



**VÍTOR DE SOUZA ABREU**

**DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA E CONSERVAÇÃO DE  
*Polylepis* spp. NOS ANDES PERUANOS: UMA ABORDAGEM  
BASEADA EM MODELAGEM ECOLÓGICA**

**LAVRAS – MG  
2022**

**VÍTOR DE SOUZA ABREU**

**DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA E CONSERVAÇÃO DE *Polylepis* spp. NOS ANDES  
PERUANOS: UMA ABORDAGEM BASEADA EM MODELAGEM ECOLÓGICA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, área de concentração em Ecologia, para a obtenção do título de Doutor.

Prof. Dr. Eduardo van den Berg  
Orientador  
Dra. Vanessa Leite Rezende  
Coorientadora

**LAVRAS – MG  
2022**

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca  
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Abreu, Vítor de Souza.

Distribuição geográfica e conservação de *Polylepis* spp. nos  
Andes peruanos: uma abordagem baseada em modelagem ecológica  
/ Vítor de Souza Abreu. - 2022.

64 p.: il.

Orientador(a): Eduardo van den Berg.

Coorientador(a): Vanessa Leite Rezende.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2022.

Bibliografia.

1. Ecossistemas andinos. 2. Florestas de *Polylepis*. 3.  
Distribuição potencial. I. van den Berg, Eduardo. II. Rezende,  
Vanessa Leite. III. Título.

**VÍTOR DE SOUZA ABREU**

**DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA E CONSERVAÇÃO DE *Polylepis* spp. NOS ANDES PERUANOS: UMA ABORDAGEM BASEADA EM MODELAGEM ECOLÓGICA**

**GEOGRAPHIC DISTRIBUTION AND CONSERVATION OF *Polylepis* spp. IN THE PERUVIAN ANDES: AN APPROACH BASED ON ECOLOGICAL MODELING**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, área de concentração em Ecologia, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 28 de setembro de 2022

Dr. Eduardo van den Berg (UFLA)

Dra. Vanessa Leite Rezende (UFLA)

Dra. Letícia Maria Vieira (UFLA)

Dr. Sérgio Henrique Godinho Silva (UFLA)

Dr. Thadeu Sobral de Souza (UFMT)



---

Prof. Dr. Eduardo van den Berg  
Orientador

Dra. Vanessa Leite Rezende  
Coorientadora

**LAVRAS – MG  
2022**

À minha mãe, que sempre luta junto comigo  
pela conquista dos meus objetivos.  
Ao meu avô (*in memoriam*), que é o meu  
eterno exemplo de vida.

Dedico.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por iluminar e abençoar minha caminhada até aqui.

À Universidade Federal de Lavras, especialmente ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal, pela oportunidade de desenvolvimento da Tese.

Ao meu orientador, professor Eduardo van den Berg, e à minha coorientadora, Vanessa Leite Rezende, pela confiança, paciência, apoio científico e fundamental contribuição na realização deste trabalho e na minha vida acadêmica e profissional.

Ao Laboratório de Ecologia Vegetal, onde troquei experiências e pude usufruir de boa estrutura e de recursos necessários ao desenvolvimento da Tese.

Ao professor Sérgio Henrique Godinho Silva, pela ajuda na obtenção de dados importantes utilizados neste trabalho.

À minha família, que é meu alicerce e maior fonte de motivação. Principalmente à minha mãe, por todo o amor, dedicação e valores a mim transmitidos.

Ao meu querido e amado avô Vital (*in memoriam*), que mesmo não estando mais aqui, é a quem eu devo grande parte do que me tornei.

Ao meu namorado, Vittor Siqueira, pelo companheirismo nos dias bons, e pela paciência e compreensão nos dias ruins.

A todos os meus amigos, que, de longe ou de perto, sempre torceram por mim e dividiram comigo meus piores e, principalmente, meus melhores momentos durante esses anos.

Enfim, a todos os que estiveram ao meu lado durante essa trajetória, contribuindo direta ou indiretamente, meus mais sinceros agradecimentos.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

*“Ser o eterno forasteiro, o eterno aprendiz, o eterno postulante: aí está um jeito para ser feliz.”*

(Julio Ramón Ribeyro)

## RESUMO GERAL

As florestas tropicais andinas são formadas predominantemente por espécies do gênero *Polylepis*. Essas são as comunidades florestais mais altas do mundo, e fornecem importantes serviços ecossistêmicos para a região. O Peru faz parte do centro de diversidade de *Polylepis* e abriga a maior riqueza de espécies do gênero, sendo cinco delas endêmicas. O nível de endemismo e o relevante papel de *Polylepis* tornam essas florestas prioridades para conservação no mundo. Assim, esta Tese foi estruturada sob duas abordagens de pesquisa e dividida em dois artigos científicos. No primeiro, realizamos uma revisão bibliométrica sobre a atual distribuição de *Polylepis*, utilizando artigos científicos publicados sobre a temática. No segundo, analisamos a distribuição potencial de cinco espécies de *Polylepis* endêmicas dos Andes peruanos, determinando em que medida as Áreas Protegidas (APs) são suficientes para a conservação dessas espécies. Para o levantamento bibliográfico, utilizamos diferentes palavras-chave na base de pesquisa da Web of Science e da Scopus e predizemos a distribuição das espécies utilizando 11 variáveis ambientais e seis algoritmos diferentes. Nós encontramos um baixo número de publicações sobre as florestas de *Polylepis*. Nessas publicações, a comunidade científica tem discutido fatores climáticos e antrópicos como determinantes para a atual distribuição dessas florestas. Além disso, encontramos o padrão de distribuição potencial que emerge da combinação de fatores climáticos e topográficos. Esse padrão revela que as cinco espécies de *Polylepis* estudadas têm alta probabilidade de ocorrer em grande parte dos Andes no Peru e fora do Peru, mas atualmente ocupam apenas uma pequena porcentagem do território do referido país. A área e distribuição de APs, que são a principal medida de conservação dos ecossistemas Andinos, são insuficientes para suprir a necessidade de conservação das espécies de *Polylepis* nos Andes peruanos. Nós entendemos que a conservação das florestas de *Polylepis* é um desafio, por conta da sua vulnerabilidade e exposição à pressão antrópica e condições ambientais. Porém, esperamos que as informações que trazemos nesse estudo possam ser usadas como ferramenta para melhor manejo e conservação dessas florestas.

**Palavras-chave:** Ecossistemas andinos. Florestas de *Polylepis*. Análise bibliométrica. Distribuição potencial. Peru.



## GENERAL ABSTRACT

The Andean tropical forests are predominantly formed by species of the genus *Polylepis*. These are the highest forest communities in the world, and they provide important ecosystem services to the region. Peru is part of the center of diversity for *Polylepis* and is home to the greatest richness of species of the genus, five of which are endemic. The level of endemism and the relevant role of *Polylepis* make these forests a priority for conservation in the world. Thus, we structured this Phd dissertation under two research approaches and divided into two scientific articles. In the first one, we carried out a bibliometric review on the current distribution of *Polylepis*, using scientific articles published on the subject. In the second, we analyze the potential distribution of five species of *Polylepis* endemic to the Peruvian Andes, determining to what extent the Protected Areas (PAs) are sufficient to the conservation of these species. For the bibliographic survey, we used different keywords in the Web of Science and Scopus research base and predicted the species distribution using 11 environmental variables and six different algorithms. We found a low number of publications on *Polylepis* forests. In these publications, the scientific community has discussed climatic and anthropic factors as determinants for the current distribution of these forests. Furthermore, we find the potential distribution pattern that emerges from the combination of climatic and topographical factors. This pattern reveals that the five species of *Polylepis* studied have a high probability of occurring in a large part of the Andes in Peru and outside Peru, but currently occupy only a small percentage of the territory of that country. The area and distribution of PAs, which are the main conservation measure of Andean ecosystems, are insufficient to meet the need for conservation of *Polylepis* species in the Peruvian Andes. We understand that the conservation of *Polylepis* forests is a challenge, due to their vulnerability and exposure to human pressure and environmental conditions. However, we hope that the information we bring in this study can be used as a tool for better management and conservation of these forests.

**Keywords:** Andean ecosystems. *Polylepis* forests. Bibliometric analysis. Potential distribution. Peru.

## SUMÁRIO

### PRIMEIRA PARTE

|                        |    |
|------------------------|----|
| INTRODUÇÃO GERAL ..... | 11 |
| REFERÊNCIAS .....      | 13 |

### SEGUNDA PARTE

|  |           |
|--|-----------|
| <b>ARTIGO 01 - Distribuição, ameaças e conservação de <i>Polylepis</i> spp. nos Andes: uma revisão crítica.....</b>                                      | <b>16</b> |
| INTRODUÇÃO .....   | 18        |
| MATERIAL E MÉTODOS .....   | 19        |
| RESULTADOS .....   | 20        |
| Tendências temporais na publicação .....   | 20        |
| Países e instituições .....  | 21        |
| Autores.....   | 22        |
| Artigos e documentos principais .....  | 22        |
| Principais tópicos.....  | 23        |
| Distribuição, ameaças e conservação de <i>Polylepis</i> spp.....   | 24        |
| DISCUSSÃO.....   | 25        |
| CONCLUSÕES.....  | 27        |
| REFERÊNCIAS .....  | 29        |
| MATERIAL SUPLEMENTAR.....  | 32        |
| <br>   |           |
| <b>ARTIGO 02 - Fatores climáticos e topográficos moldando a distribuição potencial de espécies de <i>Polylepis</i> endêmicas dos Andes peruanos.....</b> | <b>42</b> |
| INTRODUÇÃO .....   | 44        |
| MATERIAL E MÉTODOS .....   | 45        |
| Espécies e área de estudo .....  | 45        |
| Variáveis Ambientais.....  | 47        |
| Modelagem .....  | 48        |
| RESULTADOS .....   | 50        |
| DISCUSSÃO.....   | 53        |
| CONCLUSÕES.....  | 57        |
| REFERÊNCIAS .....  | 58        |
| CONSIDERAÇÕES FINAIS.....  | 64        |

## **PRIMEIRA PARTE**

## INTRODUÇÃO GERAL

Os ambientes montanos são comumente considerados como típicos locais de grande ocorrência de espécies endêmicas (HUGHES; ATCHISON, 2015). Como exemplo desse tipo de ecossistema, os Andes formam o maior complexo de montanhas do planeta e sua extensão abrange regiões tropicais, subtropicais e temperadas (GARAVITO et al., 2013). Na região tropical, os ecossistemas andinos se constituem como principais detentores das mais diversas formas de vida alpina, com elevada riqueza de espécies, sendo grande parte delas, endêmicas. Estima-se que a flora tropical andina é composta por mais de 500 gêneros e 3.500 espécies, das quais 60% podem ser endêmicas (SKLENÁR et al., 2014).

Ao mesmo tempo em que os Andes são reconhecidos por sua biodiversidade e altas taxas de endemismo, esses ecossistemas têm sido identificados globalmente como uma das áreas naturais mais severamente ameaçadas (RAMIREZ-VILLEGAS et al., 2014). Por este motivo, são reconhecidos como um dos *hotspots* mundiais de biodiversidade e são uma das principais prioridades de conservação global (MEYER et al., 2015). A concentração da população humana nessa região é uma das principais ameaças aos ecossistemas andinos, pois tem causado a redução significativa da paisagem natural, degradação do hábitat e extinção de espécies, devido à exploração insustentável de recursos naturais (ARMENTERAS et al., 2011).

Nos Andes Tropicais, as florestas são formadas predominantemente por espécies do gênero *Polylepis* (Rosaceae) (KESSLER et al., 2014). Este gênero foi descrito inicialmente por Ruíz e Pavón, em 1794, e pertence à família Rosaceae, da tribo Sanguisorbeae (SIMPSON, 1986). A região andina que abrange os países Peru e Bolívia, é considerada o centro de diversidade de *Polylepis* e abriga 19 espécies do gênero, que têm uma amplitude altitudinal de 3400 m, podendo atingir até 5.200 m de altitude (FJELDSA; KESSLER, 1996; NAVARRO et al., 2005; MENDOZA; CANO, 2011; TOIVONEN et al., 2011). Essas são as comunidades florestais mais altas do mundo, e fornecem serviços ecossistêmicos essenciais, como regulação hídrica, conservação de solos e redução de CO<sub>2</sub>. Por isso, *Polylepis* é considerado como gênero chave para a conservação nos Andes (FJELDSA; KESSLER, 1996; VALENCIA et al., 2016).

Atualmente, as florestas de *Polylepis* formam pequenas manchas altamente suscetíveis às mudanças climáticas (RENISON et al., 2013). Comumente, estudos têm demonstrado a redução dos limites de distribuição das espécies desse gênero (GARECA et al., 2010; RENISON et al., 2011; CUYCKENS et al., 2016). Essa redução espacial está intimamente

relacionada, além das alterações de condições climáticas, com o aumento de atividades antrópicas, ligadas à extração madeireira e queima de pastagens (KESSLER et al., 2014). Neste sentido, 60% das espécies de *Polylepis* sofreram ou estão sofrendo algum tipo de declínio populacional atribuído direta ou indiretamente a ações humanas (DOMIC et al., 2017). Além disso, 27 espécies do gênero sofreram redução média de 36% de área de distribuição potencial desde o Último Máximo Glacial (cerca de 21 mil anos atrás) (ZUTTA; RUNDEL, 2017).

O relevante papel de *Polylepis* no fornecimento de serviços ecossistêmicos, bem como na provisão de habitats em altitudes elevadas, tem sido motivo para que essas florestas sejam consideradas como áreas prioritárias para a conservação no mundo (VALENCIA et al., 2018). A projeção de áreas potencialmente adequadas fornece uma perspectiva sobre a distribuição espacial das espécies, considerada como fator chave para preservação e conservação das florestas de *Polylepis* (ZUTTA; RUNDEL, 2017). Neste contexto, uma das técnicas que têm sido utilizadas para prever essas áreas, são os Modelos de Distribuição de Espécies – SDMs (GIANNINI et al., 2012; ZURELL et al., 2020).

Os modelos gerados resultam em mapas de adequabilidade ambiental projetados no espaço geográfico, que possibilitam a previsão dos riscos de extinção de espécies, bem como direcionam a definição de estratégias de conservação e restauração de áreas (YU et al., 2019). De maneira geral, os SDMs relacionam dados biológicos (pontos de ocorrência) com fatores abióticos, que representem ou influenciem a distribuição de espécies em uma escala macroecológica (FRANKLIN, 2010; PETERSON et al., 2011).

Diante disso, esta Tese foi dividida em dois artigos. No primeiro, realizamos uma revisão bibliométrica sobre a atual distribuição de *Polylepis*, utilizando artigos científicos publicados sobre a temática. E no segundo, analisamos a distribuição potencial das cinco espécies de *Polylepis* endêmicas dos Andes peruanos, determinando em que medida as áreas protegidas são suficientes para suprir a necessidade de conservação dessas espécies.

## REFERÊNCIAS

- ARMENTERAS, D. et al. Understanding deforestation in montane and lowland forests of the Colombian Andes. **Regional Environmental Changes**, v. 11, p. 693-705, 2011.
- CUYCKENS, G. A. E. et al. Climate change and the distribution and conservation of the world's highest elevation woodlands in the South American Altiplano. **Global and Planetary Change**, v. 137, p. 79-87, 2016.
- DOMIC, A. I. et al. Pollination ecology of *Polylepis tomentella* (Rosaceae), an andean anemophilous tree presenting a potential floral fungal infection. **International Journal of Plant Sciences**, v. 178, p. 512-521, 2017.
- FJELDSA, M. E.; KESSLER, M. **Conserving the biological diversity of *Polylepis* woodlands of the highland of Peru and Bolivia: a contribution to sustainable natural resource management in the Andes**. Copenhagen, Denmark: NORDECO. 1996.
- FRANKLIN, J. **Mapping Species Distributions: spatial inference and prediction**. Cambridge University Press. 2010.
- GARAVITO, N. T. et al. Evaluación del estado de conservación de los bosques montanos en los Andes tropicales. **Ecosistemas**, v. 21, p. 148-166, 2013.
- GARECA, E. E. et al. *Polylepis* woodland remnants as biodiversity islands in the Bolivian high Andes. **Biodiversity and Conservation**, v. 19, p. 3327-3346, 2010.
- GIANNINI, T. C. et al. Desafios atuais da modelagem preditiva de distribuição de espécies. **Rodriguésia**, v. 63, p. 733-749, 2012.
- HUGHES, C. E.; ATCHISON, G. W. The ubiquity of alpine plant radiations: from the Andes to the Hengduan Mountains. **New Phytologist**, v. 207, p. 275–282, 2015.
- KESSLER, M. et al. Elevational patterns of *Polylepis* tree height (Rosaceae) in the high Andes of Peru: role of human impact and climatic conditions. **Frontiers in Plant Science**, v. 5, p. 1-12, 2014.
- MENDOZA, W; CANO, A. Diversidad del género *Polylepis* (Rosaceae, Sanguisorbeae) en los Andes peruanos. **Revista Peruana de Biología**, v. 18, p. 197-200, 2011.
- MEYER, C. et al. Global priorities for an effective information basis of biodiversity distributions. **Nature Communications**, v. 6, p. 1-8, 2015.
- NAVARRO, G. et al. Classification of the high-Andean *Polylepis* forests in Bolivia. **Plant Ecology**, v. 176, p. 113-130, 2005.
- PETERSON, A T. et al. **Ecological Niches and Geographic Distributions**. Princeton University Press. 2011.

- RAMIREZ-VILLEGAS, J. et al. Using species distributions models for designing conservation strategies of Tropical Andean biodiversity under climate change. **Journal for Nature Conservation**, v. 22, p. 391-404, 2014.
- RENISON, D. et al. Landscape structural complexity of high-mountain *Polylepis australis* forests: a new aspect of restoration goals. **Restoration Ecology**, v. 19, p. 390-398, 2011.
- RENISON, D. et al. Distribución y estado de conservación de las poblaciones de árboles y arbustos del género *Polylepis* (Rosaceae) en las montañas de Argentina. **Ecología Austral**, v. 23, p. 27-36, 2013.
- SIMPSON, B. B. Speciation and specialization of *Polylepis* in the Andes. In: VUILLEUMIER, F.; MONASTERIO, M. (Eds.) **High altitude tropical biogeography**. New York, USA: Oxford University Press and the American Museum of Natural History, 1986. p. 304-316.
- SKLENAŘ, P. et al. Island biogeography of tropical alpine floras. **Journal of Biogeography**, v. 41, p. 287-297, 2014.
- TOIVONEN, J. M. et al. Accessibility predicts structural variation of Andean *Polylepis* forests. **Biodiversity and Conservation**, v. 20, p. 1789–1802, 2011.
- VALENCIA, B. G. et al. Andean microrefugia: testing the Holocene to predict the Anthropocene. **New Phytologist**, v. 212, p. 510-522, 2016.
- VALENCIA, B. G. et al. *Polylepis* woodland dynamics during the last 20,000 years. **Journal of Biogeography**, v. 45, p. 1019–1030, 2018.
- YU, F. et al. Climate and land use changes will degrade the distribution of *Rhododendrons* in China. **Science of the Total Environment**, v. 659, p. 515-528, 2019.
- ZURELL, D. et al. A standard protocol for reporting species distribution models. **Ecography**, v. 43, p. 1261–1277, 2020.
- ZUTTA, B. R.; RUNDEL, P. W. Modeled shifts in *Polylepis* species ranges in the Andes from the Last Glacial Maximum to the present. **Forests**, v. 8, p. 232-248, 2017.

## **SEGUNDA PARTE**



## ARTIGO 01

(Redigido de acordo com as normas do periódico *Tropical Ecology*)

### **DISTRIBUIÇÃO, AMEAÇAS E CONSERVAÇÃO DE *Polylepis* spp. NOS ANDES: UMA REVISÃO CRÍTICA**

#### **RESUMO**

As florestas de *Polylepis* são um dos principais ecossistemas dos Andes. A pressão antrópica e as flutuações climáticas têm as deixado cada vez mais vulneráveis. Aqui, realizamos uma revisão bibliométrica de artigos publicados em revistas indexadas, a fim de reunir conhecimentos acerca da distribuição do gênero *Polylepis* e subsidiar estratégias para sua conservação. Nós analisamos artigos das bases Web of Science e Scopus. Fizemos o levantamento dos seguintes parâmetros bibliométricos: ano de publicação, país e instituição dos autores, periódicos, autores, idioma e palavras-chave. Além disso, discutimos as ameaças e estratégias de conservação do gênero com base nos principais resultados encontrados nas publicações. Encontramos 46 artigos publicados sobre o tema. As publicações ocorreram entre 1995 e 2022, por autores de 12 países. Alemanha e Argentina foram os países com maior número de trabalhos. Calculamos um total de 103 autores e 63,1% dos trabalhos possuem coautores de países diferentes. A maioria dos trabalhos foi publicada em inglês (73,9%) e o periódico que recebeu a maior parte das publicações foi *Ecología Austral* (13,04%). Por fim, destacamos os termos “climate change” e “livestock” entre os 10 mais frequentes nas palavras-chave dos autores. Isso corrobora o fato de que 41,3% dos artigos discutem fatores antrópicos e/ou mudanças climáticas como a causa da fragmentação das florestas de *Polylepis*. O termo “conservation” não figura entre os 10 mais frequentes nas palavras-chave e apenas três artigos (6,52%) abordaram os Modelos de Distribuição de Espécies (SDMs) como uma ferramenta importante para a conservação do gênero.

**Palavras-chave:** Análise bibliométrica; Compilação de dados; Conservação; Florestas montanas; Rede de pesquisa.

## ABSTRACT

The *Polylepis* forests are one of the main ecosystems of the Andes. Anthropogenic pressure and climate changes have made them increasingly vulnerable. Here, we carried out a bibliometric review of articles published in indexed journals, to gather knowledge about the distribution of *Polylepis* genus and support strategies for its conservation. We reviewed articles from Web of Science and Scopus platforms. We surveyed the bibliometric parameters: publication year, country and institution of authors, journals, authors, language and keywords. In addition, we discussed the threats and conservation strategies of the genus based on the main results found in the publications. We found 46 published articles on the topic. Publications occurred between 1995 and 2022, by authors from 12 countries. Germany and Argentina were the countries with the highest number of works. We calculated a total of 103 authors and 63.1% of the works have co-authors from different countries. Most of the works were published in English (73.9%) and the journal that published most publications was *Ecología Austral* (13.04%). Finally, we highlight the terms “climate change” and “livestock” among the 10 most frequent in the authors' keywords. This corroborates the fact that 41.3% of the articles discussed anthropic factors and/or climate change as the cause of the fragmentation of *Polylepis* forests. Protected Areas are the main form of protection for these forests and the term “conservation” is not among the 10 most frequent in the keywords. Only three articles (6.52%) addressed Species Distribution Models (SDMs) as an important tool for the conservation of the genus.

**Keywords:** Bibliometric analysis; Data compilation; Conservation; Mountain forests; Research network.

## INTRODUÇÃO

A ocorrência de espécies endêmicas é um dos critérios para identificação de áreas prioritárias para conservação (Meyer et al. 2015). Com a crescente pressão antrópica sobre as florestas andinas, vem sendo cada vez mais importante utilizar ferramentas que permitem determinar possíveis novos locais de ocorrência de espécies endêmicas ou ameaçadas. A identificação de áreas ambientalmente adequadas para as espécies aumenta o entendimento a respeito do risco potencial da espécie, e os resultados gerados auxiliam na tomada de decisão para sua conservação (Yu et al. 2019).

A região andina tem sofrido com o aumento do desmatamento para conversão de terras para agricultura. Além disso, tem sofrido efeitos indiretos do intenso desmatamento ocorrido na Amazônia (Nanni et al. 2020). Por exemplo, a aceleração no degelo dos Andes tropicais em 42% de 1990 a 2020 (tanto em extensão quanto em volume), tem sido atribuída às mudanças climáticas e ao aumento das queimadas florestais nos últimos anos na Amazônia, que geram carbono negro e podem acarretar o recuo das geleiras (Cayo et al. 2022).

O gênero *Polylepis* pertence à família Rosaceae e compreende cerca de 30 espécies endêmicas dos ecossistemas florestais alto-andinos, que formam povoamentos mono específicos acima de 3.300 m de altitude (Toivonen et al. 2011). As florestas de *Polylepis* são um dos principais ecossistemas dos Andes, ligados à vida do homem andino desde que este chegou à região (Valencia et al. 2018). Além de importante endemismo regional, estas florestas são responsáveis pela regulação hídrica, mitigação de emissões de CO<sub>2</sub>, proteção do solo e fornecem habitats para espécies endêmicas e ameaçadas de outros grupos taxonômicos (Fjeldsa e Kessler 1996; Sevilhano-Ríos e Rodewald 2017).

Apesar de tamanha importância que essas florestas representam para o funcionamento ecossistêmico da região, a pressão antrópica (como queimadas, desmatamento, extração de lenha e aumento da pecuária) e as flutuações climáticas têm as deixado cada vez mais vulneráveis (Kessler 2002; Renison et al. 2018). Desta forma, as florestas de *Polylepis* têm sido consideradas como um dos ecossistemas mais ameaçados do mundo (IUCN 2022). Assim, faz-se necessário a adesão de medidas mitigatórias e os estudos acerca da distribuição de florestas nativas para neutralizar os efeitos negativos das mudanças climáticas através da conservação e reflorestamento (Zutta et al. 2012).

Os Modelos de Distribuição de Espécies são uma ferramenta valiosa para auxiliar a tomada de decisões para conservação de espécies (Giannini et al. 2012; Zurell et al. 2020). Esses modelos usam métodos quantitativos para inferir os requisitos ambientais das espécies a

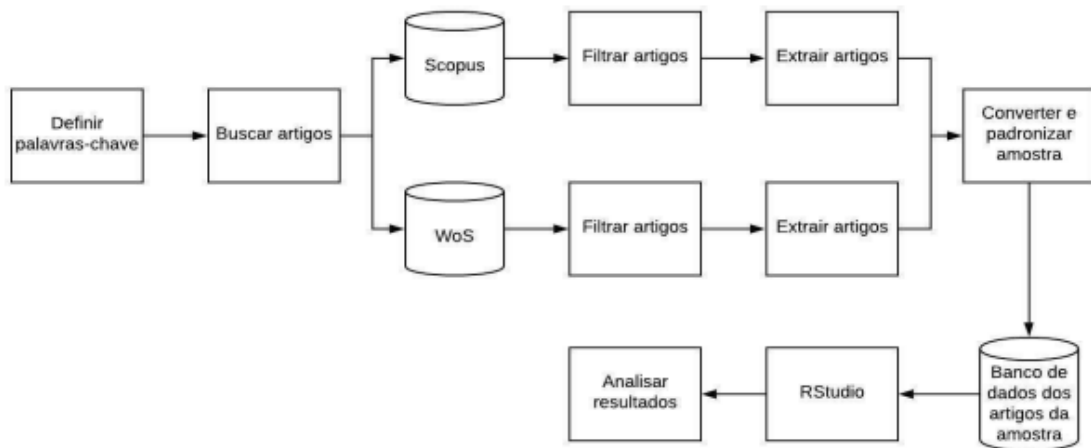
partir de variáveis abióticas e pontos de ocorrência conhecidos e são cada vez mais usados para prever distribuições (Wisz et al. 2008). Os resultados dos modelos são mapas de adequabilidade ambiental que indicam possíveis novos locais de ocorrência para a espécie.

Na região andina, ainda são escassos estudos relacionados à biodiversidade e distribuição de espécies (Mejía et al. 2018). Diante disso, nós buscamos nessa revisão: (i) descrever os principais parâmetros bibliométricos dos estudos de distribuição de *Polylepis* spp.; (ii) caracterizar a distribuição do gênero ao longo dos Andes; (ii) identificar as principais ameaças enfrentadas pelas espécies do gênero; e (iii) discutir a modelagem da distribuição de espécies como uma estratégia para conservação das florestas de *Polylepis*. A partir disso, esperamos reunir conhecimentos acerca da distribuição do gênero nos Andes e subsidiar estratégias para sua conservação.

## MATERIAL E MÉTODOS

A busca bibliográfica foi realizada utilizando diferentes palavras-chave na base de pesquisa da Web of Science (<https://webofscience.com>) e da Scopus (<https://www.scopus.com/home.uri>). Para obter o maior número de documentos e, conseqüentemente, um banco de dados mais completo, utilizamos palavras em inglês, espanhol e português, relacionadas à temática, que estavam presentes nas palavras-chave, títulos e/ou resumos das publicações. As palavras utilizadas foram: TS = “polylepis” AND “distribution” OR “polylepis” AND “species distribution model”. O levantamento foi realizado em agosto de 2022, portanto consideramos todos os artigos publicados até julho de 2022.

Todos os documentos apresentados nas coleções das plataformas acima foram analisados, sendo que a seleção dos artigos seguiu o seguinte padrão: (i) seleção inicial de trabalhos que tiverem título e resumo dentro da linha de estudo deste projeto; (ii) análise das referências bibliográficas dos trabalhos, a fim de encontrar possíveis outros trabalhos da temática; e (iii) leitura na íntegra dos artigos selecionados e submissão dos mesmos de forma exploratória por critérios de “inclusão” ou “exclusão” da base literária deste estudo (Figura 1). Entre os critérios de exclusão, cita-se: (i) estudos realizados com epíteto “*polylepis*” e não com o gênero foco deste estudo; (ii) estudos que não abordavam a temática de distribuição das espécies de *Polylepis* spp.; e (iii) estudos que foram realizados em outros locais do mundo, diferentes da América do Sul.



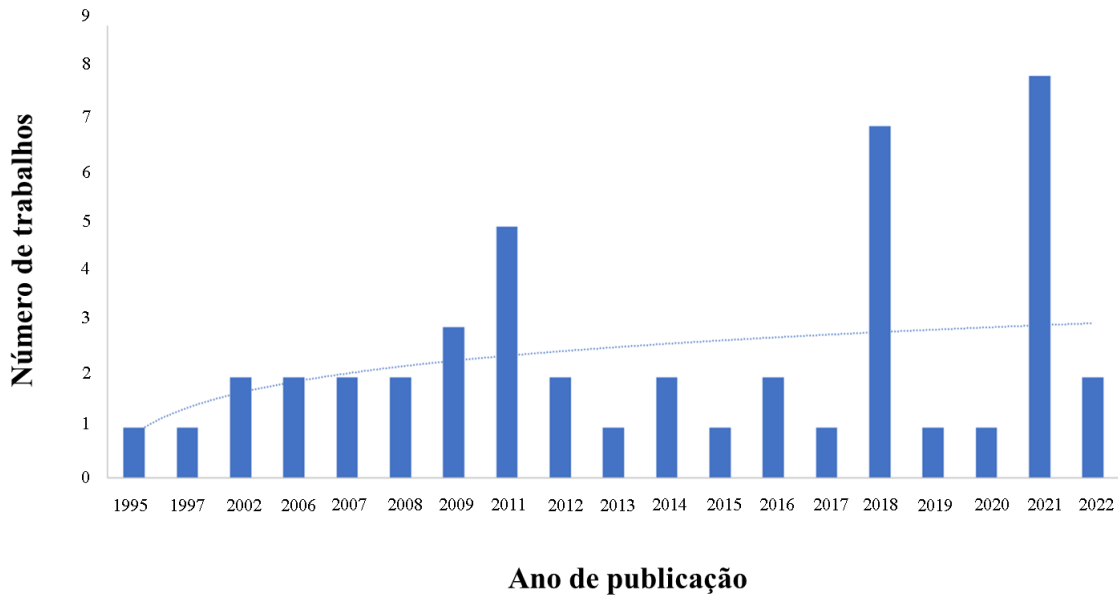
**Fig. 1** Etapas da análise bibliométrica.

Considerando a base literária final, os artigos foram analisados e coletamos as seguintes informações bibliométricas: (i) ano de publicação, (ii) país, (iii) instituições dos autores, (iv) periódicos, (v) autores, (vi) idioma e (vii) palavras-chaves. Ao final da revisão bibliométrica também foi realizada a descrição dos principais resultados encontrados nas publicações analisadas. Em seguida, os dados foram processados no pacote *bibliometrix* do software R (Aria e Cuccurullo 2017).

## RESULTADOS

### Tendências temporais na publicação

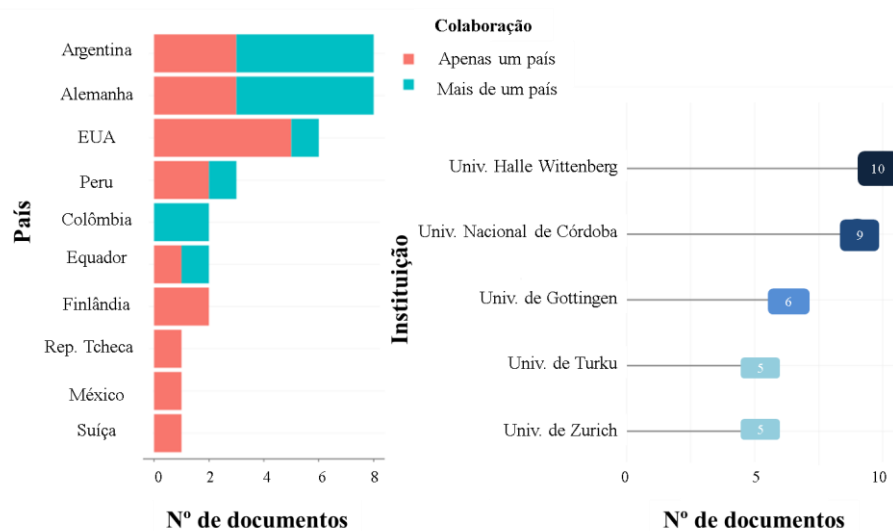
Ao final da avaliação bibliográfica, 46 artigos se encaixaram com a temática distribuição do gênero *Polylepis* nos Andes (Material Suplementar S1). As publicações ocorreram entre 1995 e 2022 (Figura 2), resultando em média 1,65 publicações por ano, sendo que o número de publicações por ano teve um aumento significativo entre 2018 e 2022, chegando a aproximadamente quatro publicações por ano. Considerando os estudos publicados, os anos de 2011, 2018 e 2021 destacam-se em número de publicações com cinco, sete e oito publicações no tópico de estudo, respectivamente.



**Fig. 2** Frequência de publicações sobre distribuição de *Polylepis* spp. realizadas anualmente.

### Países e instituições

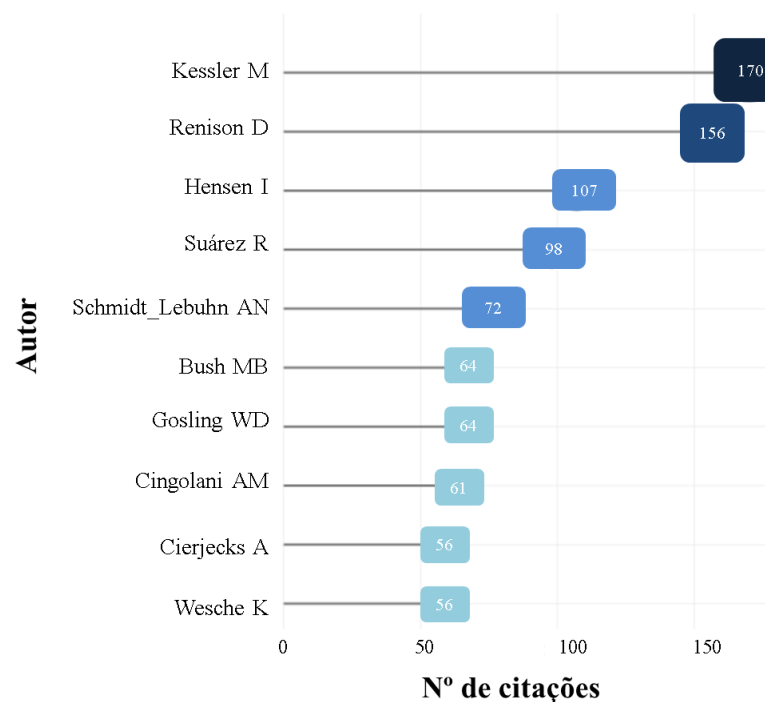
Os trabalhos foram publicados por autores de 12 diferentes países. Alemanha e Argentina foram os países com maior número de trabalhos publicados ( $n = 8$ ), seguidos de Estados Unidos ( $n = 6$ ) e Peru ( $n = 3$ ). As principais instituições de ensino que pesquisam a temática estão situadas na Alemanha e Argentina, justificando o maior número de publicações, sendo elas: Universidade de Halle Wittenberg, Universidade Nacional de Córdoba e Universidade de Gottingen (Figura 3).



**Fig. 3** Distribuição e número de trabalhos sobre distribuição de *Polylepis* spp. publicados em cada país e instituição.

## Autores

A análise bibliométrica calculou um total de 103 autores nos 46 trabalhos publicados, onde apenas dois trabalhos tiveram autoria singular. Em média, os trabalhos possuem 3,35 coautores por documento e 63,1% dos trabalhos possuem algum coautor de outro país, ou seja, a maior parte dos estudos é construída por meio de colaboração de pessoas de diferentes países. Entre estes, apenas três autores publicaram mais que quatro trabalhos, sendo eles Michael Kessler, Isabell Hensen e Daniel Renison. Juntos, esses três autores possuem 433 citações, sendo 170 para Kessler, 156 para Renison e 107 para Hensen (Figura 4).

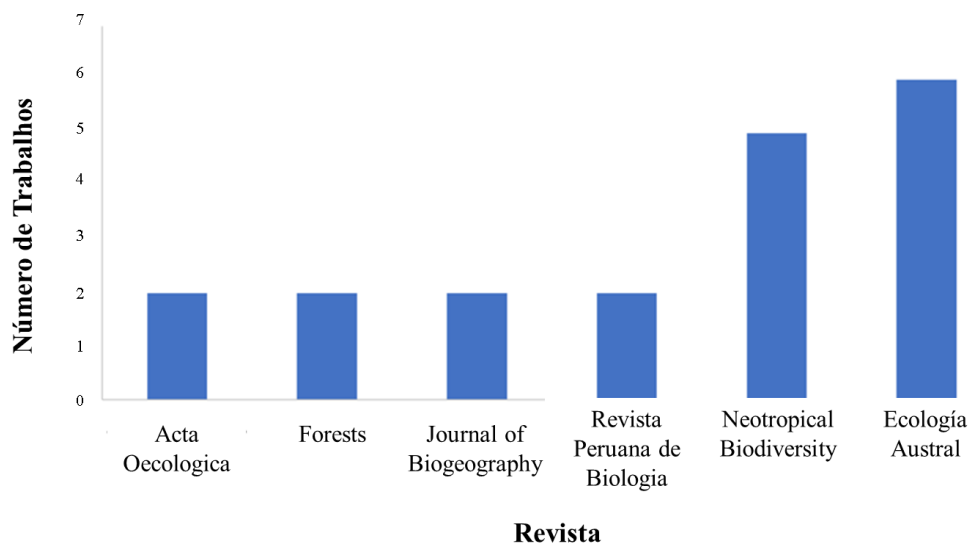


**Fig. 4** Lista e número de citações dos 10 autores mais citados em publicações sobre distribuição de *Polylepis* spp.

## Artigos e documentos principais

Entre os trabalhos analisados, 34 foram publicados em inglês (73,91%) e 12 em espanhol (26,09%). Destaca-se que a elevada porcentagem de trabalhos publicados em inglês deve-se a tendência da publicação científica mundial, a qual prioriza publicações em inglês para uma melhor distribuição e difusão das pesquisas realizadas em diferentes países. Contudo, aproximadamente 25% dos trabalhos foram publicados em espanhol, ou seja, em revistas com o idioma local dos países em que o gênero é encontrado.

O modelo das publicações abrange artigos publicados em periódicos e trabalhos publicados em anais de congressos, onde um trabalho (2,2%) foi publicado em anais, três trabalhos (6,5%) publicados em anais com posterior publicação em periódicos e 42 (91,3%) trabalhos publicados somente em periódicos. Portanto, aproximadamente 98% dos trabalhos estão publicados em periódicos mundiais (Material Suplementar S2). *Ecología Austral* e *Neotropical Biodiversity* são os periódicos com a maioria das publicações sobre o tema, com seis e cinco trabalhos publicados, respectivamente (Figura 5). Esses dois periódicos juntos totalizam 23,9% das publicações ao longo dos anos, sendo, portanto, os mais relevantes para a temática.



**Fig. 5** Principais periódicos onde os artigos sobre distribuição de *Polylepis* spp. foram publicados.

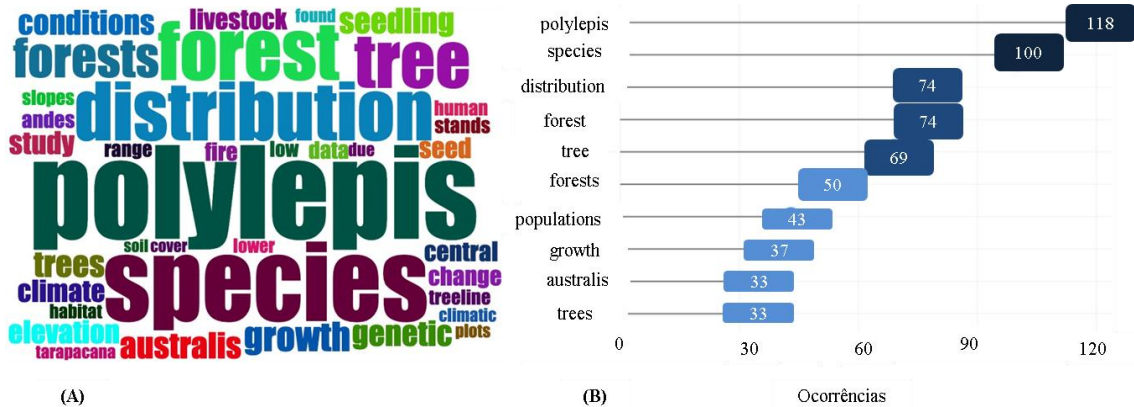
Apenas três artigos apresentaram mais de 50 citações. Os artigos mais citados foram “Taxonomical and distributional notes on *Polylepis* (Rosaceae)” (n = 74), publicado por Kessler e Schmidt-Lebuhn (2006); “Efectos del fuego sobre un bosquecillo de *Polylepis australis* (Rosaceae) en las montañas de Córdoba, Argentina” (n = 73), publicado por Renison et al. (2002); e “Long-term drivers of change in *Polylepis* woodland distribution in the central Andes” (n = 56), publicado por Gosling et al. (2009).

### Principais tópicos

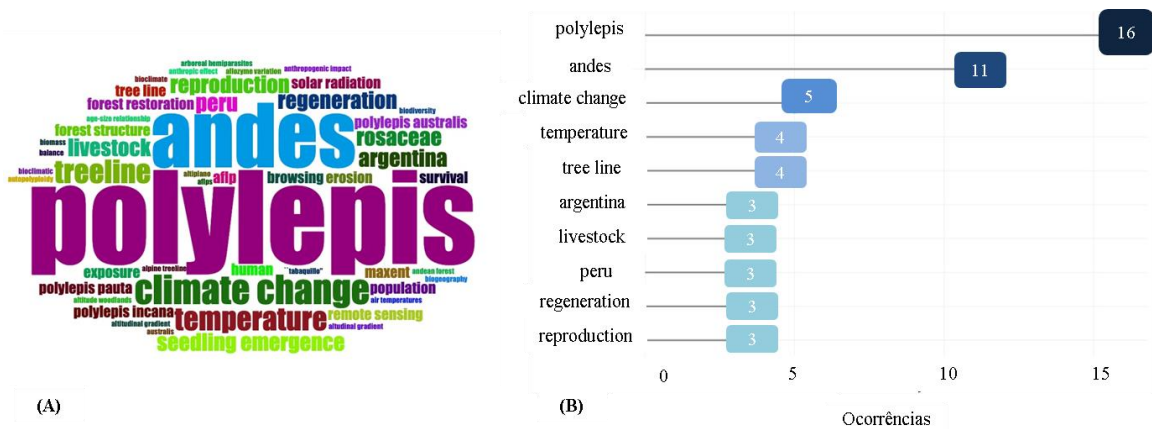
Os 10 termos mais relevantes em publicações sobre distribuição de *Polylepis* são apresentados nas figuras 6 e 7. Na Figura 6, são apresentados os termos que aparecem pelo menos 30 vezes no título e/ou resumo dos 46 artigos analisados. Os mais comuns são



“polylepis” (n = 118), “species” (n = 100), “distribution” (n = 74), “forests” (n = 74) e “tree” (n = 69). Na Figura 7, estão os termos mais usados como palavras-chave pelos autores. Os mais comuns são “polylepis” (n = 16), “andes” (n = 11), “climate change” (n = 5), “temperature” (n = 4) e “treeline” (n = 4).



**Fig. 6** Termos mais frequentes encontrados no título e/ou resumo dos 46 artigos analisados. (A) quanto maior a fonte, mais frequente é o termo. (B) quantidade de vezes que os termos aparecem.



**Fig. 7** Termos mais frequentes encontrados entre as palavras-chave dos autores dos artigos analisados. (A) quanto maior a fonte, mais frequente é o termo. (B) quantidade de vezes que os termos aparecem.

### Distribuição, ameaças e conservação de *Polylepis* spp.

A maior parte das florestas de *Polylepis* tem distribuição entre 3.000 e 4.000 m de altitude, porém podem atingir até 5.200 m, com uma extensão de 5.400 km no sentido Norte-Sul. Isso as caracteriza como os ecossistemas florestais de maior alcance altitudinal e latitudinal no mundo (Braun 1997; Mendoza e Cano 2011; Toivonen et al. 2011; Renison et al. 2018). Dos 46 artigos analisados, 19 estudaram o impacto humano e/ou as mudanças

climáticas como a causa da fragmentação das florestas de *Polylepis*. A maior parte dos artigos (63%) citam as queimadas e o pastoreio excessivo como os principais responsáveis pela distribuição fragmentada das florestas. Já para 37% dos autores as mudanças climáticas são as principais ameaças a essas florestas.

As Áreas Protegidas se constituem como a principal forma de proteção das florestas de *Polylepis*, porém alguns autores sinalizam o reflorestamento como uma alternativa viável de conservação das espécies do gênero. O termo “conservation” apareceu pela primeira vez no título e/ou resumo das publicações apenas em 2002 (Kessler 2002). Apenas 6,52% dos artigos abordaram os Modelos de Distribuição de Espécies – SDMs como uma ferramenta importante para a conservação de *Polylepis* spp. (Zutta et al. 2012; Zutta e Rundel 2017; Domic e Capriles 2021).

## DISCUSSÃO

Utilizamos a análise bibliométrica para investigar como a comunidade científica tem reagido ao problema de perda de hábitat, que afeta as florestas de *Polylepis* (os ecossistemas florestais de maior altitude no mundo). A análise prospectiva pode mostrar como as ameaças a essas florestas têm sido compreendidas e quais medidas de conservação podem ser adotadas para reduzir o efeito dessas ameaças e desacelerar o processo de fragmentação concernente a esses ecossistemas.

A distribuição quantitativa anual de publicações sobre *Polylepis* reflete o desenvolvimento das pesquisas, o conhecimento gerado sobre o assunto e até mesmo a maturidade desse campo. O primeiro artigo foi publicado em 1995. Percebemos, então, um baixo número de publicações sobre as florestas de *Polylepis*, dado o tempo que este assunto está em pauta no meio científico. Esperamos que nos próximos anos haja um aumento significativo do número de publicações, pois essas florestas estão cada vez mais ameaçadas e acreditamos que a comunidade científica pode ser fundamental para ampliar e difundir o conhecimento sobre elas.

A Argentina é o país da América do Sul que mais contribui com as publicações sobre *Polylepis* spp. O fato de Alemanha e Estados Unidos aparecerem como importantes colaboradores reforça a ideia de que o “problema *Polylepis*” é de interesse mundial. Michael Kessler, o autor mais citado, atualmente integra a equipe do Instituto de Botânica Sistemática da Universidade de Zurique, na Suíça. Porém, já fez parte do Instituto de Geobotânica Sistemática da Universidade de Göttingen, na Alemanha. Atualmente desenvolve trabalhos

relacionados à biodiversidade e biogeografia de plantas tropicais. Alguns tópicos importantes que ele aborda nas suas pesquisas são: (i) causas que determinam os limites inferiores de distribuição de plantas em ecossistemas montanhosos; e (ii) modelagem da relação entre distribuição de plantas e clima.

Ecología Austral, da Associação Argentina de Ecologia, e Neotropical Biodiversity, da Secretaria de Educação Superior, Ciência, Tecnologia e Inovação do Equador, são os periódicos que mais receberam publicações sobre distribuição de *Polylepis*. Ambos são de acesso livre e se enquadram amplamente no domínio de Ecologia e Biodiversidade. Esse resultado evidencia esses periódicos como os mais relevantes na divulgação de resultados sobre *Polylepis* em todo o mundo. Cabe ressaltar que dos seis periódicos mais representativos, quatro são de países da América do Sul.

O artigo mais citado foi publicado no periódico alemão “Organisms, Diversity and Evolution”, descrevendo novas espécies de *Polylepis* e relatando as extensões das faixas de distribuição dessas espécies (Kessler e Schmidt-Lebuhn 2006). O segundo e terceiro artigos mais citados estudaram a distribuição fragmentada das florestas de *Polylepis*, evidenciando o efeito negativo do fogo (Renison et al. 2002) e das flutuações climáticas sobre as populações (Gosling et al. 2009). Respectivamente, foram publicados nos periódicos “Revista Chilena de Historia Natural” e “Journal of Vegetation Science”. Esses dois últimos artigos também discutem a necessidade de conservação dessas florestas e sugerem o manejo do fogo e reflorestamento como estratégias viáveis para conservação do gênero.

A presença dos termos “climate change” e “livestock” entre os 10 mais frequentes nas palavras-chave dos autores evidenciam fatores climáticos e antrópicos como determinantes para a atual distribuição do gênero *Polylepis*. Também destacamos os termos “Peru” e “Argentina” entre os mais frequentes. O Peru faz parte do atual centro de diversidade de *Polylepis* e abriga a maior riqueza de espécies do gênero (19 espécies) (Mendoza e Cano 2011). Já a Argentina, além de ser o país sul-americano que mais contribui para a pesquisa de distribuição do gênero, é considerada área de endemismo de *P. australis*. Esta espécie é uma das mais estudadas do gênero, principalmente devido ao seu alto grau de ameaça (Renison et al. 2011; Marcora et al. 2021). Chamamos atenção para a ausência do termo “conservation” entre os 10 mais frequentes tanto no título e resumo, quanto nas palavras-chave.

Com base nos artigos analisados, também podemos inferir que combinações específicas de características do terreno estão diretamente relacionadas com a ocorrência dos povoamentos de *Polylepis* spp. (Coblentz e Keating 2008). Isso faz com que o padrão natural de distribuição não seja homogêneo para todo o gênero, diferenciando-se de acordo com a

espécie avaliada (Camel et al. 2019). Além disso, a ocupação humana nos Andes tem causado a hiperfragmentação das florestas durante os últimos anos. Assim, torna-se cada vez mais comum a presença de bosques isolados de *Polylepis* spp., ao invés de um cinturão de vegetação contínua (Valencia et al. 2018). As atividades econômicas exercidas na região como a pecuária, agricultura, conversão de florestas e incêndios florestais têm gerado pressões sobre essas espécies (Cuyckens et al. 2021).

A distribuição atual de *P. australis*, por exemplo, é pelo menos em parte delimitada pela ocorrência de incêndios (Renison et al. 2002; Argibay e Renison 2018). Portanto, o uso do fogo pode afetar fortemente a zona de fronteira reprodutiva das florestas remanescentes de *Polylepis*. Desta forma, os povoamentos abaixo da linha superior das árvores se expandiriam continuamente em direção a altitudes mais baixas, se o impacto humano cessasse (Cierjacks et al. 2007). De forma complementar, as mudanças climáticas também moldam o padrão de distribuição das espécies de *Polylepis*. Existem vários estudos indicando que as variações climáticas podem conduzir rápidas mudanças na vegetação, alterando esse padrão e as exigências para sobrevivência do gênero (Kessler et al. 2014; Marcora et al. 2021).

A modelagem de distribuição de espécies para *Polylepis* spp. ainda é incipiente, mas são extremamente importantes para subsidiar sua conservação. Os modelos gerados podem identificar áreas de adequabilidade ambiental das espécies, que devem ser prioridade para conservação (Caballero-Villalobos et al. 2021). Por exemplo, projeções futuras mostraram que, em longo prazo, o complexo Páramo “Sumapaz-Cruz Verde” é uma área importante para a conservação de *P. quadrijuga*, porque fornece uma ampla gama de habitats para os diferentes cenários de mudança do clima avaliados (Caballero-Villalobos et al. 2021). Estudos com base em registros de pólen e estudos filogeográficos disponíveis, identificaram que existem quatro *hotspots* de abrigos atuais: Cordilheira Central do Peru, bacia do Lago Titicaca, Cordilheira Ocidental da Bolívia e norte do Chile (Domic e Capriles 2021).

## CONCLUSÕES

Por conta da baixa quantidade de publicações científicas anuais de estudos relacionados à distribuição de *Polylepis* e a alta concentração desses estudos em poucas regiões de ocorrência e em poucas revistas, é interessante que ocorram interações entre autores, para que a troca de experiências e dados aumente a escala de conhecimento sobre essa temática. A revisão bibliométrica é muito importante para a compilação dos dados mais importantes e para a facilitação na procura pelas principais literaturas desta temática.

As árvores de *Polylepis* são economicamente importantes para as comunidades camponesas e imensuravelmente importantes para a manutenção do ecossistema em altas altitudes. No entanto, os poucos estudos publicados na área geralmente não são replicados de uma região para outra, o que dificulta o entendimento mais amplo dessas questões. A utilização da Modelagem de Distribuição de Espécies para o gênero *Polylepis* ainda é um ramo pouco estudado, de forma a apresentar anos com baixa ocorrência ou sem nenhuma publicação realizada.

Conforme visualizado nos artigos analisados é necessário discutir e difundir o uso da tecnologia e técnicas significativamente avançadas para ajudar a melhorar o futuro das florestas de *Polylepis* e as espécies que delas dependem. Também é necessária, a confecção de uma rede eficiente de áreas protegidas em toda a área de distribuição desta espécie e o manejo adequado dessas áreas. Isso garantiria a conservação futura deste ecossistema único e altamente ameaçado.

## REFERÊNCIAS

- Aria M, Cuccurullo C (2017) bibliometrix: an R-tool for comprehensive science mapping analysis. *J Informetr* 11:959—975. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>
- Argibay DS, Renison D (2018) Efecto del fuego y la ganadería en bosques de *Polylepis australis* (Rosaceae) a lo largo de un gradiente altitudinal en las montañas del centro de la Argentina. *Bosque* 39:145—150. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002018000100145>
- Braun G (1997) The use of digital methods in assessing forest patterns in an Andean environment: the *Polylepis* example. *Mt Res Dev* 17:253—262. <https://doi.org/10.2307/3673852>
- Caballero-Villalobos L, Fajardo-Gutiérrez F, Calbi M, Silva-Arias CA (2021) Climate Change Can Drive a Significant Loss of Suitable Habitat for *Polylepis quadrijuga*, a Treeline Species in the Sky Islands of the Northern Andes. *Front Ecol Evol* 9:661550. <https://doi.org/10.3389/fevo.2021.661550>
- Camel V, Quispe-Melgar HR, Ames-Martínez FN et al (2019) Forest structure of three endemic species of the genus *Polylepis* (Rosaceae) in central Perú. *Ecol Austral* 29:285—295. <https://doi.org/10.25260/EA.19.29.3.0.812>
- Cayo EYT, Borja MO, Espinoza-Villar R, Moreno N (2022) Mapping three decades of changes in the Tropical Andean Glaciers using landsat data processed in the earth engine. *Remote Sens* 14:1—21. <https://doi.org/10.3390/rs14091974>
- Cierjacks A, Wesche K, Hensen I (2007) Potential lateral expansion of *Polylepis* forest fragments in central Ecuador. *For Ecol Manag* 242:477—486. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.01.082>
- Coblentz D, Keating PL (2008) Topographic controls on the distribution of tree islands in the high Andes of south-western Ecuador. *J Biogeogr* 35:2026—2038. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2008.01956.x>
- Cuyckens GAE, Mazzini F, Julián RF et al (2021) Effect of livestock on regeneration of queñoa (*Polylepis australis* Bitt.) forest in the Southern Andean Yungas of northwestern Argentina. *Ver Chapingo Ser Cienc For y del Ambient* 27:215—228. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2020.05.035>
- Domic AI, Capriles JM (2021) Distribution shifts in habitat suitability and hotspot refugia of Andean tree species from the last glacial maximum to the Anthropocene. *Neotrop Biodivers* 7:297—309. <https://doi.org/10.1080/23766808.2021.1957652>
- Fjeldsa ME, Kessler M (1996) Conserving the biological diversity of *Polylepis* woodlands of the highland of Peru and Bolivia: a contribution to sustainable natural resource management in the Andes. NORDECO, Copenhagen.

- Giannini TC, Siqueira MF, Acosta AL et al (2012) Desafios atuais da modelagem preditiva de distribuição de espécies. *Rodriguésia* 63:733—749. <https://doi.org/10.1590/S2175-78602012000300017>
- Gosling WD, Hanselman JA, Knox C et al (2009) Long-term drivers of change in *Polylepis* woodland distribution in the central Andes. *J Veg Sci* 20:1041—1052. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2009.01102.x>
- International Union for Conservation of Nature – IUCN (2022) The IUCN red list of threatened species. <https://www.iucnredlist.org>
- Kessler M (2002) The “*Polylepis* Problem”: where do we stand? *Ecotropica* 8: 97—110. <https://doi.org/10.1111/jbi.13209>
- Kessler M, Schmidt-Lebuhn AN (2006) Taxonomical and distributional notes on *Polylepis* (Rosaceae). *Org Divers Evol* 6:67—69. <https://doi.org/10.1016/j.ode.2005.04.001>
- Kessler M, Toivonem JM, Sylvester SP et al (2014) Elevational patterns of *Polylepis* tree height (Rosaceae) in the high Andes of Peru: role of human impact and climatic conditions. *Front Plant Sci* 5:1—12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00194>
- Marcora PI, Tecco PA, Ferrero MC et al (2021) Are populations of *Polylepis australis* locally adapted along their elevation gradient? *Neotrop Biodivers* 7:246—256. <https://doi.org/10.1080/23766808.2021.1940049>
- Mejía D, Tonón M, Abad L (2018) Distribución potencial del género *Polylepis* en la Cuenca del río Paute bajo un escenario de cambio climático. *Rev Fac Cienc Quim* 19:1390—1869.
- Mendoza W, Cano A (2011) Diversidad del género *Polylepis* (Rosaceae, Sanguisorbeae) en los Andes peruanos. *Rev Peru Biol* 18:197—200. <https://doi.org/10.15381/rpb.v18i2.228>
- Meyer C, Kreft H, Guralnick R, Jetz W (2015) Global priorities for an effective information basis of biodiversity distributions. *Nat Commun* 6:1—8. <https://doi.org/10.1038/ncomms9221>
- Nanni AS, Piquer-Rodríguez M, Rodríguez D et al (2020) Presiones sobre la conservación asociadas al uso de la tierra en las ecorregiones terrestres de la Argentina. *Ecol Austral*. 30:304—320. <https://doi.org/10.25260/EA.20.30.2.0.1056>
- Renison D, Cingolani AM, Suarez A (2002) Efectos del fuego sobre un bosquecillo de *Polylepis australis* (Rosaceae) en las montañas de Córdoba, Argentina. *Rev Chil Hist Nat* 75:719—727. <https://doi.org/10.4067/S0716-078X2002000400007>
- Renison D, Hensen I, Suarez R (2011) Landscape structural complexity of high-mountain *Polylepis australis* forests: a new aspect of restoration goals. *Restoration Ecology* 19:390—398. <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2009.00555.x>

- Renison D, Morales L, Cuyckens GAE et al (2018) Ecología y conservación de los bosques y arbustales de *Polylepis*: ¿qué sabemos y qué ignoramos? *Ecol Austral* 28:163—174. <https://doi.org/10.25260/EA.18.28.1.1.522>
- Sevillano-Ríos CS, Rodewald AD (2017) Avian community structure and habitat use of *Polylepis* forests along an elevation gradient. *PeerJ* 5:e3220. <https://doi.org/10.7717/peerj.3220>
- Toivonen JM, Kessler M, Ruokolainen K et al (2011) Accessibility predicts structural variation of Andean *Polylepis* forests. *Biodivers Conserv* 20:1789—1802. <https://doi.org/10.1007/s10531-011-0061-9>
- Valencia BG, Bush MB, Coe AL et al (2018) *Polylepis* woodland dynamics during the last 20,000 years. *J Biogeogr* 45:1019—1030. <https://doi.org/10.1111/jbi.13209>
- Wisz MS, Hijmans RJ, Li J et al (2008) Effects of sample size on the performance of species distribution models. *Divers Distrib* 14:763—773. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2008.00482.x>
- Yu F, Wang T, Groen TA, Skidmore AK et al (2019) Climate and land use changes will degrade the distribution of *Rhododendrons* in China. *Sci Total Environ* 659:515—528. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.223>
- Zurell D, Franklin J, König C et al (2020) A standard protocol for reporting species distribution models. *Ecography* 43:1261—1277. <https://doi.org/10.1111/ecog.04960>
- Zutta BR, Rundel PW (2017) Modeled shifts in *Polylepis* species ranges in the Andes from the Last Glacial Maximum to the present. *Forests* 8:232—248. <https://doi.org/10.3390/f8070232>
- Zutta BR, Rundel PW, Saatchi S et al (2012) Prediciendo la distribución de *Polylepis*: bosques Andinos vulnerables y cada vez más importantes. *Rev Peru Biol* 19:205—212. <https://doi.org/10.15381/rpb.v19i2.849>



**MATERIAL SUPPLEMENTAR**

**Material Suplementar S1** Trabalhos considerados após os critérios de exclusão.

| <b>Autores</b>  | <b>Título</b>  | <b>Ano de publicação</b> |
|---|--|--------------------------|
| Kessler, M  | Present and potential distribution of <i>Polylepis</i> (Rosaceae) forests in Bolivia                           | 1995                     |
| Braun, G  | The use of digital methods in assessing forest patterns in an Andean environment: the <i>Polylepis</i> example | 1997                     |
| Kessler, M  | The "Polylepis problem": where do we stand?  | 2002                     |
| Renison, D; Cingolani, AM;<br>Suarez, R                 | Effects of fire on a <i>Polylepis australis</i> (Rosaceae) woodland in the mountains of Cordoba, Argentina     | 2002                     |
| Kessler, M; Schmidt-Lebuhn, AN                          | Taxonomical and distributional notes on <i>Polylepis</i> (Rosaceae)  | 2006                     |
| Robledo, G; Urcelay, C;<br>Dominguez, L; Rajchenberg, M | Taxonomy, ecology, and biogeography of polypores (Basidiomycetes) from Argentinian <i>Polylepis</i> woodlands  | 2006                     |

---

|   |   |      |
|---|---|------|
| Cierjacks, A; Wesche, K; Hensen,<br>I                             | Potential lateral expansion of <i>Polylepis</i> forest fragments in central Ecuador   | 2007 |
| Schmidt-Lebuhn, AN; Seltmann,<br>P; Kessler, M                    | Consequences of the pollination system on genetic structure and patterns of species distribution in the Andean genus <i>Polylepis</i> (Rosaceae): a comparative study | 2007 |
| Cierjacks, A; Salgado, S; Wesche,<br>K; Hensen, I                 | Post-fire population dynamics of two tree species in high-altitude <i>Polylepis</i> forests of central Ecuador  | 2008 |
| Coblentz, D; Keating, PL  | Topographic controls on the distribution of tree islands in the high Andes of southwestern Ecuador  | 2008 |
| Gosling, WD; Hanselman, JA;<br>Knox, C; Valencia, BG; Bush,<br>MB | Long-term drivers of change in <i>Polylepis</i> woodland distribution in the central Andes  | 2009 |
| Rada, F; Garcia-Nunez, C;<br>Rangel, S                            | Low temperature resistance in saplings and ramets of <i>Polylepis sericea</i> in the Venezuelan Andes   | 2009 |

---

---

|  |   |      |
|--|---|------|
| Macek, P; Mackova, J; de Bello, F                          | Morphological and ecophysiological traits shaping altitudinal distribution of three <i>Polylepis</i> treeline species in the dry tropical Andes   | 2009 |
| Aragundi, S; Hamrick, JL; Parker, KC                       | Genetic insights into the historical distribution of <i>Polylepis pauta</i> (Rosaceae) in the northeastern Cordillera Oriental of Ecuador         | 2011 |
| Hensen, I; Teich, I; Hirsch, H; von Wehrden, H; Renison, D | Range-wide genetic structure and diversity of the endemic tree line species <i>Polylepis australis</i> (Rosaceae) in Argentina                    | 2011 |
| Mendoza, W; Cano, A  | Diversidad del género <i>Polylepis</i> (Rosaceae, Sanguisorbeae) en los Andes peruanos  | 2011 |
| Renison, D; Hensen, I; Suarez, R                           | Landscape structural complexity of high-mountain <i>Polylepis australis</i> forests: a new aspect of restoration goals                            | 2011 |
| Toivonen, JM; Kessler, M; Ruokolainen, K; Hertel, D        | Accessibility predicts structural variation of Andean <i>Polylepis</i> forests  | 2011 |
| Bosch, AIP; Tecco, PA; Funes, G; Cabido, M                 | Efecto de la temperatura en la regeneración de especies leñosas del Chaco Serrano e implicancias en la distribución actual y potencial de bosques | 2012 |

---

---

|  |  |      |
|--|--|------|
| Zutta, BR; Rundel, PW; Saatchi, S; Casana, JD; Gauthier, P; Soto, A; Velazco, Y; Buermann, W   | Prediciendo la distribución de <i>Polylepis</i> : bosques Andinos vulnerables y cada vez más importantes   | 2012 |
| Renison, D; Cuyckens, GAE; Pacheco, S; Guzmán, GF; Grau, HR; Marcora, P; Robledo, Gerardo; Cingolani, AM; Dominguez, J; Landi, M; Bellis, L; Hensen, I | Distribución y estado de conservación de las poblaciones de árboles y arbustos del género <i>Polylepis</i> (Rosaceae) en las montañas de Argentina | 2013 |
| Kessler, M; Kuhn, A; Neffa, VGS; Hensen, I   | Complex geographical distribution of ploidy levels in <i>Polylepis australis</i> (Rosaceae), an endemic tree line species in argentina             | 2014 |
| Kessler, M; Toivonen, JM; Sylvester, SP; Kluge, J; Hertel, D   | Elevational patterns of <i>Polylepis</i> tree height (Rosaceae) in the high Andes of Peru: role of human impact and climatic conditions            | 2014 |
| Garavito, NT; Newton, AC; Oldfield, S  | Regional Red List assessment of tree species in upper montane forests of the Tropical Andes  | 2015 |

---

---

|   |  |      |
|---|--|------|
| Cuyckens, GAE; Christie, DA;<br>Domic, AI; Malizia, LR; Renison,<br>D | Climate change and the distribution and conservation of the world's highest elevation woodlands in the South American Altiplano                              | 2016 |
| Herrera, KP; Montano, CR  | Edge effect on lichen's distribution and chlorophyll content, in fragments of <i>Polylepis quadrijuga</i> (Rosaceae) in Paramo de la Rusia (Boyaca-Colombia) | 2016 |
| Zutta, BR; Rundel, PW   | Modeled shifts in <i>Polylepis</i> species ranges in the andes from the Last Glacial Maximum to the present  | 2017 |
| Argibay, DS; Renison, D   | Effect of fire and livestock on <i>Polylepis australis</i> (Rosaceae) woodlands along an altitudinal gradient in the mountains of central Argentina          | 2018 |
| Cuyckens, GAE; Renison, D   | Ecología y conservación de los bosques montanos de <i>Polylepis</i> . Una introducción al número especial  | 2018 |
| Morales, LV; Sevillano-Rios, CS;<br>Fick, S; Young, TP                | Differential seedling regeneration patterns across forest-grassland ecotones in two tropical treeline species ( <i>Polylepis</i> spp.)                       | 2018 |

---

---

|  |  |      |
|--|--|------|
| Rension, D; Morales, L;<br>Cuyckens, GAE; Sevillano, ST;<br>Amaya, DMC                           | Ecología y conservación de los bosques y arbustales de <i>Polylepis</i> : ¿qué sabemos y qué ignoramos?  | 2018 |
| Segovia-Salcedo, MC; Domic, A;<br>Boza, TE; Kessler, M   | Situación taxonómica de las especies del género <i>Polylepis</i> . Implicancias para los estudios ecológicos, la conservación y la restauración de sus bosques | 2018 |
| Toivonen, JM; Gonzales-Inca, CA; Bader, MY; Ruokolainen, K;<br>Kessler, M                        | Elevational shifts in the topographic position of <i>Polylepis</i> forest stands in the Andes of Southern Peru   | 2018 |
| Valencia, BG; Bush, MB; Coe, AL; Orren, E; Gosling, WD   | Polylepis woodland dynamics during the last 20,000 years   | 2018 |
| Camel, V; Quisoe-Melgar, HR;<br>Ames-Martínez, FN; Romo, WCN; Segovia-Salcedo, MC;<br>Kessler, M | Forest structure of three endemic species of the genus <i>Polylepis</i> (Rosaceae) in central Peru   | 2019 |

---

---

|  |   |      |
|--|---|------|
| Pinos, J   | Challenges and conservation implications of <i>Polylepis</i> woodlands in the Andean region: defining actions for sustainable management                      | 2020 |
| Bastidas-Leon, EW; Espinel-Ortiz, DA; Romoleroux, K                      | Population genetic analysis of two <i>Polylepis</i> microphylla (Wedd.) bitter (Rosaceae) forests in Ecuador  | 2021 |
| Caballero-Villalobos, L; Fajardo-Gutierrez, F; Calbi, M; Silva-Arias, GA | Climate change can drive a significant loss of suitable habitat for <i>Polylepis quadrijuga</i> , a treeline species in the Sky Islands of the Northern Andes | 2021 |
| Canales-Gutierrez, A; Gutierrez-Flores, IR                               | Spatial distribution pattern of <i>Polylepis rugulosa</i> Bitter (quenoa) in different hillside slope exposures, Tacna (Peru)                                 | 2021 |
| Cuyckens, GAE; Mazzini, F; Julian, RF; Medina, DE; Guzman, GF            | Effect of livestock on regeneration of quenoa ( <i>Polylepis australis</i> Bitt.) forest in the Southern Andean Yungas of northwestern Argentina              | 2021 |
| Domic, AI; Capriles, JM  | Distribution shifts in habitat suitability and hotspot refugia of Andean tree species from the last glacial maximum to the Anthropocene                       | 2021 |

---



---

|  |  |             |
|--|--|-------------|
| <p>Marcora, PI; Tecco, PA; Ferrero, MC; Ferreras, AE; Zeballos, SR; Funes, G; Gurvich, DE; Arias, G; Caceres, Y; Hensen, I</p> | <p>Are populations of <i>Polylepis australis</i> locally adapted along their elevation gradient?</p>   | <p>2021</p> |
| <p>Ramsay, BPL; Marley, NJ; Bilton, DT; Rundle, SD; Ramsay, PM</p>   | <p>The structure of tardigrade communities at fine spatial scales in an Andean <i>Polylepis</i> forest</p>   | <p>2021</p> |
| <p>Sevillano-Rios, CS; Morales, LV</p>   | <p>Temperature and solar radiation explain differences in the distribution of two locally sympatric high Andean trees (<i>Polylepis</i> spp.) in the Cordillera Blanca, Peru</p> | <p>2021</p> |
| <p>Arizapana-Almonacid, MA; Camel, V; Castaneda-Tinco, M; Pyles, MV; Teodoro, GS; van den Berg, E</p>                          | <p>The effect of human impact and environmental conditions on <i>Polylepis</i> forest and on the world's highest mistletoe infestation</p>                                       | <p>2022</p> |
| <p>Crispin-DelaCruz, DB; Morales, MS; Andreu-Hayles, L; Christie, DA; Guerra, A; Requena-Rojas, EJ</p>                         | <p>High ENSO sensitivity in tree rings from a northern population of <i>Polylepis tarapacana</i> in the Peruvian Andes</p>   | <p>2022</p> |

---

**Material Suplementar S2** Periódicos em que os artigos foram publicados.

| <b>Revista</b>  | <b>Número de trabalhos</b> |
|---|----------------------------|
| Ecología Austral  | 6                          |
| Neotropical Biodiversity                                  | 5                          |
| Acta Oecologica   | 2                          |
| Forests   | 2                          |
| Journal of Biogeography                                   | 2                          |
| Revista Peruana de Biología                               | 2                          |
| Amazon Science  | 1                          |
| American Journal of Botany                                | 1                          |
| Biodiversity and Conservation                             | 1                          |
| Biotropica  | 1                          |
| Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica              | 1                          |
| Bosque  | 1                          |
| Canadian Journal of Botany                                | 1                          |
| Conservation Genetics                                     | 1                          |
| Dendrochronologia   | 1                          |
| Forest Ecology and Management                             | 1                          |
| Frontiers in Ecology and Evolution                        | 1                          |
| Frontiers in Plant Science                                | 1                          |
| Global and Planetary Change                               | 1                          |
| Hacquetia   | 1                          |
| International Journal of Plant Science                    | 1                          |
| Journal of Vegetation Science                             | 1                          |
| Mountain Research and Development                         | 1                          |
| Organisms Diversity and Evolution                         | 1                          |
| Oryx  | 1                          |
| Plant Ecology   | 1                          |
| Plant Systematics and Evolution                           | 1                          |
| Restoration Ecology                                       | 1                          |
| Revista de Biología Tropical                              | 1                          |
| Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente | 1                          |
| Revista Chilena de Historia Natural                       | 1                          |

## ARTIGO 02

(Redigido de acordo com as normas do periódico *Tropical Ecology*)

### FATORES CLIMÁTICOS E TOPOGRÁFICOS MOLDANDO A DISTRIBUIÇÃO POTENCIAL DE ESPÉCIES DE *Polylepis* ENDÊMICAS DOS ANDES PERUANOS

#### RESUMO

Espécies de *Polylepis* formam os ecossistemas florestais de maior altitude do mundo e atualmente são ameaçadas por ações antrópicas e flutuações climáticas. Um aspecto importante para sua conservação é o conhecimento sobre as características das espécies e as condições ambientais por elas requeridas. Assim, nosso objetivo foi construir Modelos de Distribuição de Espécies (SDMs) para as cinco espécies de *Polylepis* endêmicas dos Andes peruanos, a fim de analisar a distribuição espacial das áreas adequadas de cada uma delas e verificar o quanto as áreas protegidas do Peru se sobrepõem a essas áreas. Nós selecionamos 11 variáveis ambientais (climáticas e topográficas) e utilizamos seis algoritmos para prever a distribuição das espécies. Determinamos os preditores mais importantes para os modelos e calculamos a proporção da área de alta adequabilidade ambiental que se encontra sob proteção no país. Os modelos demonstraram alta adequabilidade ambiental (>60%) para as cinco espécies em locais desconectados de Peru, Bolívia, Equador, Colômbia, Venezuela e Argentina. A maior parte dessa área está na porção peruana da Cordilheira do Andes, com um percentual de proteção no país que varia entre 6,4% (*P. flavipila*) a 15,0 % (*P. multijuga*). A variável mais relevante para a predição da distribuição potencial das cinco espécies foi o Plano de Curvatura, seguido por Perfil de Curvatura, Profundidade do Vale e *Hillshade*. Concluímos que o relevo nos Andes peruanos é um fator chave para a distribuição das espécies de *Polylepis*; e que a baixa porcentagem de área sob proteção é insuficiente para suprir a necessidade de conservação dessas espécies.

**Palavras-chave:** Adequabilidade ambiental; Conservação; Espécies endêmicas; Florestas Andinas; Modelos de Distribuição de Espécies; Peru.

## ABSTRACT

*Polylepis* species form the highest altitude forest ecosystems in the world and are currently threatened by human actions and climatic changes. An important aspect for its conservation is the knowledge about the characteristics of the species and the environmental conditions required by them. Thus, our objective was to build Species Distribution Models (SDMs) for the five species of *Polylepis* endemic to the Peruvian Andes, to analyze the spatial distribution of the suitable areas of each of them and verify how much the protected areas of Peru overlap those areas. We selected 11 environmental variables (climatic and topographic) and used six algorithms to predict species distribution. We determined the most important predictors for the models and calculated the proportion of the area of high environmental suitability that is under protection in the country. The models demonstrated high environmental suitability (>60%) for the five species in disconnected locations in Peru, Bolivia, Ecuador, Colombia, Venezuela and Argentina. Most of this area is in the Peruvian portion of the Andes, with a percentage of protection in the country ranging from 6.4% (*P. flavipila*) to 15.0% (*P. multijuga*). The most relevant variable for predicting the potential distribution of the five species was the Plan Curvature, followed by Profile Curvature, Valley Depth and Hillshade. We conclude that the relief in the Peruvian Andes seems to be a key factor for the distribution of the species of *Polylepis*; and that the low percentage of area under protection is insufficient to meet the need for conservation of these species.

**Keywords:** Environmental suitability; Conservation; Endemic species; Andean forests; Species Distribution Models; Peru.

## INTRODUÇÃO

Os Andes formam uma cadeia de montanhas na costa oeste do continente sul-americano, cujas florestas remanescentes encontram-se fragmentadas e comumente circuncidadas por áreas com algum grau de degradação (Sylvester et al. 2017). Nos Andes Tropicais, essas florestas são formadas predominantemente por espécies do gênero *Polylepis* (Rosaceae) (Kessler et al. 2014). Este gênero compreende cerca de 30 espécies, que têm distribuição restrita à região andina e que podem ser encontradas desde a Venezuela até a região central da Argentina (Arnal et al. 2014).

Povoamentos monoespecíficos de *Polylepis* spp. podem ser encontrados em terras alto-andinas acima dos 3.300 m de altitude, porém há registros isolados do gênero em altitude mínima de até 1.500 m (Toivonen et al. 2011). As florestas de *Polylepis* são os ecossistemas florestais de maior amplitude altitudinal e latitudinal no mundo, podendo atingir até 5.200 m e com uma extensão de 5.400 km no sentido Norte-Sul (Braun 1997; Toivonen et al. 2011; Renison et al. 2018). Essas florestas são fundamentais para o controle do microclima e promoção da estabilidade no balanço hídrico do ecossistema na região dos Andes (Garavito et al. 2015; Cahill et al. 2021). Em regiões mais secas, como nos litorais peruano e chileno, a interceptação de neblina por essas florestas contribui com até 75% da precipitação local (Bruijnzeel et al. 2011). Além disso, essas florestas são extremamente importantes para a biodiversidade local e regional, pois funcionam como abrigo para muitas espécies endêmicas especialistas em hábitat (Gareca et al. 2010).

Atualmente, as florestas de *Polylepis* estão espacialmente constituídas por fragmentos florestais, inseridos em uma matriz de pastagem, ocorrendo em encostas íngremes, ravinas rochosas e vales (Segovia-Salcedo et al. 2018). A distribuição irregular de *Polylepis* é atribuída a mecanismos naturais como o fogo e preferências microclimáticas que causaram disjunções populacionais, e que foram sobremaneira agravadas pela atividade humana (Kessler 2002; Gosling et al. 2009). As causas dessa fragmentação também estão associadas aos fatores topográficos e ao histórico climático da região, como por exemplo, períodos de glaciação (Valencia et al. 2016; Zutta e Rundel 2017; Valencia et al. 2018). Dada essa importância e o grau de ameaça, as florestas de *Polylepis* se tornaram prioridade de conservação nos Andes Tropicais (Fjeldsa e Kessler 1996; Valencia et al. 2018).

As florestas andinas do Peru cobrem apenas uma área de 2.201 km<sup>2</sup> (cerca de 0,17% do território nacional), sendo que quase a metade disso (1.015 km<sup>2</sup>, o equivalente a 46%) é composta por florestas de *Polylepis* (Minam 2015). As espécies do gênero são importantes

provedoras de serviços ecossistêmicos, principalmente relacionados ao estoque de carbono e à provisão de água na região. O Peru faz parte da área considerada como centro de diversidade de *Polylepis* e abriga a maior riqueza de espécies do gênero (19 espécies), sendo cinco delas endêmicas: *Polylepis canoi*, *Polylepis flavipila*, *Polylepis multijuga*, *Polylepis racemosa* e *Polylepis subsericans* (Navarro et al. 2005; Lloyd et al 2011; Mendoza e Cano 2011). A porção peruana da Cordilheira dos Andes também é onde as florestas de *Polylepis* são mais ameaçadas, fragmentadas e pouco estudadas (Canales-Gutiérrez e Guitierrez-Flores 2021).

Neste contexto, clima e relevo parecem contribuir diretamente para a atual distribuição das florestas de *Polylepis*, além da influência antrópica. Portanto, um aspecto importante para sua conservação é a análise das características das espécies e das condições requeridas por elas (Anderson et al. 2003; Sevillano-Ríos e Morales 2021). Uma das técnicas que têm sido utilizadas para representar tais condições, contribuindo no processo de projeção da ocorrência potencial de espécies são os Modelos de Distribuição de Espécies – SDMs (Zurell et al. 2020). Os modelos gerados resultam em mapas de adequabilidade ambiental projetados no espaço geográfico, que possibilitam a previsão dos riscos de extinção de espécies, bem como direcionam a definição de estratégias de conservação e restauração de áreas (Yu et al. 2019).

Diante disso, nós selecionamos as cinco espécies de *Polylepis* endêmicas do Peru e aplicamos a modelagem de distribuição destas espécies para toda a Cordilheira dos Andes, a fim de prever e analisar a distribuição espacial das áreas adequadas de cada uma delas. Especificamente, buscamos (i) fazer a predição de possíveis novos locais de ocorrência e gerar mapas de adequabilidade para as espécies em toda região andina; (ii) identificar os principais preditores climáticos e topográficos que moldam a atual distribuição das espécies; e (iii) determinar em que medida as áreas protegidas abrangem áreas de adequabilidade ambiental das espécies.

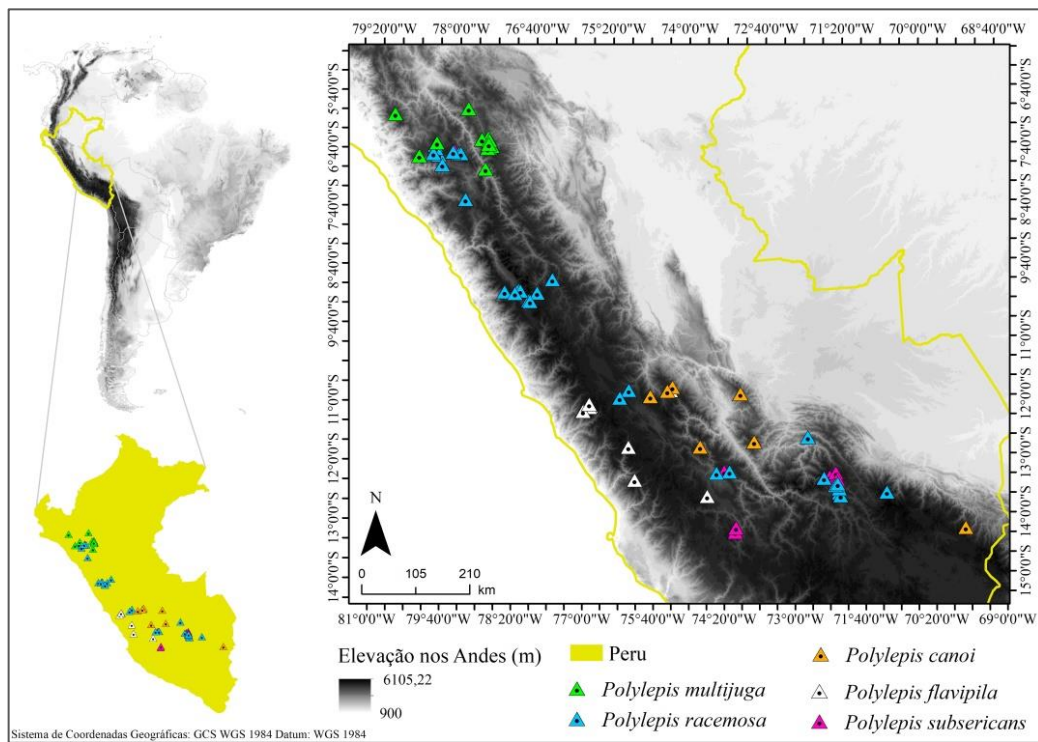
## **MATERIAL E MÉTODOS**

### **Espécies e área de estudo**

Nós modelamos a distribuição potencial das cinco espécies de *Polylepis* endêmicas dos Andes peruanos: *P. canoi*, *P. flavipila*, *P. multijuga*, *P. racemosa* e *P. subsericans* (Mendoza e Cano 2011). Os registros de ocorrência foram obtidos dos bancos de dados digitais (i) *Global Biodiversity Information Facility* (GBIF, <http://www.gbif.org>); e (ii)

*speciesLink* (<https://specieslink.net>). Visando aumentar a confiabilidade dos dados, realizamos a filtragem e remoção dos registros que não apresentavam (i) informação completa de latitude e longitude; (ii) nome do autor da coleta; e (iii) ano de coleta.

Depois disso, removemos os registros duplicados para a mesma espécie e mantivemos, para cada espécie, apenas os registros de ocorrência espacialmente únicos (considerando células de 5 x 5 km), ou seja, para cada espécie, somente um registro de ocorrência a cada célula de 25 km<sup>2</sup>. Realizamos esse procedimento visando diminuir os vieses de amostragem, normalmente encontrados quando os registros de ocorrência são obtidos de forma secundária (Hijmans 2012; Fourcade et al. 2014; Oliveira et al. 2016). Por fim, obtivemos 69 registros espacialmente únicos: *P. canoi* (7), *P. flavipila* (8), *P. multijuga* (12), *P. racemosa* (31) e *P. subsericans* (11) (Figura 1).



**Fig. 1** Cordilheira dos Andes e pontos de ocorrência das cinco espécies de *Polylepis* endêmicas dos Andes peruanos.

Apesar de serem espécies endêmicas dos Andes peruanos, nós geramos os modelos para toda a região andina, pois sabemos que espécies do gênero *Polylepis* se distribuem amplamente por toda a cordilheira. Entendemos também que a escolha do tamanho da área deve ser compatível com os objetivos do estudo, e aqui buscamos identificar todos os possíveis novos locais de adequabilidade para essas espécies.

## Variáveis ambientais

Para produzir os SDMs, utilizamos inicialmente 36 variáveis, sendo 19 variáveis bioclimáticas e outras 9 variáveis climáticas, obtidas do WorldClim versão 2.1 (<https://www.worldclim.org>), com resolução espacial de ~5 km. Além dessas, também utilizamos 8 variáveis topográficas, criadas a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE) da *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM), com resolução espacial de 90 m. Todas as camadas de variáveis foram cortadas para a região andina usando uma máscara shapefile (altitude acima de 900 m). As variáveis topográficas foram reamostradas para a resolução espacial das bioclimáticas (~5 km).

Com o objetivo de selecionar variáveis de maior significância e utilizar dados mais parcimoniosos na elaboração do modelo, verificamos a colinearidade das variáveis por meio de uma Análise de Componentes Principais (PCA). Entretanto, os preditores menos redundantes sugeridos pela PCA, nem sempre são os melhores do ponto de vista ecológico (Eisenlohr 2014). Assim, analisamos cada grupo de preditores colineares e fizemos a seleção com base, não apenas na análise estatística, mas também no conhecimento teórico a respeito das condições ecológicas das espécies (variável resposta). Além disso, calculamos o Fator de Inflação da Variância (VIF) para cada variável selecionada e consideramos para a modelagem apenas os preditores com  $VIF < 2,5$  (Midi et al. 2013; Kalnins 2018). Por fim, utilizamos 11 preditores ambientais para gerar os modelos: 4 variáveis bioclimáticas (Bio4 – sazonalidade da temperatura, Bio8 – temperatura média do quarto mais úmido, Bio15 – sazonalidade da precipitação e Bio19 – precipitação do quarto mais frio); 1 variável climática (Radmax – Radiação Solar Máxima); e 6 variáveis topográficas (Plc – Plano de Curvatura, Pfc – Perfil de Curvatura, Swi – Índice Topográfico de Umidade SAGA, Hil – *Hillshade*, Asp – Aspecto e Vd – Profundidade do Vale) (Tabela 1).



**Tabela 1** Lista das 11 variáveis ambientais selecionadas para gerar os SDMs, sua fonte de obtenção e importância ambiental.

| Variáveis                              | Abreviação | Fonte de Obtenção | Importância Ambiental  |
|--|------------|-------------------|--|
| Sazonalidade da Temperatura            | Bio4       | WorldClim         | Diferença de temperatura ao longo do ano.  |
| Temperatura Média do Quarto mais Úmido | Bio8       | WorldClim         | Temperatura dos três meses de maior precipitação no ano.   |
| Sazonalidade da Precipitação           | Bio15      | WorldClim         | Diferença de precipitação entre os seis meses mais chuvosos e os seis mais secos do ano.                 |
| Precipitação do Quarto mais Frio       | Bio19      | WorldClim         | Disponibilidade de água durante os três meses mais frios do ano.   |
| Radiação Solar Máxima                  | Radmax     | WorldClim         | Disponibilidade de energia para fotossíntese e fator determinante de estresse hídrico em períodos secos. |
| Plano de Curvatura                     | Plc        | MDE - SRTM        | Retenção hídrica do terreno e potencial de erosão do solo.   |
| Perfil de Curvatura                    | Pfc        | MDE - SRTM        | Umidade do solo, velocidade do fluxo hídrico superficial e potencial de erosão do solo.                  |
| Profundidade do Vale                   | Vd         | MDE - SRTM        | Heterogeneidade geomorfológica do terreno, exposição ao vento e quantidade de radiação solar recebida.   |
| <i>Hillshade</i>                       | Hil        | MDE - SRTM        | Formas do relevo e luminosidade do terreno.  |
| Aspecto                                | Asp        | MDE - SRTM        | Diferença de radiação solar recebida pelo terreno (verão/inverno e manhã/tarde).                         |
| Índice Topográfico de Umidade          | Swi        | MDE - SRTM        | Umidade do solo, potencial de alagamento e acúmulo de ar frio.   |

## Modelagem

Vários algoritmos matemáticos são capazes de prever a distribuição de espécies, e combiná-los aumenta a confiabilidade dos modelos (Araújo e New 2007; Araújo et al. 2019). Aqui, nós utilizamos seis algoritmos com diferentes métodos de modelagem: *Bioclim*, *Generalized Linear Models (GLM)*, *Multiple Adaptive Regression Splines (MARS)*, *Artificial Neural Networks (ANN)*, *Support Vector Machines (SVM)* e *Random Forest (RF)*. Os modelos foram gerados em ambiente R versão 4.2.1 (R Core Team 2022), utilizando os

pacotes *dismo* (Hijmans et al. 2021), *stats* (R Core Team 2022), *earth* (Milborrow 2021), *nnet* (Ripley e Venables 2022), *kermlab* (Karatzoglou et al. 2022) e *randomForest* (Liaw e Wiener 2022).

Alguns algoritmos de modelagem requerem dados com registros de presença e ausência das espécies. No entanto, dados de ausência verdadeira são raros para a maioria das espécies, e nesses casos usamos pseudo-ausências (PAs). As PAs são pontos aleatórios selecionados na área de estudo, que servem para representar as ausências na calibração e avaliação dos modelos (Berbet-Massin et al. 2012).

Durante a modelagem, para cada espécie, dividimos aleatoriamente o conjunto de dados em 70% para treinar os modelos e 30% para testar os modelos (Xu e Goodacre 2018). Como esses subconjuntos são partes dos mesmos dados de ocorrência, nós randomizamos 10 vezes, com o objetivo de fornecer avaliações menos enviesadas. O modelo final de cada algoritmo foi avaliado a partir do valor da *True-Skill Statistics* (TSS). Os valores de TSS variam de -1 a 1, onde valores negativos ou próximos a zero indicam previsões similares a modelos gerados aleatoriamente, enquanto modelos satisfatoriamente ajustados apresentam TSS próximas a 1 (Allouche et al. 2006). Consideramos modelos de sucesso aqueles que apresentaram valores de TSS  $>0,5$ . A importância da contribuição de cada variável para os modelos foi determinada pelo valor da Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio (RMSE).

Depois de produzir os modelos, selecionar os mais satisfatórios e obter os mapas de projeções contínuas de cada algoritmo, aplicamos o método de *ensemble* (Araújo e New 2007). Nessa etapa, juntamos as projeções dos melhores algoritmos, resultando em um mapa contínuo por espécie. Após a obtenção dos mapas contínuos, classificamos a distribuição potencial das espécies de acordo com a probabilidade de ocorrência (0-20%, 20-40%, 40-60% e  $>60\%$ ). Essa classificação nos permite analisar com mais clareza as áreas com maior ( $>60\%$ ) ou menor (0-20%) adequabilidade de cada espécie.

Por fim, nós calculamos a porção da área de alta adequabilidade ambiental ( $>60\%$ ) de cada espécie inserida em Áreas Protegidas (APs) no território peruano. A máscara shapefile das APs foram obtidas por meio do *Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado* – Peru (<https://geo.sernanp.gob.pe/visorsernanp>). Nós consideramos todas as categorias de Áreas Naturais Protegidas (ANPs) nacionais (68), regionais (32) e privadas (145).

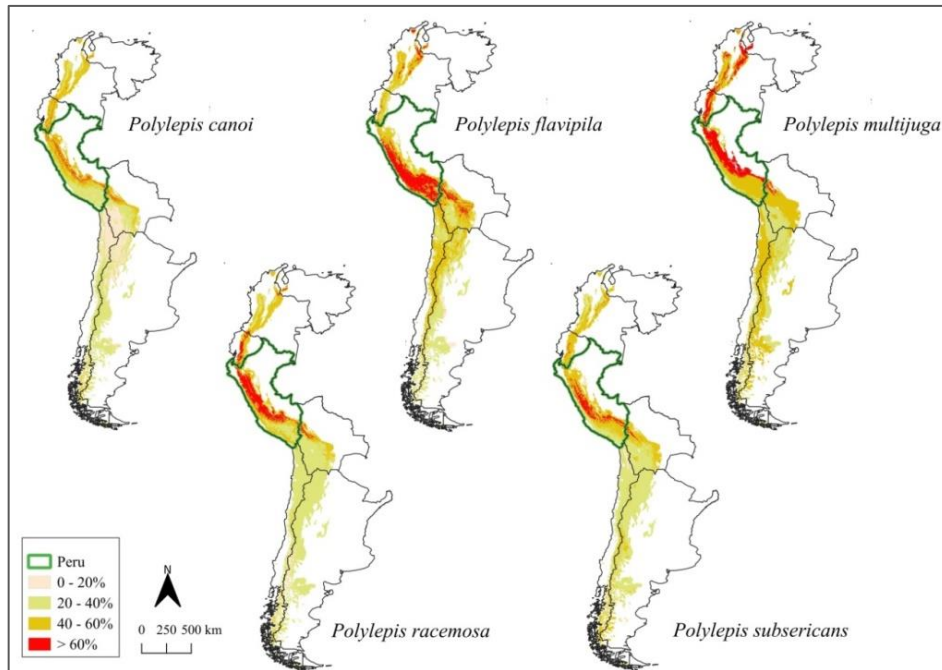
## RESULTADOS

Os algoritmos RF e SVM forneceram um bom ajuste para todas as espécies. O algoritmo MARS foi considerado satisfatório para todas as espécies, exceto *P. subsericans*. Para *P. racemosa*, todos os algoritmos forneceram previsões confiáveis, uma vez que os valores de TSS foram todos superiores a 0,5. Por fim, além de *P. racemosa*, o GLM forneceu boa previsão apenas para *P. multijuga* e *P. subsericans* (Tabela 2).

**Tabela 2** *True Skill Statistics* (TSS) para os seis algoritmos usados na modelagem da distribuição potencial das cinco espécies de *Polylepis* endêmicas do Peru. Em destaque, estão os modelos significativos (TSS >0,5).

| Espécie               | Algoritmo   |             |             |             |             |             |
|-----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                       | Bioclim     | GLM         | MARS        | ANN         | SVM         | RF          |
| <i>P. canoi</i>       | 0,0         | 0,33        | <b>0,98</b> | 0,28        | <b>0,95</b> | <b>0,94</b> |
| <i>P. flavipila</i>   | 0,0         | 0,49        | <b>0,98</b> | 0,0         | <b>0,92</b> | <b>0,91</b> |
| <i>P. multijuga</i>   | 0,0         | <b>0,75</b> | <b>0,96</b> | 0,0         | <b>0,95</b> | <b>0,92</b> |
| <i>P. racemosa</i>    | <b>0,69</b> | <b>0,94</b> | <b>0,89</b> | <b>0,70</b> | <b>0,91</b> | <b>0,97</b> |
| <i>P. subsericans</i> | 0,0         | <b>0,69</b> | 0,38        | 0,38        | <b>0,95</b> | <b>0,72</b> |

Os modelos demonstraram alta adequabilidade ambiental (>60%) para as cinco espécies em locais desconectados de regiões do Peru, Bolívia, Equador e Colômbia. Com exceção de *P. subsericans* as espécies também têm áreas de alta probabilidade de ocorrência na porção dos Andes pertencente à Venezuela e, especificamente *P. flavipila*, em alguns pontos dos Andes da Argentina (Figura 2).



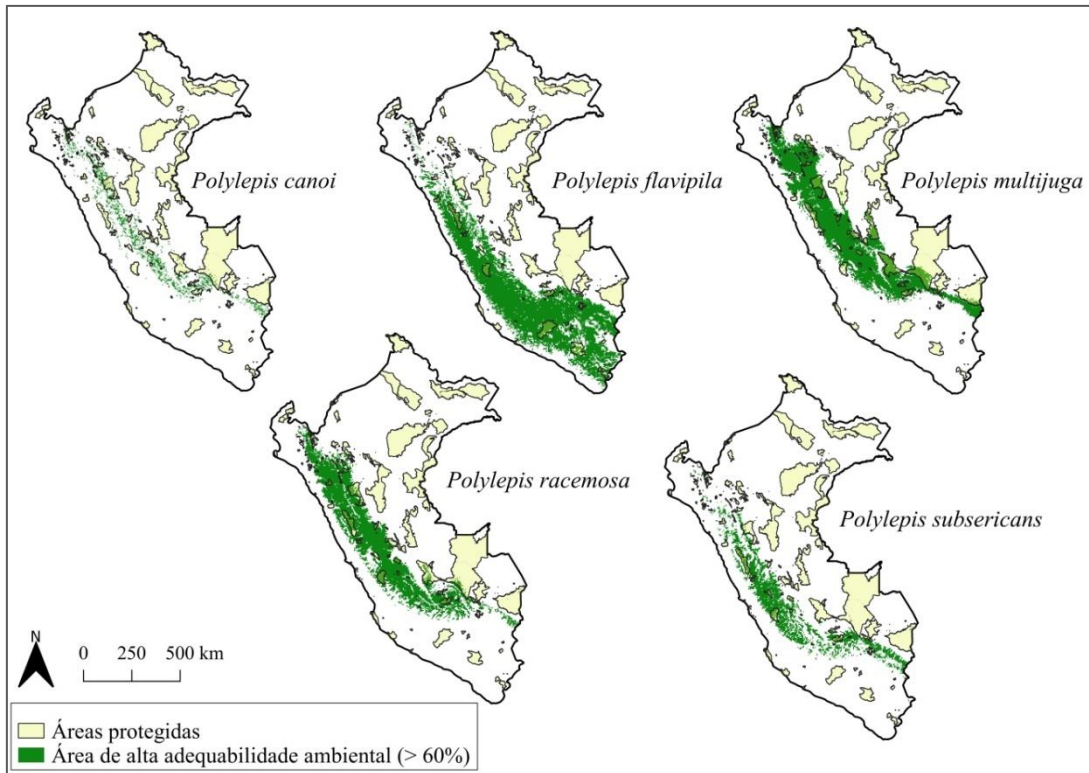
**Fig. 2** Distribuição potencial das cinco espécies de *Polylepis* endêmicas dos Andes peruanos.

A área total de alta adequabilidade (AAT) é de: 57.629 km<sup>2</sup> para *P. canoi*; 113.901 km<sup>2</sup> para *P. subsericans*; 225.472 km<sup>2</sup> para *P. racemosa*; 359.851 km<sup>2</sup> para *P. flavipila*; e 360.845 km<sup>2</sup> para *P. multijuga* (Tabela 3).

**Tabela 3** Classes de adequabilidade ambiental para as cinco espécies de *Polylepis* endêmicas dos Andes peruanos.

| Espécie               | Área de adequabilidade ambiental (km <sup>2</sup> ) |                                       |                                       |   |
|-----------------------|---|---------------------------------------|---------------------------------------|---|
|                       | Não adequada<br>(0 – 20%)                           | Baixa<br>adequabilidade<br>(21 – 40%) | Média<br>adequabilidade<br>(41 – 60%) | Alta<br>adequabilidade –<br>AAT<br>(>60%) |
| <i>P. canoi</i>       | 439.942   | 1.030.111                             | 704.548                               | 57.629                                    |
| <i>P. subsericans</i> | 21.629  | 1.208.600                             | 888.099                               | 113.901                                   |
| <i>P. racemosa</i>    | 44.204  | 1.305.477                             | 657.076                               | 225.472                                   |
| <i>P. flavipila</i>   | 49.150  | 697.310                               | 1.125.918                             | 359.851                                   |
| <i>P. multijuga</i>   | ---   | 579.640                               | 1.291.745                             | 360.845                                   |

Como esperávamos, a maior parte dessa área (adequabilidade >60%) está na porção peruana da cordilheira do Andes (AAPer), com um percentual de proteção que varia entre 6,4% (*P. flavipila*) a 15,0% (*P. multijuga*), como mostramos na Figura 3 e na Tabela 4.

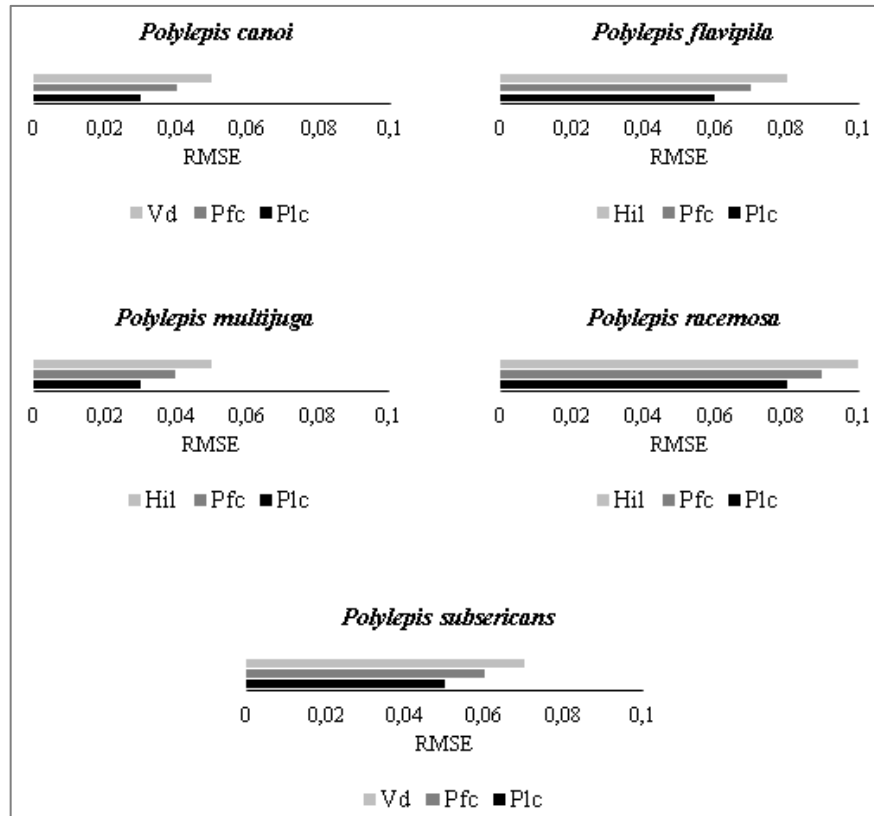


**Fig. 3** Área de alta adequabilidade ambiental das cinco espécies de *Polylepis* e Áreas Protegidas (APs) do Peru.

**Tabela 4** Porcentagem de área de alta adequabilidade das cinco espécies de *Polylepis* endêmicas do Peru inserida em Áreas Protegidas (APs) no país.

| Espécie               | Área de alta adequabilidade (km <sup>2</sup> ) |                    |                    | Razão<br>(AAProt/AAPer) | %    |
|-----------------------|--|--------------------|--------------------|-------------------------|------|
|                       | Total<br>(AAT)                                 | No Peru<br>(AAPer) | Em APs<br>(AAProt) |                         |      |
| <i>P. flavipila</i>   | 359.851  | 271.176            | 17.566             | 0,064                   | 6,4  |
| <i>P. subsericans</i> | 113.901  | 97.482             | 9.300              | 0,095                   | 9,54 |
| <i>P. racemosa</i>    | 225.472  | 176.712            | 20.328             | 0,115                   | 11,5 |
| <i>P. canoi</i>       | 57.629   | 40.615             | 5.553              | 0,136                   | 13,6 |
| <i>P. multijuga</i>   | 360.845  | 251.259            | 37.680             | 0,150                   | 15,0 |

Os valores de RMSE indicaram que os três preditores mais relevantes para a predição da distribuição potencial das cinco espécies são topográficos. Para todas as espécies, a variável Plc (Plano de Curvatura) apresentou os menores valores de RMSE para todas as espécies. Além dessa, as variáveis Pfc (Perfil de Curvatura), Vd (Profundidade do Vale) e Hil (*Hillshade*) também aparecem como importantes preditores (Figura 4). Vale lembrar, que quanto menor o valor de RMSE, melhor o ajuste do modelo com aquela variável.



**Fig. 4** Valores de RMSE para as três variáveis mais importantes na predição das cinco espécies de *Polylepis* endêmicas dos Andes peruanos. Em que: Hil: *Hilshade*; Pfc: Perfil de Curvatura; Plc: Plano de Curvatura; e Vd: Profundidade do Vale.

## DISCUSSÃO

Nossos resultados ampliam o conhecimento sobre as condições ambientais nas quais ocorrem cinco espécies de *Polylepis* com distribuição atual restrita ao Peru. Mostramos que as cinco espécies tem alta probabilidade (>60%) de ocorrer em regiões não contíguas da Cordilheira dos Andes, inclusive para além do território peruano. A reduzida área atual de ocorrência das espécies pode ser resultado da intensa pressão antrópica histórica na região ou pela sua limitada capacidade de dispersão em locais desconectados (Zutta et al. 2012; Kessler et al. 2014). O gênero *Polylepis* é conhecido por ter limitação na dispersão de sementes, que dificulta a ocupação de novas áreas. Essa dispersão de curta distância pelo vento, aliada às limitações (pós-dispersão) para o estabelecimento de plântulas em áreas normalmente antropizadas, bloqueiam a expansão da floresta (Morales et al. 2018).

Sabe-se que, naturalmente, há uma descontinuidade florestal atribuída às populações de *Polylepis* (Valencia et al. 2018). Durante o Pleistoceno, a vegetação dos Andes foi exposta a períodos glaciais/interglaciais, que causaram ciclos de contração e expansão das florestas.

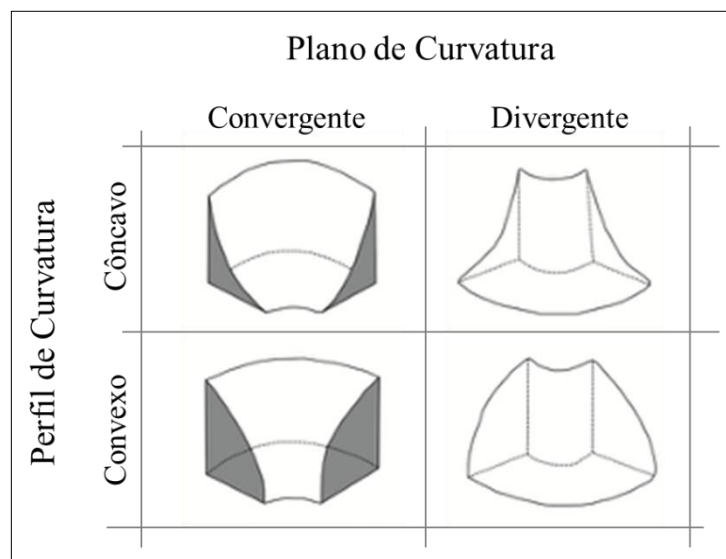
Esses ciclos resultaram em fragmentação e isolamento de populações, bem como no aumento da taxa de especiação e dos níveis regionais de endemismo (Gosling et al. 2009; Londoño et al. 2014). No entanto, o processo de ocupação humana e o aumento das atividades antrópicas, intensificaram a perda de cobertura florestal e geraram a hiperfragmentação desses habitats (Renison et al. 2006; Valencia et al. 2018). Além disso, barreiras topográficas, oriundas de uma série de processos orogênicos (inerentes ao soerguimento dos Andes), causaram inúmeros eventos de separação de áreas de distribuição de populações (Kattan et al. 2004). A distribuição desigual de *Polylepis* spp. não pode ser explicada por apenas um ou outro fator, mas pela combinação complexa que existe entre eles.

Atualmente os chamados relictos de florestas de *Polylepis* no Peru ocupam apenas cerca de 1.050 km<sup>2</sup>, o equivalente a 0,08% do território nacional (Minam 2015). Isso representa apenas 2,58% da área de alta adequabilidade (>60%) de *P. canoi* no país (espécie com menor adequabilidade), e apenas 0,38% da área de alta adequabilidade de *P. flavipila* (espécie com maior adequabilidade). De fato, estima-se que até os últimos anos, cerca de 98% das florestas de *Polylepis* desapareceram de regiões do Peru (Fjeldsa e Kessler 1996; Auca e Ramsey 2019). Para *P. flavipila*, por exemplo, nossos modelos predizem uma área com alta probabilidade de ocorrência de cerca de 271 mil km<sup>2</sup>, enquanto atualmente a espécie ocupa menos de 220 km<sup>2</sup>. A estimativa é de que, em apenas 45 anos, as populações de *P. flavipila* sofreram uma redução de 52,8% de área (Ames-Martínez et al. 2021).

Também é preciso destacar a diferença entre a altitude média de ocorrência potencial e real das espécies. Nosso estudo constatou que para *P. subsericans*, por exemplo, a altitude média de distribuição potencial é de 4.025 m, enquanto atualmente a espécie se distribui em altitude média de 4.600 m (Kessler et al. 2014; Toivonen et al. 2018). Para *P. racemosa* a diferença é ainda maior, pois vimos que a espécie se distribui potencialmente em altitude média de 3.244 m, enquanto originalmente essa média é de 3.973 m (Zutta e Rundel 2017). Essa diferença significa diminuição da área geográfica de distribuição das espécies, (que é maior em altitudes mais baixas), e conseqüentemente, maior suscetibilidade ao declínio populacional. No caso das florestas de *Polylepis*, que já ocorrem em altitudes muito elevadas, essa diminuição pode ser drástica, mesmo com pequenas alterações na faixa altitudinal de distribuição (Zutta e Rundel 2017).

A relação entre espécie e ambiente é um importante aspecto para o estudo das necessidades ecológicas e distribuição de espécies (Yi et al. 2018). Nossos resultados demonstram que a probabilidade de ocorrência das cinco espécies de *Polylepis* estudadas variam em função de fatores ambientais chaves, especialmente preditores topográficos. A

variável de maior importância para os modelos (Plc) descreve a curvatura horizontal do terreno, portanto, se refere ao caráter convergente/divergente do terreno. De forma complementar, a variável Pfc (a segunda de maior importância para as cinco espécies) descreve a curvatura vertical do terreno, indicando seu caráter côncavo/convexo (Florenzano 2008) (Figura 5). No nosso estudo, as cinco espécies se distribuem majoritariamente em terrenos com valores positivos de Plc (vertentes divergentes) e negativos de Pfc (vertentes convexas) (Florenzano 2008; Guadagnin et al. 2015).



**Fig. 5** Tipos de curvatura para determinar as formas de relevo. Adaptado de Scoti et al. (2016).

As formas de plano e perfil de curvatura influenciam na concentração de água na paisagem e na velocidade do fluxo superficial da água no terreno, respectivamente. Em vertentes divergentes-convexas, como as que predominantemente se encontram nas zonas de alta adequabilidade das espécies, a infiltração de água tende a ser menor e a velocidade do fluxo em direção à base é maior (Sirtoli et al. 2008). Por isso a importância das florestas de *Polylepis*, bem como das epífitas e musgos marcadamente presentes nessas florestas, captando a umidade da neblina e das chuvas, e liberando lentamente no ecossistema (Kessler et al. 2014). Esse processo, além de desempenhar notável papel ecológico, garante a disponibilidade de água para muitas pessoas que vivem nos Andes peruanos.

Considerando a relevância, as ameaças de origem antrópica e a vulnerabilidade ambiental das populações de *Polylepis* no Peru, no final do século XIX começaram a ser tomadas as primeiras ações de proteção a essas florestas (Herrera e Ali 2009). Dessa forma, as Áreas Protegidas (APs) se constituem como a principal medida de conservação dos



ecossistemas Andinos (Cuyckens et al. 2016). No entanto, nós observamos que a maior parte da área dos Andes peruanos que contém zonas com alta adequabilidade ambiental para as cinco espécies de *Polylepis* se encontram sem proteção no país. Em média, apenas 11,5% da área onde as espécies apresentam alta probabilidade de ocorrência estão dentro de alguma AP, sendo que *P. flavipila* tem a menor porcentagem (6,4%) e *P. multijuga*, a maior (15%).

A espécie *Polylepis flavipila* se distribui originalmente nos Andes Centrais do Peru em altitudes que variam de 3600 a 4700 m e se caracteriza por se desenvolver em locais áridos e frios (Ames-Martínez et al. 2019; Zutta et al. 2012). Atualmente, é classificada como Vulnerável no Livro Vermelho de Espécies Endêmicas do Peru (León et al. 2006). Parcialmente protegidas pela Reserva Paisagística de Nor-Yauyos Cochas (AP nacional), populações de *P. flavipila* sofrem modificações de distribuição espacial e estrutura diamétrica induzidas por ações antrópicas (Camel et al. 2019). A espécie foi a que apresentou a maior área de alta adequabilidade no Peru (271.176 km<sup>2</sup>, cerca de 21% do território do país), mas hoje ocupa apenas 0,002% do território peruano e sua reduzida distribuição está diretamente relacionada à elevada ocupação humana (Ames-Martínez et al. 2021).

A espécie *P. multijuga*, que apresentou a maior área de alta adequabilidade protegida no Peru, é o membro mais basal do gênero *Polylepis*. Originalmente, se distribui no Norte do Peru e suas populações podem ser encontradas em forma de pequenos povoamentos ou árvores isoladas nos departamentos de Cajamarca, Amazonas, Lambayeque, e San Martín (León et al. 2006). Dado o tempo que os humanos habitam e utilizam essa área, estima-se que as populações da espécie estejam sofrendo processo de fragmentação por mais de mil anos (Quinteros-Casaverde et al. 2012). Apesar de ser considerada como Vulnerável no Livro Vermelho de Plantas Endêmicas do Peru (León et al. 2006) e na Lista Vermelha de Espécies Ameaçadas da IUCN (IUCN 2022), não há registros atuais de ocorrência de *P. multijuga* nas APs do departamento de Cajamarca, que possui apenas 7,6% do seu território protegido (Minam 2021). O departamento de Cajamarca faz parte do atual centro de distribuição da espécie e detém a maior porcentagem de área de alta adequabilidade para *P. multijuga*.

Além de *P. multijuga*, Cajamarca também é o departamento com maior área de alta adequabilidade, em termos relativos, para *P. racemosa*; e também não registra a ocorrência da espécie em APs. Populações de *P. racemosa* são registradas desde o Norte do Peru, passando pelos Andes Centrais, até o Sul do país, porém apenas no Parque Nacional Huascarán (departamento de Ancash, região dos Andes Centrais) a espécie se encontra efetivamente protegida. Apesar de ser muito utilizada em programas de restauração, *P. racemosa* também consta como Vulnerável na Lista Vermelha de Espécies Ameaçadas da IUCN (IUCN 2022).

Esse é um dado preocupante, pois a espécie cumpre papel ecológico regional relevante no aporte hídrico de qualidade, promovendo estabilidade no balanço hídrico do ecossistema (Kessler et al. 2014; Garavito et al. 2015).

Dado que não incluímos o fator humano como preditor nos modelos e considerando o histórico de antropização da região, muitas áreas ambientalmente adequadas para espécies e que estão fora das APs, atualmente são pastagens, áreas de agricultura ou até mesmo cidades. Além disso, a quantidade de área sob proteção existente na região dos Andes peruanos (apenas 9,36%) é insuficiente para suprir a necessidade de conservação de espécies de distribuição restrita e/ou em risco de extinção, como é o caso *Polylepis* spp. Devido sua conexão com a dinâmica da água e fornecimento de outros serviços ecossistêmicos, bem como a provisão de habitat de qualidade para outros grupos, as florestas de *Polylepis* merecem particular atenção. A informação que trazemos nesse estudo, sobre a predição de locais para potencial distribuição espacial das espécies, deve ser usada como ferramenta para melhor manejo e conservação dessas florestas nos Andes peruanos.

## CONCLUSÕES

O padrão de distribuição potencial que emerge da combinação de fatores climáticos e topográficos revela que as cinco espécies de *Polylepis* estudadas têm alta probabilidade de ocorrerem em grande parte dos Andes no Peru e fora do Peru, mas atualmente ocupam apenas uma pequena porcentagem do território do referido país. Os preditores topográficos desempenham papel fundamental na distribuição das espécies de *Polylepis* endêmicas do Peru, de maneira que Plano de Curvatura e Perfil de Curvatura foram as variáveis mais importantes para os modelos.

A área e distribuição de APs, que são a principal medida de conservação dos ecossistemas Andinos, são insuficientes para suprir a necessidade de conservação das espécies de *Polylepis* no Peru. Nós entendemos que a conservação das florestas de *Polylepis* é um desafio, por conta da sua vulnerabilidade e exposição à pressão antrópica e condições ambientais. Porém, esperamos que as informações que trazemos aqui possa orientar a tomada de ações efetivas de proteção a essas florestas. A consolidação de APs já existentes e a criação de novas APs, aliado ao reflorestamento de áreas ambientalmente adequadas, parece uma excelente estratégia.

## REFERÊNCIAS

- Allouche O, Tsoar A, Kadmon R (2006) Assessing the accuracy of species distribution models: prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS). *J Appl Ecol* 43:1223—1232. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2006.01214.x>
- Ames-Martínez FN, Quispe-Melgar HR, Renison D (2021) Conservation status assessment of the highest forests in the world: *Polylepis flavipila* forests as a case study. *Neotrop Biodivers* 7:160—169. <https://doi.org/10.1080/23766808.2021.1920295>
- Anderson RP, Lew D, Peterson AT (2003) Evaluating predictive models of species' distributions: criteria for selecting optimal models. *Ecol Modell* 162:211—232. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(02\)00349-6](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(02)00349-6)
- Araújo MB, Anderson RP, Barbosa AM et al (2019) Standards for distribution models in biodiversity assessments. *Sci Adv* 5:eaat4858. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aat48>
- Araújo MB, New M (2007) Ensemble forecasting of species distributions. *Trends Ecol Evol* 22:42—47. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2006.09.010>
- Arnal H (2014) Mapa pan Andino de bosques de *Polylepis* prioritarios para conservación. The Plains, USA.
- Aucca C, Ramsey PM (2019) Management of biodiversity and land use in Southern Peru. *Mt Res Dev* 25:287—289. [https://doi.org/10.1659/0276-4741\(2005\)025\[0287:MOBALU\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1659/0276-4741(2005)025[0287:MOBALU]2.0.CO;2)
- Berbet-Massin M, Jiguet F, Albert CH, Thuiller W (2012) Selecting pseudo absences for species distribution models: how, where and how many? *Methods Ecol Evol* 3:327—338. <https://doi.org/10.1111/j.2041-210X.2011.00172.x>
- Braun G (1997) The use of digital methods in assessing forest patterns in an Andean environment: the *Polylepis* example. *Mt Res Dev* 17:253—262. <https://doi.org/10.2307/3673852>
- Bruijnzeel LA, Mulligan M, Scatena FN (2011) Hydrometeorology of tropical montane cloud forests: emerging patterns. *Hydrol Process* 25:645—498. <https://doi.org/10.1002/hyp.7974>
- Cahill JRA, Merckx T, Dyck HV et al (2021) Lower density of arthropod biomass in small high-Andes *Polylepis* fragments affects habitat use in insectivorous birds. *Ecosphere* 12:e03401. <https://doi.org/10.1002/ecs2.3401>
- Camel V, Quispe-Melgar HR, Ames-Martínez FN et al (2019) Forest structure of three endemic species of the genus *Polylepis* (Rosaceae) in central Perú. *Ecol Austral* 29:285—295. <https://doi.org/10.25260/EA.19.29.3.0.812>

- Canales-Gutiérrez A, Gutierrez-Flores IR (2021) Patrón de distribución espacial de *Polylepis rugulosa* Bitter (queñoa) en diferentes exposiciones de ladera, Tacna (Perú). *Cienc Amaz (Iquitos)* 9:73—82. <https://doi.org/10.22386/ca.v9i1.321>
- Cuyckens GAE, Christie DA, Domic AI et al (2016) Climate change and the distribution and conservation of the world's highest elevation woodlands in the South American Altiplano. *Glob Planet Change* 137:79—87. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.12.010>
- Eisenlohr PV (2014) Persisting challenges in multiple models: a note on commonly unnoticed issues regarding collinearity and spatial structure of ecological data. *Braz J Bot* 37:365—371. <https://doi.org/10.1007/s40415-014-0064-3>
- Fjeldsa ME, Kessler M (1996) Conserving the biological diversity of *Polylepis* woodlands of the highland of Peru and Bolivia: a contribution to sustainable natural resource management in the Andes. NORDECO, Copenhagen.
- Florenzano TG (2008) Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais. Oficina de Textos, São Paulo.
- Fourcade Y, Engler JO, Rödder D et al (2014) Mapping species distributions with MAXENT using a geographically biased sample of presence data: a performance assessment of methods for correcting sampling bias. *PLoS One* 9:e97122. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0097122>
- Garavito NT, Newton AC, Oldfield S (2015) Regional Red List assessment of tree species in upper montane forests of the Tropical Andes. *Oryx* 49:397—409. <https://doi.org/10.1017/S0030605315000198>
- Gareca EE, Hermy M, Fjeldsa J et al (2010) *Polylepis* woodland remnants as biodiversity islands in the Bolivian high Andes. *Biodivers Conserv* 19:3327—3346. <https://doi.org/10.1007/s10531-010-9895-9>
- Gosling WD, Hanselman JA, Knox C et al (2009) Long-term drivers of change in *Polylepis* woodland distribution in the central Andes. *J Veg Sci* 20:1041—1052. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2009.01102.x>
- Guadagnin PMA, Trentin R, Alves FA (2015) Relação entre as variáveis geomorfométricas e a vegetação florestal na bacia hidrográfica do Arroio Caverá - Oeste do RS. *Revista do Departamento de Geografia – USP* 29:246—261. <https://doi.org/10.11606/rdg.v29i0.102131>
- Herrera A, Ali M (2009) Paisajes del desarrollo: la ecología de las tecnologías andinas. *Antipod Rev Antropol Arqueol* 8:169—194. <https://doi.org/10.7440/antipoda8.2009.07>
- Hijmans RJ (2012) Cross-validation of species distribution models: removing spatial sorting bias and calibration with a null model. *Ecology* 93:679—688. <https://doi.org/10.1890/11-0826.1>

- Hijmans RJ, Phillips S, Leathwick J, Elith J (2021) dismo: Species Distribution Modeling. R package version 1.3-5. <https://cran.r-project.org/web/packages/dismo/index.html>
- International Union for Conservation of Nature – IUCN (2022) The IUCN red list of threatened species. <https://www.iucnredlist.org>
- Kalnins A (2018) Multicollinearity: how common factors cause Type 1 errors in multivariate regression. *Strateg Manag J* 39:2362—2385. <https://doi.org/10.1002/smj.2783>
- Karatzoglou A, Smola A, Hornik K et al (2022) kernlab: Kernel-Based Machine Learning Lab. R package version 0.9-31. <https://cran.r-project.org/web/packages/kernlab/index.html>
- Kattan GH, Franco P, Rojas V, Morales G (2004) Biological diversification in a complex region: a spatial analysis of faunistic diversity and biogeography of the Andes of Colombia. *J Biogeogr* 31:1829—1839. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2004.01109.x>
- Kessler M (2002) The “*Polylepis* Problem”: where do we stand? *Ecotropica* 8: 97—110. <https://doi.org/10.1111/jbi.13209>
- Kessler M, Toivonem JM, Sylvester SP et al (2014) Elevational patterns of *Polylepis* tree height (Rosaceae) in the high Andes of Peru: role of human impact and climatic conditions. *Front Plant Sci* 5:1—12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00194>
- León B, Roque J, Ulloa CU et al (2006) El libro rojo de las plantas endémicas del Perú. *Rev Peru Biol* 13:1—972. <https://www.geogpsperu.com/2015/10/el-libro-rojo-de-las-plantas-endemicas.html>
- Liaw A, Wiener M (2022). randomForest: Breiman and Cutler's Random Forests for Classification and Regression. R package version 4.7-1.1. <https://cran.r-project.org/web/packages/randomForest/index.html>
- Lloyd HUW, Sevillano-Ríos CS, Marsden SJ, Valdés-Velásquez A (2011) Bird community composition across an Andean tree-line ecotone. *Austral Ecol* 37:470—478. <https://doi.org/10.1111/j.1442-9993.2011.02308.x>
- Londoño C, Cleef A, Madriñán S (2014) Angiosperm flora and biogeography of the páramo region of Colombia, Northern Andes. *Flora* 209:81—87. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2013.11.006>
- Mendoza W, Cano A (2011) Diversidad del género *Polylepis* (Rosaceae, Sanguisorbeae) en los Andes peruanos. *Rev Peru Biol* 18:197—200. <https://doi.org/10.15381/rpb.v18i2.228>
- Midi H, Sarkar SK, Rana S (2013) Collinearity diagnostics of binary logistic regression model. *J Interdiscip Math* 13:253—267. <https://doi.org/10.1080/09720502.2010.10700699>

- Milborrow S (2021) earth: Multivariate Adaptive Regression Splines. R package version 5.3.1. <https://cran.r-project.org/web/packages/earth/index.html>
- Ministerio del Ambiente – MINAM (2015) Mapa nacional de cobertura vegetal: memoria descriptiva. Lima, Peru. <https://www.gob.pe/institucion/minam/informes-publicaciones/2674-mapa-nacional-de-cobertura-vegetal-memoria-descriptiva>
- Ministerio del Ambiente – MINAM (2021) Reporte Estadístico Departamental: Cajamarca. Lima, Peru. <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/cajamarca-reporte-estadistico-departamental-agosto-2021>
- Morales LV, Sevillano-Ríos CS, Fick S, Young TP (2018) Differential seedling regeneration patterns across forest–grassland ecotones in two tropical treeline species (*Polylepis* spp.). *Austral Ecol* 43:514–526. <https://doi.org/10.1111/aec.12588>
- Navarro G, Molina JA, De La Barra N (2005) Classification of the high-Andean *Polylepis* forests in Bolivia. *Plant Ecol* 176:113–130. <https://doi.org/10.1007/s11258-004-0025-1>
- Oliveira U, Paglia AP, Brescovit AD et al (2016) The strong influence of collection bias on biodiversity knowledge shortfalls of Brazilian terrestrial biodiversity. *Divers Distrib* 22:1–13. <https://doi.org/10.1111/ddi.12489>
- Quinteros-Casaverde N, Flores-Negrón CF, Williams DA et al (2012) Low genetic diversity and fragmentation effects in a wind-pollinated tree, *Polylepis multijuga* Plige (Rosaceae) in the high Andes. *Conserv Genet* 13:593-603. <https://doi.org/10.1007/s10592-011-0310-1>
- R Core Team (2018) R: a language and environment for statistical computing. R. Foundation for Statistical Computing. <https://www.Rproject.org/>
- Renison D, Hensen I, Suarez R, Cingolani AM (2006) Cover and growth habit of *Polylepis* woodlands and shrublands in the mountains of central Argentina: human or environmental influence? *J Biogeogr* 33:876–887. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2006.01455.x>
- Renison D, Morales L, Cuyckens GAE et al (2018) Ecología y conservación de los bosques y arbustales de *Polylepis*: ¿qué sabemos y qué ignoramos? *Ecol Austral* 28:163–174. <https://doi.org/10.25260/EA.18.28.1.1.522>
- Ripley B, Venables W (2022) nnet: Feed-Forward Neural Networks and Multinomial Log-Linear Models. R package version 7.3-17. <https://cran.r-project.org/web/packages/nnet/index.html>
- Scoti AAV, Robaina LES, Trentin R (2016) Estudo do relevo da bacia hidrográfica do Rio Ibicuí com base em parâmetros morfométricos - oeste do Rio Grande do Sul. *Geo UERJ* 29:1–19. <https://doi.org/10.12957/geouerj.2016.15110>
- Segovia-Salcedo MC, Domic A, Boza TE et al (2018) Situación taxonómica de las especies del género *Polylepis*. Implicancias para los estudios ecológicos, la conservación y la

- restauración de sus bosques. *Ecol Austral* 28:188—201.  
<https://doi.org/10.25260/EA.18.28.1.1.527>
- Sevillano-Ríos CS, Morales LV (2021) La temperatura y radiación solar explican diferencias en la distribución de dos árboles altoandinos (*Polylepis* spp.) localmente simpátricos en la Cordillera Blanca, Perú. *Neotrop Biodivers* 7:327—340.  
<https://doi.org/10.1080/23766808.2021.1938887>
- Sirtoli AE, Silveira CT, Mantovani LE et al (2008) Atributos do relevo derivados de Modelo Digital de Elevação e suas relações com solos. *Sci Agrar* 9:317—329.  
<https://doi.org/10.5380/rsa.v9i3.11517>
- Sylvester SP, Heitkamp F, Sylvester MDPV et al (2017) Relict high-Andean ecosystems challenge our concepts of naturalness and human impact. *Sci Rep* 7:1—13.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-017-03500-7>
- Toivonen JM, Gonzalez-Inca CA, Bader MY et al (2018) Elevational shifts in the topographic position of *Polylepis* forest stands in the Andes of Southern Peru. *Forests* 9:1—10.  
<https://doi.org/10.3390/f9010007>
- Toivonen JM, Kessler M, Ruokolainen K et al (2011) Accessibility predicts structural variation of Andean *Polylepis* forests. *Biodivers Conserv* 20:1789—1802.  
<https://doi.org/10.1007/s10531-011-0061-9>
- Valencia BG, Matthews-Bird F, Urrego DH et al (2016) Andean microrefugia: testing the Holocene to predict the Anthropocene. *New Phytol* 212:510—522.  
<https://doi.org/10.1111/nph.14042>
- Valencia BG, Bush MB, Coe AL et al (2018) *Polylepis* woodland dynamics during the last 20,000 years. *J Biogeogr* 45:1019—1030. <https://doi.org/10.1111/jbi.13209>
- Xu Y, Goodacre R (2018) On splitting training and validation set: a comparative study of cross-validation, bootstrap and systematic sampling for estimating the generalization performance of supervised learning. *J Anal Test* 2:249—262.  
<https://doi.org/10.1007/s41664-018-0068-2>
- Yi Y, Zhou Y, Cai Y et al (2018) The influence of climate change on an endangered riparian plant species: the root of riparian Homonoia. *Ecol Indic* 92:40—50.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.05.004>
- Yu F, Wang T, Groen TA, Skidmore AK et al (2019) Climate and land use changes will degrade the distribution of *Rhododendrons* in China. *Sci Total Environ* 659:515—528.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.223>
- Zurell D, Franklin J, König C et al (2020) A standard protocol for reporting species distribution models. *Ecography* 43:1261—1277. <https://doi.org/10.1111/ecog.04960>
- Zutta BR, Rundel PW (2017) Modeled shifts in *Polylepis* species ranges in the Andes from the Last Glacial Maximum to the present. *Forests* 8:232—248.  
<https://doi.org/10.3390/f8070232>

Zutta BR, Rundel PW, Saatchi S et al (2012) Prediciendo la distribución de *Polylepis*: bosques Andinos vulnerables y cada vez más importantes. Rev Peru Biol 19:205—212. <https://doi.org/10.15381/rpb.v19i2.849>



## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A conservação das florestas de *Polylepis* é um desafio, dada sua vulnerabilidade e exposição à pressão antrópica, condições ambientais e mudanças climáticas. O volume de publicações científicas a respeito do tema é reduzido, mas nós esperamos e acreditamos que o conhecimento gerado pela comunidade científica aumentará significativamente nos próximos anos. Para isso, sugerimos o fortalecimento de uma rede de colaboração entre autores, países e instituições, para que a troca de conhecimentos possa difundir a informação sobre ameaças e estratégias de conservação das florestas de *Polylepis*.

A utilização da modelagem da distribuição de espécies ainda é incipiente para *Polylepis* spp., mas nós demonstramos que o emprego dessa técnica pode auxiliar na identificação de áreas potenciais para conservação. A distribuição potencial presente das cinco espécies estudadas nos deu um panorama geral das zonas que provavelmente estariam cobertas por florestas de *Polylepis* na atualidade. Por um lado, a inclusão de variáveis topográficas na geração dos modelos foi essencial para identificar os possíveis novos locais de ocorrência das espécies. Por outro lado, ao não considerarmos os fatores antrópicos como variáveis, nós perdemos a informação da influência direta do impacto humano sobre essa distribuição.

As Áreas Protegidas não cobrem a maioria da área de distribuição potencial das cinco espécies endêmicas do Peru. Para o futuro, sugerimos a criação de novas APs, aliada a ações de reflorestamento, para proteção e restauração das florestas de *Polylepis*. Além disso, apontamos a consolidação e o fortalecimento das APs já existentes, junto à participação das comunidades locais, como uma eficaz estratégia de conservação. Considerando que a falta de informação básica sobre as florestas de *Polylepis* é um gargalo, acreditamos que nosso estudo é importante para orientar a adoção de medidas de conservação dessas florestas. Por fim, ressaltamos que é importante que cada país trate o problema de acordo com sua realidade ambiental e possibilidades locais.