sousa Júnior
Demerval Aparecido Gonçalves
Walter Mendes Filho
Alexandre Castro
Dener Ghenov
Mariana Carriles
Cláudio Bicudo Mendonça
Gabriela Kostrzewycz Pereira

Núcleo de Estudos em Infraestrutura,
Ambiente e Sustentabilidade – NINFA

Instituto Tecnológico de Aeronáutica

Como citar este artigo:

Sousa Júnior[✉], W. C.; Gonçalves, D. A.; Mendes Filho, W.; Castro, A.; Ghenov, D.; Carriles, M.; Mendonça, C. B.; Pereira, G. K. Exposição e vulnerabilidade climática na porção leste do Arquipélago de Marajó/PA: análise preliminar. Informe Técnico, n. 04. São José dos Campos: CTA/ITA, 2022. Disponível em <http://redevale.ita.br/>.

[✉] E-mail: wilson@ita.br

Introdução

O IPCC, em seu relatório mais recente, AR6 (IPCC, 2022), aponta para um aumento médio da temperatura entre 1,2° e 1,8°C no cenário RCP4.5 e 1,3° a 1,9° C no cenário RCP8.5 até 2040. Entretanto, este aumento de temperatura não será percebido de maneira uniforme em todo o planeta. De acordo com o relatório, a chamada região da monção sul-americana, que compreende parte do Centro-Oeste e da Amazônia brasileira, poderia experimentar aumentos de temperatura na estação mais quente do ano de até o dobro da taxa global. O relatório também aponta a possibilidade de ocorrência de um número 4,8 vezes maior de eventos de calor extremo com recorrência de décadas, em relação ao padrão atual até o século XIX.

Em relação à elevação do nível médio do mar (até 2040), esta pode variar de 28 cm a 55 cm, no cenário mais otimista (RCP1,9) ou de 63 cm a 1,02 m (RCP8,5, pior cenário), em comparação com a média de 1995-2014. O relatório do IPCC ressalta que a tendência atual aponta para os

cenários mais pessimistas, e enfatiza a necessidade de medidas mitigadoras e adaptativas em todos os níveis de governança.

No que concerne às anomalias de precipitação, Chou et al. (2014) apontaram variações negativas entre 5% e 45% para toda a região Centro-Oeste e Amazônia em cenários desenhados por dois modelos climáticos globais (MIROC e HADGEM) com regionalização pelo modelo ETA. Tal redução na precipitação implicaria uma redução sistemática dos fluxos na bacia amazônica, especialmente na bacia do rio Tocantins, importante contribuinte para o regime fluvial-estuarino da Baía de Marajó.

De acordo com Santos et al. (2021), uma das regiões mais vulneráveis às mudanças climáticas na costa brasileira é o Arquipélago de Marajó, especialmente alguns municípios da porção leste.

Neste contexto, objetivando melhor caracterizar a situação climática da porção leste do Arquipélago de Marajó, para subsidiar estratégias de adaptação, o presente trabalho aborda aspectos de exposição e vulnerabilidade da região, em caráter preliminar.

Os Cenários do IPCC

Os cenários modelados pelo IPCC consideram hipóteses sobre emissões futuras de gases de efeito estufa (GEE), baseadas em parâmetros do desenvolvimento econômico mundial, tais como crescimento populacional, produção e comércio global, dentre outros, e geram perfis das trajetórias de concentração de gases na atmosfera terrestre, os chamados RCP (*Representative Concentration Pathway*).

A seguir, uma breve descrição do que representam os dois cenários RCP adotados neste trabalho.

- RCP 8.5 - É o cenário de altas emissões, consistente com um futuro sem mudanças nas políticas públicas para reduzir as emissões e caracterizado pelo aumento das emissões que levam a altas concentrações atmosféricas de GEE. É muitas vezes chamado cenário “*business as usual*” (BAU), por representar um fracasso nas tentativas multilaterais para redução das emissões globais.
- RCP 4.5 - É um cenário intermediário de emissões, consistente com um futuro com reduções de emissões relativamente ambiciosas. Neste cenário, as emissões de GEE aumentam ligeiramente antes de começarem a cair por volta de 2040. Apesar das ações relativamente ambiciosas de redução de emissões, o RCP4.5 aponta para um futuro com variação na temperatura média acima dos 2°C/1,5°C estabelecidos no Acordo de Paris. Conforme os últimos balanços de emissões, é tido como um cenário base mais provável para análises de estratégias de mitigação/adaptação.

Modelos e dados

Para este estudo, foram adotados os cenários RCP4.5 e RCP8.5 do IPCC, visando contrastar possíveis situações, realista e pessimista, em termos de emissões. O primeiro assume que serão adotadas medidas para reduzir as emissões em todo o planeta, com um pico de emissões e posterior estabilização em 2060. O segundo prevê um contexto global no qual as emissões de gases de efeito estufa aumentam até 2100, atingindo níveis duas vezes maiores do que o cenário RCP 4.5.

Para a construção dos cenários climáticos, foram utilizados dados de variáveis climáticas disponíveis na plataforma PROJETA¹, fornecidos pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Esta plataforma fornece dados sobre 59 variáveis climáticas, com registros históricos para o período de 1961 a 2005, e dados projetados com base nos cenários do RCP para o período 2006-2099.

Para avaliar a elevação do nível do mar, foram considerados os dados da plataforma Central Climática. A plataforma usa dados de elevação da Climate Central's CoastalDEM², que foram revisados e publicados por Kulp e Strauss (2021).

Para a identificação de vulnerabilidades climáticas futuras, é necessário estabelecer um período de base para a comparação. Assim, o clima passado foi definido a partir da média do período entre 1961-1990 (registros de padrões climáticos normais). O clima futuro foi definido para o período entre 2021-2050.

As variáveis de projeção climáticas consideradas na análise são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Variáveis de projeção climática e fontes

Variável	Descrição	Fonte
PRCPTOT	Precipitação anual	PROJETA (INPE)
CDD	Dias consecutivos sem chuva	PROJETA (INPE)
RX1Day	Máxima precipitação diária	PROJETA (INPE)
TP2m	Temperatura do ar a 2 metros da superfície	PROJETA (INPE)
Sea Level	Áreas alagadas por aumento do nível do mar	Climate Central (CoastalDEM)

O diagnóstico climático das cidades de Soure, Salvaterra e Cachoeira do Arari foi realizado por meio da análise do comportamento das variáveis de precipitação e temperatura, bem como

¹ <https://projeta.cptec.inpe.br/#/dashboard>

² <https://coastal.climatecentral.org/>

alguns índices utilizados pela Organização Meteorológica Mundial (OMM). Dessa forma, buscou-se caracterizar as alterações observadas anteriormente na série de dados históricos, caracterizando a linha de base para comparação com os cenários climáticos.

Para reunir os dados diários das variáveis de precipitação e temperatura, foram utilizadas estações do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e da Agência Nacional de Águas (ANA) localizadas na região. Após análise das séries de dados, a estação de Soure (48000) foi escolhida como estação central para as análises climáticas. As estações Cachoeira do Arari (49012) e Santa Cruz do Arari (49011), também foram consideradas, como estações de apoio. Ambas as estações apresentam dados para períodos inferiores a 20 anos completos, mas foram utilizadas para a validação das análises realizadas com base nos dados da estação Soure.

A análise estatística dos dados baseou-se em parâmetros como: medidas de tendência central (média, máxima e mínima), medidas de dispersão, como desvio em relação à média e a elaboração do Índice de Anomalia de Chuva (RAI), extraído do total de chuvas da série histórica (1968-2020).

Área de estudo

A área de estudo em análise é a porção leste do Arquipélago de Marajó, na região costeira do estado do Pará, que engloba os municípios de Soure, Salvaterra e Cachoeira do Arari. A região recebe influência do meio marinho, estando sujeita a variações do nível do mar e dinâmica costeira, por um lado, e também é conformada por aporte continental oriundo da baía de Marajó, influenciada especialmente à sul pela bacia dos rios Araguaia e Tocantins e à norte pelo rio Amazonas.

A Figura 1 apresenta um mapa da região com a sobreposição de células do modelo climático utilizado.

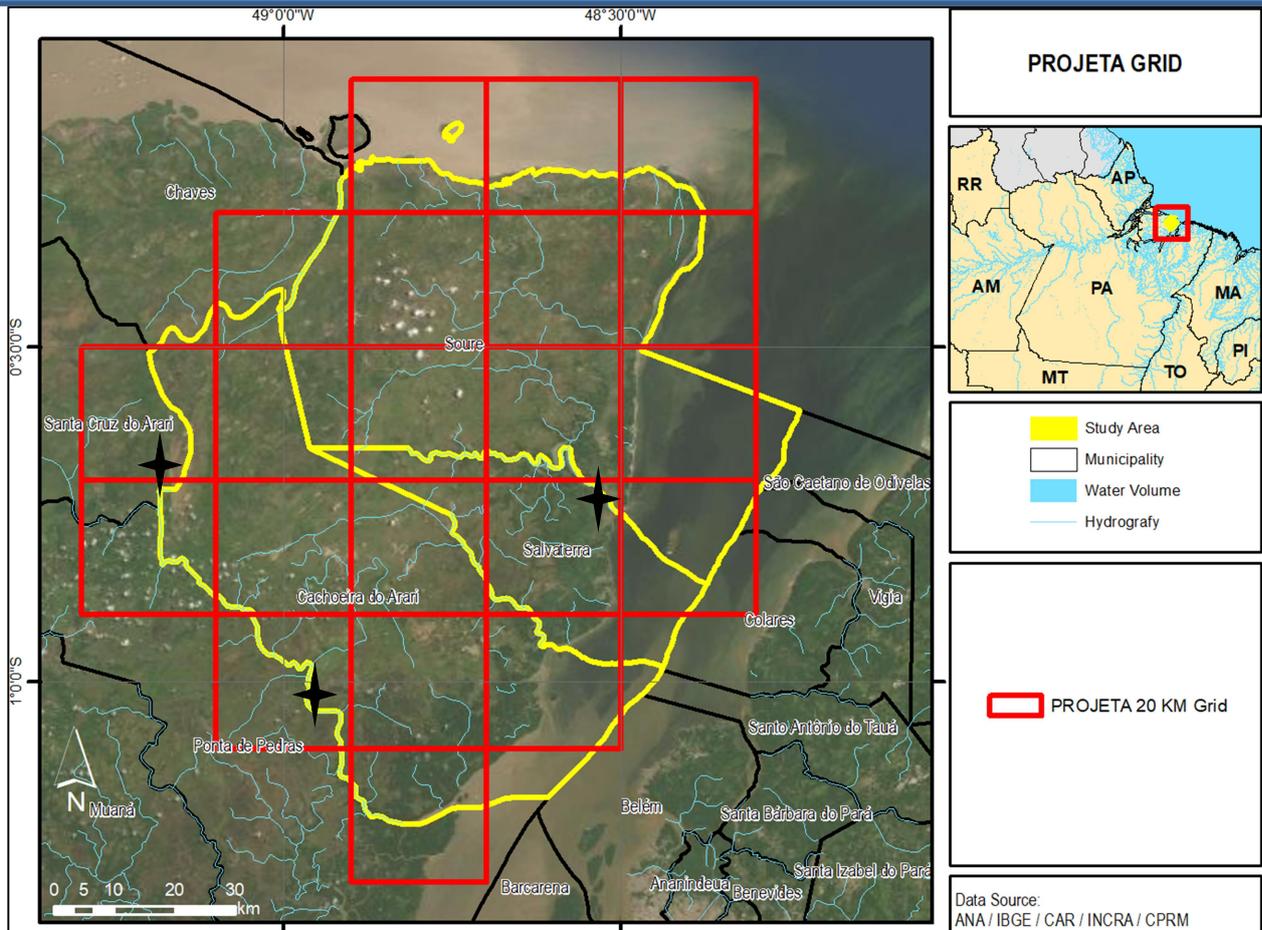


Figura 1. Porção leste do Arquipélago de Marajó (municípios de Soure, Salvaterra e Cachoeira do Arari). Sobre a região, linhas de grade do modelo climático em vermelho e marcações das estações meteorológicas consideradas (✦).

Resultados

O comportamento da variável PRCPTOT no cenário RCP 4.5, de 1961 até o final do século, em 2100, bem como sua linha de tendência, em vermelho, são apresentados na Figura 2.

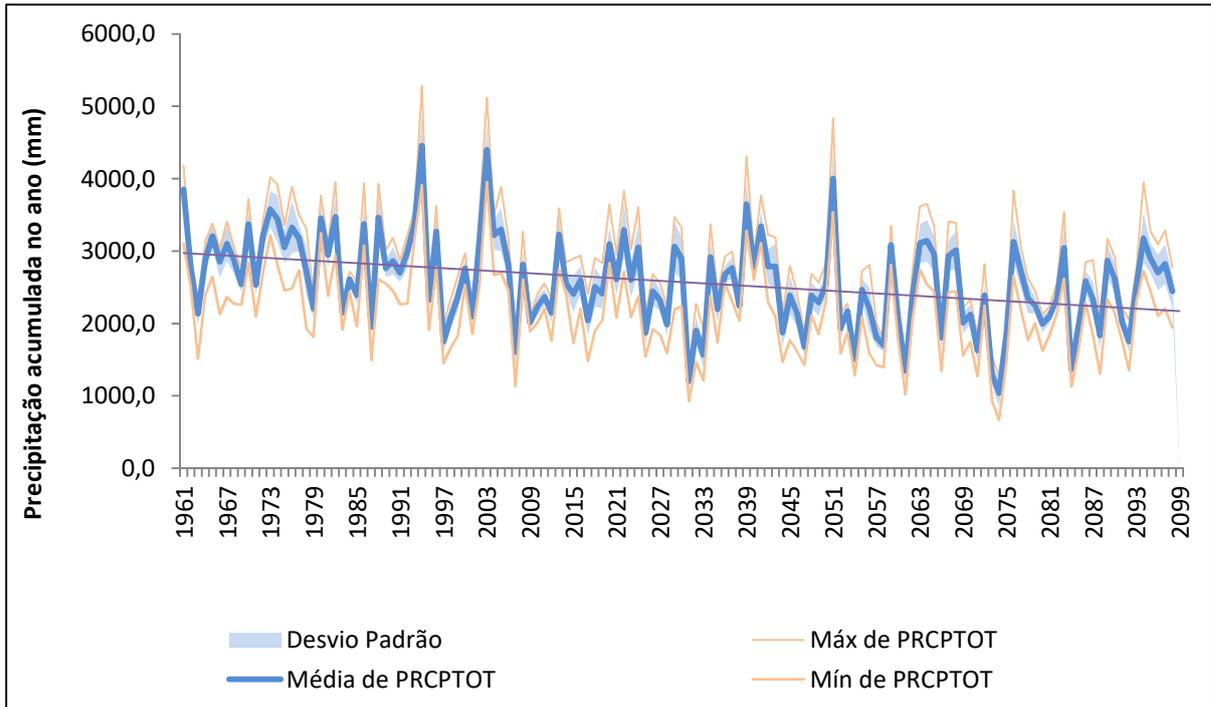


Figura 2. Precipitação anual em série histórica (base 1961-90) e projeções RCP4.5 (até 2100).

Observa-se que, no cenário RCP 4.5, projeta-se uma redução de cerca de 668 mm na precipitação anual até o final do século, equivalente a uma redução de 23% em relação à média do período 1961-1990.

O comportamento da variável PRCPTOT no cenário RCP 8.5, de 1961 até o final do século, em 2100, bem como sua linha de tendência, em vermelho, são apresentados na Figura 3.

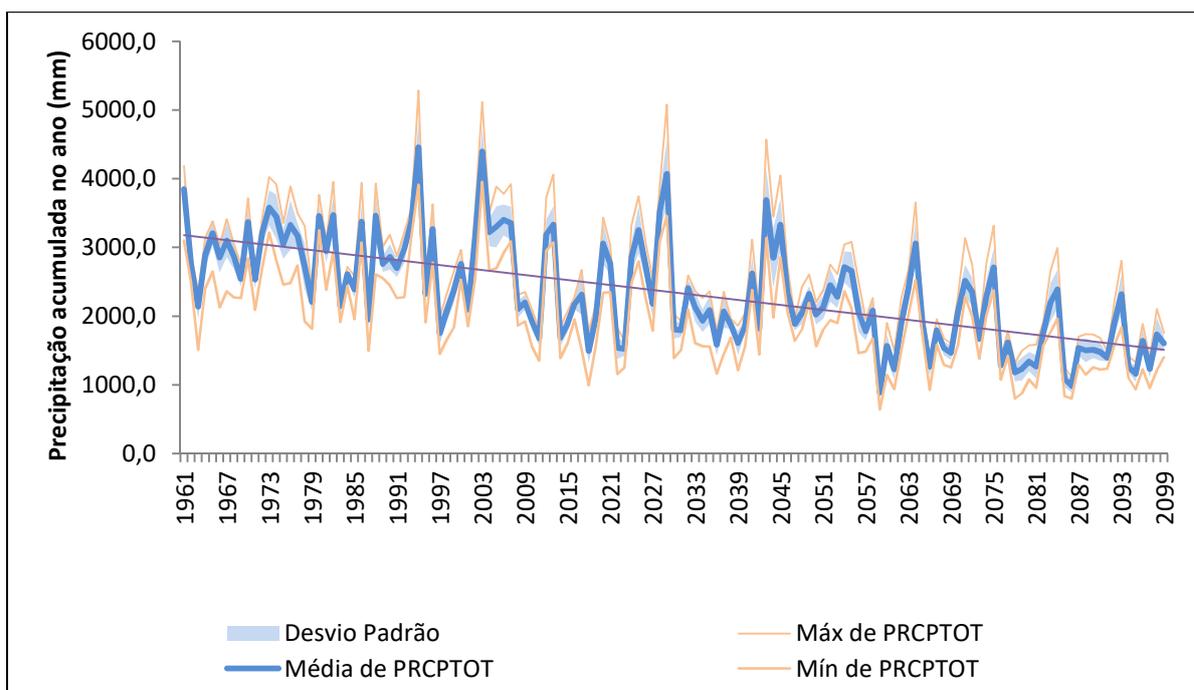


Figura 3. Precipitação anual em série histórica (base 1961-90) e projeções RCP8.5 (até 2100).

No cenário RCP 8.5, projeta-se para o final do século uma redução de cerca de 1.268 mm na precipitação anual, equivalente a uma redução de 43% em relação à média do período 1961-1990.

Os mapas da Figura 4 apresentam o diagnóstico (base) e prognóstico climático (projeções), nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, para a variável de Dias Consecutivos sem Chuva. Os valores das variáveis são exibidos na unidade de “dias”.

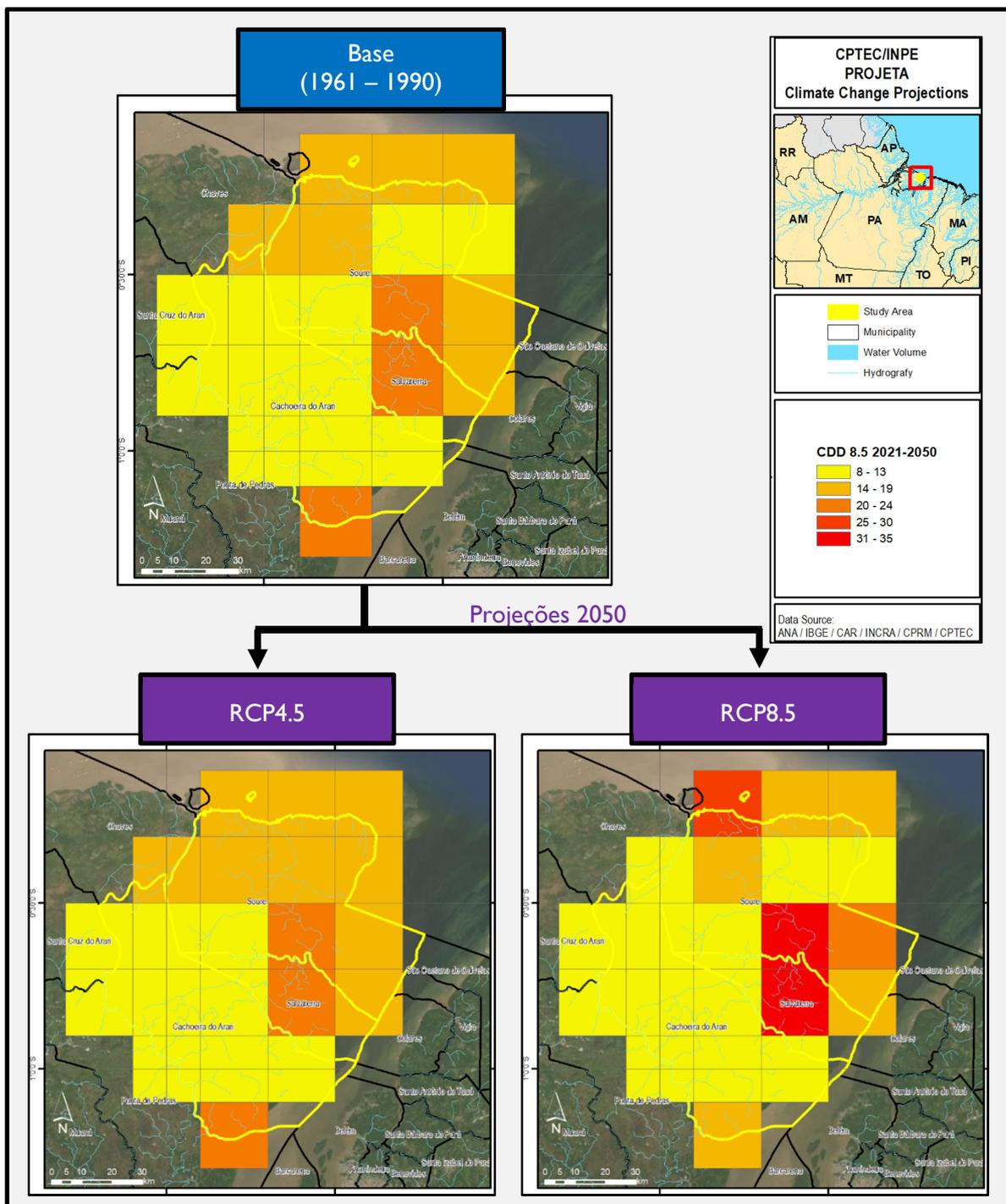


Figura 4. Dias Consecutivos sem Chuva (RCP4.5 e RCP8.5)

Há uma tendência de aumento de até 15% na média de dias consecutivos sem chuva na região estudada para o cenário RCP4.5. Já para o cenário RCP 8.5, a tendência de aumento de dias consecutivos sem chuva é maior, pois neste cenário também há uma maior redução nos volumes anuais de precipitação. Os dias consecutivos sem chuva podem aumentar em até 40% até o final do século.

O comportamento da variável TP2m (temperatura do ar a 2 metros da superfície) no cenário RCP4.5, de 1961 até o final do século, em 2100, bem como sua linha de tendência, em vermelho, são apresentados na Figura 5.

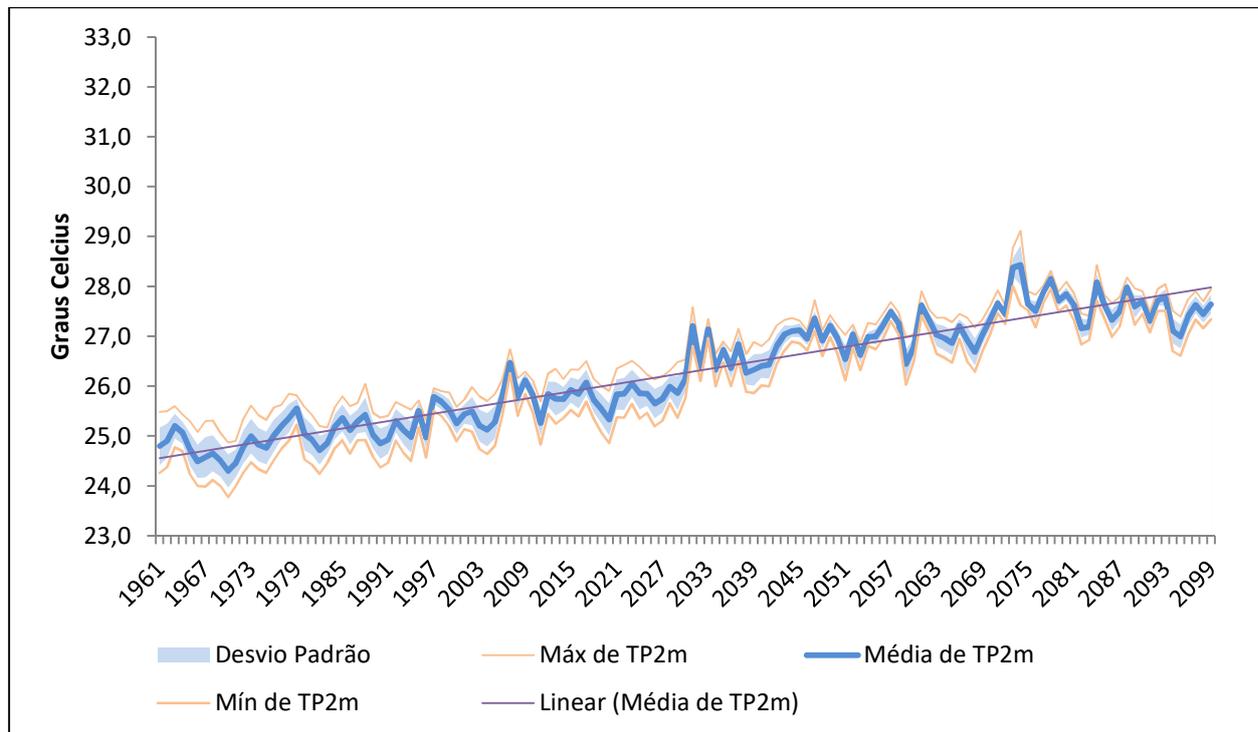


Figura 5. Precipitação anual em série histórica (base 1961-90) e projeções RCP4.5 (até 2100).

A tendência de aumento dos valores de temperatura é clara. Observa-se que, no cenário RCP4.5, projeta-se um aumento médio da temperatura de 2,7°C até o final do século, valor superior à média projetada de aquecimento global para o mesmo RCP.

O comportamento da variável TP2m para o cenário RCP8.5, de 1961 até o final do século, em 2100, bem como sua linha de tendência, em vermelho, são apresentados na Figura 6.

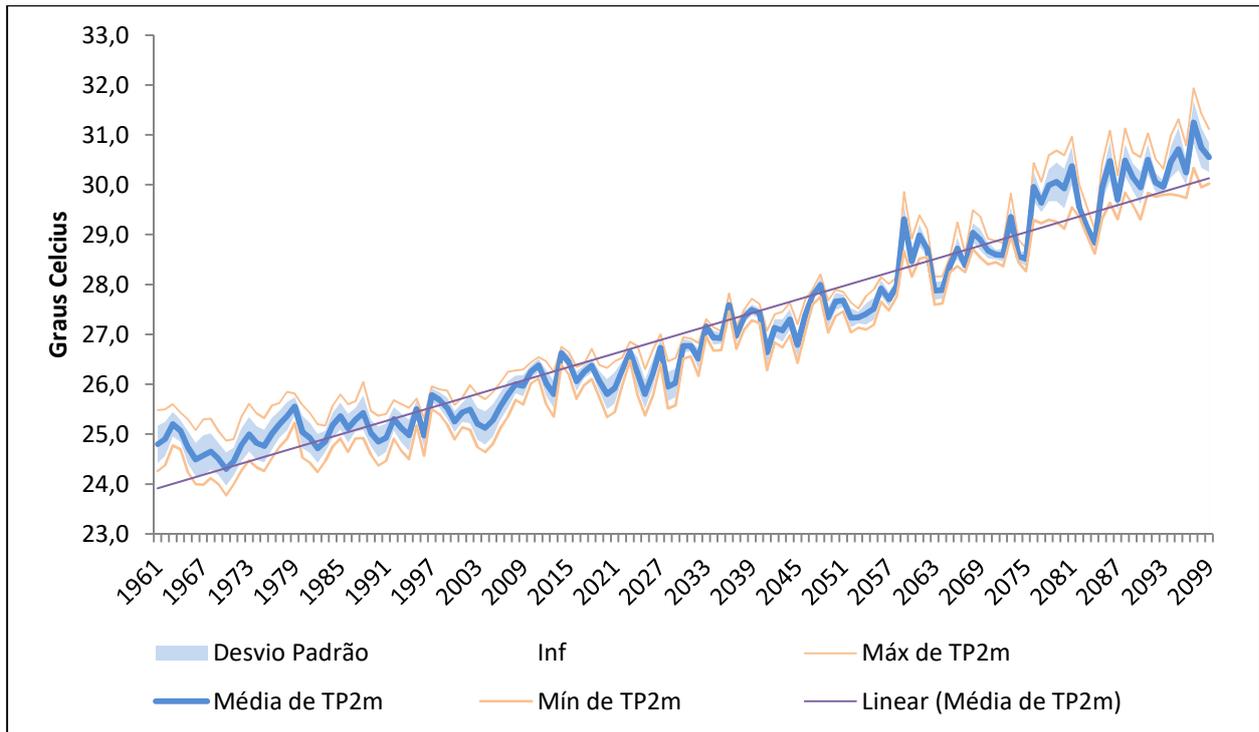


Figura 6. Precipitação anual em série histórica (base 1961-90) e projeções RCP8.5 (até 2100).

A tendência de aumento de temperatura é bem mais acentuada no cenário RCP 8.5, sendo projetada uma elevação de temperatura média de 4,9°C até o final do século, para a região de estudo.

Para a tendência de elevação do nível médio relativo do mar (Sea Level), o modelo digital de elevação costeiro CoastalDem foi alimentado com os níveis indicados pelos cenários RCP4.5 (0,5 m) e RCP8.5 (1 m).

O município de Soure apresentou a maior parte de seu território inundado a partir das projeções para ambos os cenários. No cenário RCP 4.5, o município teria mais da metade de seu território submerso, e acima de 60%, no cenário RCP 8.5. Em Salvaterra, as áreas inundáveis concentram-se na divisa com Soure e nas porções mais baixas de sua linha de costa. No cenário RCP 8.5, até 7% da área do município estaria submersa, sendo a área urbana a mais afetada. Em Cachoeira do Arari, no cenário RCP 4.5, menos de 1% de sua área estaria submersa. No cenário RCP 8.5, essas áreas ultrapassariam 5% da área do município, sendo as regiões mais afetadas a dos Projetos de Assentamento Extrativista (PAE) Urubuquara e Xipaiá.

Nos mapas da Figura 7 são apresentados o diagnóstico e prognóstico climático, nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, para a elevação do nível do mar.

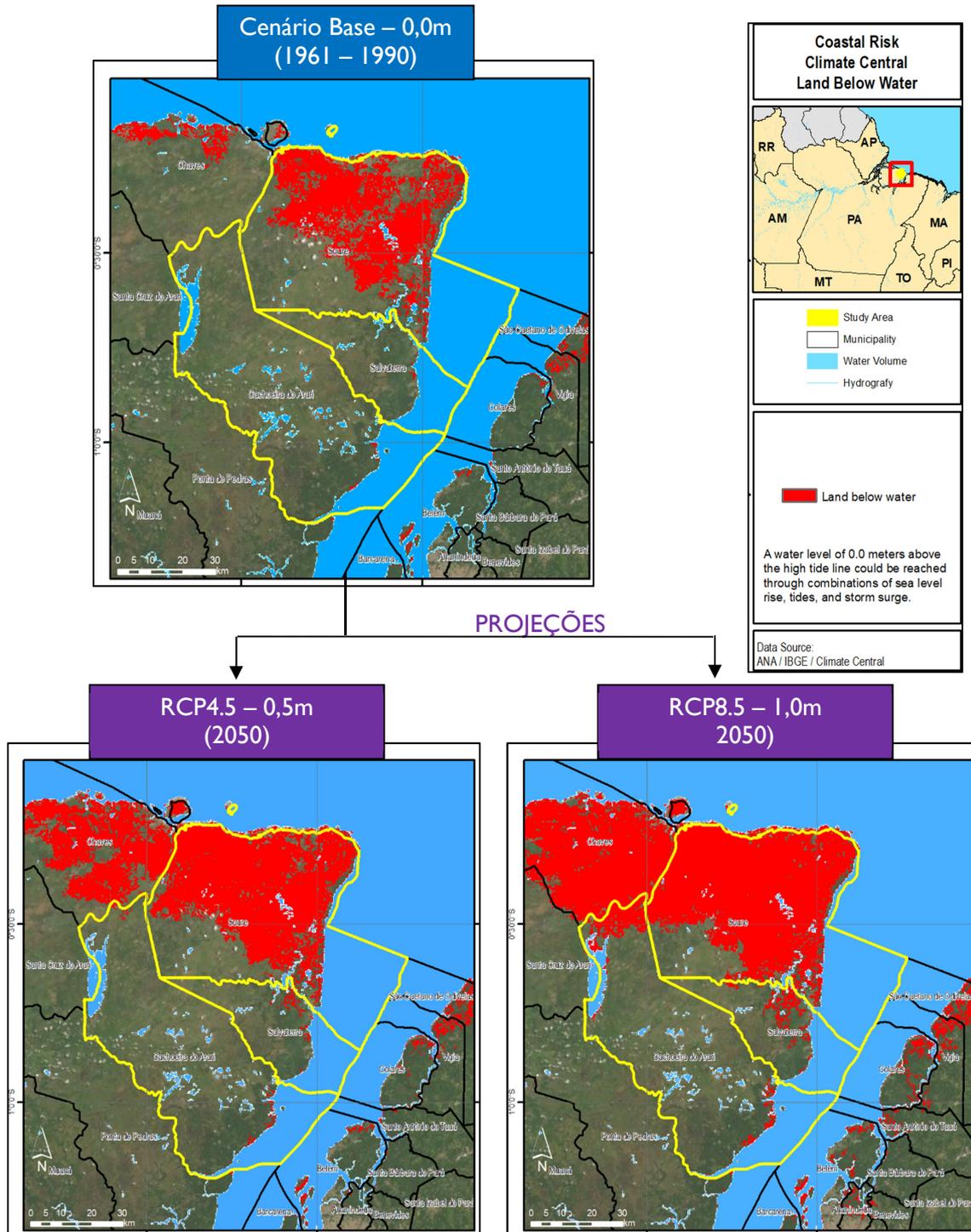


Figura 7. Mapas de áreas sob inundação com o aumento do nível médio do mar.

A Tabela 2 apresenta as porcentagens de área para cada município que estaria abaixo da água para os dois cenários de elevação do nível do mar. A área inundada no cenário base corresponde às áreas úmidas naturais.

Tabela 2 - Aumento do nível do mar em cenários RCP

Município	Área inundada em relação à área total do município (%)		
	Cenário Base - 0,0m	RCP 4.5 - 0,5m	RCP 8.5 - 1,0m
Soure	34,1	51,6	61,0
Salvaterra	0,2	2,1	7,0
Cachoeira do Arari	0,1	0,6	5,6

Considerações finais

De acordo com a análise dos dados históricos das estações meteorológicas selecionadas, ficam claras duas tendências centrais no comportamento das variáveis climáticas de precipitação e temperatura na região. Com relação à precipitação, há uma tendência de redução do volume de precipitação anual, principalmente no período chuvoso (janeiro a junho), e a ocorrência de chuvas fora de época, no período seco (julho a dezembro). Em relação à temperatura, a tendência é que os valores médios e máximos dessa variável subam na região.

A redução da precipitação na região corrobora com a redução da vazão dos rios que correm no interior do arquipélago e despejam suas águas na baía do Marajó. Este efeito, somado à elevação do nível do mar em cenários futuros, pode contribuir para o avanço das águas do mar em direção ao interior da ilha, desencadeando um maior risco de salinização dos solos e águas próximas à região costeira. Este efeito é mais acentuado para os concelhos de Soure e Salvaterra, que têm maior influência do Oceano Atlântico. Segundo relatos de moradores da comunidade quilombola do Caldeirão, durante o segundo semestre, período de estiagem, percebe-se a afluência da maré no cotidiano da comunidade, pois os moradores precisam se aprofundar para conseguir água de melhor qualidade. Esse efeito pode ser amplificado devido à forte redução da precipitação na bacia do rio Araguaia-Tocantins (Chou et al., 2014), um dos contribuintes mais importantes para o estuário.

Desde o ano de 2000, a precipitação anual tem sido caracterizada pela predominância de anos mais secos, como mostra a análise de anomalia pluviométrica. De acordo com os dados, os anos de 2007, 2015, 2018 e 2020 foram muito mais secos do que a média da normal climatológica.

Com base nos resultados das projeções climáticas apresentadas, confirma-se a tendência de redução dos volumes anuais de precipitação e aumento da temperatura na região de estudo. No cenário RCP 4.5, prevê-se que os volumes anuais de precipitação diminuam cerca de 23% até ao final do século. No cenário RCP 8.5, essa redução deve atingir cerca de 43% no mesmo período.

A análise da série histórica das estações meteorológicas da região, de 1968 a 2020, apontou uma redução de aproximadamente 11% na precipitação anual. A redução já observada está mais próxima da trajetória apresentada pelo cenário RCP 8.5. Ainda, de acordo com a

especialização das projeções climáticas para esta variável, Cachoeira do Arari e Salvaterra podem apresentar as maiores reduções de precipitação. Esse impacto climático pode afetar as lavouras da região que demandam maiores volumes de água ao longo do ano, e a irrigação pode ser necessária em períodos específicos.

Além da redução da precipitação, também foram avaliados dois efeitos secundários associados, os dias consecutivos sem chuva, que representam períodos mais longos de escassez hídrica, e a intensidade da precipitação máxima diária. Com a redução da precipitação anual, os dois cenários avaliados apresentam um aumento de dias consecutivos sem chuva na região, sendo este efeito mais intenso no cenário RCP 8.5. Identificou-se que as regiões de Salvaterra, onde se localiza a maioria das comunidades quilombolas, serão mais afetadas por períodos mais longos de escassez, assim como a porção sul de Cachoeira do Arari, onde está localizada a comunidade quilombola Gurupá. As chuvas de maior intensidade diária devem continuar a ocorrer nas proximidades das zonas urbanas de Soure e Salvaterra.

Em relação aos valores de temperatura, no cenário RCP 4.5, projeta-se um aumento médio da temperatura de cerca de 2,7°C até o final do século, em relação ao valor médio de 1961-1990. No cenário RCP 8.5, a elevação da temperatura pode chegar a 4,9 °C para o mesmo período. No diagnóstico climático, observou-se que no período de 1968 a 2020 já se nota um aumento médio de temperatura de aproximadamente 0,3°C. Nos meses de maio a junho, esse aumento já chega a 0,5°C. Esse efeito faz com que temperaturas mais altas sejam percebidas antes do início do verão pela população.

A combinação dos efeitos da redução da precipitação anual e do aumento da temperatura média na região deve contribuir para acentuar a já observada tendência de redução das áreas superficiais de água nos municípios estudados. Conforme avaliado, no período atual, esse efeito tem maior impacto no município de Soure, que já perdeu cerca de 30% dessas áreas, em relação aos valores de 1985. De acordo com as projeções, esse efeito deve se acentuar em Soure , e deve se intensificar nos municípios de Salvaterra e Cachoeira do Arari.

De acordo com as projeções de subida do nível do mar, o município mais vulnerável a este impacto climático é Soure, que poderá ter mais de 50% do seu território submerso no RCP 4.5, e mais de 60% no RCP 8.5. De acordo com a estrutura fundiária de Soure, avaliada com base no CAR, a maioria das áreas que serão inundadas em Soure, principalmente na região centro e norte do município, são propriedades de médio e grande porte que desenvolvem atividades relacionadas à pecuária bubalina. Essa situação pode fazer com que essa atividade exerça maior pressão sobre as áreas mais altas da região, ocupadas por comunidades tradicionais.

Em relação às comunidades tradicionais, boa parte das RESEX, incluindo as comunidades de Pesqueiro, Céu, Caju Una e Pedral, além da área urbana do município de Soure, devem ser afetadas pelo aumento do mar nível. Em Salvaterra, esse efeito terá maior impacto na área urbana próxima à divisa com Soure, incluindo algumas comunidades quilombolas como o Caldeirão, sendo mais significativo no cenário RCP 8.5. Em Cachoeira do Arari, a elevação do

nível do mar será sentida em parte de seu litoral, próximo aos PAEs de Urubuquara e Xipaiá. No cenário RCP8.5, o aumento do nível do mar atingirá também a região norte do município, na divisa com Soure e Chaves, podendo até atingir o Lago Arari, local de importância para o modo de vida da população.

Essas projeções afetam a porção leste do arquipélago do Marajó de diferentes formas, ora condicionadas a características geomorfológicas, ora relacionadas às condições hidrodinâmicas fluvio-costeiras, ora associadas à cobertura e usos do solo da região.

Em relação ao aporte fluvial e sua importância na morfodinâmica fluvial-costeira no leste do Marajó, estudo realizado por Costa (2014) indica que os rios Tocantins, Jacaré e Pará formam um ambiente exportador de sedimentos para a Baía do Marajó, com volumes estimados entre 3,7 e 5,4 milhões de toneladas. Uma possível redução desse aporte fluvial continental, devido à diminuição da precipitação em cenários de mudanças climáticas, poderia levar a um maior impacto da erosão costeira no leste do Marajó.

O regime de chuvas está diretamente relacionado à dinâmica flúvio-estuarina da região e às variações de salinidade. Segundo estudos de Ferreira (2013), o sistema fluvial Paracauari, que divide Salvaterra de Soure, estava relacionado principalmente à sazonalidade das chuvas. Durante a estação seca, a influência das águas marinhas é modulada pelas marés e atinge as áreas de confluência com os rios Saco e Mangueiras, com vazão líquida para a Baía de Marajó de 98.594 m³/s no ciclo de maré estudado, com salinidade média de 6 na foz do rio Paracauari. Na estação chuvosa, a vazão líquida para a Baía do Marajó foi de 65.269 m³/s ao final do ciclo de maré, com salinidades sempre inferiores a 2 nos trechos estudados. Em um futuro regime em que a penetração da maré no período seco seja aumentada (devido a um menor aporte fluvial), poderá haver um maior alcance das águas salobras no interior da baía.

No interior do arquipélago, na maior parte de Soure e Cachoeira do Arari, onde predominam as planícies e brejos, parte importante da área apresenta níveis abaixo do nível médio relativo do mar e estará sujeita à elevação do lençol freático devido ao aumento da pressão hidrostática do ambiente marinho mais alto.

Por outro lado, nessas áreas pode haver uma redução do suporte de inundação em casos de conjunção de eventos extremos de maré e precipitação, que tendem a ocorrer com maior frequência, segundo o IPCC (2022). Algumas comunidades mapeadas no município de Soure estão em condições suscetíveis a esses extremos.

Um último aspecto sobre os cenários de mudanças climáticas no leste do Marajó está relacionado ao aumento da temperatura. Com um aumento médio previsto de cerca de 1,5°C até 2040, mas com a possibilidade de extremos de temperatura mais elevados, as alterações climáticas podem afetar o número de incêndios que ocorrem anualmente, a duração da época de incêndios, a área queimada pelos incêndios e podem aumentar intensidade do fogo.



Mudanças nessas propriedades do fogo significam incêndios sazonais mais frequentes e mais intensos e, portanto, maior potencial de fogo.

Referências Bibliográficas

Chou, S. C., Lyra, A., Mourão, C., Dereczynski, C., Pilotto, I., Gomes, J., Bustamante, J., Tavares, P., Silva, A., Rodrigues, D., Campos, D., Chagas, D., Sueiro, G., Siqueira, G., Nobre, P., & Marengo, J. Evaluation of the Eta simulations nested in three global climate models. *American Journal of Climate Change*, 3, 438–454, 2014.

Costa, M. S. Aporte hídrico e de material particulado em suspensão para a baía de Marajó: contribuições dos rios Jacaré Grande, Pará e Tocantins. *Dissertação de Mestrado*. Instituto de Geociências. Universidade Federal do Pará, 2014.

El-Robrini, M.; Silva, M. M. A.; Souza Filho, P. W. M.; El-Robrini, M. H. S.; Silva Júnior, O. G.; França, C. F. *Erosão e progradação do litoral brasileiro – Pará*. 2015. Disponível em https://www.researchgate.net/publication/283915016_EROSAO_E_PROGRADACAO_DO_LITORAL_BRASILEIRO_PARA.

Ferreira, G. P. Caracterização hidrodinâmica e do transporte de sedimentos na região fluvio-estuarina do rio Paracauari, Ilha de Marajó, Pará. *Dissertação de Mestrado*. Departamento de Oceanografia. Universidade Federal de Pernambuco. 2013.

França, C.F. Análise morfológica da porção oriental dos municípios de Soure e Salvaterra, Ilha do Marajó-PA. *Tese de Doutorado*. Centro de Geociências. Belém: Universidade Federal do Pará, 2003, 144p.

International Panel on Climate Change, IPCC. *Sixth Assessment Report, AR6 - Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Disponível em <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-ii/>. Acesso em 22 JUL 2022.

Kulp, S. A.; Strauss, B. H. *CoastalDEM v2. 1: A high-accuracy and high-resolution global coastal elevation model trained on ICESat-2 satellite lidar*. 2021. Disponível em <http://www.climatecentral.org>. Acesso em 28 JUL 2022.

Oliveira, U.; Soares-Filho, B., Bustamante, M.; Gomes, L.; Ometto, J.P; Rajão, R. *Determinants of Fire Impact in the Brazilian Biomes*. 2022. Disponível em <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/ffgc.2022.735017/full#h5>.

Santos, M. R. S.; Vitorino, M. I.; Pereira, L. C. C.; Pimentel, M. A. S.; Quintão, A. F. Vulnerabilidade Socioambiental às Mudanças Climáticas: Condições dos Municípios Costeiros no Estado do Pará. *Ambiente & Sociedade*, v. 24, 2021.

* * *