



5

Uso de modelos de nicho para a predição de ocorrência de espécies florestais

Marcos Silveira Wrege
Valderês Aparecida de Sousa
Márcia Toffani Simão Soares
Itamar Antônio Bognola
Elenice Fritzsos
Ananda Virgínia de Aguiar
Letícia Penno de Sousa

Introdução

Nicho ecológico é, basicamente, o conjunto de condições e recursos a partir dos quais os indivíduos de uma espécie são capazes de sobreviver, crescer e se reproduzir (De Marco Júnior; Siqueira, 2009). Holt (2009) e Wiens (2011), baseando-se no conceito de nicho ecológico dado por Hutchinson (1957), definem nicho como sendo um conjunto de condições bióticas e abióticas onde a espécie pode permanecer. O estudo do nicho de uma espécie ou população determina a amplitude de sua distribuição geográfica.

Existem ferramentas modernas que podem ser usadas para fazer a modelagem do nicho ecológico. Esses modelos têm muitas aplicações, e uma lista delas sempre estará incompleta, pois seu uso está em crescimento, com inovações a cada dia que permitem novas abordagens. As principais delas são: localizar espécies ou populações raras ou ameaçadas de extinção (Menon et al., 2010); fazer estudos fitogeográficos (Alfaro et al., 2014); estudar regiões com potencial de entrada de espécies invasoras, de pragas ou de doenças (Queiroz et al., 2018); fazer a projeção futura do nicho ecológico de uma espécie ou de uma população, com base nos padrões de alterações climáticas de uma região; estimar os padrões potenciais de riqueza de uma espécie, entre outras.

Juntamente com os estudos de genética de populações, os modelos de nicho têm sido usados para estudar a distribuição e a diversidade de populações naturais (Sousa; Richards, 2011) e indicar populações de interesse para uso em programas de melhoramento ou de conservação genética (Wrege et al., 2009, 2015, 2017). Com base na importância da ferramenta para estudos voltados à conservação, melhoramento genético e manejo de espécies florestais no Brasil, o presente capítulo aborda os principais aspectos, limitações e perspectivas de aplicação desta ferramenta na silvicultura do País.

A relação entre as espécies, o ambiente e os espaços geográficos: conceito de nicho ecológico

Conceito de nicho ecológico

O conceito de nicho ecológico parte do princípio que o conhecimento das condições e recursos nos quais os indivíduos de uma espécie são capazes de se adaptar e se estabelecer auxiliam na predição da sua distribuição (Grinnell, 1917; James et al., 1984; Soberón; Peterson, 2005). Tem-se observado a existência de relação direta entre a distribuição de espécies, as condições bióticas e abióticas favoráveis e o nicho ecológico, verificando-se que o limite de ocorrência de uma espécie coincide com o limite do nicho (Lee-Yaw et al., 2016). Sexton et al. (2009) afirmam que o limite de ocorrência de uma espécie é a expressão de seu nicho ecológico no espaço geográfico. A inter-relação entre biogeografia e nicho também é apontada por Wiens (2011).

Tipos de nicho ecológico

Existem basicamente dois tipos de nicho: o fundamental e o realizado. O primeiro é teórico e corresponde aos limites máximos das condições ambientais onde uma espécie pode sobreviver na ausência de interações prejudiciais, tal como a competição que ocorre na presença de outras espécies. É representado pela tolerância e resposta fisiológica da espécie às condições abióticas de determinado local, dentre elas o clima, solo e relevo. A distribuição das espécies, bem como dos



recursos genéticos das espécies florestais, tem forte influência do clima que atua como uma ação direcionadora sobre os limites das regiões de ocorrência das espécies (Garcia et al., 2013; Alfaro et al., 2014).

O nicho realizado, por sua vez, é o real, o que existe de fato na natureza. O nicho realizado considera, além das condições abióticas, as interações bióticas, incluindo tanto as interações prejudiciais (ex. competição) quanto as benéficas (ex: simbiose) entre as espécies, as quais podem limitar ou expandir os limites máximos das regiões onde a espécie pode sobreviver. Por exemplo, uma espécie poderia deixar de ocupar um espaço onde teria os limites das condições ambientais favoráveis para se desenvolver, devido à presença de outra espécie mais competitiva e que disputaria o mesmo nicho.

Na distribuição das espécies, existe ainda a influência de outros fatores que limitam a sua ocorrência, como as barreiras geográficas (ex. cadeia de montanhas, rios, oceanos, desertos, entre outras) e a história da espécie (ex. diferentes eras geológicas que apresentam períodos de maior aquecimento e períodos de resfriamento, que alteram a distribuição da espécie ao longo do tempo), que impedem sua dispersão, podendo aumentar as diferenças entre o nicho fundamental e o realizado.

Competição entre espécies pelo mesmo nicho ecológico

É comum ocorrer a sobreposição de nichos entre duas ou mais espécies, quando estas têm necessidades semelhantes, podendo ocorrer competição, conforme o caso. A competição depende da dimensão da sobreposição entre os nichos e pode causar um estreitamento do nicho realizado. Uma das possíveis respostas de uma espécie à sobreposição de nichos é a sua aclimatação, em outras dimensões do nicho fundamental, com a formação de tipos morfológicos diferenciados que, no longo prazo, podem evoluir e gerar uma nova espécie pelo processo de especiação. A especiação pode se dar de forma que uma espécie pode evoluir para outra ou, ainda, em duas ou mais novas espécies. Ocorre especialmente quando uma população de determinada espécie se isola, modificando o nicho em função da adaptação a novas condições e recursos do meio, permanecendo isolada das demais populações quanto ao aspecto reprodutivo, não havendo trocas de genes entre a população isolada e as demais. Sofre, assim, mutações cumulativas que podem modificar, com o tempo, o genótipo, alterando sua relação com o meio e sua expressão fenotípica e evoluindo para uma nova espécie (Towsend et al., 2009).

Modelagem da distribuição de espécies

O nicho ecológico de uma espécie pode ser modelado espacialmente [Modelos de Nicho Ecológico (ENM) - sigla em inglês que significa “Ecological Niche Models”]. Os modelos podem ser usados para delimitar a distribuição das espécies no espaço e no tempo, e para entender como as condições ambientais influenciam na ocorrência ou na abundância de uma espécie ou de uma população. A relação entre espaço e tempo é dinâmica e o espaço que uma espécie ocupa em um determinado momento pode se alterar. Por isso se diz que o nicho possui uma dimensão temporal e mutável. As ações antropogênicas, como as alterações do clima, são também capazes de influenciar na distribuição das espécies ao longo do tempo (PBMC, 2012).

A mudança na distribuição da espécie causada pelas alterações dos padrões climáticos, ao longo do tempo, pode ser quantificada com o uso de modelos e camadas contendo dados climáticos de cenários futuros, utilizando programas especiais de modelagem de nicho, como o OpenModeller



ou o MaxEnt, em conjunto com sistemas de informações geográficas (SIG), para a interpretação dos resultados. Com isso, é possível calcular o ganho ou a perda de área potencial que uma espécie ou uma população poderá ter, em função das mudanças climáticas, na maioria dos casos representada pelo aumento de temperatura ou, em alguns casos, pelo resfriamento e pela alteração dos padrões de precipitação pluvial, variável conforme a região.

Os modelos consideram os pontos de ocorrência das espécies/populações estudadas, representadas pelas coordenadas geográficas, estabelecendo uma ligação com variáveis abióticas, tais como o clima, os solos e as características topográficas do lugar de ocorrência. Entretanto, não considera as interações bióticas. Atualmente, os modelos são capazes de prever o nicho fundamental e não o nicho realizado. A inclusão das interações interespecíficas na modelagem está sendo intensivamente estudada, principalmente para a predição de ocorrência de uma espécie em relação a outra fortemente relacionada (De Marco Júnior; Siqueira, 2009), como a araucária e a gralha-azul, por exemplo.

O clima, por ter influência forte e direta sobre a distribuição das espécies, e também pela disponibilidade de base de dados, tem sido amplamente utilizado para a estimativa da ocorrência de espécies florestais (Garcia, 2014; Matos et al., 2017; Scarante et al., 2017; Wrege et al., 2017). As regras de distribuição utilizadas no presente (período base) podem ser aplicadas nas projeções de cenários futuros, de acordo com os modelos climáticos desenvolvidos pelas organizações meteorológicas presentes em todo o mundo, as quais geram os cenários seguindo as tendências apontadas pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) (Sigla em inglês, que representa as iniciais de ‘Intergovernmental Panel on Climate Change’) (Siqueira; Peterson, 2003). Existem também modelos matemáticos capazes de prever as condições futuras de clima, com base no padrão histórico de estações meteorológicas, como aquele desenvolvido por Virgens Filho et al. (2011).

Etapas na elaboração de modelos de nicho ecológico

Estão sintetizadas adiante as etapas a serem seguidas no processo de modelagem de nicho ecológico, abrangendo desde o preparo dos pontos de ocorrência da espécie e das camadas ambientais até a modelagem propriamente dita:

Etapa 1 - Obtenção, preparo e análise dos pontos de presença ou de ausência das espécies ou populações

A primeira etapa da modelagem consiste na obtenção, análise e preparo dos pontos de presença ou de ausência da espécie ou da população a ser modelada, quando devem ser eliminadas as coordenadas de menor precisão (ex.: coordenada de município), duvidosas, erradas, discrepantes ou muito próximas umas das outras, ainda que corretas. Na maioria dos casos, os algoritmos que trabalham com dados de presença são os preferidos, pois os dados de ausência são raros e difíceis de determinar. Só são usados quando se tem certeza de que a espécie não ocorre em uma dada região. Existem três tipos: os dados primários, os dados inéditos, obtidos in loco e por meio de levantamentos de campo, e os dados secundários, publicados em formato digital, em bases de domínio público que reúnem a coleção de vários herbários, como o SpeciesLink (<http://www.splink.cria.org.br>), o GBIF (<http://www.gbif.org>) e IABIN (<http://www.iabin.net>) e, ainda, os obtidos por meio de levantamentos na literatura.



Em princípio, os dados depositados nos bancos de dados citados não passam por um processo rigoroso de validação. Esse processo precisa ser executado pelo usuário, que deve analisar e preparar os dados para a modelagem. Segundo De Marco Júnior e Siqueira (2009), a qualidade do dado usado na modelagem é fundamental para o sucesso do resultado final. A qualidade e a quantidade dos dados de distribuição afetam fortemente os resultados da modelagem (Suarez-Seoane et al., 2002), assim como a resolução e escolha das variáveis ambientais (Robertson et al., 2003). O aumento do número de pontos aumenta a acurácia dos modelos (Stockwell; Peterson, 2002) e a seleção de um adequado conjunto de pontos pode afetar mais o resultado dos modelos do que a seleção do melhor algoritmo.

Dados de presença ou de ausência de uma espécie disponíveis nos bancos podem apresentar limitações, devido à imprecisão ou do viés na escolha das áreas de coleta (De Marco Júnior; Siqueira, 2009), requerendo uma criteriosa análise antes do uso. Exemplos de limitações que podem comprometer a acurácia do modelo são a predominância de registros em áreas de mais fácil acesso, como centros urbanos e rodovias; o registro da coordenada do município em substituição às coordenadas do local do levantamento de campo, principalmente no caso de dados mais antigos; erros como a inversão de coordenadas (troca de latitude por longitude); identificação de regiões de plantio em que a ocorrência não é natural (ex.: plantio utilizando populações de uma mesma espécie proveniente de outra região); erros de identificação da espécie, entre outros.

Pontos de pseudoausência são aqueles pontos simulados, isto é, onde não houve um georreferenciamento no campo, mas sabe-se que a espécie ou a população não ocorre no local e, portanto, é simulada a sua não ocorrência. A inclusão de pontos de pseudoausência na modelagem pode aumentar a acurácia do modelo. A relação sugerida é de 100 pontos de ausência ou pseudoausência para cada ponto de presença, com isso diminui-se o erro de sobreprevisão, que é a tendência de mapear áreas como potencialmente adequadas, onde não existe relato de presença da espécie.

O uso das camadas ambientais na geração dos modelos também requer cautela. Aspectos como a aplicação de camadas relacionadas à ocorrência da espécie/população, ou a falta de camadas relacionadas à ocorrência nos modelos, bem como o uso de camadas com resolução espacial inferior à desejada, podem limitar a predição da área de distribuição da espécie. Como exemplo, locais com grande variabilidade climática e que, se não houver camadas de clima com resolução espacial desejada, pode-se ocultar as variações microclimáticas, com erros de predição

Apesar dos problemas citados, a importância da geração de modelos de nicho justifica-se não somente pela grande demanda por informações de distribuição de espécies e das projeções futuras, causadas pelas mudanças climáticas globais (Thuiller, 2003), como também pela necessidade de ajustes dos modelos e identificação das lacunas de informações, para o melhor uso da ferramenta.

Nos levantamentos feitos em campo ou na literatura, existe um número ideal de pontos de presença de uma espécie/população que deve ser usado para gerar um modelo satisfatório. De modo geral, quanto maior a quantidade de pontos, melhor será o resultado. Segundo Wisz et al. (2008), pode-se dividir a quantidade necessária de pontos em três classes: 10, 30 ou 100 pontos. Essa divisão baseia-se na disponibilidade de dados (muitas vezes dispõe-se de poucos pontos de presença da espécie) e na importância da espécie. No entanto, para as espécies raras (Siqueira et al., 2009) ou críticas (Pearson et al., 2007), as quais muitas vezes não têm essa quantidade de pontos (10, 30 ou 100), Stockwell e Peterson (2002), entre outros autores, sugerem usar um número menor de pontos, utilizando para este fim métodos de análise específicos.



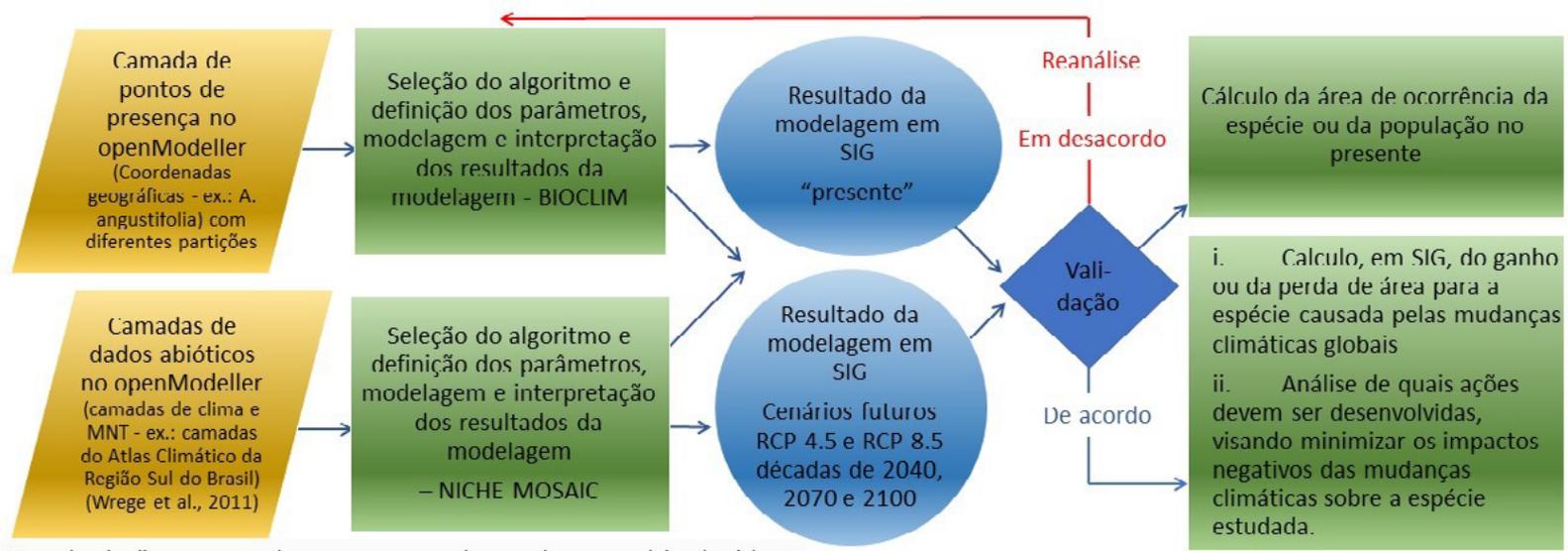
Etapa 2 - Obtenção, preparo e análise das camadas ambientais

Na predição de ocorrência de uma espécie ou de uma população, as camadas ambientais selecionadas para a modelagem são, geralmente, criadas no formato “raster”, apresentados como uma matriz de células, conhecidas como “pixel”, e com o tamanho de cada pixel determinando a resolução espacial. A qualidade da predição de ocorrência dependerá da resolução das camadas ambientais. Na escolha da melhor resolução, é necessário considerar a precisão dos pontos de ocorrência, as características do terreno, as características da espécie e a área a ser analisada (Elith; Leathwick, 2009). No entanto, alguns autores questionam se a resolução das camadas ambientais tem efeito sobre o resultado dos modelos (Guisan et al., 2006).

Além do formato “raster”, alguns softwares, entre os quais o MaxEnt (Phillips et al. 2006), trabalham também com o formato vetor. Neste caso, cada polígono formado por uma linha vetorial tem um único valor categórico. Este formato é muito comum, por exemplo, quando se usam dados de solos. O OpenModeller, outro software de modelagem muito utilizado, não trabalha com camadas contendo variáveis categóricas (formato “vetor”), trabalha apenas com variáveis contínuas (formato “raster”). O OpenModeller realiza um processo de experimentação, utilizando os mesmos dados de entrada para vários algoritmos, em ambiente controlado, gerando um resultado diferente de saída para cada algoritmo utilizado.

As camadas altamente correlacionadas devem ser evitadas (Guisan; Thuiller, 2005). Existem técnicas estatísticas para identificá-las e para uso na seleção das variáveis. Alguns autores utilizam técnicas de análise multivariada para avaliar a contribuição das variáveis na variação dos dados e como um indicativo de sua importância na distribuição das espécies, tal como o uso de Análises de Componentes Principais (Peterson et al., 2003) ou, também, a aplicação de índices de correlação para remover as variáveis altamente correlacionadas, diminuindo assim a multicolinearidade entre os dados (Guisan; Thuiller, 2005) ou, ainda, a aplicação de técnicas de mineração de dados (Hochachka et al., 2007).

Inicialmente, o método “jackknife” era muito utilizado. Atualmente, não é mais usado, pois foram criados muitos algoritmos que apresentam formas diferentes de processar os dados e de apresentar os resultados (veja modelo esquemático da modelagem na Figura 1).



Camadas de clima + pontos de presença = camadas geradas por modelos de nicho

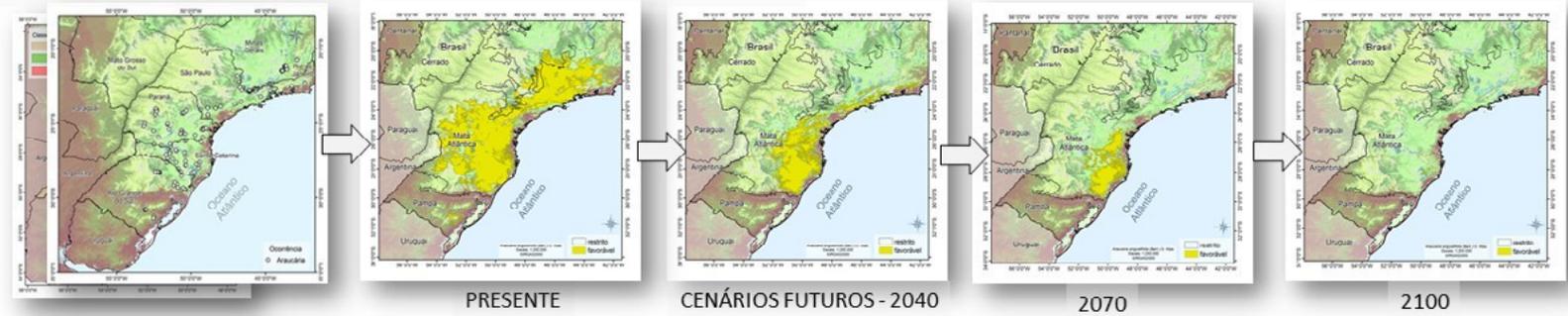


Figura 1. Representação esquemática do procedimento padrão para modelagem de nicho - ex.: *A. angustifolia*.

Fonte: Wrege et al. (2015).

Nota: RCP45 e RCP 85 são trajetórias de concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera adotadas pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas – IPCC, no 5º Relatório feito em 2013. O primeiro é considerado menos pessimista e o segundo mais pessimista (sigla em inglês, que significa Representative Concentration Pathway).

MNT é o Modelo Numérico do Terreno ou modelo digital de elevação que representa a altitude.



Etapa 3 - Seleção dos algoritmos da modelagem de nicho ecológico

Para estabelecer o limite de distribuição de uma espécie, é necessário um critério. O melhor limite é o que minimiza a omissão e a sobreprevisão. Pode-se dizer que quanto maior a omissão, menor a sobreprevisão e vice-versa. A estratégia mais adequada é a fixação da taxa de omissão, pois não é possível fazer inferências da sobreprevisão somente com pontos de presença da espécie.

Existem vários modelos de nicho (algoritmos) desenvolvidos até o momento, para mapear a distribuição das espécies, cada um com suas particularidades e indicações para uso. Uns funcionam melhor com uma grande quantidade de pontos de presença de uma espécie, enquanto outros conseguem fazer boas predições, apesar do número pequeno de ocorrência, e são indicados para as espécies raras, por exemplo. Adiante são apresentados os principais algoritmos que estão associados ao software de modelagem de nicho ecológico “OpenModeller” e suas características.

- **Artificial Neural Network** (Redes Neurais Artificiais): este algoritmo usa técnicas de interconexão artificial de dados, imitando as propriedades das redes de neurônios existentes nos seres vivos, para criar mapas de distribuição das espécies. Servem para resolver problemas de inteligência artificial sem, contudo, criar um modelo de um sistema real. Dados dos conjuntos de pontos onde se sabe que a espécie ocorre e do conjunto de camadas contendo dados ambientais (clima, solo e condições geográficas) são usados, representando os parâmetros que podem limitar a capacidade de sobrevivência da espécie.
- **Bioclim**: este algoritmo usa a média e o desvio padrão, separadamente, de cada variável para calcular os envelopes bioclimáticos para o desenvolvimento de uma espécie e, com estes dados, cria mapas de distribuição da espécie. A adequação dos valores das variáveis ambientais, em cada ponto, e os respectivos envelopes são responsáveis por classificar os pontos em “adequados”, “marginais” ou “inadequados”. Dados dos conjuntos de pontos onde se sabe que a espécie ocorre e do conjunto de camadas contendo dados ambientais (clima, solo e condições geográficas) são usados, representando os parâmetros que podem limitar a capacidade de sobrevivência da espécie.
- **EnvelopeScore** (Modelo Envelope): Este modelo baseia-se nos valores mínimos e máximos de cada variável para definir os envelopes bioclimáticos e, com isso, criar mapas de distribuição das espécies. A probabilidade de ocorrência da espécie, em um dado ponto, é determinada pelo número de variáveis ambientais que se situam no entre os valores máximos e mínimos. Dados dos conjuntos de pontos, onde se sabe que a espécie ocorre, e do conjunto de camadas contendo dados ambientais (clima, solo e condições geográficas) são usados, representando os parâmetros que podem limitar a capacidade de sobrevivência da espécie.
- **Environmental Distance** (Distância Ambiental): algoritmo que normaliza os valores das variáveis ambientais e calcula a distância entre as condições ambientais, para cada ponto de ocorrência, e seleciona a menor distância. Se o valor de distância calculada estiver entre “0” e o valor do “parâmetro fornecido”, então a probabilidade de ocorrência estará no intervalo entre “0” e “1”. Se o valor for superior ao valor do parâmetro, então a probabilidade será “0”.
- **Genetic Algorithm for RuleSet Prediction (GARP)** (Algoritmo genético para predição de distribuição de espécie): algoritmo genético que descreve as condições ambientais nas quais as espécies têm condições favoráveis para garantir a manutenção de suas populações. Com base nisso, mapas de distribuição das espécies são criados. Dados dos conjuntos de pontos onde se sabe que a espécie ocorre e do conjunto de camadas contendo dados ambientais (clima, solo e condições geográficas) são usados, representando os parâmetros que podem limitar a capacidade de sobrevivência da espécie.



- **MaxEnt** (Máxima Entropia): o algoritmo usa o princípio da máxima entropia quanto aos dados de presença de uma espécie, para estimar um conjunto de funções que se relacionam com variáveis ambientais do habitat, a fim de criar mapas que se aproximem da distribuição geográfica potencial da espécie (Phillips et al., 2006).
- **Support Vector Machine (SVM)** (Máquinas de Vetores de Suporte): este algoritmo é representado por um conjunto de métodos de aprendizados supervisionados relacionados que pertencem a uma família de classificadores lineares generalizados. Uma propriedade especial das SVMs é que minimiza simultaneamente o erro de classificação empírica e maximiza a margem geométrica; por isso também são conhecidos como classificadores de margem máxima. Com esse princípio, cria mapas de distribuição das espécies. Dados dos conjuntos de pontos onde se sabe que a espécie ocorre e do conjunto de camadas contendo dados ambientais (clima, solo e condições geográficas) são usados, representando os parâmetros que podem limitar a capacidade de sobrevivência da espécie.
- **Modelo de consenso**: atualmente, é muito sugerido na literatura o uso de modelos de integração, chamados “modelo de consenso” entre vários algoritmos, como o próprio nome informa (De Marco Júnior; Siqueira, 2009). Em SIG, são agrupados os resultados de vários modelos, gerando um resultado final que integra todos os demais.

Modelagem de nicho como ferramenta para a conservação genética - um exemplo de uma espécie típica e emblemática do Bioma Mata Atlântica em perigo de extinção: *Araucaria angustifolia*

Um dos principais problemas relacionados à conservação e ao pré-melhoramento de populações nativas é a identificação e a delimitação do espaço geográfico ocupado por elas. A seleção feita fenotipicamente sem nenhum indicativo sobre as delimitações de populações naturais, como vem sendo realizada em grande parte das situações, traz uma série de prejuízos ao processo de melhoramento genético, com maior tempo necessário para o desenvolvimento dos programas de melhoramento, maior dispêndio de recursos financeiros e menor chance de sucesso na obtenção de um material genético com qualidade superior. Estudos voltados à conservação e melhoramento genético com uso de modelos de nicho podem auxiliar, substancialmente, na identificação de habitats bioclimáticos em áreas de ocorrência natural de espécies, conforme apresentado por Shinnemann et al. (2016), para o gênero *Pinus*. O uso de modelos de nicho, juntamente com estudos de genética de populações, possibilita a delimitação de populações e de zonas ecológico-genéticas para o emprego nos trabalhos de melhoramento genético.

Aproximações da distribuição potencial de *Araucaria angustifolia* no Brasil no presente (período base, compreendido entre 1961 e 1990) e em cenários futuros (até 2100), considerando as mudanças climáticas globais estabelecidas pelo IPCC (2012), foram feitas por Wrege et al. (2017) (Figuras 2 e 3) com uso de modelagem de nicho ecológico. Nestas primeiras aproximações, foram utilizados somente parâmetros climáticos associados ao registro de pontos de presença da espécie, definidas pelos modelos Niche Mosaic e Bioclim. Esses modelos foram selecionados por serem os que geraram os melhores resultados, com os maiores valores de Area under Curve (AUC). O AUC é um índice qualificador do modelo gerado. Varia entre 0 e 1 e quanto mais próximo de 1, melhor a qualidade do modelo.

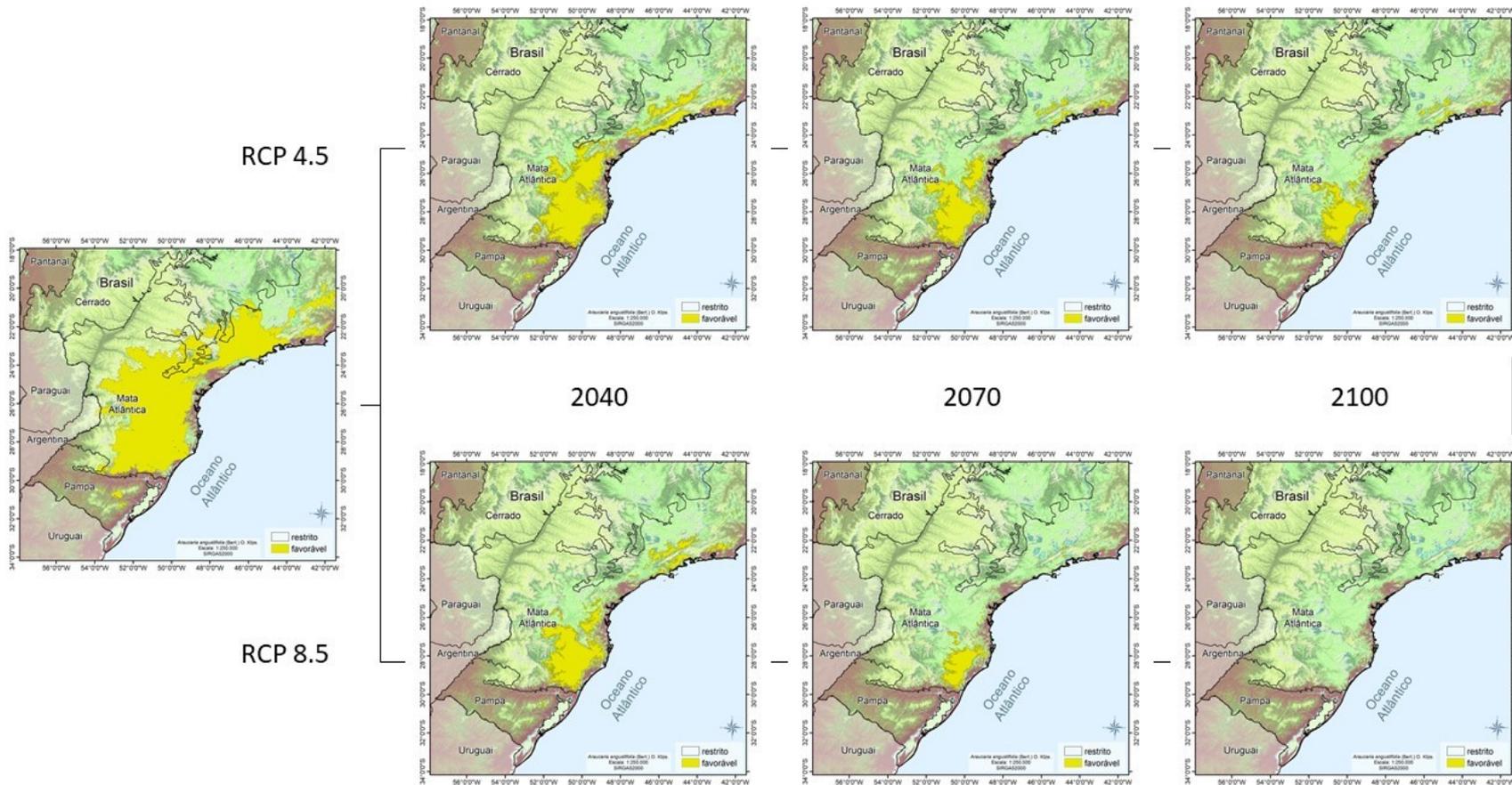


Figura 2. Modelos de nicho gerados para *A. angustifolia* para o presente e cenários futuros - Bioclim.

Fonte: Wrege et al. (2017).

Nota: RCP45 e RCP 85 são trajetórias de concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera adotadas pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas - IPCC, no 5º Relatório feito em 2014 (IPCC, 2017). O primeiro é considerado menos pessimista e o segundo mais pessimista (sigla em inglês, que significa Representative Concentration Pathway).

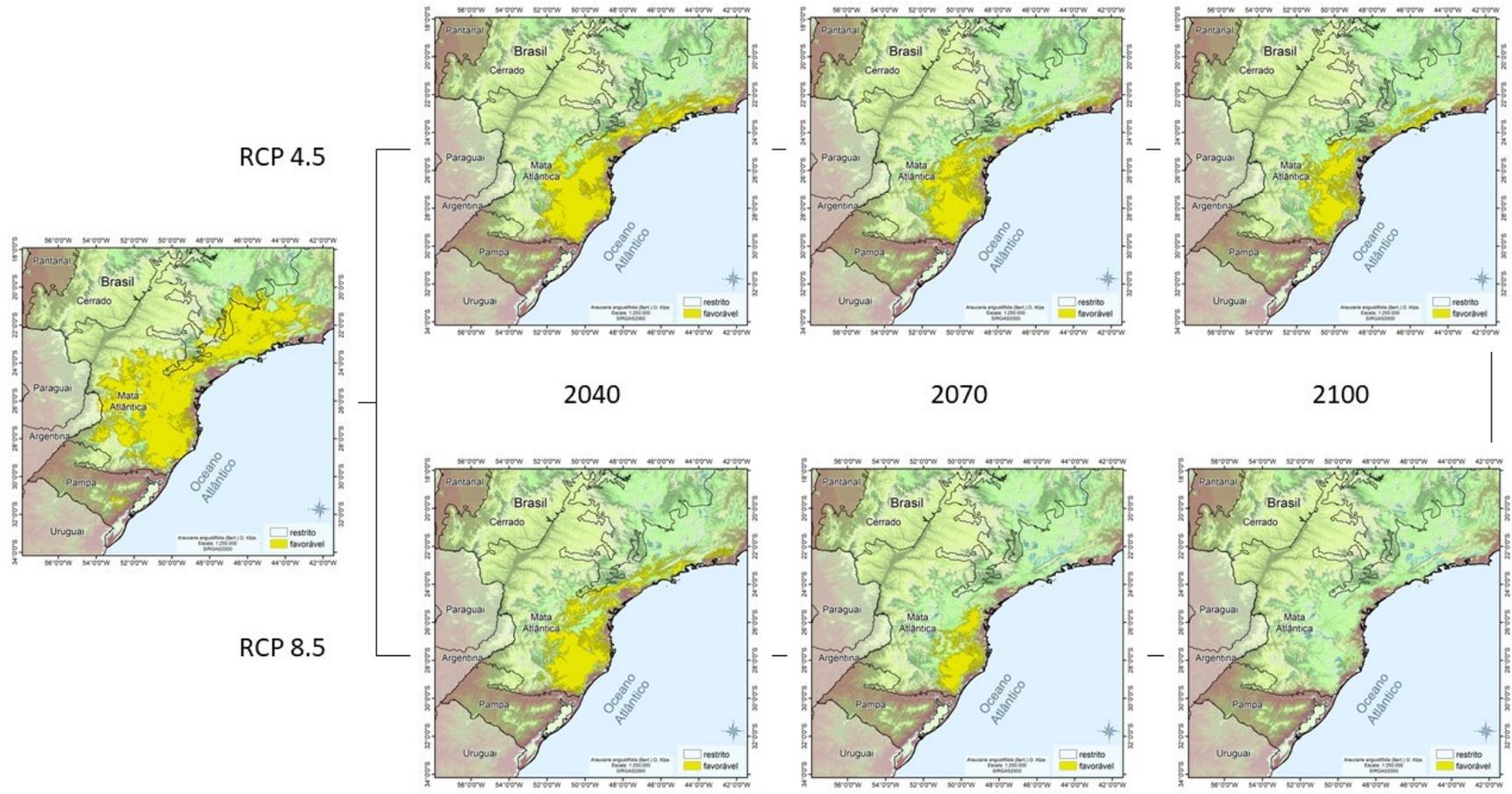


Figura 3. Modelos de nicho gerados para *A. angustifolia* para o presente e cenários futuros - Niche Mosaic.

Fonte: Wrege et al. (2017).

O mapa gerado com a distribuição da espécie, feito por Wrege et al. (2017), ficou similar à região de ocorrência natural da espécie, definido por Hueck (1953). No entanto, um dos modelos, o Niche Mosaic, apresentou também como área de domínio natural de *A. angustifolia*, o escudo Sul-Riograndense (Serra do Sudeste) - municípios de Santana da Boa Vista, Pelotas e Canguçu - localizado na Metade Sul do Rio Grande do Sul (Figuras 3 e 4). Nesta região, o clima é muito similar ao das outras regiões em que a espécie ocorre, mas em uma altitude bem menor, entre 200 m e 380 m. Os solos desta região são também bastante diferentes, geralmente rasos, arenosos e, ou pedregosos, de baixa fertilidade natural. O que foi identificado no resultado do modelo Niche Mosaic pode ser corroborado com Reitz et al. (1983), que consideram que o limite sul de ocorrência da araucária está na Serra do Sudeste, especificamente em Canguçu, na latitude de 31°S, onde é predominante a Floresta Estacional, com ocorrência de araucária. Dutra e Stranz (2003) também indicam que os núcleos de Floresta com Araucária, na Serra do Sudeste, são pequenos, mas fitogeograficamente importantes.

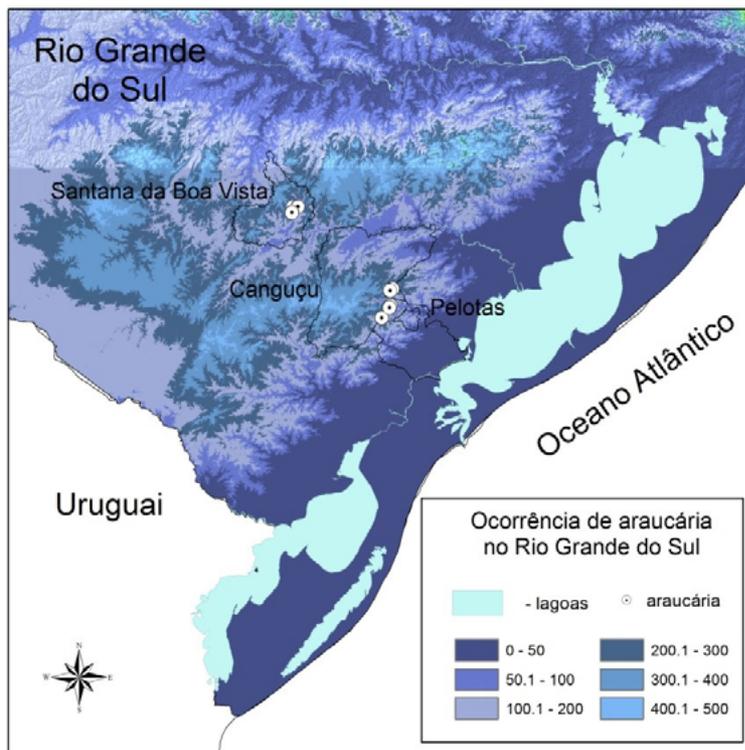


Figura 4. Região de ocorrência de *Araucaria angustifolia* na Serra do Sudeste - Metade Sul do Rio Grande do Sul - Pontos verdes no mapa (Fritzsons et al., 2018).

Fonte: levantamento feito pelos autores in loco.

Na projeção do futuro, com as alterações dos padrões climáticos, está prevista grande redução de área favorável para o desenvolvimento da espécie, que é tipicamente de clima temperado (Cfb). Wrege et al. (2015) concluíram que, para haver evolução da espécie e superação dos problemas causados pelas mudanças climáticas, seria necessário um longo período de tempo (centenas de anos), o que não é mais possível, pois as mudanças climáticas têm ocorrido muito rapidamente. *A. angustifolia* é classificada pela União Internacional para Conservação da Natureza (IUCN) como



criticamente em perigo de extinção (IUCN, 2017), um estágio anterior à extinção propriamente dita. Assim, o risco de extinção da espécie é agravado pelas mudanças climáticas e pela espécie apresentar resposta biológica muito lenta, devido ao longo ciclo reprodutivo, dentre outras características, que dificultam a sua resposta adaptativa.

A solução para a mitigação dos efeitos das mudanças climáticas globais para esta espécie e para outras espécies nas mesmas condições seria manter sua diversidade genética, para garantir a sua capacidade de sobrevivência nas próximas décadas, mantendo remanescentes nativos ou incentivando plantios com a utilização de sementes locais, para evitar o efeito da exogamia, que seria o cruzamento com procedências de outras regiões.

Além disso, seria necessário um monitoramento das populações que restaram da espécie e das espécies competidoras, avaliando o comportamento ao longo do tempo e o aumento da vulnerabilidade, visando garantir a manutenção da diversidade genética e a sobrevivência desta e de outras espécies em situação similar. Os modelos de nicho podem auxiliar nos monitoramentos, indicando áreas prioritárias para se proceder às análises de risco de extinção, isto é, onde a regeneração pode estar sendo prejudicada devido ao aquecimento global.

Atualmente, a tarefa de identificar populações para conservação é um trabalho árduo, frente à intensa fragmentação florestal, devido às ações antrópicas, o que restringe a movimentação, a conexão e a dispersão de organismos, podendo dar origem a subpopulações menores.

Perspectivas futuras

Para possibilitar ganhos na aproximação entre a distribuição preditiva e a realidade de campo, diversos grupos de pesquisa têm apontado a necessidade de inclusão de um maior número de parâmetros associados à ocorrência e à produção dos modelos matemáticos (Garcia, 2014; Matos et al., 2017). A inclusão de parâmetros relacionados à paisagem nos modelos de nicho, como a topografia, e parâmetros de solo, como a classificação, parâmetros físicos e a fertilidade química, tem apresentado resultados promissores, conforme pode ser verificado em Ray et al. (2016) e Guidigan et al. (2018). Parâmetros socioeconômicos e variáveis de produção também têm sido utilizados para espécies arbóreas de valor comercial, conforme apresentados por Ray et al. (2016) para *Hevea brasiliensis*. Matos et al. (2017) ressaltam a pertinência da abordagem multidisciplinar em estudos envolvendo a interação genótipo x ambiente x manejo, o que requer colaboração mais estreita entre as disciplinas, para melhor atender as demandas de pesquisa, inovação e formação de políticas públicas.

As camadas contendo as variáveis climáticas geradas com dados de estações meteorológicas locais, em ambiente SIG, com menor resolução espacial e escala semidetalhada, também permitirão evoluir as análises de predição de ocorrência das espécies e aproximar mais o modelo gerado com a realidade existente no campo.

A necessidade de aperfeiçoamento dos modelos atualmente existentes para a projeção de cenários futuros é apontada por Giannini et al. (2012), que sugere as seguintes linhas de ação para atendimento desta demanda: (i) melhorar o acesso e a eficiência na obtenção de dados de monitoramento ambiental; (ii) identificar os principais fatores bióticos e abióticos determinantes à ocorrência das espécies; (iii) incorporar a dinâmica de comportamento das comunidades florestais nos modelos; (iv) determinar a influência dos processos evolucionários na resposta das espécies às mudanças climáticas; (v) incluir regras, nos modelos globais, que definem os grupos funcionais das espécies.



Agradecimentos

Os autores agradecem à Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) pelo apoio concedido ao projeto Araucamate (código SEG 02.13.07.005.00.00).

Referências

- ALFARO, R. I.; FADY, B.; VENDRAMIN, G. G.; VENDRAMINI, G. G.; DAWSON, I. K.; FLEMING, R. A.; SÁENZ-ROMERO, C.; LINDIG-CISNEROS, R. A.; MURDOCK, T.; VINCETI, B.; NAVARRO, C. M.; SKOPPA, T.; BALDINELLI, G.; EL-KASSABY, Y. A.; LOO, J. The role of forest genetic resources in responding to biotic and abiotic factors in the context of anthropogenic climate change. **Forest Ecology and Management**, v. 333, p. 1-12, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.04.006>.
- DE MARCO JUNIOR, P.; SIQUEIRA, M. F. Como determinar a distribuição potencial de espécies sob uma abordagem conservacionista? **Megadiversidade**, v. 5, n. 1-2, p. 65-76, 2009.
- DUTRA, T. L.; STRANZ, A. História das Araucariaceae: a contribuição dos fósseis para o entendimento das adaptações modernas da família no Hemisfério Sul, com vistas a seu manejo e conservação. In: RONCHI, L. H.; COELHO, O. G. W. (ed.). **Tecnologia diagnóstico e planejamento ambiental**. São Leopoldo: UNISINOS, 2003. p. 293-351.
- ELITH, J.; LEATHWICK, J. Predicting species distributions from museum and herbarium records using multiresponse models fitted with multivariate adaptive regression splines. **Diversity and Distributions**, v. 13, p. 265-275, 2007.
- FRITZSONS, E.; WREGGE, M. S.; MANTOVANI, L. E. A distribuição natural do pinheiro-do-paraná no estado do Rio Grande do Sul, Brasil: a influência de fatores climáticos e geomorfológicos. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 22, p. 117-132, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v22i0.51315>.
- GARCIA, K.; LASCO, R.; INES, A. Predicting geographic distribution and habitat suitability due to climate change of selected threatened forest tree species in the Philippines. **Applied Geography**, v. 44, p. 12-22, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2013.07.005>.
- GARCIA, K. Modelagem da aptidão climática do *Eucalyptus grandis* frente aos cenários de mudanças climáticas no Brasil. **Scientia Forestalis**, v. 42, n. 104, p. 493-501, 2014.
- GIANNINI, T. C.; SIQUEIRA, M. F.; ACOSTA, A. L.; BARRETO, F. C. C.; SARAIVA, A. M.; SANTOS, I. A. Desafios atuais da modelagem preditiva de distribuição de espécies. **Rodriguésia**, v. 63, n. 3, p. 733-749, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S2175-78602012000300017>.
- GRINNELL, J. The niche-relationships of the California Thrasher. **Auk**, v. 34, p. 427-433, 1917.
- GUIDIGAN, M. L. G.; AZIHO, F.; IDOHO, R.; OKHIMAMHE, A. A.; FANDOHAN, A. B.; SINSIN, B.; ADET, L. Modeling the current and future distribution of *Kigelia africana* under climate change in Benin, West Africa. **Modeling Earth Systems and Environment**, v. 4, n. 3, p. 1225-1238, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40808-018-0491-4>.
- GUISAN, A.; BROENNIMANN, O.; ENGLER, R.; VUST, M.; YOCCOZ, N. G.; LEHMANN, A.; ZIMMERMANN, N. E. Using niche-based models to improve the sampling of rare species. **Conservation Biology**, v. 20, n. 2, p. 501-511, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2006.00354.x>.
- GUISAN, A.; THUILLER, W. Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. **Ecology Letters**, v. 8, p. 993-1009, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2005.00792.x>.
- HOCHACHKA, W.; CARUANA, R.; FINK, D.; MUNSON, A.; RIEDEWALD, M.; SOROKINA, D.; KELLING, S. Data mining for discovery of pattern and process in ecological systems. **Journal of Wildlife Management**, v. 71, p. 2427-2437, 2007.
- HOLT, R. D. Bringing the Hutchinsonian niche into the 21st century: ecological and evolutionary perspectives. **Proceedure of National Academic Science**, v. 106, p. 19659-19665, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.0905137106>.



HUECK, K. Distribuição e habitat natural do pinheiro do paraná (*Araucaria angustifolia*). **Boletim da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras, Universidade de São Paulo. Botánica**, v. 10, p. 5-24, 1953. DOI: <http://dx.doi.org/10.11606/issn.2318-5988.v10i1>.

HUTCHINSON, G. E. Concluding remarks. **Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology**, v. 22, p. 415-427, 1957.

IPCC 2012. Intergovernmental Panel on Climate Change 2012. **Climate change: the physical science basis**. Cambridge: Cambridge University Press, Cambridge, 2013. 1535 p. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

IPCC 2013. Intergovernmental Panel on Climate Change 2013. **Climate change: the physical science basis**. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 1535 p. DOI: <http://dx.doi.org/10.1017/CBO9781107415324>.

IUCN Red List of Threatened Species. **Red list**: version 2016-3. Disponível em: www.iucnredlist.org. Acesso em: 18 fev. 2017.

JAMES, F. C.; JOHNSTON, R. F.; WARNER, N. O.; NIEMI, G.; BOECKLEN, W. The Grinnelian niche of the Wood Thrush. **American Naturalist**, v. 124, p. 17-47, 1984.

LEE-YAW, J. A.; KHAROUBA, H. M.; BONTRAGER, M.; MAHONY, C.; CSERG , NOREEN, A. M. E.; LI, Q.; SHUSTER, R.; ANGERT, A. L. A. Synthesis of transplant experiments and ecological niche models suggests that range limits are often nicht limits. **Ecology Letters**, v. 19, p. 710-722, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1111/ele.12604>.

MATOS, M. de F. da S.; SCARANTE, A.; SOARES, M. T. S.; BOGNOLA, I. A.; WREGE, M. S. Distribui o de *Handroanthus impetiginosus* no Brasil e as proje oes futuras conforme as mudanças climáticas globais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 20.; SIMPÓSIO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS E DESERTIFICA O DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO, 5., 2017, Juazeiro, Petrolina. **A agrometeorologia na soluço de problemas multiescala**: anais. Petrolina: Embrapa Semiárido: UNIVASF, 2017.

MENON, S.; CHOUDHURY, B. I.; KHAN, M. L.; PETERSON, A. T. Ecological niche modeling and local knowledge predict new populations of *Gymnocladus assamicus* a critically endangered tree species. **Endangered Species Research**, v. 11, p. 175-181, 2010. DOI: <https://doi.org/10.3354/esr00275>.

PBMC. Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. **Sum rio executivo do v. 1**: base científica das mudanças climáticas. Rio de Janeiro, 2012. 34 p.

PEARSON, R. G.; RAXWORTHY, C. J.; NAKAMURA, M.; PETERSON, A. T. Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in madagascar. **Journal of Biogeography**, v. 34, p. 102-117, 2007.

PETERSON, A. T. Predicting the geography of species' invasions via ecological niche modeling. **Quarterly Review of Biology**, v. 78, p. 419-433, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1086/378926>.

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

QUEIROZ, D. L.; WREGE, M. S.; K NAST, T. B. S.; GARRASTAZU, M. C.; BURKHARDT, D. Potential distribution of the guava psyllid *Triozioida limbata* (Hemiptera, Psylloidea), today and in global climate change scenarios. **Turkish Journal of Zoology**, v. 42, p. 330-336, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3906/zoo-1709-21>.

RAY, D.; BEHERA, M. D.; JACOB, J. Predicting the distribution of rubber trees (*Hevea brasiliensis*) through ecological niche modeling with climate, soil, topography and socioeconomic factors. **Ecological Resource**, v. 31, n. 75, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11284-015-1318-7>.

REITZ, R.; KLEIN, R. M.; REIS, A. Projeto madeira do Rio Grande do Sul. **Sellowia**, v. 34/35, n. 34/35, p. 5-483, 1983. Anais Bot nicos do Herb rio Barbosa Rodrigues.

ROBERTSON, M. P.; PETER, C. I.; VILLET, M. H.; RIPLEY, B. S. Comparing models for predicting species' potential distributions: a case study using correlative and mechanistic predictive modelling techniques. **Ecological Modelling**, v. 164, n. 2-3, p. 153-167, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(03\)00028-0](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(03)00028-0).



- SCARANTE, A. G.; MATOS, M. D. F. D. S.; SOARES, M. T.; AGUIAR, A. V. de; WREGE, M. S. Distribution of *Handroanthus heptaphyllus* in Brazil and future projections according to global climate change. **Revista Geama**, v. 3, n. 4, p. 201-209, 2017.
- SEXTON, J. P.; MCINTYRE, P. J.; ANGERT, A. L.; RICE, K. J. Evolution and ecology of species range limits. **Annual Review Evolution System**, p. 415-436, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.110308.120317>.
- SHINNEMAN, D. J.; MEANS, R. E.; POTTER, K. M.; HIPKINS, V. D. Exploring climate niches of ponderosa pine (*Pinus ponderosa* Douglas ex Lawson) haplotypes in the western United States: implications for evolutionary history and conservation. **PLoS One**, v. 11, e0151811, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0151811>.
- SIQUEIRA, M. F.; DURIGAN, G.; MARCO JÚNIOR, P. de; PETERSON, A. T. Something from nothing: using landscape similarity and ecological niche modeling to find rare plant species. **Journal for Nature Conservation**, v. 17, n. 1, p. 25-32, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2008.11.001>.
- SIQUEIRA, M. F.; PETERSON, A. T. Consequences of global climate change for geographic distributions of Cerrado tree species. **Biota Neotropica**, v. 3, n. 2, p. 1-14, 2003.
- SOBERÓN, J.; PETERSON, A. T. Interpretation of models of fundamental ecological niches and species' distributional areas. **Biodiversity Informatics**, v. 2, p. 1-10, 2005.
- SOUSA, V. A.; RICHARDS, C. M. Genetic diversity and biogeographic determinants of population structure in *Araucaria angustifolia* Bert. O Ktze. In: WORKSHOP OF EMBRAPA'S SCIENTISTS IN USA, 1., 2011, Fort Collins. **Meeting abstract**. Fort Collins: USDA, Agricultural Research Service, 2011. p. 37.
- STOCKWELL, D. R. B.; PETERSON, A. T. Effects of sample size on accuracy of species distribution models. **Ecological Modelling**, v. 148, p. 1-13, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(01\)00388-X](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(01)00388-X).
- SUAREZ-SEOANE, S.; OSBORNE, P. E.; ALONSO, J. C. Largescale habitat selection by agricultural steppe birds in Spain: identifying species-habitat responses using generalized additive models. **Journal of Applied Ecology**, v. 39, p. 755-771, 2002.
- THUILLER, W. Biomod: optimizing predictions of species distributions and projecting potential future shifts under global change. **Global Change Biology**, v. 9, p. 1353-1362, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00666.x>.
- VIRGENS FILHO, J. S.; FÉLIX, R. P.; LEITE, M. L.; TSUKAHARA, R. Y. PGECLIMA_R: gerador estocástico para simulação de cenários climáticos brasileiros. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 17., 2011, Vitória. **Anais [...]**. Vitória: SBAGRO, 2011. v. 1. p. 1-5.
- WIENS, J. J. The niche, biogeography and species interactions. **Philosophical Transactions of The Royal Society**, v. 366, p. 2336-2350, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1098/rstb.2011.0059>.
- WISZ, M. S.; HIJMANS, R. J.; LI, J.; PETERSON, A. T.; GRAHAM, C. H.; GUIBAN, A. Effects of sample size on the performance of species distribution models. **Diversity and Distributions**, v. 14, p. 763-773, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2008.00482.x>.
- WREGE, M. S.; FRITZSONS, E.; SOARES, M. T. S.; BOGNOLA, I. A.; SOUSA, V. A.; SOUSA, L. P. de; GOMES, J. B. V.; AGUIAR, A. V.; GOMES, G. C.; MATOS, M. de F. da S.; SCARANTE, A. G.; FERRER, R. Distribuição natural e habitat da araucária frente às mudanças climáticas globais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 37, p. 331, 2017. DOI: <https://doi.org/10.4336/2017.pfb.37.91.1413>.
- WREGE, M. S.; FRITZSONS, E.; SOARES, M. T. S.; SOUSA, V. A. Variáveis climáticas relacionadas aos serviços ambientais: estudo de caso da araucária. In: PARRON, L. M.; GARCIA, J. R.; OLIVEIRA, E. B. de; BROWN, G. G.; PRADO, R. B. (org.). **Serviços ambientais em sistemas agrícolas e florestais do Bioma Mata Atlântica**. Brasília, DF: Embrapa, 2015. p. 242-247.
- WREGE, M. S.; HIGA, R. C. V.; BRITEZ, R. M.; GARRASTAZU, M. C.; SOUSA, V. A.; CARAMORI, P. H.; RADIN, B.; BRAGA, H. J. Climate change and conservation of *Araucaria angustifolia* in Brazil. **Unasyuva**, v. 60, p. 30-33, 2009.
- WREGE, M. S.; STEINMETZ, S.; REISSER JUNIOR, C.; ALMEIDA, I. R. **Atlas climático da região Sul do Brasil: Estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado; Colombo: Embrapa Florestas, 2011. 332 p.

