



GOVERNO DO ESTADO DO CEARÁ
UNIVERSIDADE REGIONAL DO CARIRI – URCA
CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA SAÚDE – CCBS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DIVERSIDADE BIOLÓGICA E
RECURSOS NATURAIS – PPGDR

Dissertação de Mestrado

**MODELAGEM DE DISTRIBUIÇÃO DE *Fredius* (DECAPODA,
PSEUDOTHELPHUSIDAE) E IMPLICAÇÕES PARA CONSERVAÇÃO**

LUCIENE SOUSA SILVA

CRATO - CE

2024



GOVERNO DO ESTADO DO CEARÁ
UNIVERSIDADE REGIONAL DO CARIRI – URCA
CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA SAÚDE – CCBS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DIVERSIDADE BIOLÓGICA E
RECURSOS NATURAIS – PPGDR

Dissertação apresentada ao Programa de Pós -
Graduação em Diversidade Biológica e Recursos
Naturais da Universidade Regional do Cariri -
URCA, como requisito parcial para obtenção do
título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Allysson Pontes Pinheiro

**MODELAGEM DE DISTRIBUIÇÃO DE *Fredius* (DECAPODA,
PSEUDOTHELPHUSIDAE) E IMPLICAÇÕES PARA CONSERVAÇÃO**

Luciene Sousa Silva

CRATO - CE

2024

LUCIENE SOUSA SILVA

**MODELAGEM DE DISTRIBUIÇÃO DE *Fredius* (DECAPODA,
PSEUDOTHELPHUSIDAE) E IMPLICAÇÕES PARA CONSERVAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós -
Graduação em Diversidade Biológica e Recursos
Naturais da Universidade Regional do Cariri -
URCA, como requisito parcial para obtenção do
título de Mestre.

Área de Concentração: Biodiversidade

Orientador: Prof. Dr. Allysson Pontes Pinheiro

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Allysson Pontes Pinheiro - (Orientador)

Universidade Regional do Cariri – URCA

Prof. Dr. William Ricardo Amancio Santana - (Membro Interno)

Universidade Regional do Cariri – URCA

Prof. Dr. Daniel José Marcondes Lima - (Membro Externo)

Universidade Regional do Cariri – URCA

Prof. Dr. Luiz Marivando Barros - (Suplente)

Universidade Regional do Cariri – URCA

Dedico esse trabalho a Deus, que é o dono dos meus dias, e a meus pais, Francisco de Assis Silva (in memoriam) e Aldenir Feliciano de Sousa que mesmo não tendo educação formal, sempre me incentivaram a estudar.

AGRADECIMENTOS

À **Deus** pelo Dom da minha vida e por me permitir esta conquista e me fortalecer todos os dias. A Ele toda Honra e Glória!

Agradeço imensamente ao meu orientador **Prof. Dr. Allysson Pontes Pinheiro** pela oportunidade, confiança e por todos os ensinamentos, paciência e conhecimento transmitido.

Aos integrantes do Laboratório de Crustáceos do Semiárido (LACRUSE). Em especial a **Carlito, Whanderson e Iago**, pelo apoio, presteza e atenção, que foram fundamentais para o desenvolvimento e conclusão deste trabalho!

Aos professores avaliadores: **Dr. William Ricardo Amâncio Santana, Dr. Daniel José Marcondes Lima e Dr. Luiz Marivando Barros**.

Aos meus pais, **Francisco de Assis** (*in memoriam*), que mesmo não estando mais presente entre nós, sempre estará no meu coração, e a minha mãe **Aldenir Feliciano**, que é minha maior fonte de amor, inspiração, força e coragem.

A minhas irmãs **Adriana, Eliana, Luciana e Miliana**, por sempre me apoiarem e ampararem em meus piores e melhores momentos.

Um agradecimento especial ao meu namorado **Regivânio Rodrigues**, por todo apoio e incentivo em todos os meus sonhos e projetos, e que é para mim uma fonte de inspiração por sua inteligência, sabedoria e generosidade.

Gratidão a todos vocês que torcem, que vibram comigo a cada passo dado, e que de alguma forma me incentivam a continuar nessa jornada!

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - <i>Fredius ibiapaba</i> fotografado na APA da Bica do Ipu, CE.....	14
Figura 2 - Mapa de distribuição atual de <i>Fredius</i> , com pontos de ocorrência das espécies e variáveis climáticas.....	24
Figura 3 - Distribuição potenciais prevista para <i>Fredius</i> feitas com variáveis climáticas, no melhor cenário previsto de mudanças climáticas futuras RCP 2.6.....	25
Figura 4 - Distribuição potenciais prevista para <i>Fredius</i> feitas usando variáveis climáticas, no pior cenário previsto de mudanças climáticas futuras RCP 8.5.....	26

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Conjunto de 19 variáveis bioclimáticas utilizadas para predição de distribuição atual e futura de <i>Fredius</i>	17
Tabela 2 – Dados gerais de distribuição do gênero <i>Fredius</i>	19
Tabela 3 - Número de ocorrência de <i>Fredius</i> identificadas por espécie.....	21
Tabela 4 - Valores de AUC, ROC e TSS para a distribuição atual e potencial nos dois cenários de mudanças climáticas futuras RCP 2.6 e RCP 8.5.....	22
Tabela 5 – Valores de importância relativa de cada variável climática para cada modelo.....	23

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

APA	Área de Proteção Ambiental
AUC	<i>Area unther the curve</i> (área sob a acurva)
CMIP5	<i>Coupled Model Intercomparison Project phase 5</i>
GBIF	<i>Global Biodiversity Information Facility</i>
IUCN	União Internacional para Conservação da Natureza
MDE	Modelagem de Distribuição de Espécies
MNE	Modelagem de Nicho Ecológico
RCPs	<i>Representative Concentration Pathway</i>
ROC	Características Operacionais do Receptor
SIG	Sistemas de Informações Geográficas
TSS	<i>True skill statistics</i> (Estatísticas de habilidades verdadeiras)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2. MATERIAL E MÉTODOS	16
2.1 Área de estudo	16
2.2 Obtenção e tratamento dos dados de ocorrência	16
2.3 Obtenção das variáveis ambientais preditoras	17
2.4 Modelos de distribuição de espécies	18
3. RESULTADOS	19
3.1. Dados gerais da ocorrência de <i>Fredius</i>	19
3.2 Avaliação dos modelos e importância relativa das variáveis	22
3.3 Predição de distribuição atual e futura de <i>Fredius</i>.	23
4. DISCUSSÃO	27
5 CONCLUSÃO	31
REFERÊNCIAS	31

RESUMO

A modelagem de distribuição de espécies (MDE), também chamada de Modelagem de nicho Ecológico (MNE) é uma ferramenta amplamente utilizada para compreender fatores de distribuição das espécies e processos biogeográficos a partir da combinação de pontos de ocorrência e variáveis ambientais de uma determinada espécie ou grupos de espécies. Esses modelos são gerados por meio de algoritmos que constroem mapas preditivos relacionando camadas ambientais e as coordenadas geográficas dos pontos de ocorrência de uma espécie. Os caranguejos de água-doce-do-gênero *Fredius*, são pertencentes a família Pseudothelphusidae. Sua distribuição é fortemente influenciada pelas condições climáticas. Os registros disponíveis de *Fredius*, mostram uma ampla distribuição na América do Sul, sendo descritos quase que exclusivamente na Bacia Amazônica. Embora a maioria das espécies sejam classificadas como Pouco Preocupante (LC) pela União Internacional para a Conservação da Natureza e dos Recursos Naturais (IUCN), esta última alerta sobre as grandes ameaças futuras que essas espécies podem sofrer devido a degradação e perda de habitat, tornando evidente a importância e compreensão dos fatores associados a distribuição de ocorrência dessas espécies. O presente estudo teve como objetivo identificar áreas potenciais de ocorrência de *Fredius*, através da Modelagem de Distribuição de Espécies, bem como, os fatores ambientais que influenciam na sua distribuição. A metodologia baseou-se na técnica de entropia máxima, onde através do programa MaxEnt, foram realizadas interações de dados de presença das espécies com variáveis bioclimáticas na projeção da América do Sul. A importância de cada variável para todos os cenários indica que a temperatura é um fator determinante para ocorrência das espécies estudadas. Com isso as previsões futuras apontam para uma significativa perda de habitat onde as espécies ocorrem atualmente, resultando na extinção das espécies no cenário mais pessimista.

Palavras-Chave: América do Sul. Espécies. Ocorrência. Previsões. Variáveis bioclimáticas.

ABSTRACT

Species Distribution Modeling (SDM), also known as Ecological Niche Modeling (ENM), is a widely used tool to understand species distribution factors and biogeographic processes by combining occurrence points and environmental variables of a particular species or groups of species. Indeed, these models are generated through algorithms that construct predictive maps by relating environmental layers to the geographic coordinates of species occurrence points. As freshwater crabs of the genus *Fredius* belong to the Pseudothelphusidae family. Their distribution is strongly influenced by climatic conditions. The available records of *Fredius* indicate a broad distribution in South America, with descriptions predominantly found in the Amazon Basin. While most species are classified as Least Concern (LC) by the International Union for Conservation of Nature and Natural Resources (IUCN), it warns about significant future threats these species may face due to habitat degradation and loss. This underscores the importance of understanding the factors associated with the distribution of these species. The present study aimed to identify potential occurrence areas of *Fredius* through Species Distribution Modeling, as well as to investigate the environmental factors influencing their distribution. The methodology relied on the maximum entropy technique, wherein interactions between species presence data and bioclimatic variables were projected across South America using the MaxEnt program. The importance of each variable for all scenarios indicates that temperature is a determining factor for the occurrence of the studied species. As a result, future predictions point to a significant loss of habitat where the species currently occurs, resulting in the extinction of the species in the most pessimistic scenario.

Keywords: South America. Species. Occurrence. Predictions. Bioclimatic variables.

1 INTRODUÇÃO

A distribuição geográfica dos organismos é um dos pontos principais da ecologia geral, uma questão-chave para estudos evolutivos e um instrumento importante para a biologia da conservação na atualidade. Conhece-la é de fundamental importância, pois esse conhecimento a respeito da biogeografia visa à compreensão de como fatores ambientais bióticos e abióticos criam ou influenciam os padrões de biodiversidade. Os meios ecológicos capazes de criar esses padrões são base para entendimento de onde uma espécie se distribui e porquê ela se encontra naquele ambiente (Wiens, 2011; Rangel; Loyola, 2012).

Dados de distribuição são importantes para a avaliação do status de ameaça dessas espécies, uma vez que a extensão de ocorrência e o número de populações são critérios utilizados para definir as categorias de ameaça da União Internacional para Conservação da Natureza (IUCN) (Martinelli; Moraes, 2013). Hoje, a obtenção desses dados é possível através da construção de modelos de distribuição de espécies a partir de dados ambientais oriundos de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) que auxiliam o entendimento da biogeografia das espécies, ou grupo de espécies, em diferentes escalas espaciais ou temporais (Guisan; Thuiller, 2005; Giannini *et al.*, 2012). Esses modelos são chamados de Modelagem de Distribuição de Espécies (MDE) ou Modelagem de Nicho Ecológico (MNE), os quais associam dados de localidade de espécies, ou outros atributos de diversidade biológica, com preditores ambientais usando modelos estatísticos e de aprendizado de máquina para produzir descrições empíricas e previsões espaciais de relações espécie-ambiente (Franklin, 2010).

Existe uma discussão sobre o uso das terminologias: MDE e MNE, e qual terminologia seria mais adequada. Essa discordância ocorre, pois, a abordagem utiliza predominantemente dados abióticos que correspondem apenas a uma fração da complexidade de fatores que determinam o nicho de uma espécie (Peterson, 2006; Soberón, 2007; Elith; Leathwick, 2009; Giannini *et al.*, 2012). Nesse estudo, será utilizado o termo “Modelagem de Distribuição de Espécies”. Esse tipo de modelagem deve considerar o conceito fundamental de nicho ecológico, o delineamento amostral, a seleção dos algoritmos, parâmetros ou preditores que serão utilizados, contribuições dos preditores e a validação dos modelos (Araújo; Guisan, 2006). Tais modelos são formados por meio de algoritmos que constroem mapas preditivos relacionando camadas ambientais e as coordenadas geográficas dos pontos de ocorrência de uma espécie (Austin, 2002; Guisan; Thuiller, 2005; Franklin, 2009).

Ao longo dos últimos anos, houve um aumento significativo de estudos partindo do objetivo de compreender distribuições geográficas das espécies, com esse crescimento o

desenvolvimento computacional e a utilização de métodos baseados em sistemas de informações geográficas e modelagens de distribuição de espécies ganharam destaque pela disponibilidade de algoritmos para análises de dados. Essa abordagem é considerada de baixo custo e tem sido aplicada em diversas pesquisas, principalmente para a conservação de espécies e biomas (Lelay *et al.*, 2010, Werneck *et al.*, 2012, Sobral-Souza *et al.*, 2018, Adhikari *et al.*, 2019, Kolanowska; Jakubska-Busse, 2020). Vale ressaltar que a modelagem tem sido aplicada com sucesso para fornecer informações sobre a distribuição potencial de espécies mesmo com poucos pontos de ocorrência registrados (Lelay *et al.*, 2010; McCune, 2016).

O uso da modelagem de distribuição de espécies apresenta tendência de crescimento por sua significativa contribuição para conservação, pois auxilia na identificação de áreas potenciais de distribuição, locais de adaptação quanto as mudanças climáticas e servem de base para tomadas de decisão em futuros projetos de preservação.

Pontos de ocorrência de uma espécie carregam informações sobre sua distribuição. Cada ponto reflete parte do nicho realizado e, portanto, contém informações sobre as condições abióticas, as interações bióticas e a capacidade de dispersão necessárias para a ocorrência das espécies (Soberon; Peterson, 2005).

Em decorrência do desenvolvimento humano, os ecossistemas tornaram-se alvo de grandes processos de exploração. Entre eles, os ambientes aquáticos continentais são mais atingidos e sofrem grandes transformações na qualidade da água dos seus rios e riachos. Isso se deve, principalmente, ao mal gerenciamento de esgoto e de atividades como a mineração, desmatamento desenfreado e construções de represas, perda e fragmentação de habitat (Callisto; Gonçalves; Moreno, 2005; Arraes; Loghin, 2012; Giannini *et al.*, 2012).

Os ecossistemas de água doce apresentam uma vulnerabilidade a impactos de origem antropogênicos (Cavalheiro; Fialho, 2020), o que pode resultar em perdas imensuráveis em sua biodiversidade (Carvalho, 2009; Giannini *et al.*, 2012), pois as comunidades bióticas presentes nesses ecossistemas interagem com tais ações e isso pode resultar em um declínio em sua população. Por isso, algumas espécies podem ser usadas como indicadoras dos impactos sofridos em seu habitat (Callisto *et al.*, 2001). Um exemplo, são os crustáceos, pois representam um dos grupos mais diversos nesses ambientes e desempenham um papel fundamental para o funcionamento do ecossistema em que vivem (Wacker; Harzsch, 2021).

Decápoda é uma ordem de crustáceos que inclui organismos conhecidos como caranguejos, lagostas, camarões, siris, entre outros. Esta ordem é rica em espécies e atualmente compreende 17.400 espécies recentes que são divididas entre grupos principais. Dentre eles a Infraordem Brachyura que são representados por aproximadamente 7 768 espécies

(Decanet.info, 2023). No Brasil, algumas famílias de caranguejo de água doce pertencentes à infraordem Brachyura incluem Trichodactylidae e Pseudothelphusidae. A família dos Pseudothelphusidae inclui caranguejos primários de água doce exclusivos da Região Neotropical que completam todo o seu ciclo de vida independentemente da água salgada. (Yeo et al., 2008; Cumberlidge et al.; Alvarez; Villalobos, 2014). Atuam como agentes na ciclagem de nutrientes, controlam a produção primária e desempenham papel importante no fluxo de energia em ambientes límnicos (Devine; Vanni, 2002; Vieira, 2003), tornando-os, na maioria das vezes, espécies-chave em seus habitats. Por essas características, esses organismos são extremamente afetados por mudanças ambientais como temperatura, luminosidade e estresses antropogênicos (Wacker; Harzsch, 2021).

Algumas espécies pertencentes a esta família são os caranguejos-de-água-doce do gênero *Fredius* Pretzmann, 1967. Distribuídos por um vasto território que abrange cinco principais bacias hidrográficas segundo Rodrigues e Campos, (1998); Magalhães *et al.* (2014) e Santos *et al.*, (2020): bacia do rio Orinoco; bacia do rio Essequibo – Cuyuni; bacia do rio Amazonas; bacia do rio Madeira e seu afluente; e rios atlânticos. Espécies deste gênero desempenham papéis ecológicos primordiais no seu habitat (Guimarães Junior, 2021).

A maioria das espécies brasileiras estão distribuídas na Bacia Amazônica (Magalhães; Rodríguez 2002; Magalhães *et al.*, 2005; Magalhães; Barbosa; Py-Daniel, 2006; Magalhães, Pereira 2007; Magalhães, 2009; Zanetti; Castro; Magalhães, 2018), embora haja registros desses caranguejos para a região Nordeste do Brasil em pequenas manchas relictuais de floresta úmida em altitudes elevadas (Magalhães *et al.*, 2005; Pinheiro; Santana, 2016; Santos *et al.*, 2020). Segundo a literatura, trata-se de *Fredius Ibiababa* (Santos et al., 2020) (Figura 1).

Figura 1 - *Fredius ibiapaba* fotografado na APA da Bica do Ipu, CE.



Fonte: Dos Santos (2020)

Dados de distribuição destas espécies são importantes para entender sobre quais fatores influenciam na sua ocorrência. E, tendo em vista que entender a distribuição atual e potencial dos organismos é fundamental para a conservação da biodiversidade (Richardson, 2012), torna-se evidente que a MDE é um importante instrumento para fundamentar estudos voltados para a conservação de espécies. Dessa forma, o presente o estudo visa identificar áreas potenciais de ocorrência do caranguejo-de-água-doce *Fredius*, por meio de Modelos de Distribuição de Espécies, bem como, os fatores ambientais que influenciam na sua distribuição, e variáveis que possuem maior contribuição para os modelos.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

A área estudo corresponde a América do Sul, devido ao endemismo das espécies *Fredius* nesta região (Melo, 2003; Mantelatto *et al.*, 2022). Devido a sua ampla extensão territorial, a América do Sul apresenta grandes variações climáticas ao longo de toda a sua extensão (Chotamonsak *et al.*, 2011), a exemplo da temperatura média anual que pode variar de 15°C até 29°C, e as taxas de precipitação anual variam de 0 a 8029 milímetros, a depender da região (Fick; Hijmans, 2017).

2.2 Obtenção e tratamento dos dados de ocorrência

Os dados de ocorrência de *Fredius* foram obtidos a partir de uma revisão sistemática de cunho exploratório, aliado a dados obtidos da base de dados GBIF (disponibilizada em <https://www.gbif.org/>). A revisão sistemática é uma importante ferramenta que permite reunir dados importantes sobre um determinada temática, podendo auxiliar na identificação de lacunas, diagnósticos e informações úteis para a compreensão de modelos de distribuição de espécies. Para a revisão sistemática, foram utilizados manuscritos publicados no período de 1972-2022 (50 anos). Foram utilizadas as bases de dados: *Google Scholar*, *Scielo* e *Web of Science*. Não foram considerados trabalhos publicados antes de 1972 e/ou provenientes de Monografias, Dissertações, Tese, Trabalhos de Conclusão de Curso, Relatórios, além de resumos de congressos, simpósios, eventos locais, regionais, nacionais e internacionais.

Estudos sem informações de latitude e longitude tiveram suas coordenadas estimadas a partir do banco de dados de identificação geográfica *GeoNames* (www.geonames.org). Todas as coordenadas e localidades foram confirmadas usando o programa de mapeamento por satélite *Google Earth* (<https://www.google.com.br/intl/pt-BR/earth/>) considerando o sistema de coordenadas geográficas em WGS84. Para evitar sobreposição dos pontos, não foram utilizadas localidades com coordenadas geográficas próximas ou iguais.

Ao final, todas as informações válidas obtidas foram unidas em uma tabela de dados registrando-se: (1) tipo de dado (primário ou secundário); (2) origem do dado; (3) espécie; (4) ano; (5) País de origem da ocorrência; (4) e (6) coordenadas geográficas (latitude e longitude), e outra tabela foi construída com a sua distribuição por número de espécie na região amazônica (vide seção “Resultados”).

2.3 Obtenção das variáveis ambientais preditoras

Para a realização da predição de distribuição atual de *Fredius*, utilizamos o conjunto de 19 variáveis bioclimáticas (Tabela 1), obtido na base de dados do Worldclim (www.worldclim.org). Para isso, foi utilizada a função “*getData*” do pacote “*raster*” do software R (R Development Core Team, 2023). Dados climáticos foram obtidos com resolução de 5 arc-min. Em seguida, os dados bioclimáticos foram filtrados para a América do Sul, a fim de evitar inferências bioclimáticas de outras regiões nos nossos modelos. Após esse procedimento, os dados bioclimáticos foram inspecionados quanto a sua multicolinearidade, com o uso da função “*vifstep*” do pacote “*usdm*” do software R. Essa função utiliza o método *stepwise* para remover variáveis com alto valor de correlação com outras variáveis dentro do modelo (Naimi *et al.*, 2014). Assim, apenas as variáveis não colineares foram utilizadas para a modelagem.

Tabela 1 – Conjunto de 19 variáveis bioclimáticas utilizadas para predição de distribuição atual e futura de *Fredius*.

Código	Variável Ambiental
Bio01	Temperatura Média Anual
Bio02	Faixa Diurna Média (Média mensal (temperatura máxima - temperatura mínima))
Bio03	Isotérmica (BIO2/BIO7) ($\times 100$)
Bio04	Sazonalidade da Temperatura (desvio padrão $\times 100$)
Bio05	Temperatura máxima do mês mais quente
Bio06	Temperatura mínima do mês mais frio
Bio07	Faixa anual de temperatura (BIO5-BIO6)
Bio08	Temperatura média do trimestre mais úmido
Bio09	Temperatura Média do Trimestre Mais Seco
Bio10	Temperatura média do trimestre mais quente
Bio11	Temperatura Média do Trimestre Mais Frio
Bio12	Precipitação Anual
Bio13	Precipitação do mês mais chuvoso
Bio14	Precipitação do Mês Mais Seco
Bio15	Sazonalidade da Precipitação (Coeficiente de Variação)
Bio16	Precipitação do trimestre mais úmido
Bio17	Precipitação do Trimestre Mais Seco
Bio18	Precipitação do trimestre mais quente
Bio19	Precipitação do trimestre mais frio

As predições de distribuição de *Fredius* em cenários futuros foram realizadas com o uso do modelo *Coupled Model Intercomparison Project phase 5* (CMIP5). Os dados foram obtidos da base de dados do *Worldclim* (www.worldclim.org), com o uso da função “*getData*” do pacote “*raster*” do software R (*R Development Core Team*, 2023). Os cenários RCPs (*Representative Concentration Pathway*) de 2.6 e 8.5 foram utilizados para indicar as variações climáticas no ano de 2070. No RCP 2.6 as emissões de dióxido de carbono (CO₂) devem diminuir até chegar a zero aproximadamente em 2100, com temperatura média global aumentando 2 °C. Já o cenário RCP 8.5 é considerado o pior cenário possível para a mesma perspectiva, onde prevê um aumento de temperatura média global substancial, possivelmente superior a 4°C até o final do século (Van loon *et al.*, 2011; IPCC, 2014, 2019). Portanto, avaliamos as predições de distribuição de espécies de *Fredius* para a América do Sul no melhor e pior cenário de mudanças climáticas previstos.

2.4 Modelos de distribuição de espécies

Os modelos de distribuição de espécie foram gerados utilizando dois algoritmos, sendo eles: modelo BIOCLIM (Booth *et al.*, 2014); modelo de Máxima Entropia ou MaxEnt (Phillips *et al.*, 2017). Para cada modelo foram criados 1000 pontos de pseudoausência. Além disso, cada modelo foi particionado em 75% de dados para teste e 25% de dados para treinamento. Para isso, foi utilizada a função “*kfold*” do pacote “*raster*” em R (*R Development Core Team* 2023).

Para determinar os melhores modelos para as predições de distribuição atuais e futuras de *Fredius* foram utilizados os valores de características operacionais do receptor (ROC) com base na área sob a curva (AUC) (Fielding; Bell, 1997), bem como as medidas de estatísticas de habilidades verdadeiras (TSS) (Allouche; Tsoar; Kadmon, 2006). A área sob a curva (AUC) apresenta a seguinte interpretação: quanto mais próximo do valor um, ou seja, quanto mais distante o resultado do modelo for da previsão aleatória, melhor o desempenho do modelo (Rushton; Oemerod; Kerby, 2004; Phillips; Anderson; Chapiro, 2006). Uma área igual a 1 representaria o “modelo perfeito”; uma área de 0,5 indicaria que o modelo seleciona ao acaso (Giannini *et al.*, 2012). Do ponto de vista prático, um teste de validação pode adotar os valores de AUC a seguir como indicadores da qualidade do modelo (Metz, 1986): excelente (0,9 – 1); bom (0,8 – 0,9); médio (0,7 – 0,8); ruim (0,6 – 0,7); muito ruim (0,5 – 0,6).

Por fim, os mapas de adequabilidade da distribuição atual e futura de *Fredius* foram plotados. Para isso, foi utilizada a função “*ensemble*” do pacote “*sdm*” (Naimi; Araujo, 2016), em seguida os foram plotados os gráficos de adequabilidade atual com potenciais percas e

ganhos de habitat para *Fredius* sendo adicionalmente plotados os pontos de ocorrência utilizados para as análises.

3. RESULTADOS

3.1. Dados gerais da ocorrência de *Fredius*

A tabela 2 a seguir foi construída a partir dos dados obtidos na revisão de literatura exploratória realizada como produto primário dessa dissertação. A tabela mostra detalhes da distribuição de espécies do gênero *Fredius*, segundo dados da literatura dos últimos 50 anos.

Tabela 2 – Dados gerais de distribuição do gênero *Fredius*.

ID	TIPO	ORIGEM	ESPÉCIE	ANO	PAÍS	LONG	LAT
1	Secund	Gbif	<i>Fredius reflexifrons</i>	2017	Brazil	-47,66302	-3,30485
2	Secund	Gbif	<i>Fredius denticulatus</i>	2016	French Guiana	- 52,043952	4,517322
3	Secund	Gbif	<i>Fredius avilai</i>	2014	Brazil	- 60,903057	- 12,555834
4	Secund	Gbif	<i>Fredius reflexifrons</i>	2012	Brazil	- 40,746472	-4,313944
5	Secund	Gbif	<i>Fredius fittkau</i>	2012	Guyana	-59,88066	5,00322
6	Secund	Gbif	<i>Fredius estevisi</i>	2008	Venezuela	- 61,505278	5,955694
7	Secund	Gbif	<i>Fredius denticulatus</i>	2005	Brazil	-60,10045	-2,3497
8	Secund	Gbif	<i>Fredius ykaa</i>	2004	Brazil	- 57,146472	-3,923194
9	Secund	Gbif	<i>Fredius chaffanjoni</i>	2004	Venezuela	-66,35894	4,75132
10	Secund	Gbif	<i>Fredius ykaa</i>	2004	Brazil	- 57,189722	-3,746667
11	Secund	Gbif	<i>Fredius fittkau</i>	2003	Brazil	- 63,791111	1,808611
12	Secund	Gbif	<i>Fredius chaffanjoni</i>	2003	Venezuela	-67,081	3,959
13	Secund	Gbif	<i>Fredius platyacanthus</i>	2003	Brazil	- 63,729722	2,4975
14	Secund	Gbif	<i>Fredius reflexifrons</i>	2002	Brazil	- 59,770278	-2,448889
15	Secund	Gbif	<i>Fredius stenolobus</i>	2000	Venezuela	-64,428	5,934
16	Secund	Gbif	<i>Fredius stenolobus</i>	2000	Venezuela	-64,478	5,898
17	Secund	Gbif	<i>Fredius stenolobus</i>	2000	Venezuela	-64,493	5,878
18	Secund	Gbif	<i>Fredius stenolobus</i>	2000	Venezuela	-64,313	5,558
19	Secund	Gbif	<i>Fredius stenolobus</i>	2000	Venezuela	-64,405	5,828
20	Secund	Gbif	<i>Fredius stenolobus</i>	2000	Venezuela	-64,487	6,282
21	Secund	Gbif	<i>Fredius stenolobus</i>	2000	Venezuela	-64,527	6,325
22	Secund	Gbif	<i>Fredius stenolobus</i>	2000	Venezuela	-65,048	6,327
23	Secund	Gbif	<i>Fredius stenolobus</i>	2000	Venezuela	-65,025	6,338
24	Secund	Gbif	<i>Fredius stenolobus</i>	2000	Venezuela	-64,798	6,892

25	Secund	Gbif	Fredius stenolobus	2000	Venezuela	- 65,034283	6,335783
26	Secund	Gbif	Fredius stenolobus	2000	Venezuela	- 64,528333	6,321667
27	Secund	Gbif	Fredius reflexifrons	1999	Brazil	-60,1275	-3,1775
28	Secund	Gbif	Fredius reflexifrons	1997	Brazil	-50,9	0,766667
29	Secund	Gbif	Fredius stenolobus	1997	Brazil	- 63,843617	2,569167
30	Secund	Gbif	Fredius stenolobus	1997	Brazil	- 63,832222	2,671667
31	Secund	Gbif	Fredius fittkai	1996	Brazil	-65,5925	-1,171389
32	Secund	Gbif	Fredius fittkai	1995	Brazil	- 66,122222	0,625833
33	Secund	Gbif	Fredius fittkai	1995	Brazil	- 65,249167	0,571111
34	Secund	Gbif	Fredius platyacanthus	1995	Brazil	- 63,871667	2,608056
35	Secund	Gbif	Fredius reflexifrons	1995	Brazil	-47,315	-1,191667
36	Secund	Gbif	Fredius fittkai	1994	Brazil	- 63,617222	1,765833
37	Secund	Gbif	Fredius fittkai	1994	Brazil	- 63,653611	1,603611
38	Secund	Gbif	Fredius fittkai	1994	Brazil	- 64,809167	1,195833
39	Secund	Gbif	Fredius fittkai	1994	Brazil	-65,0625	0,692778
40	Secund	Gbif	Fredius reflexifrons	1984	Brazil	- 59,961944	-2,925556
41	Secund	Gbif	Fredius denticulatus	1982	Brazil	- 59,974722	-2,930556
42	Secund	Gbif	Fredius beccarii	1980	Suriname	-57,65	3,57
43	Secund	Gbif	Fredius denticulatus	1974	Suriname	- 57,275278	5,379167
44	Secund	Gbif	Fredius denticulatus	1964	Brazil	-48,4833	-1,45
45	Secund	Gbif	Fredius reflexifrons	1865	Brazil	- 53,043945	-3,210556
46	Secund	Gbif	Fredius reflexifrons	NA	Brazil	-57,5875	-0,564722
47	Secund	Gbif	Fredius reflexifrons	NA	French Guiana	-53,23477	3,92404
48	Secund	Gbif	Fredius reflexifrons	NA	Guyana	-60	6
49	Secund	Gbif	Fredius fittkai	NA	Venezuela	- 64,722767	2,326167
50	Secund	Gbif	Fredius ykaa	NA	Brazil	- 57,189717	-3,746667
51	Secund	Santos et al. 2020	Fredius Ibiapaba	2017	Brazil	- 40,746667	-4,295
52	Secund	Santos et al. 2020	Fredius Ibiapaba	2017	Brazil	- 40,745278	-4,295
53	Secund	Santos et al. 2020	Fredius Ibiapaba	2017	Brazil	- 40,743056	-4,298889
54	Secund	Santos et al. 2020	Fredius Ibiapaba	2017	Brazil	- 40,745278	-4,301389
55	Secund	Santos et al. 2020	Fredius Ibiapaba	2017	Brazil	- 40,746667	-4,309444
56	Secund	Santos et al. 2020	Fredius Ibiapaba	2017	Brazil	- 40,746667	-4,314167

57	Secund	Santos et al. 2020	Fredius Ibiapaba	2017	Brazil	-40,7525	-4,327778
58	Secund	Santos et al. 2020	Fredius Ibiapaba	2017	Brazil	- 40,756389	-4,338333
59	Secund	Santos et al. 2020	Fredius Ibiapaba	2017	Brazil	- 40,758889	-4,3425
60	Secund	Santos et al. 2020	Fredius Ibiapaba	2017	Brazil	- 40,764444	-4,369722
61	Secund	Magalhães, 2009	Fredius adpressus	2009	Venezuela	- 62,250525	-8,617053
62	Secund	Magalhães et al., 2014	Fredius buritizalis	2014	Brazil	-61,95886	- 10,852063
63	Secund	Suárez, 2015	Fredius cuaoensis	2015	Venezuela	- 62,250525	-8,617053
64	Secund	Rodriguez & Campos, 1998; Cumberlidge, Alvarez & Villalobos, 2014; Mora-day et al., 2009; Magalhães et al., 2014; Zanetti et al., 2018	Fredius beccarii	1980	Guyana	- 61,507462	-6,040098
65	Secund	Rodriguez & Campos, 1998; Cumberlidge et al., 2014; Cumberlidge, Alvarez & Villalobos, 2014; Zanetti et al., 2018	Fredius granulatus	1998	Colombia	- 71,318895	-1,040349
66	Secund	Rodriguez & Campos, 1998; Cumberlidge et al., 2014; Cumberlidge, Alvarez & Villalobos, 2014; Zanetti et al., 2018	Fredius beccarii	1980	Venezuela	- 61,700519	-6,500378

Foram avaliados um total de 66 pontos de ocorrência de *Fredius* (Tabela 2), com localização geográfica principalmente na região Norte do Brasil, local correspondente ao território da floresta amazônica.

Tabela 3 - Número de ocorrência de *Fredius* identificadas por espécie.

Espécie	Número de espécies
<i>Fredius adpressus</i> Rodríguez & Pereira, 1992	n = 1
<i>Fredius avillai</i> Martins, Nascimento, Santos, Magalhães & Pinheiro, 2021	n = 1
<i>Fredius beccari</i> (Coifmann, 1939)	n = 3

<i>Fredius buritizatis</i> Magalhães & Mantelatto, 2014	n = 1
<i>Fredius cuaoensis</i> Suárez, 2015	n = 1
<i>Fredius chaffanjoni</i> (Rathbun, 1905)	n = 2
<i>Fredius denticulatus</i> (H. Milne-Edwards, 1853)	n = 5
<i>Fredius estevisi</i> (Rodriguez, 1966)	n = 1
<i>Fredius fittkaui</i> (Bott, 1967)	n = 10
<i>Fredius granulattus</i> Rodríguez & Campos, 1998	n = 1
<i>Fredius Ibiapaba</i> Santos, Tavares, Silva, Cervini, Pinheiro & Santana, 2020	n = 11
<i>Fredius platyacanthus</i> Rodriguez & Pereira, 1992	n = 2
<i>Fredius reflexifrons</i> (Ortmann, 1897)	n = 10
<i>Fredius stenolobus</i> Rodriguez & Suárez, 1994	n = 14
<i>Fredius ykaa</i> Magalhães, 2009	n = 3

3.2 Avaliação dos modelos e importância relativa das variáveis

Os modelos gerados a partir do algoritmo MaxEnt se adequaram melhor aos parâmetros estatísticos de AUC e TSS, apresentando excelentes desempenho preditivos, com valores de AUC acima de 90% (Tabela 4), onde modelos com um AUC > 0.9 apresentam um excelente poder discriminatório. Portanto, os testes foram considerados adequados para a predição de distribuição de *Fredius*.

Tabela 4 - Valores de AUC e TSS para a distribuição atual e potencial nos dois cenários de mudanças climáticas futuras RCP 2.6 e RCP 8.5.

Modelo	Cenário	AUC	Cor	TSS	Deviance
maxent	Presente	0.92	0.56	0.71	0.56
bioclim	Presente	0.58	0.11	0.19	1.45
maxent	Rcp 8.5	0.91	0.53	0.72	0.62
bioclim	Rcp 8.5	0.69	0.3	0.39	1.08
maxent	Rcp 2.6	0.92	0.56	0.74	0.59
bioclim	Rcp 2.6	0.66	0.24	0.32	1.16

No que diz respeito as variáveis mais importantes para o modelo, o estudo mostra que para o presente foram: Precipitação do mês mais chuvoso (0,42), isotérmica (temperatura não muda) (0,39), precipitação do trimestre mais quente (0,17); para o cenário RCP 2.6 – Isotérmica (0,40), precipitação do mês mais chuvoso (0,36), precipitação do trimestre mais quente (0,14); e cenário RCP 8.5 – Temperatura média do trimestre mais seco (0,33), Isotérmica (0,26), precipitação do mês mais chuvoso (0,14), faixa diurna média (média mensal (temperatura

máxima – temperatura mínima)) (0,14). Além disso, os valores de importância relativa de cada variável climática para cada modelo estão disponíveis na Tabela 5.

Tabela 5 – Valores de importância relativa de cada variável climática para cada modelo

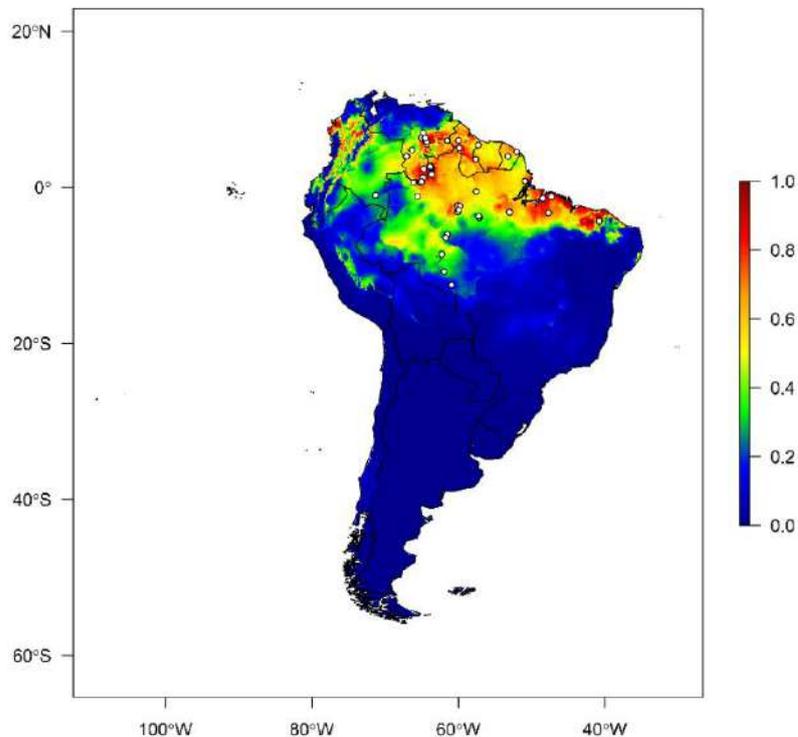
Cenário presente	Descrição	Cor	AUC
bio_02	Faixa Diurna Média (Média mensal (temperatura máxima - temperatura mínima))	0.02	0.02
bio_03	Isotérmica (BIO2/BIO7) ($\times 100$)	0.39	0.27
bio_08	Temperatura média do trimestre mais úmido	0.02	0.01
bio_09	Temperatura Média do Trimestre Mais Seco	0.00	0.00
bio_13	Precipitação do mês mais chuvoso	0.42	0.32
bio_14	Precipitação do Mês Mais Seco	0.01	0.01
bio_15	Sazonalidade da Precipitação (Coeficiente de Variação)	0.06	0.05
bio_18	Precipitação do trimestre mais quente	0.17	0.12
bio_19	Precipitação do trimestre mais frio	0.11	0.09
Cenário Rcp 8.5		Cor	AUC
bio_02	Faixa Diurna Média (Média mensal (temperatura máxima - temperatura mínima))	0.14	0.11
bio_03	Isotérmica (BIO2/BIO7) ($\times 100$)	0.26	0.16
bio_08	Temperatura média do trimestre mais úmido	0.11	0.08
bio_09	Temperatura Média do Trimestre Mais Seco	0.33	0.26
bio_13	Precipitação do mês mais chuvoso	0.14	0.11
bio_14	Precipitação do Mês Mais Seco	0.01	0.01
bio_15	Sazonalidade da Precipitação (Coeficiente de Variação)	0.01	0.00
bio_18	Precipitação do trimestre mais quente	0.11	0.07
bio_19	Precipitação do trimestre mais frio	0.01	0.01
Cenário Rcp 2.6		Cor	AUC
bio02	Faixa Diurna Média (Média mensal (temperatura máxima - temperatura mínima))	0.00	0.00
bio03	Isotérmica (BIO2/BIO7) ($\times 100$)	0.40	0.32
bio08	Temperatura média do trimestre mais úmido	0.00	0.00
bio09	Temperatura Média do Trimestre Mais Seco	0.04	0.03
bio13	Precipitação do mês mais chuvoso	0.36	0.28
bio14	Precipitação do Mês Mais Seco	0.00	0.00
bio15	Sazonalidade da Precipitação (Coeficiente de Variação)	0.09	0.05
bio18	Precipitação do trimestre mais quente	0.14	0.13
bio19	Precipitação do trimestre mais frio	0.04	0.03

3.3 Predição de distribuição atual e futura de *Fredius*.

Conforme o modelo de distribuição atual (Figura 2), as espécies apresentam as maiores áreas com potencial de ocorrência na região Norte da América do Sul, percorrendo territórios

de países como o Brasil (região Norte e Nordeste), Colômbia, Venezuela, Guiana e Suriname. Com isso, vemos que as condições adequadas são altamente prováveis em sua maioria para região norte da América do Sul. De acordo com a modelagem, nota-se que *Fredius* está distribuído da Venezuela ao Brasil. Sendo que no Brasil, ocorrem quase exclusivamente nas planícies da Bacia Amazônica, nos estados do Roraima, Amapá, Amazonas, Pará, Rondônia, Mato Grosso e uma espécie estendendo-se para o Ceará, Nordeste do Brasil.

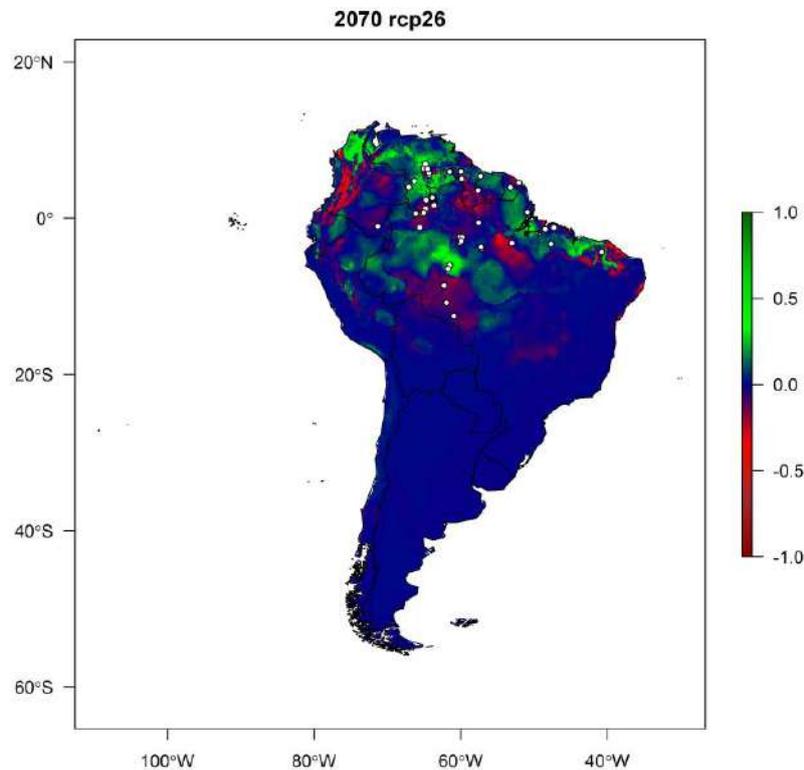
Figura 2 - Mapa de distribuição atual de *Fredius spp.*, com pontos de ocorrência das espécies e variáveis climáticas. Escala de cores indica a probabilidade de ocorrência.



A figura acima, apresenta cores para indicar a probabilidade prevista de que as condições sejam adequadas para ocorrência das espécies. Sendo, vermelho indicando alta probabilidade de condições adequadas para a espécie, amarelo indicando condições típicas daqueles onde a espécie é encontrada e azul indicando baixa probabilidade prevista de condições adequadas. Como também a probabilidade de condições adequadas de ocorrência das espécies em uma escala de 0 a 1, onde quanto mais próximo do 0, menos as condições de ocorrência e mais próximo do 1, maiores as condições adequadas de ocorrência. Os pontos brancos indicam a ocorrência atual das espécies.

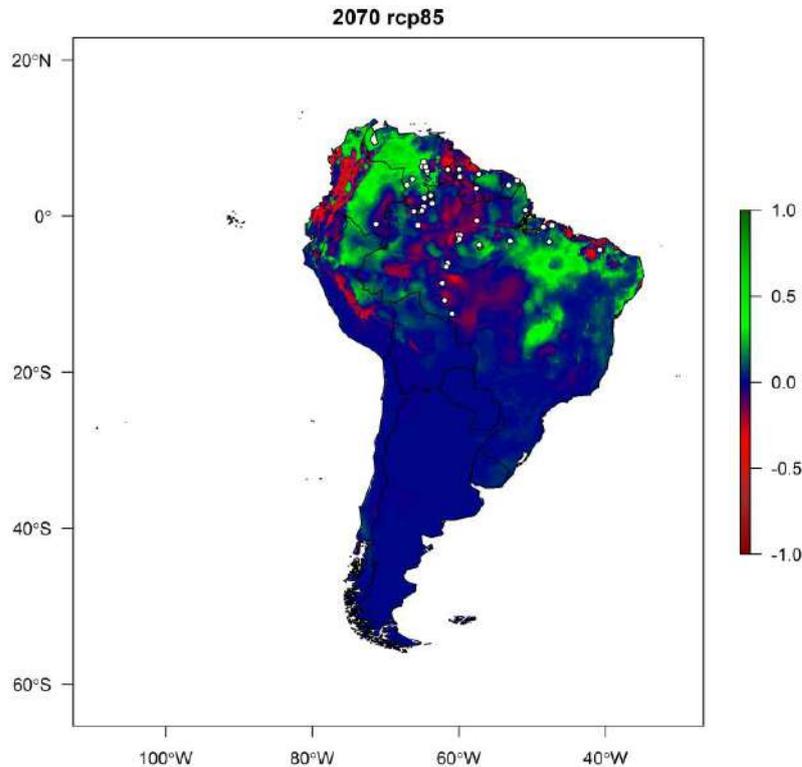
As áreas de distribuição potencial em cenários de mudanças climáticas futuros, gerados pelos modelos a seguir (Figuras 3 e 4), expressa uma grande área com probabilidade de ocorrência da espécie para boa parte da Bacia Amazônica, abrangendo algumas regiões em todos os países a qual essa bacia se estende (Brasil, Colômbia, Guiana, Guiana Francesa, Suriname e Venezuela), onde a mesma vai apresentar maiores índices de ocorrência seguindo o Rio Amazonas, Rio Negro, Rio Branco e afluentes percorrendo estados como o do Amazonas e de Roraima.

Figura 3 – Mapa de distribuição potencial prevista para *Fredius* feitas com variáveis climáticas, no melhor cenário previsto de mudanças climáticas futuras RCP 2.6. **Escala de cores indica a probabilidade de ocorrência.**



* Maxent produz uma predição contínua com valores variando de 0 a 1 e de 0 a -1, representados em duas escalas, positiva e negativa. Na escala positiva, destacada em verde, observa-se o aumento de áreas adequadas para a ocorrência das espécies. Já na escala negativa, marcada em vermelho, identifica-se a perda de áreas adequadas para a sua ocorrência.

Figura 4 - Distribuição geográfica potenciais prevista para *Fredius* feitas usando variáveis climáticas, no pior cenário previsto de mudanças climáticas futuras RCP 8.5. **Escala de cores indica a probabilidade de ocorrência.**



* Maxent produz uma predição contínua com valores variando de 0 a 1 e de 0 a -1, representados em duas escalas, positiva e negativa. Na escala positiva, destacada em verde, observa-se o aumento de áreas adequadas para a ocorrência das espécies. Já na escala negativa, marcada em vermelho, identifica-se a perda de áreas adequadas para a sua ocorrência.

Há uma redução significativa de áreas com probabilidade de ocorrência de *Fredius* no cenário RCP 8,5, se comparado ao cenário RCP 2,6. Ao longo do território da América do Sul entre as áreas mais afetadas estão territórios da Venezuela, Colômbia, Suriname e Guiana. Ao longo do território brasileiro, as áreas mais afetadas estão nas regiões dos estados de Roraima, Pará, Mato Grosso, Rondônia, Ceará e Amazonas. Percebe-se ainda uma possível fragmentação das espécies em dois grupos, um mais oriental e outro mais ocidental de acordo com as probabilidades de ocorrência.

4. DISCUSSÃO

Nossos resultados indicam que as mudanças climáticas previstas podem ocasionar sérias consequências para *Fredius*. Pois mudanças nos padrões de chuvas e eventos climáticos extremos podem impactar seu habitat e comportamento. Resultando em alterações na distribuição geográfica, reprodução e disponibilidade de alimentos para essas espécies. Além disso, as mudanças climáticas podem ainda afetar a qualidade da água, influenciando negativamente a sua sobrevivência.

O mapa de ocorrência atual (Figura 2) mostra que os pontos de ocorrência de *Fredius* estão localizados na região norte da América do Sul. No território brasileiro a maior concentração está na região que compreende a Bacia Amazônica. Porém, de acordo com estudos recentes feitos por Santos *et al.*, (2020), há registros de uma espécie no Ceará, região Nordeste do Brasil. *Fredius ibiapaba* foi registrado pela primeira vez por Magalhães *et al.* (2005) em dois pontos no Planalto da Ibiapaba, no nordeste do Brasil. Posteriormente sua distribuição estendeu-se até a Área de Proteção Ambiental da Bica do Ipu, também no planalto da Ibiapaba - entre 635 e 782 m (Santos *et al.*, 2020). Diante da ocorrência desse caranguejo-de-água-doce no Nordeste brasileiro, Magalhães *et al.* (2005) postularam hipóteses para tentar explicar a ocorrência relictual desse caranguejo, uma delas estaria relacionada às oscilações no período quaternário, que em virtude das pulsações climáticas-vegetacionais a espécie teria se dispersado do seu centro de origem, na bacia Amazônica, até o Planalto da Ibiapaba, formando hoje, uma população relictual (Santos *et al.*, 2020).

Outro ponto importante é que apesar de nossos modelos apresentarem baixa probabilidade de áreas adequadas para a ocorrência dessas espécies em Rondônia, nosso banco de dados mostra pontos de ocorrência de uma espécie nessa região, no município de Chupinguaia, estado de Rondônia. Trata-se da espécie *Fredius avilai* (Martins *et al.*, 2021). Isso pode indicar que o modelo superestimou a área de distribuição dessa espécie, ou pode ser um indicativo de condições favoráveis para ocorrência da espécie na região. Outras possíveis explicações para este hiato de distribuição seriam pouco esforço amostral na região, algum tipo de erro, especialmente por se tratar de dados secundários, ou ainda um organismo pertencente a outro grupo taxonômico.

No cenário de mudanças climáticas futuro (RCP 2.6), é considerado o cenário mais otimista para a ocorrência das espécies, pois este caminho de emissão é representativo de cenários da literatura que levam a níveis de concentração de gases estufa muito baixos. Onde

as emissões de gases de estufa são substancialmente reduzidas, ao longo do tempo (Van loon *et al.*, 2007), resultando em ambientes propícios para ocorrência das espécies.

Para o cenário RCP 8.5, há uma perda significativa de área favoráveis para ocorrência de *Fredius*, sendo as regiões mais afetadas pelas mudanças climáticas, Venezuela, Guiana, Suriname, Peru, e Brasil. De acordo com as projeções para 2070 neste cenário, para o Brasil, não haverá áreas favoráveis para ocorrência em algumas regiões de estados, como Roraima, Amapá, Pará, Rondônia, e Mato Grosso. Entre as regiões que serão menos afetadas está o norte da Venezuela, Guiana francesa e parte da região norte e nordeste do Brasil.

De modo geral, os resultados sugerem que *Fredius* apresenta baixa flexibilidade, sendo pouco tolerantes a ambientes com baixa umidade, altas temperaturas e baixo índice de recursos hídricos. Estas características podem influenciar seu habitat preferencial e comportamento, sendo importante considerar esses fatores para lidar com a conservação dessas espécies.

Um resultado importante foi em relação às variáveis mais importantes para os modelos. A variável isotérmica apresentou altos valores de contribuição para modelo, o que indica que os pontos de ocorrência obtidos e as camadas utilizadas apresentam uma boa precisão, uma vez que estas espécies possuem preferências ambientais específicas, não se adaptando a variações de temperatura. Precipitação do mês mais chuvoso, aparece em seguida como uma variável com alta porcentagem de contribuição. Claramente esta variável é um fator limitante à distribuição desta espécie que ocorre predominantemente na região amazônica com temperaturas altas que caracteriza o seu clima equatorial (Fisch; Marengo; Nobre, 1998), e que a exemplo de *Fredius reflexifrons* é amplamente distribuído na bacia amazônica e em algumas bacias hidrográficas costeiras de países do norte da América do Sul (Magalhães, 2003; Cumberlidgeet; Alvarez; Villalobos, 2014). Em seguida, Precipitação do trimestre mais quente também foi uma variável com importante contribuição. As variáveis bioclimáticas que estiveram entre as que mais contribuíram para os modelos das espécies aqui estudadas, indicam que são, provavelmente, os fatores mais limitantes à distribuição destas espécies, corroborando com estudos de outros autores (Capinha; Anastácio, 2011; Bradie; Leung, 2016). Além disso, esse tipo de variáveis são as mais utilizadas em estudos desta natureza (Liu; White; Newell, 2011).

Os modelos foram criados com um conjunto de variáveis ambientais para abranger ao máximo os possíveis fatores relacionados a ocorrência das espécies. Assim, o presente estudo contribui com informações acerca da possível distribuição das espécies, a respeito das variáveis que estão relacionadas com a ocorrência das mesmas.

A avaliação dos modelos apresentou valores de AUC acima de 90%, onde do ponto de vista estatístico são considerados excelentes (Metz, 1986), indo de encontro também com o

sentido biológico da espécie, o que apoia uma precisão na relação espécies-ambiente (Capinha; Anastácio, 2011).

Embora a Amazônia seja considerada um centro de distribuição de espécies, está entre os ecossistemas mais sensíveis às mudanças climáticas (Seddon *et al.*, 2016). Além disso, sofre intensa exploração econômica predatória, na maior parte por conta da expansão agrícola e da exploração de madeira ilegal (Ferreira; Venticinque; Almeida, 2005), que pode contribuir para o avanço das alterações climáticas.

O aumento gradativo da temperatura é um dos fatores determinantes na perda da biodiversidade, pois podem intensificar os períodos de seca em determinadas áreas. Além disso, prevê-se um aumento na duração da estação seca para a região Sul da Amazônia conforme as tendências hidrológicas e projeções de modelos climáticos globais (Boisier *et al.*, 2015). Com base nas previsões mais pessimistas, haverá a redução significativa de áreas favoráveis para a ocorrência de *Fredius* neste domínio para o ano de 2070.

Conforme a IUCN (União Internacional para a Conservação da Natureza), atualmente *Fredius* não se encontra em risco de extinção, contudo, diante dos cenários de mudanças climáticas previstas para o futuro, as espécies serão afetadas e poderão entrar em risco de extinção. Diante disso, é necessário, com ajuda de especialistas, buscar estratégias para sua conservação (Santos *et al.*, 2020).

Em um trabalho realizado por Alexandre *et al.* (2013) mostra que o conhecimento sobre a distribuição geográfica das espécies e os fatores que influenciam a ocorrência das espécies é especialmente importante para a conservação da biodiversidade, e que a modelagem preditiva de distribuição de espécies (MPDE) pode constituir um importante instrumento para embasar estudos e aplicações voltadas para a conservação de espécies ameaçadas de extinção.

A modelagem de distribuição de espécies tem sido aplicada com sucesso para outras espécies de caranguejo de água doce, como por exemplo, *Dilocarcinus pagei* e *Sylviocarcinus pictus* (DECAPODA: TRICHODACTYLIDAE) (Guimarães Junior, 2021), como também para espécies de plantas, como *Discocactus ferricola* (cactaceae) (Vicente-Silva; Faggioni; Paggi, 2022) e *Stryphnodendron pulcherrimum* (Willd.) Hochr. (Tomaz *et al.*, 2022).

Embora a MDE esteja sendo muito utilizada, existem algumas limitações que devem ser reconhecidas, dentre elas, a qualidade dos dados disponibilizados em bases de dados da internet. Muitas desses dados apresentam erros, principalmente de coordenadas geográficas. O resultado da modelagem depende diretamente da qualidade dos dados de ocorrência das espécies. Portanto, a realização de coletas bem georreferenciadas e padronizadas são fundamentais

(Giannini *et al.*, 2012). Neste sentido, seria importante o desenvolvimento e a implementação de filtros de qualidade de dados para garantia de maior qualidade nos dados disponibilizados.

O presente estudo ressalta a relevância das informações fornecidas pelos modelos, como as variáveis climáticas que influenciam na distribuição das espécies, para orientar os projetos de conservação de *Fredius*. As previsões alarmantes das mudanças climáticas futuras indicam uma possível perda de habitats onde essas espécies habitam atualmente, o que pode resultar na extinção de várias delas. Diante desse cenário, é crucial intensificar os esforços para proteger áreas de habitat críticas para as espécies ameaçadas e implementar programas de conservação adaptados às mudanças climáticas.

Além disso, este estudo destaca a vulnerabilidade dos caranguejos-de-água-doce diante das mudanças climáticas, evidenciando a necessidade urgente de identificar áreas potenciais para sua ocorrência. Essa identificação é fundamental para o desenvolvimento de planos de conservação eficazes. A utilização de ferramentas como a MDE pode ser extremamente valiosa para mapear essas áreas potenciais e direcionar estratégias de conservação, contribuindo assim para a preservação da biodiversidade.

REFERÊNCIAS

- ADHIKARI, D. *et al.* Ecological niche modeling as a cumulative environmental impact assessment tool for biodiversity assessment and conservation planning: A case study of critically endangered plant *Lagerstroemia minuticarpa* in the Indian Eastern Himalaya. **J. Environ. Manage**, vol: 243, p. 299-307. 2019.
- ALEXANDRE, B. R.; Lorini, M. L.; And Grelle, C.C.V. Modelagem preditiva de distribuição de espécies ameaçadas de extinção: um panorama das pesquisas Oecol. **Aust.**, vol. 17, n. 4, p. 483-508. 2013.
- ALLOUCHE, O.; TSOAR, A.; KADMON, R. Assessing the accuracy of species distribution models: prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS). **Journal of Applied Ecology**, v. 43, n. 6, p. 1223-1232. 2006.
- ARAÚJO, M. B.; GUISAN, A. Five (or so) challenges for species distribution modeling. **Journal of Biogeography**, vol. 33, n. 10, p. 1677-1688. 2006
- ARRAES, A. I. O. M.; LONGHIN, S. R. Otimização de Ensaio de Toxicidade Utilizando o Bioindicador *Allium Cepa* Como Organismo Teste, Enciclopédia Biosfera. **Centro Científico Conhecer**, vol. 8, n.14; p. 1958. 2012.
- AUSTIN, M. Spatial prediction of species distribution: an interface between ecological theory and statistical modelling. **Ecological modelling**, vol. 157, n. 2-3, p. 101- 118, 2002.
- BOISIER, J. *et al.* Fortalecimento projetado da estação seca na Amazônia por meio de simulações de modelos climáticos restritos. **Mudança Climática da Natureza**, vol. 5, p. 656–660. 2015. <https://doi.org/10.1038/nclimate2658>.
- BOOTH, T. H. *et al.* BIOCLIM: the first species distribution modelling package, its early applications and relevance to most current MaxEnt studies. **Diversity and Distributions**, vol. 20, n. 1, p. 1–9. 2014.
- BOTT, R. Flufikrabben aus Brasilien und benachbarter Gebiete. *Potamocarcinus* (Kingsleya) ORTMANN 1897 (Crustácea, Decapoda).- **Senckenbergiana biol**, vol. 48, n. 4, p. 301 – 312. 1967.
- BRADIE, J.; LEUNG, B. A quantitative synthesis of the importance of variables used in MaxEnt species distribution models. **Journal of Biogeography**, 2016.
- CALLISTO, M.; GONÇALVES JR., J. F.; MORENO, P. Invertebrados Aquáticos Como Bioindicadores. In: Goulart, E.M.A. (Eds). **Navegando o Rio das Velhas das Minas aos Gerais**. Belo Horizonte: Coopmed, 2005. p. 555-567.
- CALLISTO, M.; MORETTI, M.; GOULART, M. Benthic Microinvertebrates as a Tool to Assess Stream Health. RBRH. **Brazilian Journal of Water Resources**, Vol. 6, pp. 71-82. 2001.
- CAPINHA, C.; ANASTÁCIO, P. Assessing the environmental requirements of invaders using ensembles of distribution models. **Divers Distrib**, vol. 17, p. 13–24. 2011.

CARVALHO, C. J. B. Padrão de Endemismos e a Conservação da Biodiversidade. **Megadiversidade**, v. 5, n. 1-2, p. 77-86, 2009.

CAVALHEIRO, L. W.; FIALHO, C. B. Fishes community composition and patterns of species distribution in Neotropical streams. **Biota Neotropica**, v. 20, n. 1, p. e20190828, 2020.

CHOTAMONSAK, C. *et al.* Projected climate change over Southeast Asia simulated using a WRF regional climate model. **Atmos. Sci. Let.** v. 12, p. 213-219, 2011.

COIFMANN, I. Potamonidi della Guiana Inglesi raccolti dal Prof. Nelo Beccari. **Archivio zoológico italiano**, vol. 27, p. 93-116. 1939.

CUMBERLIDGE, N.; ALVAREZ, F. E.; VILLALOBOS J. L. **Results of the global conservation assessment of the freshwater crabs (Brachyura, Pseudothelphusidae and Trichodactylidae):** The Neotropical region, with na update on diversity. *Zookeys*, vol: 457, p. 133-157. 2014.

DecaNet eds. (2023). DecaNet. Acessado em <https://www.decanet.info> em 16/12/2023. doi:10.14284/600.

DEVINE, J.A.; VANNI, M.J. Spatial And Seasonal Variation In Nutrient Excretion By Benthic Invertebrates In A Eutrophic Reservoir. **Freshwater Biology**, vol. 47, n. 1, p. 1107-1121.

DOS SANTOS, L. C. **Caranguejo relictual na Serra da Ibiapaba:** O que nos diz a teoria dos refúgios? 2020, 98 fls. Tese De doutorado (Ecologia e recursos naturais) – Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Recursos naturais, Universidade Federal do Ceará – UFC, Fortaleza, Brasil. 2020.

ELITH J. LEATHWICK J. R. Modelos de distribuição de espécies: explicação ecológica e previsão no espaço e no tempo. **Anu. Rev. Ecol. Evolução Sist.** Vol. 40, p. 677 – 697. 2009.

FERREIRA, L. V.; VENTICINQUE, E.; ALMEIDA, S. O desmatamento na Amazônia e a importância das áreas protegidas. **Dossiê Amazônia Brasileira I • Estud. av.**, vol. 19, n. 53. 2005.

FICK, S. E.; HIJMANS, R. J. Worldclim 2: New 1-Km Spatial Resolution Climate Surfaces For Global Land Areas. **International Journal of Climatology**, vol. 37, n. 12, p. 4302-4315, 2017.

FIELDING, A.H.; Bell, J.F. A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models. **Environmental Conservation**, vol. 24, p. 38–49. 1997.

FISCH, G.; MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A. Uma revisão geral sobre o clima da amazônia. **Acta amazônica**, v. 28, n. 2, p. 101–126, 1998.

FRANKLIN, J. **Mapping species distributions: Spatial inference and prediction**. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 2010. ISBN, 1139485296, 9781139485296.

FRANKLIN, J. Species distribution modeling. 2009. p. 3-20 In: J. Franklin (ed). **Mapping species distributions: spatial inference and prediction**. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 2010. ISBN, 1139485296, 9781139485296.

GIANNINI, T. C. *et al.* Desafios atuais da modelagem preditiva de distribuição de espécies. **Rodriguésia**, v. 63, n. 3, p. 733–749. 2012.

GUIMARÃES JUNIOR, S. S. **Modelagem de distribuição das espécies de caranguejos de água doce *Dilocarcinus pagei* e *Sylviocarcinus pictus* (DECAPODA: TRICHODACTYLIDAE)**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Ciências Biológicas). Universidade Federal Rural da Amazônia, Capitão Poço, 2021.

GUISAN, A.; THUILLER, W. Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. **Ecology Letters**, vol. 8, p. 993-1009. 2005.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. 2019. **Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems**. SHUKLA, P. R.; SKEA, J.; CALVO BUENDIA, E.; MASSON-DELMOTTE, V.; PÖRTNER, H.-O.; ROBERTS, D.C.; ZHAI, P. SLADE, R. CONNORS, S. VAN DIEMEN, R.; FERRAT, M.; HAUGHEY, E.; LUZ, S.; S. NEOGI, S. PATHAK, M.; PETZOLD, J.; PORTUGAL PEREIRA, J.; VYAS, P.; HUNTLEY, E.; KISSICK, K.; BELKACEMI, M.; MALLEY, J. (Eds.), Intergovernmental Panel on Climate Change. 2019. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/11/SRCCL-Full-Report-Compiled-191128.pdf>. Acesso em: 24 nov 2023.

RODRIGUEZ, G.; MAGALHÃES, C. Recent advances in the biology of the Neotropical freshwater crab family Pseudothelphusidae (Crustacea, Decapoda, Brachyura). **Revista brasileira de Zoologia**, v. 22, p. 354-365, 2005.

RODRÍGUEZ, G.; SUÁREZ, H. *Fredius stenolobus*, a new species of freshwater crab (Decapoda: Brachyura: Pseudothelphusidae) from the Venezuelan Guiana. **Proceedings of the Biological Society of Washington**, vol. 107, n. 1, p. 132-136. 1994.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. 2013. **The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge, UK and New York, USA, 1552 pp. (2013).

IUCN. **Standards and Petitions Committee**. Guidelines for Using the IUCN Red List. Categories and Criteria. Version 15.1; IUCN Standards and Petitions Committee: Gland, Switzerland, 2022.

KOLANOWSKA, M.; JAKUBSKA-BUSSE, A. Is the lady’s-slipper orchid (*Cypripedium calceolus*) likely to shortly become extinct in Europe?-Insights based on ecological niche modelling. **PLoS One**, vol. 15, n. 1, p. e0228420. 2020.

- LELAY, G. *et al.* Prospective sampling based on model ensembles improves the detection of rare species. *Ecography*, v. 33, n. 6, p. 1015-1027. 2010.
- LIU, C., WHITE, M., NEWELL, G. Measuring and comparing the accuracy of species distribution models with presence-absence data. *Ecography* (Cop) vol. 34, p. 232–243. 2011. doi: 10.1111/j.1600-0587.2010.06354.x
- MAGALHÃES C. A New Species of Freshwater Crab of The Genus *Fredius* Pretzmann, 1967 from The Middle Amazon River Basin, Brazil (Crustacea: Decapoda: Pseudothelphusidae). *Proceedings of the Biological Society of Washington*, vol. 122, n. 1, p. 81-86. 2009.
- MAGALHÃES, C. *et al.* Exotic species of freshwater decapod crustaceans in the state of São Paulo, Brazil: records and possible causes of their introduction. *Biodiversity and Conservation*, v. 14, n. 8, p. 1929–1945. 2005.
- MAGALHÃES, C.; BARBOSA, U. C. & PY-DANIEL, V. Decapod crustaceans used as food by the Yanomami Indians of the Balawa-ú village, State of Amazonas, Brazil. *Acta Amazonica*, vol. 36, p. 369–374. 2006.
- MAGALHÃES, C.; RODRÍGUEZ, G. The systematic and biogeographical status of *Fredius reflexifrons* (Ortmann, 1897) and *Fredius fittkaui* (Bott, 1967) (Crustacea: Brachyura: Pseudothelphusidae) from the Amazon and Atlantic Guianas river basins. *Acta Amazonica*, vol. 34, n. 2, p. 677-689. 2002.
- MAGALHÃES C. **Brachyura: pseudothelphusidae** Trichodactylidae. Manual de identificação dos crustáceos decápodos de Água Doce Brasileiros. São Paulo: Editora Loyola. 2003.
- MAGALHÃES C. *et al.* Caracterização morfológica e molecular de uma nova espécie de *Fredius* (Decapoda, Pseudothelphusidae) de Rondônia, sul da Amazônia, Brasil. In: YEO, D. C. J.; CUMBERLIDGE, N.; KLAUS, S. eds. **Avanços na sistemática e biologia dos decápodos de água doce**. Monografias de Crustáceos 19. Leiden:Brilhante. 296 pág. 2014.
- MANTELATTO, L. *et al.* Checklist of decapod crustaceans from the coast of the São Paulo state (Brazil) supported by integrative molecular and morphological data: V. Dendrobranchiata and Pleocyemata [Achelata, Astacidea, Axiidea, Caridea (Alpheoidea and Processoidea excluded), Gebiidea, Stenopodidea]. *Zootaxa*, vol. 5121, n. 1, p. 001–074. 2022
- MARTINELLI, G. E.; MORAES, A.A. **Livro Vermelho da Flora do Brasil**. 1. ed. - Rio de Janeiro: Andrea Jakobsson: Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro, 2013.
- MARTINS, C.A.M. *et al.* A new species of the genus *Fredius* Pretzmann, 1967 (Decapoda: Brachyura: Pseudothelphusidae) from Brazil, with comments on the southerly distribution of the family. *Zootaxa*, vol. 4903, n. 2. 2021.
- MCCUNE, J. L. Species distribution models predict rare species occurrences despite significant effects of landscape context. *J. Appl. Ecol.* Vol. 53, n. 6, p. 1871-1879. 2016.

MELO, G. A. S. **Famílias Pseudothelphusidae e Trichodactylidae. Manual de Identificação dos Crustácea Decapoda de Água Doce do Brasil** (G.A.S. Melo, Ed.). Edições Loyola, São Paulo, p. 143-244. 2003.

METZ, C.E. ROC methodology in radiologic imaging. **Investigational Radiology**, vol. 21, p. 720-733. 1986.

MILNE-EDWARDS, H. 1853. Mémoire sur la famille des Ocypodiens. **Ann. Sci. Nat., Zool.**, vol. 20, n. 3, p. 163-226.

NAIMI, B. *et al.* Where is positional uncertainty a problem for species distribution modelling? **Ecography**. (Cop.) vol. 37, p. 191–203. 2014.

NAIMI B; ARAUJO MB. Sdm: a reproducible and extensible R platform for species distribution modelling. **Ecography**. Vol. 39, p. 368-375. 2016.
<https://doi.org/10.1111/ecog.01881>.

ORTMANN, A.E. **Carcinologische Studien**. Zoologische Jahrbücher, Abtheilung für Systematik, Geographie und Biologie der Thiere, vol. 10, n. 3, p. 258-372. 1897.

PETERSON, A. T. Uses and Requirements of Ecological Niche Models and Related Distributional Models. **Biodiversity Informatics**, v. 3, n. 1. 2006.

PHILLIPS, S.J.; ANDERSON, R.P.; SCHAPIRE, R.E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. **Ecological Modelling**, vol. 190, p. 231-259. 2006.

RANGEL, T. F.; LOYOLA, R. D. Labeling ecological niche models. **Natureza & Conservação** vol. 10, n. 2, p. 119-126. 2012.

RATHBUN, M.J. LES CRABES. D'eau douce (pontamonidae). **Nouvelles archives du muséum d'histoire naturelle**, Paris, vol .7, n. 4, p. 159-321. 1905.

RICHARDSON, D. M. Conservation biogeography: what's hot and what's not? **Diversity and Distributions**, vol. 18, p. 319-322. 2012.

RODRÍGUEZ, G.; CAMPOS, M.R. Uma revisão cladística do gênero *Fredius* (Crustacea: Decapoda: Pseudothelphusidae) e seu significado para a biogeografia das planícies guianas da América do Sul. **Jornal de História Natural**, vol. 32, n. 5, p. 763-775. 1998.

RODRÍGUEZ, G.; PEREIRA G. New species, cladistic relationships, and biogeography of the genus *Fredius* (Decapoda: Brachyura: Pseudothelphusidae) from South America. **Journal of Crustacean Biology**, vol. 12, n. 2, p. 298-311. 1992.

RODRIGUEZ, G. Three new species of *Pseudothelphusa* from Venezuela (Crustacea, Brachyura Potamonidae). **Zoologische Mededelingen**, vol. 41, n. 19, p. 259-270. 1966.

RUSHTON, S.P.; ORMEROD, S.J. & KERBY, G. 2004. New paradigms for modelling species distributions? **Journal of Applied Ecology**, vol. 41, p. 193-200.

SANTOS, L.C. the distribution of the freshwater crab *Fredius reflexifrons* (ORTMANN, 1897) (BRACHYURA, PSEUDOTHELPHUSIDAE) in an environmental protection area of the Planalto da Ibiapaba - Northeastern Brazil, with new records and comments on its conservation. **Biological Sciences , An. Acad. Bras. Ciênc.**, v. 92, n. 1. 2020.

SEDDON, A. *et al.* Sensibilidade dos ecossistemas terrestres globais à variabilidade climática. **Natureza**, vol. 531, p. 229–232. 2016. <https://doi.org/10.1038/nature16986>

SOBERÓN, J. Grinnellian and eltonian Niches and geographic distributions of species. **Ecology Letters**, v. 10, n. 12, p. 1115–1123. 2007.

SOBERÓN, J.; PETERSON, A.T. Interpretation of models of fundamental ecological niches and species distributional areas. **Biodiversity Informatics**, vol. 2, p. 1-10. 2005.

SOBRAL-SOUZA, T. *et al.* Efficiency of protected areas in Amazon and Atlantic Forest conservation: A spatio-temporal view. **Acta Oecol.** Vol. 87, p. 1-7. 2018.

VAN LOON, A H. *et al.* Vinculando a adequação do habitat e os modelos de dispersão de sementes para analisar a eficácia das estratégias hidrológicas de restauração dos pântanos. **Conservação Biológica**, vol. 144, p. 1025-1035. 2011.

TOMAZ, J. S. *et al.* Predição da distribuição natural, habitat e conservação de *Stryphnodendron pulcherrimum* (Willd.) Hochr. frente às mudanças climáticas globais. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 52, p. e72422, 2022.

VICENTE-SILVA, L.; FAGGIONI, G. P.; PAGGI, G.M. Predicting potential distribution and evaluating biotic interactions of threatened species: a case study of *Discocactus ferricola* (Cactaceae). **Biota Neotrop**, vol. 22, n. 1. 2022.

VIEIRA, I. M. Diversidade de Crustáceos das Ressacas da Lagoa dos Índios, Tacacá e APA do Curiaú. In: Takiyama, L.R.; Silva, A.Q. da (orgs.). **Diagnóstico das Ressacas do Estado do Amapá: Bacias do Igarapé da Fortaleza e Rio Curiaú, Macapá - AP, CPAQ/IEPA e DGEO/SEMA**, p.53-62. 2003.

WACKER, A.; HARZSCH, S. Crustaceans in a changing world. **Zoology**, v. 146, p. 125921. 2021.

WERNECK, F.P. *et al.* Climatic stability in the Brazilian Cerrado: implications for biogeographical connections of South American savannas, species richness and conservation in a biodiversity hotspot. **J. Biogeogr.**, vol. 39, n. 9, p. 1695-706. 2012.

WIENS, J.J. The niche, biogeography and species interactions. **Proceedings of the Royal Society: Biological Sciences**, vol. 366, p. 2336-2350. 2011.

YEO, D. C. *et al.* Diversidade global de caranguejos de água doce (Crustacea: Decapoda: Brachyura). **Hydrobiology**, vol. 595, p. 275-286. 2008.

ZANETTI, F.; CASTRO, P.M.D.; MAGALHÃES, C. Freshwater crabs (Decapoda: Brachyura: Pseudothelphusidae, Trichodactylidae) from the state of Roraima, Brazil: species

composition, distribution and new records. **Nauplius**, vol. 26, p. e2018011. 2018. DOI 10.1590/2358-2936e2018011.