

## Capítulo 3

# Modelagem da distribuição potencial de castanhais nativos

*Daiana Carolina Monteiro Toune; Lucieta Guerreiro Martorano; Marcelino Carneiro Guedes; Evert Thomas; Katia Emídio da Silva; Lucia Helena de Oliveira Wadt; Felipe Felix Costa.*

## Introdução

A castanheira-da-amazônia (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) é, sem dúvida, uma das espécies arbóreas mais pesquisadas da Amazônia, dada a sua importância cultural, socioeconômica (Salomão, 2014), histórica (Thomas et al., 2015) e nutricional (Cardoso et al., 2017). Com a proteção e a proibição do corte da castanheira no Brasil (Decreto nº 5.975 de 2006) e em outros países amazônicos, como o Peru (Lei nº 00.729-81 de 1981), Bolívia (Lei nº 27.572 de 2004) e Colômbia (Lei nº 49.072 de 2014), a espécie pode ser observada em diversos ambientes, variando de florestas maduras altamente conservadas até áreas antropizadas, como pastagens ou mesmo áreas agrícolas. Em algumas áreas alteradas, a espécie apresenta baixa ou nenhuma regeneração, baixa capacidade produtiva e altíssima mortalidade (Scoles et al., 2016), o que eleva o grau de vulnerabilidade da espécie. Sob outro ponto de vista, outros estudos mostraram o potencial de renovação dos castanhais em áreas utilizadas pela agricultura tradicional e itinerante de corte e queima, desde que manejadas adequadamente (Cotta et al., 2008; Paiva et al., 2011; Guedes et al., 2014; Porcher et al., 2018). Preocupações quanto à sua vulnerabilidade ecológica, causada pela redução de populações e por alterações do seu hábitat devido ao desmatamento, também vêm estimulando estudos sobre a espécie (Homma et al., 2014; Scoles et al., 2016).

O entendimento do hábitat da castanheira é central para propor ações de conservação, manejo e plantio que assegurem os processos ecológicos (regeneração, crescimento, interações ecológicas e manutenção da espécie na prestação de serviços ecossistêmicos) e proporcionem melhoria nos processos produtivos (aumento na produção, melhor planejamento da coleta e manejo e

valoração para pagamentos por serviços ambientais). O conceito de hábitat vai além do tipo de vegetação, ou seja, ele é um local com certas combinações de condições e recursos para um organismo manter uma população viável (Begon et al., 2006), e a distribuição espacial da espécie dentro do hábitat é determinada, principalmente, pelas interações de componentes físicos e biológicos (Odum, 2008) bem como por fatores como acessibilidade da espécie em áreas potencialmente favoráveis à sua ocorrência (Soberón, 2010). Embora esse tema tenha sido investigado por muitos ecologistas e biogeógrafos ao longo da história (Schrodt et al., 2019), no caso da castanheira-da-amazônia, algumas hipóteses têm sido levantadas recentemente, como a de que pelo menos alguns castanhais têm origem antrópica (Shepard Junior; Ramirez, 2011; Thomas et al., 2014; Ribeiro et al., 2014; Scoles; Gribel, 2012). No entanto, é um tema que ainda enfrenta barreiras devido à indisponibilidade de informações.

A modelagem de distribuição de espécies é uma técnica que utiliza observações da ocorrência, ausência ou abundância e múltiplos preditores ambientais para estimar a probabilidade de ocorrência de uma espécie ou a extensão do seu hábitat disponível (Guisan; Thuiller, 2005; Elith; Leathwick, 2009). Assim, mapas de distribuição real, potencial ou de adequabilidade de hábitat são produtos gerados a partir de modelos estatísticos, de interpolações espaciais ou de modelos de aprendizagem em máquina que auxiliam o pesquisador a fazer inferências sobre a distribuição das espécies (Franklin, 2010).

Nos últimos anos, o interesse nessa área do conhecimento tem sido crescente, como evidencia o número de artigos publicados em revistas internacionais, que passaram de dez por ano na década de 1980 para mil por ano nessa última década (Peterson; Soberón, 2012a). Estudos sobre distribuição e adequabilidade de hábitat da castanheira-da-amazônia também têm acompanhado esse crescimento – dois deles, Thomas et al. (2014) e Tourne et al. (2019) trazem grandes contribuições científicas e metodológicas sobre a espécie na escala de bioma. No primeiro, os pesquisadores modelaram a distribuição potencial da espécie sob condições de diferentes passados climáticos e apontaram a existência de refúgios durante as glaciações (~21,000 BP), com alto impacto na distribuição real. No segundo, o banco de ocorrências da espécie foi atualizado com dados de presença, recentemente coletados no Brasil, e modernas estratégias metodológicas foram utilizadas para modelar e reduzir as tendências, nas ocorrências e nos preditores ambientais, inclusive agregando o conhecimento de especialistas na análise.

Este capítulo inicia com uma breve revisão sobre a modelagem de distribuição de espécies, de modo a esclarecer, por meio da literatura atual, o uso de termos que constantemente são utilizados como sinônimos, mas não o são, o que causa erros e incompreensão das ferramentas. Em seguida, traz as mais recentes descobertas sobre a distribuição potencial da castanheira-da-amazônia e um modelo hipotético sobre os fatores bióticos, abióticos e de acessibilidade, que controlam essa distribuição. As dificuldades enfrentadas – principalmente aquelas relacionadas à carência de dados em larga escala – para estimar a probabilidade de ocorrência da espécie e extensão do seu hábitat também são aqui apresentadas. Por fim, se discute como essas informações podem contribuir para o fortalecimento da cadeia de valor da espécie.

## Modelagem de distribuição de espécies

Os estudos sobre a distribuição de espécies frequentemente possuem três objetivos: i) conhecer a distribuição geográfica; ii) compreender as características espaciais dessa distribuição; e iii) descrever a adequabilidade de hábitat, principalmente relacionada aos fatores abióticos. Dois conjuntos de dados são fundamentais para auxiliar no alcance desses objetivos: i) dados georreferenciados de ocorrência da(s) espécie(s) estudada(s); e ii) mapas de preditores ambientais, o que inclui fatores antrópicos, quando disponíveis. Esses dados são necessários para modelagem tanto de flora quanto de fauna. Entretanto, os resultados da modelagem podem ser mal interpretados quando alguns termos e conceitos da ecologia e da geografia são usados de maneira inapropriada.

Os termos “modelagem de distribuição de espécies” e “modelagem de nicho ecológico”, por exemplo, são diversas vezes utilizados como sinônimos, embora a literatura tenha apontado e discutido suas diferenças em diversas publicações (Franklin, 2010; Peterson; Soberón, 2012b). A correta utilização desses termos também envolve a compreensão de outros conceitos, tais como: “distribuição potencial e distribuição real” e “nichos fundamental e nicho realizado”. Em um levantamento realizado por Peterson e Soberón (2012a) no portal de periódicos Web of Science, foi verificado que, em 242 artigos, os estudos de modelagem de distribuição de espécies são predominantes (71%) em relação aos de modelagem de nicho (28%). Embora os modelos apresentem muitas semelhanças, a diferença principal está nas hipóteses das pesquisas abordadas.

O diagrama de BAM, proposto por Soberón e Peterson (2005), é a forma mais didática para compreender o uso apropriado dos termos e conceitos apontados previamente. Esse diagrama é apresentado a seguir, com a castanheira-da-amazônia como exemplo. O diagrama foi construído e discutido por meio de um grupo focal<sup>1</sup> que ocorreu na Embrapa Amapá em novembro de 2016<sup>2</sup>, que contou com a participação de pesquisadores especialistas na ecologia da espécie e membros do Mapeamento de Castanhais Nativos e Caracterização Socioambiental e Econômica de Sistemas de Produção da Castanha-do-Brasil na Amazônia – MapCast (2014-2018), coordenado pela Embrapa.

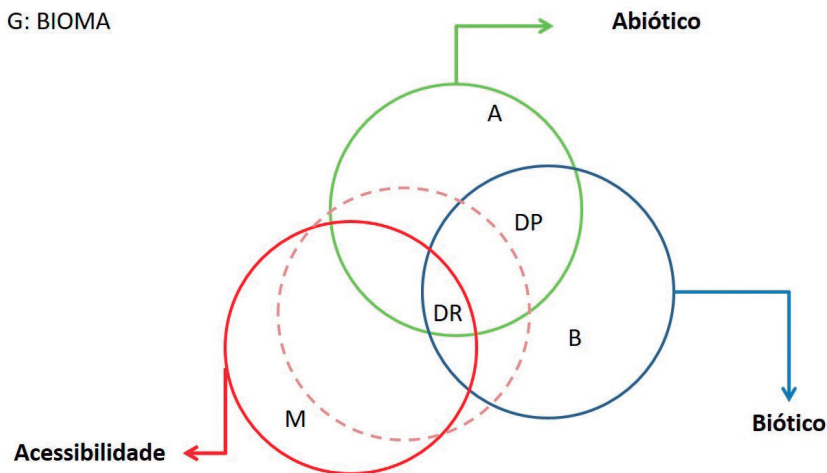
## Diagrama de BAM para *Bertholletia excelsa*

BAM é um conceito de três dimensões – biótico, abiótico e mobilidade (ou acessibilidade) – que definem a presença ou a ausência de uma espécie (Soberón; Peterson, 2005). Esse conceito hipotético foi observado para o contexto da castanheira-da-amazônia, uma espécie arbórea que ocorre no bioma Amazônia, nomeado com a letra (G). Nesse bioma, existem áreas com condições abióticas (A) (solos, clima e topografia) favoráveis, mas cuja instabilidade provoca limitações fisiológicas na espécie; e condições bióticas (B) (espécie, polinizadores, dispersores – animais e humanos, competidores, entre outras interações) que influenciam no controle populacional. A intersecção de A e B é a área totalmente adequada para a espécie, considerada área de distribuição potencial da espécie (DP). Entretanto, essa área pode não ser totalmente ocupada devido às condições de acessibilidade (M) causadas por limitação de dispersão, barreiras geográficas e/ou fatores antrópicos que limitam o acesso às áreas potenciais. A intersecção de A, B e M forma a chamada área de distribuição real (DR), ou seja, aquela realmente ocupada pela espécie e que pode ser considerada seu nicho realizado (Figura 1).

Durante a discussão sobre os fatores bióticos e abióticos no grupo focal, os pesquisadores selecionaram 29 preditores ambientais que podem estar relacionados com a ocorrência e o desenvolvimento da espécie e cujos dados encontram-se disponíveis na escala de aproximadamente 1 km de resolução espacial no bioma

<sup>1</sup> Grupo focal: método de pesquisa das ciências sociais aplicado para um grupo de pessoas.

<sup>2</sup> Discussão realizada durante o workshop “Modelagem MaxEnt e sua aplicação na estimativa de áreas preferenciais à ocorrência de *B. excelsa* na Embrapa Amapá, em 09-11-2016”.



**Figura 1.** Diagrama de BAM para *Bertholletia excelsa*. O bioma amazônico é representado pela letra G; as condições abióticas, pela letra A e pelo círculo na cor verde; as condições bióticas, pela letra B e pelo círculo na cor azul; as condições de acessibilidade, pela letra M e pelo círculo na cor vermelha; DR para área de distribuição real da espécie; DP para área de distribuição potencial da espécie; e linha tracejada representa condições que favorecem a acessibilidade da espécie às áreas potenciais.

Fonte: Adaptado de Soberón e Peterson (2005).

Amazônia<sup>3</sup>. Além disso, eles destacaram duas circunferências para a dimensão “acessibilidade”, pois existem algumas condições que favorecem a presença da espécie na área potencial (linha tracejada) e outras que limitam (linha sólida), ambas influenciadas por fatores naturais e antrópicos. Segundo os pesquisadores, a literatura tem intensamente discutido a capacidade de expansão de castanhais por contribuições humanas. Entretanto, por meio de curvas diamétricas da espécie, sabe-se que existe um declínio na população de castanheiras em florestas naturais preservadas devido à baixa capacidade de regeneração da espécie em áreas altamente sombreadas. Como os indivíduos jovens de castanheiras são dependentes de clareiras naturais ou antrópicas para seu estabelecimento, em algumas áreas utilizadas pela agricultura itinerante de pousio longo, como a praticada por populações indígenas e extrativistas, e até mesmo em áreas de

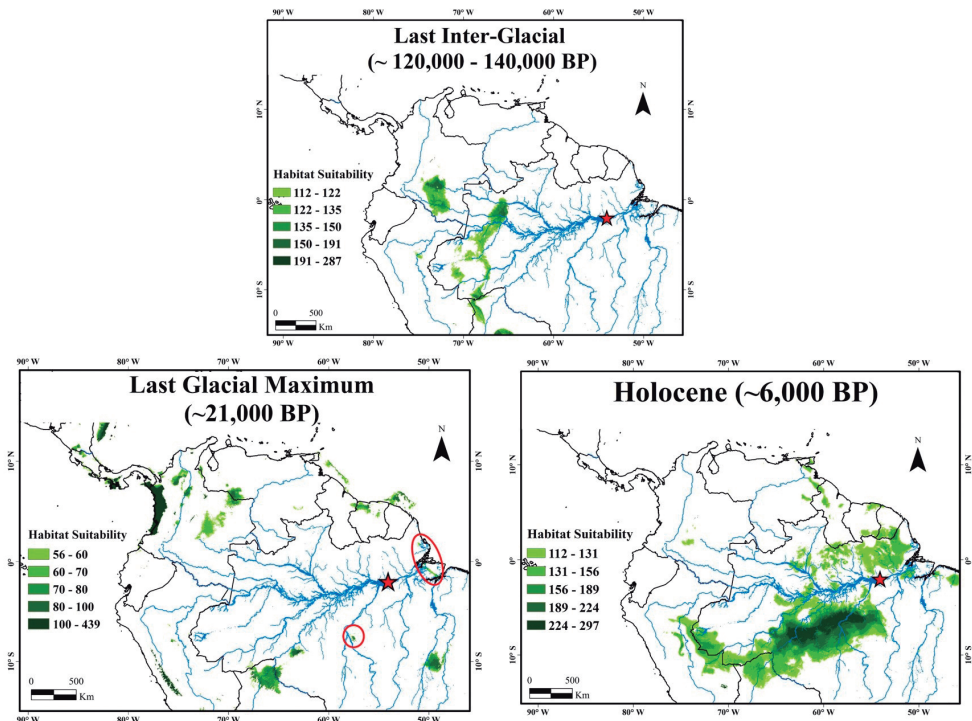
<sup>3</sup> Um banco de dados com 102 preditores ambientais foi organizado para a tese da primeira autora. A tabela com os 29 preditores ambientais selecionados pelos especialistas encontra-se disponível na publicação Tourne et al. (2019), material suplementar.

reflorestamento, têm-se observado taxas elevadas de regeneração da espécie. Isso não é observado, no entanto, em relação à abertura mecanizada de grandes áreas para o agronegócio de commodities, cuja expansão provoca redução da acessibilidade da espécie às áreas potenciais, pela fragmentação, alteração e destruição do seu hábitat. Desse modo, mesmo que indivíduos isolados de castanheira sejam encontrados nas pastagens, em plantios de soja (*Glycine max*) ou de dendê (*Elaeis guineenses*), a funcionalidade da espécie nesses agroecossistemas é seriamente comprometida.

## Evidências sobre a distribuição potencial de castanheiras

Estudos de modelagem de distribuição potencial para a castanheira-da-amazônia foram realizados nas últimas duas décadas, sendo o Museu Paraense Emílio Goeldi e a Conservação Internacional pioneiros na modelagem para identificar áreas críticas para a conservação da biodiversidade paraense. Em 2009, eles apresentaram um mapa de distribuição da castanheira-da-amazônia no Pará (Albernaz; Avila-Pires, 2009), com algumas limitações metodológicas devido à escassez de dados de presença, limitadas variáveis ambientais e ausência de controle de tendências espaciais. Em 2014, outro estudo liderado pela Bioversity Internacional e World Agroforestry Centre (Icraf) foi publicado no *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi* e trouxe descobertas inéditas em relação à distribuição da espécie observada em uma larga escala temporal. Os autores modelaram e caracterizaram a distribuição da castanheira sob diferentes condições climáticas (passado, presente e futuro) e em toda a extensão do bioma Amazônia (Thomas et al., 2014), conforme pode ser verificado na Figura 2.

Os autores constataram, baseados em evidências paleobotânicas e na distribuição da espécie modelada para diferentes passados climáticos, que, durante o período glacial (~21,000 BP), as populações de castanheiras teriam sido restritas principalmente ao sul da bacia amazônica, nos chamados refúgios. No entanto, no médio holoceno (~6,000 BP), houve expansão de condições favoráveis, o que gerou uma distribuição da espécie semelhante aos padrões atuais. Além disso, os autores modelaram cenários futuros baseados apenas em alterações das condições climáticas para a castanheira, e os resultados evidenciaram um futuro positivo para a espécie, com expansão do seu hábitat adequado – de 1,3 para 7 milhões de quilômetros quadrados até 2089. No entanto, eles destacaram que, para tomada de decisão sobre conservação e manejo, é necessário considerar outras variáveis na paisagem, tais como uso do solo e limitações de dispersores.



**Figura 2.** Mapas de adequabilidade de hábitat para a castanheira-da-amazônia. Os mapas foram obtidos a partir de projeções de passados climáticos (máximo glacial e holoceno). A cor verde indica a faixa de adequabilidade de hábitat; os círculos vermelhos indicam a localização de pequenas áreas onde as condições favoráveis podem ter prevalecido no modelo; e a estrela vermelha indica a localização da caverna da Pedra Pintada, onde os mais antigos espécimes de castanheira-da-amazônia foram encontrados, 11 mil anos antes do presente (BP).

Fonte: Thomas et al. (2014).

Eles ressaltaram que os distúrbios antropogênicos são determinantes para mudar as condições favoráveis, podendo ampliá-las, em casos moderados, bem como restringi-las. Em termos metodológicos, Thomas et al (2014) utilizaram diversas variáveis e modernas técnicas para ajustar os modelos, entretanto o modelo de distribuição potencial final apresentou elevado grau de sobreajuste relacionado aos dados de presença utilizados, ou seja, um modelo que tende a prever principalmente em áreas onde existem pontos de presença, e aponta baixa probabilidade de ocorrência em áreas com pouca ou nenhuma informação espacial. Tal situação foi visualizada, especialmente, em áreas historicamente reconhecidas como de ocorrência da espécie na Amazônia Oriental, especialmente no Pará e Amapá.

Em 2019, outra publicação, liderada pela Universidade de São Paulo em parceria com pesquisadores do projeto MapCast e Bioversity Internacional, traz um novo modelo de distribuição da castanha-da-amazônia, gerado por meio da integração de análises estatísticas, técnicas de geoprocessamento e conhecimento de especialistas (Tourne et al., 2019). Os autores enriqueceram o banco de ocorrências utilizado por Thomas et al. (2014) de 936 para 3,325 pontos de ocorrência, com dados de presença registrados em parcelas permanentes de projetos coordenados pela Embrapa – projetos Kamukaia<sup>4</sup> e MapCast, além de dados de outros pesquisadores em particular. Os autores também processaram mais de 100 variáveis e covariáveis ambientais (clima, solo e topografia) em formato adequado para modelagem e realizaram análises uni e multivariadas dos dados, combinando estas com os conhecimentos de especialistas, para seleção de preditores. As etapas metodológicas seguidas para elaborar o modelo de distribuição potencial foram resumidas em um quadro para facilitar a compreensão e a replicabilidade da pesquisa (Figura 3).

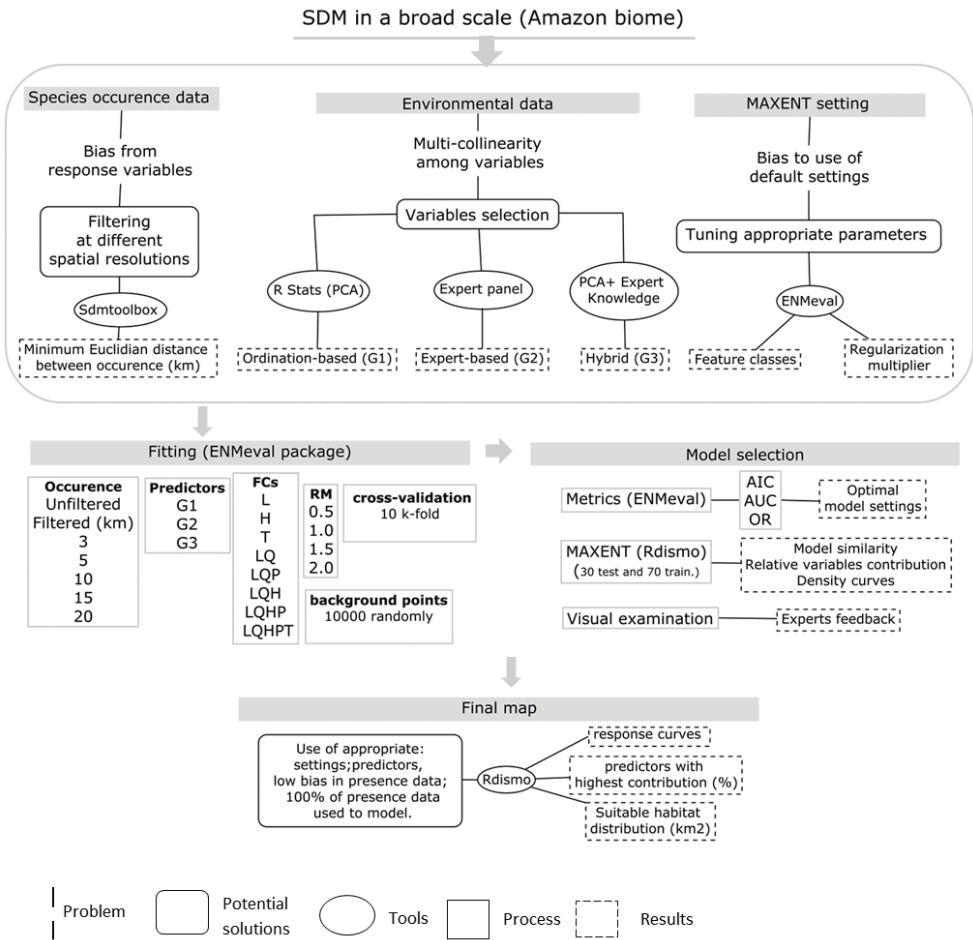
Esse mais recente estudo de modelagem de distribuição potencial da castanha-da-amazônia no bioma confirma que a espécie possui uma ampla distribuição (32% do bioma), equivalente a 2,3 milhões de quilômetros quadrados de ambientes favoráveis para sua ocorrência (Figura 4). Esse modelo apresentou um erro de omissão de 11% e acurácia média de 80%, bem como também apresentou poder preditivo para mapear áreas favoráveis à espécie no Amazonas, no Pará e no Amapá, onde os estudos anteriores mostravam dificuldade nas estimativas. Além disso, os resultados mostraram as cinco variáveis com maiores contribuições para o modelo: altitude (19,4%), fragmentos grosseiros do solo > 2mm (18,3%), fração argila (18,2%), declividade (11,9%) e evapotranspiração potencial anual (6,9%). Esses resultados correspondem aos estudos de populações que apontam a importância das variáveis de solo na ecologia e na produtividade da castanha (Costa et al., 2017; Kainer et al., 2007). A baixa contribuição das variáveis de clima foi justificada pela baixa variabilidade dos dados na resolução espacial adotada (~1 km). Mesmo assim, a evapotranspiração potencial contribuiu com 7% no ajuste do modelo, e esse resultado tem sentido ecológico, uma vez que a castanha-da-amazônia é uma espécie emergente e recebe altos níveis de radiação solar na sua área de copa. Isso causa uma predisposição a perder grande quantidade de água para a atmosfera, e a água que fica disponível para a planta é tão importante para

---

<sup>4</sup> Projeto Kamukaia – Valorização dos produtos florestais não madeireiros na Amazônia (em andamento – 3ª fase).

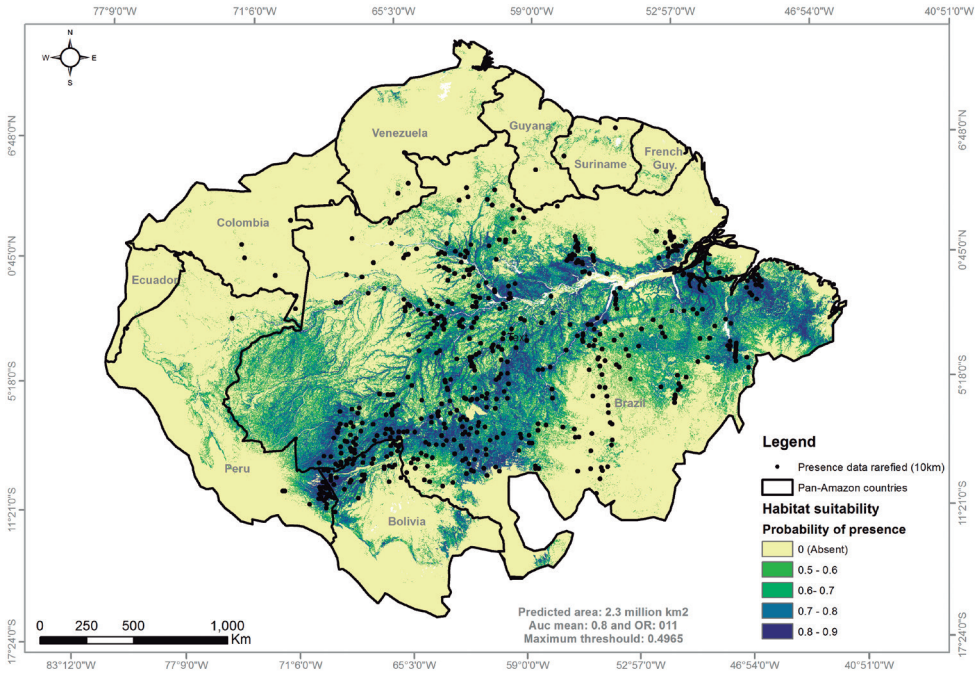


a produção de frutos que estudos já apontaram queda de produção nos períodos secos (Kainer et al., 2007; Thomas et al., 2017; Pastana et al., 2021).



**Figura 3.** Sequência metodológica para construção do modelo de distribuição potencial e identificação do hábitat adequado da castanheira-da-amazônia.

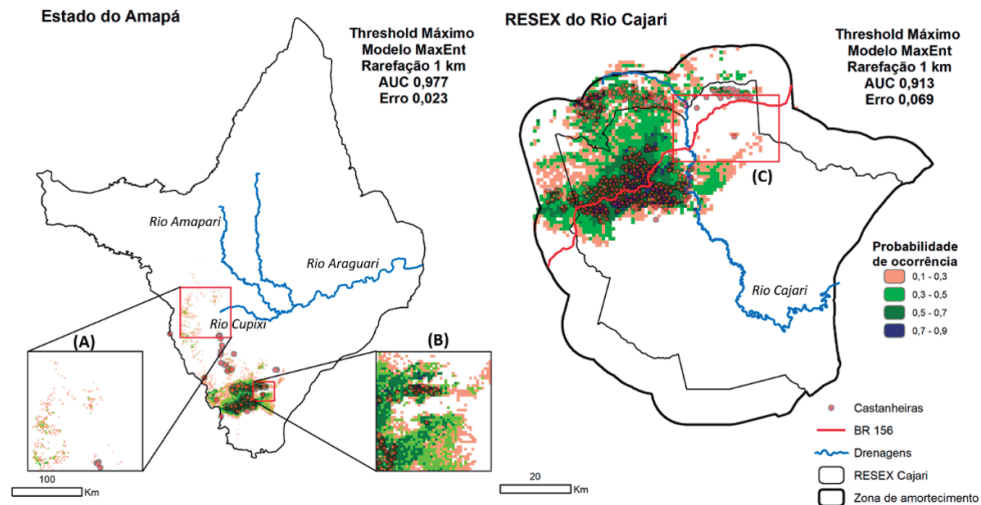
Fonte: Tourne et al. (2019).



**Figura 4.** Distribuição do habitat estimado para a castanha-da-amazônia modelada. Os pontos pretos indicam localização da espécie, filtrados para uma distância mínima de 10 km (distância adequada para evitar tendências espaciais na modelagem desse banco de dados); a graduação de cores do amarelo ao azul indicam de baixa a alta probabilidade de presença da espécie.

Fonte: Tourne et al. (2019).

Para avaliar a influência das variáveis de clima, solo e topografia sobre a distribuição potencial da castanha-da-amazônia em uma escala menor, os pesquisadores do projeto MapCast selecionaram o Amapá e uma unidade de conservação de 502 mil hectares no sul do estado, a Reserva Extrativista do Rio Cajari (Resex Cajari) para fazer um estudo de caso de modelagem (Figura 5). A aplicação dessa escala mais refinada foi possível devido às mais de 70 mil árvores de castanheiras mapeadas no estado. O estudo verificou que as castanheiras ocorrem na parte sudoeste do Amapá e que as variáveis que mais contribuem para o modelo variam de acordo com a escala; por exemplo, as variáveis de clima foram mais representativas no estado e as de solo, por sua vez, na Resex Cajari (Costa, 2018).



**Figura 5.** Distribuição potencial da castanheira-da-amazônia no Amapá (à esquerda) e na Resex do Rio Cajari (à direita). A graduação de cores, do rosa ao azul, indicam de baixa a alta probabilidade de ocorrência da espécie, e os quadrados A, B e C indicam áreas importantes para avaliação do modelo.

Fonte: Costa (2018).

No modelo estadual, a precipitação do mês mais chuvoso contribuiu com 44,5% da variabilidade explicada pelo modelo; isso demonstrou ser essa uma variável importante para ajudar a distinguir presença e ausência de castanheiras no Amapá. Entretanto, no norte do estado, onde os níveis de pluviosidade são mais altos, o modelo não aponta ocorrência da espécie nesses ambientes, o que levanta a hipótese de estes níveis serem um fator limitante. Na opinião dos especialistas consultados nesse estudo, essa variável pode ser combinada com a precipitação no trimestre mais seco, porque alguns eventos fenológicos, como a floração, ocorrem no período seco e atuam como uma expressão da planta à falta de água no solo. Na Resex do Rio Cajari, as variáveis textura do solo, fragmentos grosseiros maiores > 2 mm e matéria orgânica destacaram-se em todos os modelos; isso concorda com a paisagem da Resex, que possui diferentes classes de solo e estruturas de vegetação bem definidas. Já as variáveis topográficas não foram muito significativas nesse estudo de caso. Esse estudo também revela a necessidade de maiores coletas de dados em áreas apontadas pelo modelo com baixa probabilidade de presença, porém com relatos de ocorrência da espécie, como foi o caso da área A, próxima ao rio Cupuxi. Por outro ângulo, nas áreas de savana *stricto sensu* (A e B), o modelo apontou ausência da espécie, e isso condiz com a realidade.

Todas essas pesquisas demonstraram que é possível estimar a distribuição da castanheira-da-amazônia a partir de dados de presença e variáveis ambientais. Entretanto, para melhores ajustes dos modelos, são necessários dados ambientais coletados em maior escala de detalhamento e mais bem distribuídos no bioma, isso porque os estudos existentes são restritos a algumas regiões. Além disso, a distribuição da espécie no habitat é descontínua, ou seja, a espécie apresenta padrão aleatório em alguns lugares e agrupada em outros. Em Roraima, por exemplo, foi identificado que os indivíduos adultos apresentam padrão aleatório e os jovens possuem tendência ao agrupamento (Tonini et al., 2008), comportamento similar ao encontrado no Acre (Wadt et al., 2005). Nos castanhais avaliados no Amapá, os valores de densidade encontrados foram quatro vezes maiores que os do Acre (Neves et al., 2016) e no Amazonas, embora tenha sido encontrado um padrão aleatório, as áreas com maior densidade indicam padrão agrupado a regular (Alvez et al., 2017). Já no Pará, o padrão agrupado e a alta densidade de plantas vêm sendo reportados (Salomão, 2009). Esses padrões de densidade e distribuição das populações podem ser reflexo das condições ambientais ou genéticas, que precisam ser modelados separadamente ou combinados, estudados e discutidos para auxiliar o planejamento de conservação e uso sustentável da espécie.

## Dificuldades na disponibilidade de dados para inferências e projeções

A qualidade dos modelos de distribuição de uma espécie, ou seja, a acurácia com que a distribuição é estimada, depende sobretudo dos dados disponíveis. As principais dificuldades quanto a isso são descritas a seguir.

– **Registros de presença:** geralmente são condicionados a áreas de fácil acesso, catalogadas em museus de história natural e herbários, armazenados em banco de dados de agências de pesquisa, em banco de dados de alunos de pós-graduação, ou coletados por organizações não governamentais que apoiam estudos de conservação. Quando organizados em banco único, evidenciam áreas sub-representadas ou sobre-representadas, o que resulta em tendências espaciais nos modelos de distribuição (Thomas et al., 2014; Tourne et al., 2019). Além disso, as coleções de registros podem apresentar diversas incertezas quanto à localização dos espécimes, devido à imprecisão de dados antigos, erros de geolocalização, coordenadas com sistemas de projeções não indicados, mudanças taxonômicas, entre outros problemas que precisam ser atentamente avaliados (Franklin et al.,

2017). Uma alternativa são os métodos de filtragem espacial para corrigir as tendências e melhorar a performance dos modelos (Boria et al., 2014; Kramer-Schadt et al., 2013).

– **Registros de ausência:** uma das principais limitações nos bancos para modelagem de populações são os dados de ausências, pois são raros os estudos que refletem a ausência real da espécie. Isso acontece, sobretudo, no caso de espécies ameaçadas por perturbações humanas ou sujeitas a barreiras ecológicas, que ocupam uma pequena área do hábitat adequado (Cianfrani et al., 2010). Por isso, os dados de ausências devem ser utilizados com cautela, para não enviesar o modelo, visto que essa informação é essencial em todos os algoritmos de modelagem de distribuição espacial. A seleção de pontos de background ou pseudoausência foi uma estratégia adotada para modelos gerados com dados somente de presença, como o Maxent (Phillips; Dudík, 2008).

– **Dados abióticos:** nos últimos anos, houve um aumento na disponibilidade de planos de informação espacial de variáveis (e covariáveis) ambientais. A base de dados sobre variações no clima mundial Worldclim (Fick; Hijmans, 2017) é um excelente exemplo de oferta de dados climáticos para modelagem espacial, baseado em interpolações de médias históricas e condições futuras (Hijmans et al., 2005). Os dados são oferecidos em diversas resoluções espaciais, a mais recente delas está disponível na escala de aproximadamente 1 km<sup>2</sup> (Fick; Hijmans, 2017). Outras bases de dados também são disponibilizadas na escala global, como é o caso de solos (Hengl et al., 2014) e topografia (USGS produtos<sup>5</sup>). Entretanto, a multicolinearidade entre preditores é um sério problema estatístico que precisa ser minimizado quando covariáveis são utilizadas como variáveis independentes e causam redundância de informação, com efeitos negativos nas estimativas dos coeficientes de regressão (Dormann et al., 2013). Para reduzir essa tendência, a análise dos componentes principais (PCA) tem sido a técnica multivariada mais utilizada nos estudos de modelagem (Cruz-Cárdenas et al., 2014) e, quando associada ao conhecimento de especialistas, tem aumentado a performance dos modelos (Tourne et al., 2019).

– **Dados bióticos:** os dados de interações bióticas, especialmente da fauna, são muito raros, mas extremamente necessários, pois aumentam o poder preditivo dos modelos, tanto de distribuição potencial quanto de distribuição real da espécie. A carência desses dados é maior na região amazônica, onde os inventários faunísticos são pouco reportados, por ocorrer de forma muito lenta e em pequena

---

<sup>5</sup> Disponível em: <https://data.usgs.gov/datacatalog/>.

escala. Vale ressaltar que nas unidades de conservação o programa Arpa<sup>6</sup> (Áreas Protegidas da Amazônia), iniciado em 2002, trouxe riquíssimas informações sobre a biodiversidade amazônica inventariada para os grupos da flora, dos invertebrados, dos peixes, dos anfíbios, dos répteis, das aves e dos mamíferos.

## O uso da distribuição espacial da castanheira em estratégias de pesquisa e conservação

Em geral, as variações na densidade e distribuição espacial de espécies dependem da escala de estudo considerada. Para a castanheira, além da escala, pode-se verificar que sua ocorrência é dependente da tipologia florestal (Neves et al., 2016), da similaridade genética, da dispersão de sementes e pólen (Sujii et al., 2015), da influência de populações pré-colombianas (Clement et al., 2015), das recentes explorações florestais – madeireira e não madeireira (Tonini; Baldoni, 2019) – e dos fatores biofísicos – clima, solos e topografia (Costa, 2018; Tourne et al., 2019). Todos esses estudos expõem as causas complexas que determinam a distribuição da castanheira-da-amazônia e, ao mesmo tempo, demonstram que estudos de populações não devem ser dissociados da modelagem, mas, sim, combinados para aumentar a qualidade das estimativas.

A ocorrência da castanheira em todos os estados do bioma Amazônia no Brasil, assim como nos outros países que compõem a Pan-Amazônia<sup>7</sup>, confirma por que a espécie é um símbolo da região. Ela é um ícone da necessidade de conservação da floresta em pé a partir do seu uso e manejo, o que evidencia que essa é uma estratégia mais efetiva para a proteção da Amazônia do que a preservação total, sob regime de comando e controle. Sob o ponto de vista de conservação da espécie, por meio dos modelos de distribuição, é possível calcular o percentual e a extensão do hábitat potencial da espécie. Em áreas protegidas, como nas unidades de conservação de uso sustentável e terras indígenas, onde é possível manter a atividade agroextrativista familiar, essas informações podem contribuir para a dispersão da espécie, além de auxiliar nas ações de gestão dessas áreas.

---

<sup>6</sup> Programa do governo federal coordenado pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA) e gerenciado financeiramente pelo Fundo Brasileiro para a Biodiversidade (FUNBIO). O programa encontra-se na fase III desde 2014.

<sup>7</sup> Venezuela, Peru, Bolívia, Colômbia, Equador, Guiana, Guiana Francesa e Suriname.

Em relação às áreas aptas para plantio, recomenda-se o plantio em áreas potenciais para a sua ocorrência, mesmo que estas não estejam ocupadas pela espécie, seja por um fator geográfico, seja por um fator humano. Devem-se priorizar os plantios integrados aos sistemas agrícolas familiares, por contribuírem para a geração de renda no curto e médio prazo, por gerarem distúrbios intermediários que facilitam o estabelecimento da espécie e por contribuírem para a manutenção da sociobiodiversidade típica do modo de vida extrativista amazônico.

## Contribuições da modelagem de distribuição potencial para a cadeia de valor da castanha-da-amazônia

A produção de castanha na Amazônia brasileira vem apresentando tendência de queda há vários anos, seja pelo envelhecimento dos castanhais, seja pela susceptibilidade às mudanças climáticas das castanheiras mais velhas, seja por questões mercadológicas e organizacionais que dificultam o extrativismo da castanha, como é o caso da questão logística. O transporte da castanha é um dos principais gargalos da cadeia produtiva, problema esse maximizado pela falta de planejamento e conhecimento detalhado dos locais de produção e rotas de escoamento. Esses problemas, assim como o planejamento de políticas públicas e os investimentos privados em novas agroindústrias, também podem ser mais bem tratados com o uso adequado das informações espaciais das áreas de ocorrência das castanheiras.

A informação de que menos da metade do bioma amazônico possui condições potenciais para o desenvolvimento da castanheira (32%) levanta um alerta para a valoração de serviços ecossistêmicos oferecidos pelas populações existentes e conservadas (Tourne et al. 2019). Além disso, desperta a necessidade de olhar para o manejo sustentável na coleta dos frutos e de ter um comércio justo para a valorização, nacional e internacional, das comunidades, cooperativas e empresas que atuam nessa cadeia de valor.

A probabilidade da distribuição da espécie pode ser usada para orientar o pagamento ou a compensação pelos serviços ambientais de povos que manejam e ajudam a conservar e criar um hábitat favorável às castanheiras e às florestas associadas. Essas informações podem também ser combinadas com dados de inventário para orientar os manejadores sobre as necessidades de enriquecimento e adensamento de castanhais nativos, com o objetivo de aumentar a produção de frutos com menor esforço laboral. A localização dos castanhais e a quantificação dos estoques de

populações disponíveis são fundamentais para agregar os valores da bioeconomia à sua cadeia de valor, o que, recentemente, vem ganhando força como estratégia de conservação da Amazônia.

## Referências

- ALBERNAZ, A. L. K. M.; AVILA-PIRES, T. C. S. (org.). **Espécies ameaçadas de extinção e áreas críticas para a biodiversidade no Pará**. Belém, PA: Museu Paraense Emílio Goeldi: MCT: Conservation International, 2009. 54
- ALVES, T. C. V.; SILVA, K.E. da S.; AGUIAR, A. L. da S. A. Distribuição espacial de *Bertholletia excelsa* BONPL. em duas formações florestais no estado do Amazonas. In: SEMANA FLORESTAL UFAM, 2017, Manaus. **Anais...** Manaus: Eco & Companhia, 2017. p. 96-98.
- BAIDER, C. **Demografia e ecologia de dispersão de frutos de *Bertholletia excelsa* Humb. e Bonpl. (Lecythidaceae) em castanhais naturais silvestres da Amazônia Oriental**. 2000. (Doctoral Thesis) – Universidade de São Paulo, São Paulo.
- BEGON, M.; TOWNSEND, C. R.; HARPER, J. L. **Ecology from individuals to ecosystems**. 4. ed. United Kingdom: Blackwell Publishing, 2006.
- BORIA, R. A.; OLSON, L. E.; GOODEMAN, S. M.; ANDERSON, R. P. Spatial filtering to reduce sampling bias can improve the performance of ecological niche models. **Ecological Modelling**, v. 275, p. 73–77. Mar. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.12.012>
- CARDOSO, B. R.; DUARTE, G. B. S.; REIS, B. Z.; COZZOLINO, S. M. F. Brazil nuts: nutritional composition, health benefits and safety aspects. **Food Research International**, v. 100, p. 9-18, Sept. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.08.036>.
- CIANFRANI, C.; LE LAY, G.; HIRZEL, A. H.; LOY, A. Do habitat suitability models reliably predict the recovery areas of threatened species? **Journal of Applied Ecology**, v. 47, n. 2, p. 421-430, Apr. 2010 DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2010.01781.x>.
- CLEMENT, C. R.; DENEVAN, W. M.; HECKENBERGER, M. J.; JUNQUEIRA, A. B.; NEVES, E. G.; TEIXEIRA, W. G.; WOODS, W. I. The domestication of Amazonia before European conquest. **Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 282, n. 1812, Aug. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1098/rspb.2015.0813>.
- COSTA, F. F. **Ocorrência e estrutura vertical de florestas com castanheiras na Amazônia brasileira**. 2018. 88 f. Dissertação (Mestrado em Biodiversidade Tropical) - Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade Tropical, Universidade Federal do Amapá, Macapá.
- COSTA, M. G.; TONINI, H.; MENDES, P. Atributos do solo relacionados com a produção da castanheira-do-brasil (*Bertholletia excelsa*). **Floresta e Ambiente**, v. 24, , p. 1-10, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2179-8087.004215>.
- COTTA, J. N.; KAINER, K. A.; WADT, L. H. O.; STAUDHAMMER, C. L. Shifting cultivation effects on Brazil nut (*Bertholletia excelsa*) regeneration. **Forest Ecology and Management**, v. 256, n. 1-2, p. 28-35, July 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.03.026>.
- CRUZ-CÁRDENAS, G.; LÓPEZ-MATA, L.; VILLASEÑOR, J. L.; ORTIZ, E. Potential species distribution modeling and the use of principal component analysis as predictor variables. **Revista Mexicana de Biodiversidad**, v. 85, n. 1, p. 188-199, Mar. 2014. DOI: <https://doi.org/10.7550/rmb.36723>.



DORMANN, C. F.; ELITH, J.; BACHER, S.; BUCHMANN, C.; CARL, G.; CARRÉ, G.; MARQUÉZ, J. R. G.; GRUBER, B.; LAFOURCADE, B.; LEITÃO, P. J.; MÜNKEMÜLLER, T.; McCLEAN, C.; OSBORNE, P. E.; REINEKING, B.; SCHRÖDER, B.; SKIDMORE, A. K.; ZURELL, D.; LAUTENBACH, S. Collinearity: A review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. **Ecography**, v. 36, n. 1, p. 27–46. Jan. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2012.07348.x>

ELITH, J.; LEATHWICK, J. R. Species distribution models: ecological explanation and prediction across space and time. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, v. 40, n. 1, p. 677–697, Dec. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.110308.120159>.

FICK, S. E.; HIJMANS, R. J. WorldClim 2: new 1 km spatial resolution climate surfaces for global land areas. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 12, p. 4302–4315, Oct. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.5086>.

FRANKLIN, J. **Mapping species distributions: spatial inference and prediction**. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2010. (Ecology, biodiversity and conservation). DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511810602>.

FRANKLIN, J.; DAVIS, F. W.; IKEGAMI, M.; SYPHARD, A. D.; FLINT, L. E.; FLINT, A. L.; HANNAH, L. Modeling plant species distributions under future climates: how fine scale do climate projections need to be? **Global Change Biology**, v. 19, n. 2, p. 473–483, Feb. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.12051>.

FRANKLIN, J.; SERRA-DIAZ, J. M.; SYPHARD, A. D.; REGAN, H. M. Big data for forecasting the impacts of global change on plant communities. **Global Ecology and Biogeography**, v. 26, n. 1, p. 6–17. Jan. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1111/geb.12501>

GUEDES, M. C.; NEVES, E. de S.; RODRIGUES, E. G.; PAIVA, P.; COSTA, J. B. P. C.; FREITAS, M. F.; LEMOS, L. M. de. 'Castanha na roça': expansão da produção e renovação dos castanhais em áreas de agricultura itinerante no Amapá, Brasil. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Naturais**, v. 419, n. 2, p. 381–398, maio/ago. 2014. DOI: <https://doi.org/10.46357/bcnaturais.v9i2.532>.

GUISAN, A.; THUILLER, W. Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. **Ecology Letters**, v. 8, n. 9, p. 993–1009, Sept. 2005. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2005.00792.x>.

HAUGAASEN, J.; HAUGAASEN, T.; PERES, C.; GRIBEL, R.; WEGGE, P. Seed dispersal of the Brazil nut tree (*Bertholletia excelsa*) by scatter-hoarding rodents in a Central Amazonian Forest. **Journal of Tropical Ecology**, v. 26, n. 3, p. 251–262, May 2010. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0266467410000027>.

HENGL, T.; JESUS, J. M.; MACMILLAN, R. A.; BATJES, N. H.; HEUVELINK, G. B.M.; RIBEIRO, E.; SAMUEL-ROSA, A.; KEMPEN, B.; LEENAARS, J. G. B.; WALSH, M. G.; GONZALEZ, M. R. SoilGrids1km – Global soil information based on automated mapping. **PLoS ONE**, v. 9, n. 8, e105992, Aug. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0105992>.

HIJMANS, R. J.; CAMERON, S. E.; PARRA, J. L.; JONES, P. G.; JARVIS, A. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. **International Journal of Climatology**, v. 25, n. 15, p. 1965–1978. Nov. 2005. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.1276>

HOMMA, A. K. O.; MENEZES, J. A. E. A.; MAUÉS, M. M. Castanheira-do-pará: os desafios do extrativismo para plantios agrícolas. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Naturais**, v. 9, n. 2, p. 293–306, maio/ago. 2014. DOI: <https://doi.org/10.46357/bcnaturais.v9i2.526>.

KAINER, K. A.; WADT, L. H. O.; STAUDHAMMER, C. L. Explaining variation in Brazil nut fruit production. **Forest Ecology and Management**, v. 250, n. 3, p. 244-255, Oct. 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.05.024>.

KRAMER-SCHADT, S.; NIEDBALLA, J.; PILGRIM, J. D.; SCHRÖDER, B.; LINDENBORN, J.; REINFELDER, V.; STILLFRIED, M.; HECKMANN, I.; SCHARF, A. K.; AUGERI, D. M.; CHEYNE, S. M.; HEARN, A. J.; ROSS, J.; MACDONALD, D. W.; MATHAI, J.; EATON, J.; MARSHALL, A. J.; SEMIADI, G.; RUSTAM, R.; BERNARD, H.; ALFRED, R.; SAMEJIMA, H.; DUCKWORTH, J. W.; BREITENMOSER-WUERSTEN, C.; BELANT, J. L.; HOFER, H.; WILTING, A. The importance of correcting for sampling bias in MaxEnt species distribution models. **Diversity and Distributions**, v. 19, n. 11, p. 1366–1379. July 2013. DOI: <https://doi.org/10.1111/ddi.12096>.

NEVES, E. S.; WADT, L. H. O.; GUEDES, M. C. Estrutura populacional e potencial para o manejo de *Bertholletia excelsa* (Bonpl.) em castanhais nativos do Acre e Amapá. **Scientia Forestalis**, v. 44, n. 109, p. 19-31, mar. 2016. DOI: <https://doi.org/10.18671/scifor.v44n109.02>.

PAIVA, P. M.; GUEDES, M. C.; FUNI, C. Brazil nut conservation through shifting cultivation. **Forest Ecology and Management**, v. 261, p. 508-514, Feb. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.11.001>.

PASTANA, D. N. B.; MODENA, E. S.; WADT, L. H. O.; NEVES, E. S.; MARTORANO, L. G.; LIRA-GUEDES, A. C.; SOUZA, R. L. F.; COSTA, F. F.; BATISTA, A. P. B.; GUEDES, M. C. Strong El Niño reduces fruit production of Brazil-nut trees in the eastern Amazon. **Acta Amazonica**, v. 51, n. 3. p. 270-279, jul./sep. 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4392202003702>.

PETERSON, A.; SOBERÓN, J. Integrating fundamental concepts of ecology, biogeography, and sampling into effective ecological niche modeling and species distribution modeling. **Plant Biosystems: An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology**, v. 146, n. 4, p. 789-796, 2012a. DOI: <https://doi.org/10.1080/11263504.2012.740083>.

PETERSON, A. T.; SOBERÓN, J. Species distribution modeling and ecological niche modeling: getting the concepts right. **Natureza & Conservação**, v. 10, n. 2, p. 102-107, Dec. 2012b. DOI: <https://doi.org/10.4322/natcon.2012.019>.

PHILLIPS, S. J.; ANDERSON, R. P.; SCHAPIRE, R. E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. **Ecological Modelling**, v. 190, n. 3-4, p. 231-259, Jan. 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>.

PHILLIPS, S. J.; DUDÍK, M. Modeling of species distribution with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. **Ecography**, v. 31, p. 161–175. Jan. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.2007.0906.7590.05203.x>

PORCHER, V.; THOMAS, E.; GOMRINGER, C. R.; LOZANO, B. R. Forest ecology and management fire and distance-dependent recruitment of the Brazil nut in the Peruvian Amazon. **Forest Ecology and Management**, v. 427, p. 52-59, Nov. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.05.052>.

RIBEIRO, M. B. N.; JEROZOLIMSKI, A.; ROBERT, P.; SALLES, N. V.; KAYAPÓ, B.; PIMENTEL, T. P.; MAGNUSSON, W. E. Anthropogenic Landscape in Southeastern Amazonia: contemporary impacts of low-intensity harvesting and dispersal of Brazil nuts by the Kayapo´ indigenous people. **PLoS ONE**, v. 9, n. 7, e102187, 2014. DOI: [10.1371/journal.pone.0102187](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0102187).

SALOMÃO, R. P. Densidade, estrutura e distribuição espacial de castanheira-do-brasil (*Bertholletia excelsa* H. & B.) em dois platôs de floresta ombrófila densa na Amazônia setentrional brasileira.

**Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi**. Ciências Naturais, v. 4, n. 1, p. 11-25, jan./abr. 2009. DOI: <https://doi.org/10.46357/bcnaturais.v4i1.667> .

SALOMÃO, R. P. A castanheira:: história natural e importância socioeconômica. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi**. Ciências Naturais, v. 9, n. 2, p. 259-266, maio/ago. 2014. DOI: <https://doi.org/10.46357/bcnaturais.v9i2.524>.

SCHRODT, F.; SANTOS, M. J.; BAILEY, J. J.; FIELD, R. Challenges and opportunities for biogeography – What can we still learn from von Humboldt? **Journal of Biogeography**, v. 46, n. 8, p. 1631-1642, Aug. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1111/jbi.13616>.

SCOLES, R., CANTO, M. S.; ALMEIDA, R. G.; VIEIRA, D. P. Sobrevivência e frutificação de *Bertholletia excelsa* Bonpl. em áreas desmatadas em Oriximiná, Pará. **Floresta e Ambiente**, v. 23, n. 4, p. 555-564, out./dez, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/2179-8087.132015>.

SCOLES, R.; GRIBEL, R. The regeneration of Brazil nut trees in relation to nut harvest intensity in the Trombetas River valley of Northern Amazonia, Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 265, n. 1, p. 71-81, Feb. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.10.027>.

SHEPARD JUNIOR, G. H.; RAMIREZ, H. “Made in Brazil”: human dispersal of the Brazil Nut (*Bertholletia excelsa*, Lecythidaceae) in ancient Amazonia. **Economic Botany**, v. 65, p. 44-65, Mar. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12231-011-9151-6> .

SOBERÓN, J. M. Niche and area of distribution modeling: a population ecology perspective. **Ecography**, v. 33, n. 1, p. 159-167, Feb. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2009.06074.x>.

SOBERÓN, J.; PETERSON, A. T. Interpretation of models of fundamental ecological niches and species' distributional areas. **Biodiversity Informatics**, v. 2, p. 1-10, Jan. 2005. DOI: <https://doi.org/10.17161/bi.v2i0.4> .

SUJII, P. S.; MARTINS, K.; WADT, L. H. O.; AZEVEDO, V. C. R.; SOLFERINI, V.N. Genetic structure of *Bertholletia excelsa* populations from the Amazon at different spatial scales. **Conservation Genetics**, v. 16, n. 4, p. 955-964, Aug. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10592-015-0714-4>.

THOMAS, E.; ALCÁZAR CAICEDO, C.; LOO, J.; KINDTIII, R. The distribution of the Brazil nut (*Bertholletia excelsa*) through time: from range contraction in glacial refugia, over human-mediated expansion, to anthropogenic climate change. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi**. Ciências Naturais, v. 9. n. 2, p. 267-291, maio/ago. 2014. DOI: <https://doi.org/10.46357/bcnaturais.v9i2.525>.

THOMAS, E.; VALDIVIA, J.; ALCÁZAR CAICEDO, C.; QUAEVLI, J.; WADT, L. H. O.; CORVERA, R. NTFP harvesters as citizen scientists: validating traditional and crowdsourced knowledge on seed production of Brazil nut trees in the Peruvian Amazon. **PLOS ONE**, v. 12, n. 8, e0183743, Aug. 2017.. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0183743>.

TONINI, H.; BALDONI, A. B. Structure and regeneration of *Bertholletia excelsa* Bonpl. in Brazil nut groves in the Amazon. **Ciência Florestal**, v. 29, n. 2, p. 607-621, abr./jun. 2019. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509822112>.

TONINI, H.; COSTA, P. da; KAMINSKI, P. E. Estrutura e produção de duas populações nativas de castanheira-do-brasil (*Bertholletia excelsa* O. Berg) em Roraima. **Floresta**, v. 38, n. 3, p. 445-457, jul./set. 2008. DOI: <https://doi.org/10.5380/ff.v38i3.12410>.

TOURNE, D. C. M.; BALLESTER, M. V. R.; JAMES, P. M. A.; MARTORANO, L. G.; GUEDES, M. C.; THOMAS, E. Strategies to optimize modeling habitat suitability of *Bertholletia excelsa* in the Pan-Amazonia. **Ecology and Evolution**, v. 9, n. 22, p. 12623-12638, Nov. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1002/ece3.5726>.

WADT, L. H. O.; KAINER, K. A.; GOMES-SILVA, D. A. P. Population structure and nut yield of a *Bertholletia excelsa* stand in Southwestern Amazonia. **Forest Ecology and Management**, v. 211, n. 3, p. 371-384, June 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.02.061>.