



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

FACULTAD DE LETRAS Y CIENCIAS HUMANAS

**“BIOGEOGRAFÍA DE UN BOSQUE ALTO ANDINO: HISTORIA E
IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS QUEÑUALES
PERUANOS”**

Tesis para optar el título de Licenciada en Geografía y Medio Ambiente que presenta la

Bachiller:

GABRIELA SOFIA FLORES FLORES

ASESOR: MARTÍN ENRIQUE TIMANÁ DE LA FLOR, PHD

2017



AGRADECIMIENTOS

La elaboración de esta tesis de licenciatura ha sido un proceso lleno de aprendizaje, el cual no habría sido posible sin el apoyo de muchas personas.

En primer lugar, quiero agradecer de manera especial a mi asesor, el Dr. Martín Timaná de la Flor, por la paciencia y el apoyo brindado en todo momento durante la elaboración de la tesis; por estar siempre disponible para resolver cualquier duda o problema que surgiera, así como por sus conocimientos, aportes y críticas que me ayudaron a guiar esta investigación.

En segundo lugar, quiero agradecer a todos los profesores de la especialidad de Geografía y Medio Ambiente por contribuir con mi formación, especialmente a Martha Bell, por el tiempo brindado para ayudarme a mejorar esta tesis con sus correcciones, observaciones y consejos; a Fernando González, por su disposición e interés en la revisión de esta tesis y por todos los aportes y recomendaciones brindadas; y a Miriam Nagata y Carlos Tavares, por acompañarme en los inicios de mi carrera y estar siempre dispuestos a aconsejarme y solventar todas mis dudas.

En tercer lugar, agradezco al Dr. Carlos Reynel Rodríguez, del herbario de la Universidad Nacional Agraria La Molina, por permitirme el acceso a las colecciones de *Polylepis* y por apoyarme con bibliografía pertinente para esta investigación. A la vez, agradezco a Laura Morales, de la Universidad de California-Davis, por darme la oportunidad de participar como voluntaria en el proyecto de investigación “Restauración de Bosques de *Polylepis* en el Parque Nacional Huascarán”, gracias al cual pude trabajar de cerca con los bosques de *Polylepis* y profundizar mis conocimientos.

En cuarto lugar, quiero agradecer a Alejandra Cuentas, por su ayuda con las continuas dudas metodológicas a lo largo de la investigación y por sus consejos, así como a mis amigas de la especialidad: Fiorella Vadillo, Romina Calderón, Luciana Vásquez y Carmen Mallqui, por haberme acompañado y animado durante todo el proceso de investigación, y por hacer de mis días en la especialidad una experiencia divertida y memorable. Asimismo, quiero agradecer a Alberto Lavanda, porque su compañía, amor y apoyo constante me reconfortaron en todo momento. Por último, gracias a todos los que se vieron involucrados de una u otra manera en esta investigación, facilitándome bibliografía, aconsejándome y estando a mi lado.

Finalmente, agradezco a mis padres, por haberme apoyado desde el principio cuando decidí estudiar la carrera de Geografía y Medio Ambiente y a lo largo de mis años en la universidad. Gracias por impulsarme a ser una mejor persona y a seguir siempre mis sueños.

RESUMEN

Las zonas alto andinas del Perú son el hábitat del género *Polylepis*, un grupo arbóreo de alta relevancia ecológica que concentra una alta diversidad de especies y que es una fuente de distintos servicios ecosistémicos. Desde tiempos antiguos su distribución viene siendo afectada por las actividades del ser humano, por lo que en la actualidad su distribución se ha visto reducida a pequeños rodales. En un futuro, debido al cambio climático, su extensión actual podría disminuir.

Este proyecto de investigación tuvo como objetivo principal el determinar la distribución de cuatro especies de *Polylepis* (*P. weberbaueri*, *P. sericea*, *P. incana* y *P. racemosa*), así como del género, en los Andes centrales del Perú. Se determinaron las distribuciones actuales de las especies mediante la recopilación y georreferenciación de colecciones botánicas realizadas en el Perú. A partir de ello, se generó un Modelo de Distribución de Especies a tiempo pasado, presente y futuro, aplicando distintas variables climáticas y con diferentes modelos climáticos globales mediante el software Maxent. Finalmente, se hallaron y analizaron los lugares potencialmente más aptos para la ocurrencia de las especies y el género *Polylepis* en un escenario presente, pasado y futuro, teniendo en cuenta los factores que han influido en la distribución del género a lo largo del tiempo.

De lo mencionado, se concluyó que la distribución potencial presente del género *Polylepis* sería mucho mayor a la que actualmente abarca. En cuanto a la distribución potencial pasada y futura, en términos generales, en el pasado habría predominado una distribución más extensa del bosque; mientras que, a futuro, predominaría la disminución en la extensión del bosque conforme las condiciones climáticas se vuelven más extremas. Respecto a los modelos climáticos globales utilizados, cada especie de *Polylepis* reaccionó de distinta manera según cada modelo y escenario climático. Por último, se obtuvo que existe una variación ecológica a nivel de las especies de *Polylepis*, por lo que cada una respondería de distinta manera a los factores ambientales y humanos determinantes de su distribución.

Esta investigación permitió dar un acercamiento a las condiciones de la distribución de los bosques de *Polylepis* en el Perú en un escenario pasado, presente y futuro. De igual manera, llenó un vacío de información y conocimientos respecto al tema del origen biogeográfico del género *Polylepis* en el Perú y proporcionó un marco teórico inicial para futuros estudios de modelamiento para otros géneros alto andinos en el Perú. Los resultados demuestran la vulnerabilidad de estos bosques, invitando a la aplicación de alternativas de conservación y manejo que prevengan la degradación y restricción de su hábitat, y mitiguen los impactos de los cambios climáticos futuros.

ABSTRACT

The high Andean areas of Peru are the habitat of the genus *Polylepis*, an arboreal group of high ecological relevance that concentrates a high diversity of species and that is a source of different ecosystem services. Since ancient times its distribution has been affected by human activities, reason why at the moment its distribution has been reduced to small patches. In the future, due to climate change, its current extent could decrease.

This research project had as main objective to determine the distribution of four species of *Polylepis* (*P. weberbaueri*, *P. sericea*, *P. incana* and *P. racemosa*), as well as of the genus, in the central Andes of Peru. The current distributions of the species were determined through the collection and georeferentiation of botanical collections in Peru. From this, a Model of Distribution of Species was generated at past, present and future time, applying different climatic variables with different global climate models through Maxent software. Finally, the sites potentially most suitable for the occurrence of the species and the genus *Polylepis* were found and analyzed in a present, past and future scenario, taking into account the factors that have influenced the distribution of the genus over time.

From the above, it was concluded that the current potential distribution of the genus *Polylepis* would be much larger than it currently is. As regards of past and future potential distribution, in general terms, a more extensive distribution of the forest would have prevailed in the past; while in the future the decline in the extent of the forest would predominate as climatic conditions become more extreme. Regarding the global climate models used, each *Polylepis* species reacted differently according to each model and climatic scenario. Finally, it was obtained that there is an ecological variation concerning the *Polylepis* species, so that each one would respond differently to the environmental and human factors determining its distribution.

This research allowed an approach to the conditions of the distribution of *Polylepis* forests in Peru in a past, present and future scenario. It also filled a gap of information and knowledge regarding the biogeographic origin of the genus *Polylepis* in Perú and provided an initial theoretical framework for future modeling studies for other high Andean genera in Peru. The results demonstrate the vulnerability of these forests, inviting the application of conservation and management alternatives that prevent the degradation and restriction of their habitat, and mitigate the impacts of future climate changes.

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	ii
RESUMEN	iii
ABSTRACT	iv
TABLA DE CONTENIDO	v
ÍNDICE DE TABLAS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE MAPAS	ix
SIGLAS Y ACRÓNIMOS	x
INTRODUCCIÓN	1
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
II. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO	5
III. HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN	7
IV. OBJETIVOS	7
CAPÍTULO 1	8
MARCO CONCEPTUAL	8
1.1. MARCO TEÓRICO	8
1.1.1 Biogeografía: la distribución general de las especies	8
1.1.2 El Modelamiento de distribución de especies (MDE)	10
1.1.2.1 Aplicaciones de los MDE	14
1.1.2.2 Modelado de Máxima Entropía: Maxent	15
1.1.3 Conociendo al género <i>Polylepis</i>	16
1.1.3.1 Caracteres morfológicos	18
1.1.3.2 Usos de <i>Polylepis</i> en el área andina	20
1.1.3.3 Distribución geográfica del género	22
1.2 ANTECEDENTES	26
1.2.1 Historia de los bosques alto andinos en el Perú	26
1.2.2 El cambio climático y su impacto en la distribución de especies andinas	29
1.2.3 Troll vs. Ellenberg: un debate respecto a la distribución natural de <i>Polylepis</i>	32
1.2.4 Estudios previos al género <i>Polylepis</i> en los Andes centrales	34
1.2.5 Estudios metodológicos en MDE en los Andes centrales	38
CAPÍTULO 2	41
ÁREA DE ESTUDIO	41

2.1. Localización geográfica	41
2.2. Descripción del medio natural	43
2.3. Descripción del medio humano	45
CAPÍTULO 3	50
METODOLOGÍA	50
3.1. Recopilación de la información y procesamiento de puntos de presencia	50
3.2. Elección de variables y modelos climáticos globales	53
3.3. Elaboración de mapas de distribución potencial	55
3.3.1. Elaboración de los mapas de distribución potencial actual	56
3.3.2. Elaboración de los mapas de distribución potencial al futuro	60
3.3.3. Elaboración de los mapas de distribución potencial pasada	62
3.4. Interpretación y manejo de la data resultante	63
3.4.1. Procesamiento de resultados en ArcGis	66
CAPÍTULO 4	69
RESULTADOS	69
4.1. Contribución de las variables	72
4.2. Resultados del análisis con Maxent	72
4.3. Cuantificación de las áreas de distribución potencial	78
4.3.1. Distribución potencial actual y pasada	78
4.3.2. Distribución potencial futura	79
CAPÍTULO 5	86
DISCUSIÓN	86
5.1. Distribución potencial presente - pasada	86
5.2. Distribución potencial presente - futura	96
5.3. Conservación de los bosques de <i>Polylepis</i>	102
CAPÍTULO 6	107
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	107
BIBLIOGRAFÍA	112
ANEXOS	133

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1.: Superficie nacional de bosques naturales andinos	49
Tabla 3.1.: Especies de <i>Polylepis</i> colectadas en el Perú.	51
Tabla 3.2.: Lista de variables bioclimáticas de Worldclim	53
Tabla 3.3.: Características de los RCP	61
Tabla 3.4.: Rangos de valorización del parámetro AUC.....	64
Tabla 3.5.: Clasificación de la idoneidad del hábitat	67
Tabla 4.1.: Distribución potencial actual y pasada para cada especie modelada	78
Tabla 4.2.: Distribución potencial futura según el GCM BCC-CSM1	80
Tabla 4.3.: Distribución potencial futura según el GCM CCSM4.....	81
Tabla 4.4.: Distribución potencial futura según el GCM HadGEM-ES.....	82
Tabla 4.5.: Tabla resumen de las áreas de distribución potencial (hectáreas)	84
Tabla 4.6.: Tabla resumen de las áreas de distribución potencial (porcentaje de cambio) ..	85
Tabla 5.1.: Nivel de complejidad de los modelos utilizados en la investigación.....	99

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1.: Esquema de flujo de trabajo para la construcción de modelos de distribución de especies	12
Figura 1.2.: Bosque de <i>Polylepis weberbaueri</i> en el Parque Nacional Huascarán	18
Figura 1.3.: Hojas de <i>Polylepis</i>	19
Figura 1.4.: Corteza de <i>Polylepis</i>	20
Figura 1.5.: Comparación entre dos situaciones de flujo de agua subterránea, con y sin bosques de montaña	21
Figura 1.6.: Distribución de especies de <i>Polylepis</i> según su edad evolutiva	23
Figura 1.7.: Rango de distribución altitudinal de las especies de <i>Polylepis</i> identificadas para el Perú	25
Figura 1.8.: Desviación anual de temperatura en los Andes tropicales	31
Figura 2.1.: Localización por regiones naturales de la población en pobreza extrema para el año 2015	46
Figura 2.2.: Promedio de hectáreas que conduce el productor agropecuario por pisos altitudinales	47
Figura 3.1.: Datos en Excel requeridos para ser utilizados en el programa Maxent	57
Figura 3.2.: Plataforma Maxent con los datos ingresados para su ejecución.....	59
Figura 3.3.: Emisiones históricas de dióxido de carbono (CO ₂) según escenarios RCP	60
Figura 3.4.: Plataforma Maxent con los datos ingresados para la proyección a futuro.....	62
Figura 3.5.: Matriz de omisión y área prevista del modelo de distribución.....	63
Figura 3.6.: Matriz ROC del modelo de distribución	64
Figura 3.7.: Tabla logística que indica el percentil 10 del modelo de distribución	65
Figura 3.8.: Representación del modelo obtenido en Maxent.....	65
Figura 3.9.: Prueba de Jackknife para el modelo de distribución	66
Figura 5.1.: Las localidades para <i>P. sericea</i> desde Venezuela hasta Bolivia y su distribución potencial	87
Figura 5.2.: Las localidades para <i>P. weberbaueri</i> desde Ecuador y poblaciones aisladas en Perú y su distribución potencial	87

ÍNDICE DE MAPAS

Mapa 2.1.: Mapa del área de estudio.....	42
Mapa 4.1.: Mapa de ubicación de puntos de muestreo para <i>Polylepis weberbaueri</i>	69
Mapa 4.2.: Mapa de ubicación de puntos de muestreo para <i>Polylepis sericea</i>	70
Mapa 4.3.: Mapa de ubicación de puntos de muestreo para <i>Polylepis incana</i>	70
Mapa 4.4.: Mapa de ubicación de puntos de muestreo para <i>Polylepis racemosa</i>	71
Mapa 4.5.: Mapa de ubicación de puntos de muestreo para el género <i>Polylepis</i>	71
Mapa 4.6.: Mapa de distribución potencial de <i>Polylepis weberbaueri</i>	73
Mapa 4.7.: Mapa de distribución potencial de <i>Polylepis sericea</i>	74
Mapa 4.8.: Mapa de distribución potencial de <i>Polylepis incana</i>	75
Mapa 4.9.: Mapa de distribución potencial de <i>Polylepis racemosa</i>	76
Mapa 4.10.: Mapa de distribución potencial para el género <i>Polylepis</i>	77
Mapa 5.1.: Distribución potencial de <i>Polylepis</i> con respecto a las Áreas Naturales Protegidas.....	103

SIGLAS Y ACRÓNIMOS

ANP	Área Natural Protegida
AP	Antes del Presente
AUC	Area Under the Curve
BRIDGE	Bristol Research Initiative for the Dynamic Global Environment
ECOAN	Asociación Ecosistemas Andinos
GBIF	Global Biodiversity Information Facility
GCM	Global Climate Model
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GPS	Global Positioning System
INEI	Instituto Nacional de Estadística e Informática
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IUCN	International Union for Conservation of Nature
MDE	Modelamiento de Distribución de Especies
MINAM	Ministerio del Ambiente
PEA	Población Económicamente Activa
ROC	Receiver Operating Characteristic
RCP	Representative Concentration Pathways
SIG	Sistemas de Información Geográfica

INTRODUCCIÓN

Los Andes constituyen la cadena montañosa más larga del planeta. Con más de siete mil kilómetros, desde Venezuela y a lo largo de Colombia, Ecuador, Perú, Bolivia, Chile, hasta Argentina, este territorio se distingue por su vasta diversidad biológica inscrita dentro de un amplio rango altitudinal y relieves desiguales. En este territorio se pueden observar diversas condiciones ambientales, físicas y geográficas que permiten el desarrollo de numerosos ecosistemas, la coexistencia de una diversidad de especies y, al mismo tiempo, la generación de varios servicios ambientales (Tobón, 2009; Tejedor Garavito et al., 2012).

En gran parte de los Andes centrales, a una altitud por encima de los 3500 msnm, el estrato vegetativo está mayormente conformado por una vegetación con características especiales que le permiten acondicionarse a las situaciones extremas del medio natural, como los pastizales y zonas arbustivas. Aunque los bosques naturales no son muy comunes, sí existen de manera escasa, agrupados en reducidos rodales y ocupando una variedad amplia de hábitats entre los 3000 a 5000 msnm (Kessler, 2006); estos poseen características propias de acuerdo a la geomorfología, el gradiente latitudinal, la elevación y el gradiente térmico vertical del lugar (Tejedor Garavito et al., 2012). Debido a la amplia gama de áreas de distribución y a las características de adaptación específicas, los bosques alto andinos albergan una alta concentración de especies y un alto número de endemismos, tanto en flora como en fauna. Esta riqueza biológica se le atribuye principalmente a tres factores de índole histórico: el levantamiento de las cordilleras andinas, resultado de una serie de procesos orogénicos; el intercambio biótico a través de la existencia de rutas migratorias de especies en dirección norte-sur y sur-norte mediante la conexión con América del Norte a través del istmo de Panamá; y las fluctuaciones climáticas ocurridas durante el Pleistoceno, resultando en la fragmentación y aislamiento de las poblaciones lo que a su vez dio lugar a la especiación de las mismas (Chaverri-Polini, 1998; Tejedor Garavito et al., 2012).

Uno de los grupos arbóreos que ocurren en los Andes centrales, considerado el grupo boscoso natural que existe a mayor altitud del mundo, es el género botánico *Polylepis* (Rosaceae), conocidos vernáculamente como "queñuales" en Perú. Cuentan en total con 27 especies registradas, entre arbustos y árboles, creciendo en elevaciones extremadamente altas, en hábitats que solo fueron aptos para la colonización a partir de finales de la era Terciaria (hace 65,5 millones de años), aunque igualmente hay casos de especies que crecen en elevaciones mucho más bajas (Simpson, 1979; Mendoza & Cano, 2011; Zutta, Rundel,

Saatchi, Casana, Gauthier, Soto, Velazco & Buermann, 2012). Debido a que el género ocurre en una variedad de rangos altitudinales, las condiciones ecológicas que rigen a este género se basan en la temperatura, la humedad y el tipo de suelo (Kessler, 2006). El territorio peruano posee 19 de las 27 especies registradas para el área andina, siendo el foco de mayor diversidad de *Polylepis* de toda esta área. Estos bosques, así como demás ecosistemas andinos, cumplen un papel fundamental en la provisión de bienes y servicios ecosistémicos, especialmente en relación a los procesos de regulación hídrica (Cuesta, Peralvo & Valarezo, 2009), ya que cuentan con complejas redes hídricas que drenan el agua hacia las partes más bajas de la cuenca donde suele ubicarse la población (Tobón, 2009), por esta razón, son de suma importancia. Sin embargo, la extensión de este género ha visto reducida su distribución original, quedando menos del 10% del total en las regiones de Bolivia y Perú, principalmente por la destrucción de los mismos a causa de la quema, la presión de pastoreo de ganado, la extracción de la leña para el consumo local, entre otras causas (Kessler, 2006; Zutta et al., 2012).

Desde tiempos antiguos el poblador andino peruano supo aprovechar el potencial de estos bosques, sobre todo el de sus troncos gruesos como leña para generar calor, de esta manera, los bosques constituyen hasta la actualidad un elemento con varias funciones dentro del sistema productivo del campesino, por ejemplo, la protección y conservación del suelo agrícola, como forraje para el ganado, como proveedor de varios productos naturales (tintes, medicinas) y una importante fuente de energía extensa y barata (Reynel & Felipe-Morales, 1987). Si bien en la época prehispánica ya estaba desarrollada toda una cultura de explotación de este recurso, es con la llegada de los españoles a los Andes en el siglo XVI que la explotación de los árboles de *Polylepis* se tornó intensiva y peligrosa. Los queñuales fueron talados para ampliar la frontera agropecuaria, para leña y como combustible para la minería de la época, resultando en la pérdida de miles de hectáreas de estos bosques (Brack, 2008). Debido a la continua intervención antrópica en los bosques, no se conoce con precisión la distribución geográfica actual de los mismos, solo que existen en rodales de extensión mínima en diversos departamentos del Perú y que la sobreutilización de su leña sigue dándose, poniendo en estado de vulnerabilidad a la especie. Además, en la actualidad, debido a la estrecha relación existente entre el clima y los ecosistemas de estos bosques alto andinos, el cambio climático al que está sujeto la tierra afecta este territorio de manera directa e indirecta, generando cambios en los factores climáticos y modificando las

respuestas que los distintos ecosistemas tienen ante éstos (Anderson, Marengo, Villalba, Halloy, Young, Cordero, Gast, Jaimes & Ruiz Carrascal, 2012).

En la actualidad, existen varios estudios ecológicos y una práctica de conservación de estos bosques en algunos departamentos del país. Por ejemplo, se han venido desarrollando revisiones sobre la taxonomía y estructura genética de diversas especies del género *Polylepis* (Kessler & Schmidt, 2006, 2006b; Quinteros, 2010); recolección de información biológica para evaluar el estado de conservación de los bosques y una evaluación de la biodiversidad de los bosques de *Polylepis* en Cusco (Cordillera Vilcanota), Ancash (Corredor de Conchucos), Puno y Ayacucho (Parque Nacional Otishi) (Servat, Mendoza & Ochoa, 2002; ECOAN, 2005, 2006, 2007; Mendoza & Roque, 2007); el registro de nuevas especies en Cusco y Junín (Mendoza, 2005; Valenzuela & Villalba, 2015); el desarrollo de un proyecto de conservación en un bosque de queñuales en Lima (Carampoma) (Florencio & Valencia, 2013); estudios descriptivos sobre la distribución del género *Polylepis* en Puno, Ancash y todo el Perú (Lao, Zevallos & De la Cruz, 1990; Yallico, 1992; Dourojeanni, 2008; Mendoza & Cano, 2011, 2012); y un estudio del cambio en la cobertura de los bosques de Cusco, en la Cordillera Vilcanota (Jameson & Ramsay, 2007). Sin embargo, la mayoría de los bosques de *Polylepis* peruanos no se han visto envueltos en investigaciones de análisis biogeográfico. Por ende, esta investigación buscó determinar la distribución potencial de los bosques de *Polylepis* de los Andes centrales del Perú para poder establecer los lugares más aptos de ocurrencia del taxón, así como dar una explicación al porqué de su distribución actual. Mediante la realización de Modelos de Distribución de Especies (MDE) se buscó identificar la situación pasada, presente y futura de la especie dentro del territorio peruano, cómo habría sido y cómo sería su distribución geográfica teniendo en cuenta principalmente los cambios climáticos que puedan suceder y afectar al grupo arbóreo. Es importante establecer una línea histórica del género y un panorama de su situación actual, de esta manera, se podrá asegurar el futuro del mismo.

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los Andes es un territorio que ha sido afectado a lo largo del tiempo por los efectos de los cambios climáticos, acontecimientos geotectónicos e interacciones ecológicas; estos procesos son los que han ido constituyendo la zona andina como un espacio biogeográfico heterogéneo de gran riqueza histórica y ecológica (Beck et al., 2007), albergando la mayor concentración de especies con área de distribución restringida de América del Sur. Los

bosques alto andinos, albergan diversas especies endémicas de flora y fauna, es decir, especies raras que no se encuentran en otro lugar del planeta (Cuesta et al., 2009), lo cual los hace ecosistemas únicos. Además de ser lugares con un alto grado de biodiversidad, estos bosques también juegan un papel fundamental en la provisión de servicios ecosistémicos para la región; entre éstos podemos hallar los servicios de regulación hídrica, conservación de la diversidad biológica, regulación de las temperaturas, purificación del aire, conservación de suelos y el mantenimiento de la belleza escénica del paisaje (Fjeldså & Kessler, 1996; Cordero, 2012). Sin embargo, estos ecosistemas boscosos están en una situación vulnerable ya que se hallan experimentando impactos negativos de origen antrópico, debido a la progresiva deforestación y explotación de sus recursos a lo largo del tiempo por los humanos; y de origen natural, debido a la modificación del rango de variabilidad climática por el calentamiento global, el cual ha afectado más a las tierras altas que a las tierras bajas (Anderson et al., 2012).

Uno de los grupos arbóreos alto andinos que se ve afectado por estos impactos es el género *Polylepis*, considerado como un elemento raro y especial presente en las laderas de barrancos rocosos y quebradas en las tierras altas de los Andes, y que, actualmente, su ocurrencia se ve restringida a pequeños rodales (Fjeldså, 2002). Si este cambio en su nivel de distribución continuara progresando, afectaría los servicios ecosistémicos que brinda, esto implicaría consecuencias no solo para la población de este género, sino también para los diferentes ecosistemas que se desenvuelven alrededor y dentro del área de distribución de los bosques de *Polylepis* y que tienen una relación de dependencia con esta especie. Este es el caso de muchas aves y fauna andina que habitan en los bosques de *Polylepis* y que son especies endémicas (Brack, 2008). De la misma manera, las consecuencias de la reducción de los servicios ambientales llegarían a afectar las zonas cultivables valles abajo que se ven beneficiadas por las filtraciones de agua subterránea, y, por consiguiente, a todas las poblaciones que se asientan en los valles.

En la actualidad, si bien se han venido desarrollando diversos estudios en el Perú de evaluación de biodiversidad, de distribución específica y varios proyectos de conservación para el género *Polylepis*, aún existe una carencia de investigaciones de índole biogeográfica. Teniendo en cuenta los desafíos por los que atraviesa este grupo arbóreo, es necesario, por un lado, conocer bien la distribución actual y pasada del género para poder tener en cuenta todos los mecanismos y transformaciones en las que se ha visto envuelto hasta llegar a la situación en la que actualmente vive. Por otro lado, es igual de importante conocer el nivel

de distribución a futuro del género para poder identificar los lugares más aptos de ocurrencia del mismo y poder tomar medidas adecuadas en aras de su conservación. Si se quiere generar un mejor manejo de estos bosques, se deben de tener en cuenta los procesos históricos, actuales y a futuro que podrían influir en la distribución de los bosques de *Polylepis*.

II. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

Las regiones más elevadas de los Andes son zonas de climas extremos y llenos de una topografía abrupta. Poseen una gran diversidad de condiciones ecológicas debido a las diferencias que hay entre los microclimas y suelos de los distintos pisos altitudinales, en donde se da la distribución de las plantas y animales (Brack & Mendiola, 2000; Young, 2012); por lo mismo, los ecosistemas presentes en las zonas alto andinas poseen diversas particularidades y son únicos en su clase, albergando la mayor concentración de especies con área de distribución restringida de América del Sur, lo cual se ve manifestado en su alto número de especies endémicas en flora y fauna (Cuesta et al., 2009; Tejedor Garavito et al., 2012). Las especies de *Polylepis* son uno de los organismos que se ha adaptado a vivir en las condiciones climáticas extremas; debido a esto, los bosques de *Polylepis* poseen sus propios microclimas y albergan una amplia diversidad biológica (Fjeldså & Kessler, 1996). Empero, a pesar del papel vital que representan los bosques de *Polylepis*, éstos presentan un reducido porcentaje en la zona andina, y muchas especies están listadas como vulnerables (IUCN, 2011 citado por Zutta et al., 2012). La distribución de estos se ha mantenido muy local y siempre en pequeños rodales restringidos (Kessler, 2006). Esta ausencia boscosa parece datar de varios siglos atrás, sin embargo, es pertinente preguntarnos si esta baja densidad arbórea ha sido así desde siempre y/o si es que hay algún factor que haya influido en su distribución.

Existe un antiguo debate respecto al tema de la distribución del género *Polylepis* por los botánicos y ecólogos Carl Troll y Heinz Ellenberg, el cual ha desencadenado dos visiones contrapuestas en la explicación del porqué el género *Polylepis* se distribuye de manera restringida actualmente. Por un lado, Troll sostiene que la distribución se debe a las causas naturales, es decir, a las condiciones micro climáticas especiales que permiten a *Polylepis* crecer (Fjeldså & Kessler, 2004), a partir de las grandes variaciones climáticas a lo largo de los años que han generado que el bosque tenga períodos de desarrollo como de disminución en su masa boscosa. Por otro lado, Ellenberg sostiene que la distribución se debe a causas

humanas a partir de la deforestación iniciada hace 3000 años por el ser humano para utilizar la tierra como zona agrícola (Ansión 1986; Kessler, 2002).

La falta de información exacta acerca de la distribución de los bosques de *Polylepis*, tanto a nivel geográfico como histórico, hace difícil el determinar la configuración que estos bosques tuvieron en el pasado y, por lo mismo, la distribución que podrían tener en un futuro ante un eventual cambio en los parámetros climáticos y físicos del medio. Es necesario emplear técnicas que sean eficaces en comprender la distribución espacial de las especies en las tres escalas de tiempo: pasado, presente y futuro, por lo cual el empleo de modelos estadísticos resulta acertado. Los modelos de distribución de especies se basan en procedimientos estadísticos y cartográficos que en base a datos reales de presencia permiten calcular la idoneidad de un espacio para la ocurrencia de una especie en función de diversas variables independientes (Mateo, Felicísimo & Muñoz, 2011; Timaná & Cuentas, 2015); esto provee una alternativa para poder estimar el grado de distribución existente en épocas pasadas, a la vez que genera modelos futuros que nos permitan acercarnos a una posible distribución potencial del taxón de estudio. El beneficio de utilizar estos modelos es que “solo requieren datos de localización y datos ambientales para realizar un análisis estadístico que establezca las relaciones especie-medio ambiente y construir un modelo espacial de ocurrencia” (Zutta et al., 2012).

Investigaciones previas que hayan utilizado los métodos de modelamiento son abundantes; por nombrar algunas están la de Vargas, Consiglio, Jørgensen & Croat (2004) en Ecuador para el género botánico *Anthurium* (Araceae); Naoki et al., (2006) en Bolivia para tres especies de vida silvestre; Benito de Pando y Peñas de Giles (2007) en la Península Ibérica para la especie vegetal amenazada *Linaria nigricans*; Beck et al. (2007) aplicado en la vertiente oriental de los Andes en Perú y Bolivia para diversas plantas vasculares; y Ramirez-Villegas et al. (2014), aplicado en los Andes Tropicales en áreas por encima de los 500 msnm para evaluar los impactos del cambio climático en las distribuciones de diversas especies de aves y plantas. Para el caso específico de los bosques de *Polylepis* está el elaborado por Zutta et al. (2012) a lo largo de la Cordillera de los Andes desde Venezuela hasta Bolivia; Coronel (2013) en Ecuador; y Renison et al., (2013) en las montañas de Argentina.

Así, esta investigación buscó ir un poco más allá de lo que se sabía en términos de distribución espacial de las especies alto andinas. Mediante el uso de modelos de

distribución de especies, en primer lugar, se buscó generar una línea de tiempo de la distribución de los bosques de *Polylepis* para los Andes centrales del Perú, estableciendo los lugares que fueron, que son y que serían más aptos para la ocurrencia de las especies de *Polylepis* ante los posibles impactos del cambio climático. Y, en segundo lugar, establecer una línea base para futuras investigaciones de distribución y modelamiento tanto para el género *Polylepis* como para otros grupos arbóreos alto andinos, los cuales son más propensos a sufrir por los cambios climáticos y están carentes de investigaciones a nivel nacional.

III. HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN

El género *Polylepis* en el Perú ha venido sufriendo a lo largo del tiempo una disminución en su extensión, debido a causas naturales y antrópicas, por ende, se han visto afectados los servicios ecosistémicos que estos bosques proveen. La distribución potencial del género *Polylepis* en el Perú ayudaría a determinar los espacios más aptos donde ha ocurrido, ocurre y podría ocurrir *Polylepis* y, ante los impactos del cambio climático, establecer las variables causantes de su distribución, así como propuestas para su adecuada conservación. De igual manera, ayudaría a esclarecer el debate existente, entre Troll y Ellenberg, sobre los patrones de distribución del género, para el caso de los Andes peruanos.

IV. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Definir la distribución de las especies de *Polylepis* existentes en los Andes centrales del Perú, analizando su historia y los impactos a futuro ante un escenario de cambio climático.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Evaluar las hipótesis alternativas frente al problema de la distribución pasada del género *Polylepis* en el Perú y definir los patrones de distribución.
2. Identificar las posibles áreas de ocurrencia del género *Polylepis* hace 6000 años al pasado, a mediados del Holoceno.
3. Generar un modelo de distribución de especies del género *Polylepis* e identificar las zonas de distribución potencial actuales.
4. Aplicar variables climáticas para generar la proyección que tendrá el género *Polylepis* en un escenario de cambio climático al año 2050.

CAPÍTULO 1

MARCO CONCEPTUAL

Este primer capítulo permitirá, por un lado, exponer el marco teórico de esta investigación, ahondando más en los conceptos teóricos y metodológicos que la envuelven y en los que se centra: la disciplina de la biogeografía, el género *Polylepis* y el modelamiento de distribución de especies (MDE). Por otro lado, se explicarán los antecedentes de la investigación que fundamentan la problemática elegida y la hipótesis planteada: cuál ha sido la situación de los bosques alto andinos peruanos a lo largo del tiempo, poniendo énfasis en los bosques de *Polylepis*; cuál ha sido el impacto del cambio climático en las especies andinas; por qué y cuáles han sido los inconvenientes al momento de definir los patrones de distribución de los bosques de *Polylepis*; y qué estudios previos se han venido realizado respecto a estos, y sobre el modelamiento de distribución de especies.

1.1. MARCO TEÓRICO

1.1.1 Biogeografía: la distribución general de las especies

De acuerdo al Diccionario de Geografía Humana de Gregory et al. (2009), la biogeografía es una de las más antiguas sub disciplinas, surgida como ciencia durante el siglo XVIII, que se encarga de “describir y explicar los componentes espaciales de la distribución de los organismos vivos: dónde están, dónde no están y por qué están ahí”. Se enfoca en el estudio de patrones y procesos; el patrón, siendo definido, como una organización no aleatoria y repetitiva que llega a ocurrir en el mundo natural debido a diversos procesos generales (Brown & Lomolino, 1998). El elemento fundamental de los estudios biogeográficos es el área de distribución, tanto de una especie como de un taxón individual; esta área puede caracterizarse en términos de su tamaño, ubicación geográfica, continuidad, entre otros atributos (Espinosa, Morrone, Lorrente & Flores, 2002; Zunino & Zullini, 2003). De esta manera, es una ciencia que se encarga de estudiar la distribución geográfica de los seres vivos tanto en el tiempo como en el espacio, y comprender los procesos y factores involucrados en su distribución (Espinosa et al., 2002; Cox & Moore, 2005). Dado que es un estudio a nivel temporal y espacial, se comprende a la biogeografía dentro de dos perspectivas: la ecológica y la histórica. De esta manera, por un lado, se produce un estudio a nivel ecológico que implica la respuesta biológica de una población al medio ambiente que la rodea, tanto a su entorno abiótico como biótico, y los límites de tolerancia que posee

frente a ciertos factores ambientales. Y, por otro lado, se produce un estudio a nivel histórico que implica el conocimiento de los centros de origen de las especies y sus formas de dispersión ante distintos cambios a nivel geológico y climático a lo largo del tiempo (Huggett, 2004).

Si bien la biogeografía abarca varias ramas de estudio, en lo referente al estudio de las plantas, conocido como fitogeografía, es a partir de las ideas de Humboldt que se sientan las bases para el desarrollo de la ecología y posteriormente varios otros estudios de la naturaleza (MINAM, 2016). Entre 1799-1804, el polímata Alexander von Humboldt realizó un viaje junto con el botánico Aimé Bonpland por las regiones equinocciales del Nuevo Continente, las cuáles incluían los virreinos de Nueva Granada, Perú y Nueva España, Cuba y Venezuela. A lo largo de esta expedición realizó numerosas observaciones, colecciones y registros sobre la geografía, el clima, antropología y la historia natural de estos territorios (Dettelbach, 2016). Este viaje le permitió evocar sus ideas y mostrar sus resultados en una serie de trabajos de entre los cuáles resalta “Ideas para una geografía de las plantas” (Humboldt & Bonpland, 1985). En esta publicación, Humboldt recalca la importancia de elaborar una geografía de plantas, disciplina que recién estaba haciéndose conocida, pero que generaba materiales para comprender la historia ambiental del planeta, a la vez que mostraba las interrelaciones entre los componentes ambientales y las diversas formas de vegetación existentes.

“Ella -la geografía de las plantas- las observa según la proporción de su distribución en los diferentes climas. Casi ilimitada, tal como el objeto que investiga, descubre ante nuestros ojos el infinito manto vegetal, el cual tejido más denso o abierto, ha puesto la naturaleza, fuente de toda la vida, sobre el desnudo planeta. (...) La geografía de las plantas investiga si se pueden encontrar entre las innumerables plantas de la tierra, y si se puede detectar entre ellas ciertas formas primarias, y si se puede considerar o no las diferencias específicas como consecuencia de la degeneración o cambio, como desviación de un prototipo. Resuelve ella, o no, el problema tan discutido de si existen plantas que pertenecen a todos los climas, todas las alturas y a todas las regiones de la tierra.” (Humboldt & Bonpland, 1985).

La biogeografía ha pasado por diferentes etapas de desarrollo que le han permitido incluir nuevas perspectivas a su objeto de estudio, desde una etapa meramente descriptiva hasta una mucho más analítica (Espinosa et al., 2002). De igual manera, todos los cambios que se han dado a lo largo de la historia del planeta han proporcionado un panorama aproximado para explicar la distribución de muchos organismos en base a factores como la capacidad de

dispersión, el clima, la geología y la ecología del medio natural. La explicación de la distribución de los organismos en base a esta gama de factores ha generado que la disciplina de la biogeografía crezca enormemente, y, aunque desde finales del siglo XX sea una sub especialidad de la geografía física, lo cierto es que tanto geógrafos humanos como físicos encuentran en la biogeografía un terreno transdisciplinario de trabajo con otras ciencias como la biología, geología, paleontología y la ecología (Cox & Moore, 2005; Gregory et al., 2009). Debido a este trabajo entre disciplinas, en la actualidad, se produce un aumento del interés científico y político, sobre todo en temas de extinción de las especies y conservación de la biodiversidad.

1.1.2 El Modelamiento de distribución de especies (MDE)

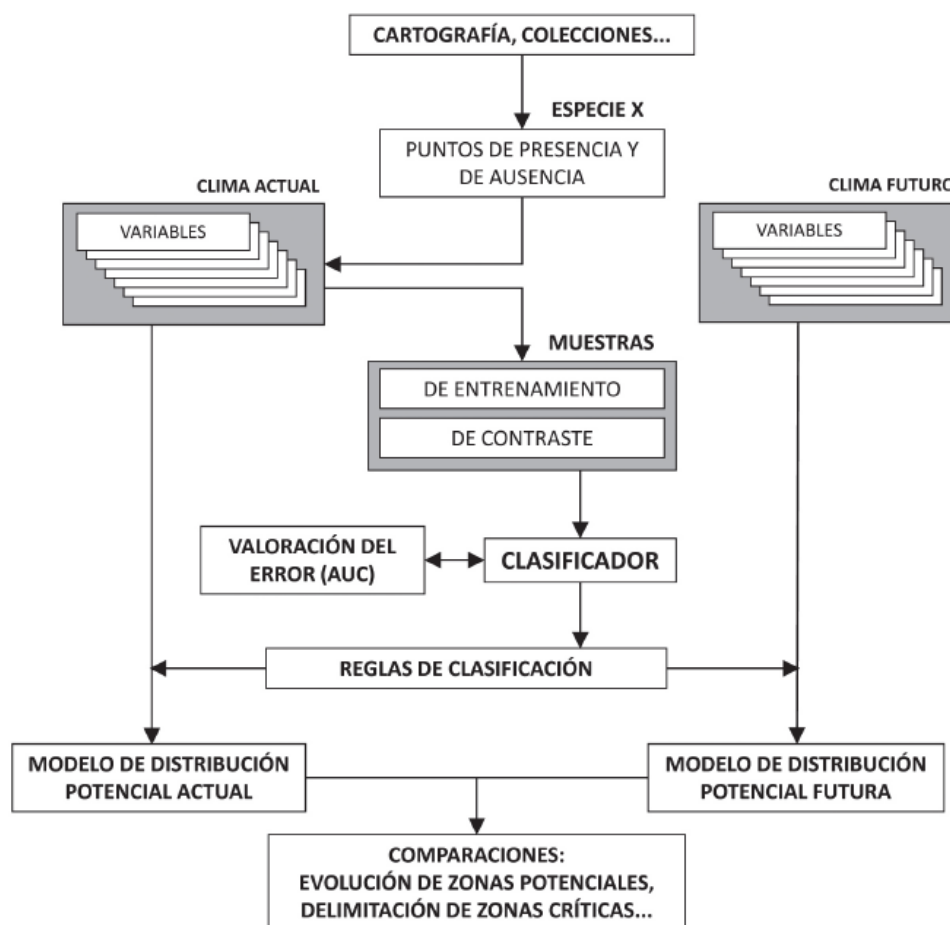
Un área de distribución es una superficie geográfica ocupada por un taxón, en donde este se desarrolla e interactúa, la cual va construyéndose a partir de los lugares en donde se ha registrado su ocurrencia (Espinosa et al., 2001, Zunino y Zullini, 2003 citado en Illoldi-Rangel & Escalante, 2008). La presencia o ausencia de una especie en esta área se encuentra determinada por el nicho ecológico del organismo, es decir: todos los factores abióticos y bióticos, y las interacciones resultantes con éstos; la dispersión, la extinción, la adaptación, los procesos de extinción, las barreras geográficas y la especiación (Soberón y Peterson, 2004 citado en Illoldi-Rangel & Escalante, 2008). En biogeografía, para identificar estos patrones de distribución se utilizan los modelos de distribución de especies (MDE), estos son modelos estadísticos y cartográficos que ayudan a analizar los patrones a nivel espacial de los organismos vivos, extrapolando los datos de distribución de especies en el espacio y el tiempo, y permitiendo la estimación de los requerimientos ecológicos (tolerancias o preferencias de hábitats) de las especies a partir de las asociaciones entre la ocurrencia geográfica de una especie y una serie de variables predictoras, llegando incluso a generar predicciones espaciales (Araújo & Guisan, 2006; Franklin, 2010). Estos modelos parten de la observación de ocurrencia de especies y la posterior recolección de puntos actuales de presencia de estos organismos para representar cartográficamente la idoneidad de un espacio, a nivel pasado, presente o futuro, en función de diversas variables independientes utilizadas como indicadores, las cuales, pueden ser cuantitativas, como la temperatura o elevación, o nominales, como el tipo y uso del suelo. De esta manera, se utilizan dos tipos de fuentes de información: los datos de presencia o ausencia de las especies a modelar, o variables dependientes, y las variables descriptivas del espacio ambiental de la especie, o variables independientes (Mateo et al., 2011; Plissock & Fuentes-Castillo, 2011).

Las variables dependientes son generadas a partir de los muestreos y observaciones de parte de recolectores y se encuentran agrupadas en colecciones de historia natural, como los museos y/o herbarios. Cabe resaltar, que en el proceso de recolección, solo se registran los datos de presencia del organismo, ya que hay diversos factores como la dinámica de una población, la fragmentación del hábitat y la capacidad dispersiva de los organismos que pueden inducir a que una localización sea considerada, a pesar de las características ideales que presente para la existencia del organismo, como una zona de ausencia del mismo, alterando así el resultado del modelo (Hirzel et al., 2002 citado en Benito de Pando & Peñas de Giles, 2007). De igual manera, algunos obstáculos que presentan estas variables es que suelen tener errores en la georreferenciación y en la identificación del taxón recolectado; a la vez, debido a que no poseen una estrategia común de muestreo, la representación que pueden tener de la distribución de la especie recolectada no es fiel a la realidad (Mateo et al., 2011).

Por otro lado, las variables independientes representan al medio abiótico de la especie, el cual afecta a la misma de forma directa o indirecta. Dependiendo de la escala de distribución del organismo dependerá la selección que se haga de las variables a integrar el proceso de modelado, sin embargo, esta selección siempre debe de tener en cuenta la relación potencial que la variable posee con la especie, cuan versátil es esta variable en el área a estudiar, y que las variables elegidas no dependan mutuamente o sean afectadas por la especie a modelar. Algunas variables utilizadas son las climáticas, edáficas, altitudinales, topográficas, hidrológicas, entre otras (Mateo et al., 2011; Anderson, 2015).

Para construir un modelo de distribución, se deben de seguir una serie de pasos. A continuación, se representa un esquema de flujo explicativo.

Figura 1.1.: Esquema de flujo de trabajo para la construcción de modelos de distribución de especies.



Fuente: Mateo et al., 2011

Como muestra la Figura 1.1, se parte de la recolección o toma de puntos de presencia de la especie a estudiar. Una vez se tienen estos datos, se procede a seleccionar las variables climáticas, tanto para el clima actual como para el futuro en caso de hacer un modelo de distribución potencial futura. Posteriormente, se escoge una muestra de los datos para una prueba previa que mida el rendimiento tanto de los datos de la especie obtenidos como el de las variables climáticas. A partir de eso, se hará una clasificación de las variables que mejor aplican para el modelo que se está buscando, según la especie escogida, para poder trabajar con estos. Una vez realizado eso, se juntará toda la información dentro del modelo estadístico elegido, y se obtendrá el modelo de distribución deseado. Finalmente, y si se ha elaborado más de un modelo, se procederá con un análisis de los mismos y una comparación entre ambos junto con la bibliografía pertinente.

Sin embargo, también se deben tener en cuenta ciertas consideraciones al momento de realizar e interpretar los modelos. De acuerdo a Nogués-Bravo (2003), la información que se

obtenga presenta una naturaleza estática (debido a los pocos muestreos que se realizan), esto implica que se asume la existencia de un equilibrio entre el medio ambiente y el patrón de biodiversidad observado. Por otro lado, los modelos estadísticos, los cuales se basan en la correlación, no permiten determinar la causalidad de la misma, es decir, no pueden generar una explicación exacta sobre las relaciones causa-efecto entre las variables y los datos, se centran en la obtención de un modelo lo más preciso y realista posible a partir de la información proporcionada. Sin embargo, al momento de interpretar los resultados, se puede realizar una descripción de las relaciones funcionales entre las variables y los datos (Sokal y Rohlf, 1981 & Box, 1966 citado en Austin, 2002; Nogués-Bravo, 2003).

Los usos que se le dan a los modelos de distribución parten de dos perspectivas claramente definidas por Urbina-Cardona & Flores-Villela (2010 citado en Pliscoff & Fuentes-Castillo, 2011): en primer lugar, el buscar identificar indirectamente la riqueza de las especies en un determinado sitio; y, en segundo lugar, el buscar identificar la distribución de las especies vulnerables y únicas para definir áreas de conservación. En síntesis, ambas perspectivas nos llevan a evaluar el impacto espacial al que se vería expuesta una especie y, partiendo de esto, la oportunidad de generar planes y estrategias de conservación, ya que al generar un modelo de distribución de especies estamos generando una predicción acerca de cómo fue o cómo potencialmente podría evolucionar el espacio en donde se desarrolla la especie de estudio.

En la actualidad, los modelos de distribución de especies se han vuelto frecuentes en estudios de biogeografía, biología de la conservación, ecología, paleoecología y gestión de la vida silvestre, siendo aplicados socio-ambientalmente de varias maneras (Araújo & Guisan, 2006; Cayuela et al., 2009; Bravo et al., 2011; Pliscoff & Fuentes-Castillo 2011; Varela, Lobo & Hortal., 2011; Morales, 2012):

- Cuantificación del nicho ecológico para las especies.
- Conservación de especies endémicas o amenazadas.
- Evaluación de patrones de propagación de especies invasivas.
- Planificación y priorización de zonas para iniciativas de conservación biológica y restauración ecológica.
- La distribución pasada de las especies.
- Distribución potencial futura frente a los impactos del cambio climático.

1.1.2.1 Aplicaciones de los MDE

Modelos aplicados a entender las distribuciones pasadas

Dado que los modelos de distribución pueden proyectarse a través del tiempo, es posible generar la paleo distribución de un organismo y analizar su evolución hasta la actualidad. El poder evaluar el desarrollo histórico de un organismo “permite conocer los antecedentes claves tanto para caracterizar de mejor forma la distribución actual como para hipotetizar cómo serán los cambios esperables en el futuro” (Pliscoff & Fuentes-Castillo, 2011, p. 69). Para poder aplicar un modelo paleo biogeográfico se necesitan de registros fósiles, así, en el caso de las especies vegetales, estos serían registros palinológicos (registros de polen). Debido a que esta información es difícil de obtener, o no existen registros de ellos, en su lugar se utiliza una combinación de datos presentes de distribución de las especies, datos paleo climáticos (como los que proporciona Worldclim¹) y algoritmos de modelamiento estadístico que permiten simular la posible distribución potencial de las especies en el pasado e incluso su evolución (Varela et al., 2011).

Modelos de distribución futuros frente al cambio climático

Del mismo modo, y en un campo mayor de estudio, los modelos de distribución sirven para predecir cómo se vería afectada la distribución de diversas especies frente a distintos escenarios de cambios climáticos, de acuerdo a los niveles de CO₂ presentes en la superficie terrestre (IPCC²). De esta manera, frente a eventos como el cambio climático, los MDE sirven para identificar el nivel de respuesta de las poblaciones ante cambios a nivel biótico, pudiendo establecer cuáles son las especies más vulnerables al cambio climático, las especies que pueden ser beneficiadas, y, a partir de esto, generar estrategias de conservación y manejo (Bravo, Sánchez & Gelviz-Gelvez, 2011).

Sin embargo, una dificultad existente tanto en las distribuciones a nivel futuro como paleo biogeográficas, es que muchas veces las proyecciones climáticas, al asumir que sufren un cambio lineal en su comportamiento, dan como resultado climas no análogos, es decir, climas nuevos o no existentes en la actualidad, lo cual presupone una situación de incertidumbre al no saber cómo es que se desarrollaría la especie en estudio ante esa nueva situación climática (Pliscoff & Fuentes-Castillo, 2011). Esto es producto de asumir que las

¹ <http://www.worldclim.org/paleo-climate1>

² Quinto Informe de Evaluación (AR5) <https://www.ipcc.ch/report/ar5/>

especies y los factores físicos, en este caso climáticos, se encuentran en equilibrio; sin embargo, que esto suceda no implica que la especie vaya a tener la habilidad de seguir los cambios a futuro que puedan darse (Araújo & Pearson, 2005).

Graham, Loisele, Velásquez-Tibatá & Cuesta Camacho (2012) explican algunas consideraciones que se deberían de tomar en cuenta al momento de pronosticar distribuciones a futuro, y resaltan tres:

- Las variables predictoras ambientales, las cuales deben de tener una base biológica entre especie y variable ambiental (como la temperatura). Estas variables predictoras derivan de dos fuentes: un escenario de emisión y un modelo climático global.
- Los datos de presencia de especies, las cuales deben provenir de una amplia gama de ambientes en la que la especie pueda habitar para así, poder proporcionar un resultado más completo de las condiciones ambientales futuras.
- El método de modelado y evaluación. Hay una amplia variedad de modelos sobre climas futuros, los cuales no obtienen los mismos pronósticos. Por eso, para determinar si un modelo pronostica adecuadamente las distribuciones futuras, es necesario que pase por una evaluación que mida su rendimiento. La medida más común de evaluación es la curva de la característica operativa del receptor (AUC) que mide el rendimiento del modelo en todas las situaciones probables.

1.1.2.2 Modelado de Máxima Entropía: Maxent

Un algoritmo de distribución de especies sumamente empleado por investigadores para determinar las distribuciones de diferentes especies, tanto vegetales como animales, es el algoritmo de modelamiento de máxima entropía. Este algoritmo se basa en el principio de máxima entropía, el cual estima una distribución de probabilidad usando la distribución más uniforme, en donde la entropía sea máxima, pero teniendo en cuenta ciertas limitaciones o restricciones (que representan la información incompleta sobre la distribución) a partir de la información que se tiene disponible del objeto de estudio (Phillips, Anderson & Schapired, 2006; Torres & Jayast, 2010; Timaná & Cuentas, 2015). En el caso de un estudio biogeográfico, se estimaría la distribución más uniforme de los puntos de ocurrencia del taxón dentro del área de estudio, pero teniendo en cuenta las restricciones de las variables ambientales utilizadas. Una distribución con máxima entropía es una buena aproximación para estimar una distribución desconocida, esto debido a que acepta todo lo conocido, pero evita lo que no se conoce dado que está sujeta a un conjunto de limitaciones conocidas que

representan la falta de información que se tiene acerca de la distribución de destino (Franklin, 2010).

Para la ejecución de este algoritmo se utiliza el software Maxent (Phillips et al., 2006), el cual es un método que permite estimar la distribución probable de máxima entropía de un organismo, es decir, permite aproximar el rango de distribución total en el que probablemente pueda ocurrir una especie dentro de un área (Scheldeman & van Zonneveld, 2011). Este programa posee una serie de ventajas indicadas por Phillips et al. (2006) y Morales (2012): requiere solamente la data de presencia de la especie junto con las variables medio ambientales para hacer predicciones, no necesita de los datos de ausencia de la especie, y, además, puede incorporar interacciones entre distintas variables predictoras.

Las características de Maxent se basan en las variables ambientales, que son las que utiliza para establecer predicciones, y son de dos tipos: las variables continuas, las cuales toman valores reales arbitrarios que corresponden a cantidades que pueden ser medidas, como la altitud, la precipitación anual y la temperatura máxima; y las variables categóricas, que sólo toman un número limitado de valores discretos como por ejemplo el tipo de suelo o vegetación (Phillips & Dudík, 2008).

Los resultados del análisis de los modelos de distribución que se obtengan al aplicar Maxent se utilizan principalmente para identificar sitios con ambientes similares a aquellos donde ya se ha encontrado la presencia de una especie, pero también se utilizan para identificar áreas de colecta, para priorizar zonas para programas de conservación y restauración ecológica, modelar los efectos del cambio climático sobre los ecosistemas y el evaluar los patrones de propagación de especies invasoras (Scheldeman & van Zonneveld, 2011; Morales, 2012).

1.1.3 Conociendo al género *Polylepis*

El género *Polylepis* Ruiz & Pav. deriva su nombre de las palabras griegas “poly” y “letis”, que significan “muchas” y “láminas” respectivamente, haciendo referencia a su corteza que se desprende en múltiples capas, una característica común en todas las especies del género (Soukup, 1970; Simpson, 1979); sin embargo, en el medio andino, los bosques de *Polylepis* son mayormente conocidos por la población local como bosques de “queñuales” o “queñoales”. El género forma parte de la familia Rosaceae, abarcando hasta 27 tipos diferentes de especies (Simpson, 1979), de las cuales, Perú posee 19 de estas especies (Mendoza & Cano, 2011), cada una con una morfología determinada y zona de vida

específica dentro de los Andes, por lo que se pueden diferenciar una de otra. A estas especies se les conoce comúnmente por distintos nombres, entre los cuales están “queñoa”, “quinuar”, “keñua”, “kehuiña”, “keshua”, “quinua”, “quiñual”, “quinhuar” y “queuna” (Weberbauer, 1945; Simpson, 1979; Gade, 1999; Mendoza & Cano, 2012).

Polylepis es considerado uno de los pocos grupos arbóreos de la sierra peruana ubicados en la zona puna, marcando el límite absoluto de altitud con otras coberturas vegetales, debido a esto llegan a resistir las temperaturas frías extremas, vientos fuertes y una intensa insolación, formando bosques junto a los glaciares (Weberbauer, 1945; Pretell, Ocaña, Jon & Barahona, 1985; Lao, Zevallos & De la Cruz, 1990; Gade, 1999). Suelen evitar las áreas planas, por lo que se les encuentra en las laderas menos expuestas con presencia de neblina de los “valles profundos y estrechos, mesetas onduladas en altitudes medias y elevada, tanto en la Cordillera Oriental y Occidental, así como en la zona interandina que se encuentra entre estas dos Cordilleras” (Mendoza & Cano, 2012).

Pueden crecer en varios tipos de suelo (aunque son susceptibles a condiciones de suelo salobres o al agua estancada), ocupando terrenos pedregosos o peñascosos, fondos de valle y quebradas con suelos profundos (Weberbauer, 1945; Pretell et al, 1985; Kessler 1995a citado en Kessler, 2006). A pesar de que los lugares donde se ubican los bosques de queñoa no estén edáficamente bien desarrollados, los árboles consiguen las condiciones favorables para vivir penetrando sus raíces entre las rocas para no ser derrumbados por los fuertes vientos que ocurren en estos hábitats (Mendoza, 2000 citado en Mendoza & Cano, 2012).

Debido a su ubicación en estas zonas, *Polylepis* está sometido a grandes fluctuaciones de temperatura durante el día y la noche que llegan a afectar a los árboles, por lo cual, éstos han ido desarrollando adaptaciones para resistir las bajas temperaturas y los cambios entre épocas húmedas y secas. Algunas adaptaciones son de carácter morfológico: cortezas y hojas más gruesas, hojas e inflorescencias más pequeñas; mientras que otras adaptaciones son de carácter fisiológico: resistencia al congelamiento (Kessler, 2006, Mendoza & Cano, 2012). Por ejemplo: *Polylepis* cambia la energía de la reproducción sexual a asexual cuando las temperaturas son bajas y la disponibilidad de humedad es limitada, así, permite que el taxón persista en ambientes de condiciones desfavorables (Fjeldså & Kessler, 1996). Por otro lado, a diferencia de la mayoría de las plantas, el crecimiento vegetativo del género se da en la época húmeda y caliente, mientras que la floración se da en la época seca y fría (Kessler, 2006). Además, la polinización de esta especie se da principalmente por acción del viento, lo

que le ha permitido adaptarse a las zonas de altitudes mayores, y colonizar grandes áreas de los Andes.

Finalmente, frente a estas adaptaciones, se ha desarrollado un hábitat para la existencia de varias otras especies vegetales y animales. Así, estos bosques sirven de refugio de varios insectos, hábitat para diversos mamíferos (ratón andino, tarucas, venados grises, zorros, zorrinos y pumas), aves (picaflor cordillerano, colibrí azul, torito de pecho gris, churrete real, tijeral blanco), y conviven con otras especies vegetales (gramíneas, orquídeas, bromeliáceas, *Gynoxis sp.*, *Escallonia resinosa* y *Escallonia mirtilloides*) (Weberbauer, 1945; Peñaherrera del Águila et al., 1986b; Fjeldså, 2002; MINAM, 2014, 2015). De igual manera, al ser el hábitat de muchas aves, son escenario de la práctica de birdwatching por los humanos.

1.1.3.1 Caracteres morfológicos

*Figura 1.2.: Bosque de *Polylepis weberbaueri* en el Parque Nacional Huascarán.*



Fotografía: Gabriela Flores, 2016

Según afirma Kessler (2006), el género *Polylepis* contiene “en su mayoría árboles de 5 a 10 metros de altura, pero también algunas especies arbustivas, y otras que llegan a superar los 25 metros”. Esto depende de la altitud en la que se encuentren las especies, las que crecen en elevaciones bajas forman árboles altos, mientras que las que crecen en elevaciones altas forman arbustos. Dependiendo de esto, cada especie presentará diferentes características morfológicas de acuerdo al nivel altitudinal en el que se desarrolle, sin embargo, como

género, los bosques de *Polylepis* presentan características únicas y una composición determinada (Simpson, 1979; Pretell et al, 1985; Lao et al., 1990; MINAM, 2014):

- Los árboles y arbustos de queñua contienen abundante ramificación, y dado que esta suele darse desde la base de un tronco retorcido, la copa es difusa e irregular.
- La corteza es de color rojizo a marrón-amarillento que va desprendiéndose continuamente en capas con un espesor de hasta 3 cm. De esta manera el árbol evita que los vientos helados congelen su savia (ver Figura 1.3).
- Las ramas suelen ser encorvadas debido a las condiciones extremas que tiene que soportar: clima frío, fuertes vientos, fenómenos de sequía.
- Las hojas del género son compuestas e imparipinnadas, siendo el número de folíolos los que varían según cada especie y la característica más útil para distinguir las especies entre sí. Además, “el tamaño de la hoja puede variar según las condiciones donde crece, siendo más grande en los terrenos húmedos” (ver Figura 1.4).
- Las flores poseen características propicias para la polinización por el viento: ausencia de pétalos, sépalos verdes y ausencia de néctar.
- Los frutos son indehiscentes y presentan una sola semilla. Predomina su dispersión por el viento, sin embargo, algunos frutos presentan espinas que permiten la dispersión por pájaros, estos pueden llevarlo enganchado en sus plumas.

Figura 1.3.: Corteza de Polylepis.



Fotografía: Gabriela Flores, 2016

Figura 1.4.: Hojas de *Polylepis*.



Fotografía: Gabriela Flores, 2016

La mayoría de los bosques de *Polylepis* están compuestos por solo una o dos especies, además de otras especies de árboles de acuerdo a la altitud en la que se encuentren; sin embargo, en ciertas áreas específicas, se pueden encontrar más de dos especies conviviendo juntas. Esto se explica debido a que algunas especies son únicas a ocurrir en un área específica, mientras que otras, tienen un rango más amplio de distribución, por lo cual pueden ocurrir en distintas zonas ecológicas (Fjeldså & Kessler, 1996). Este traslape de hábitats, sin embargo, tiende a producir hibridación (Mendoza & Cano, 2012).

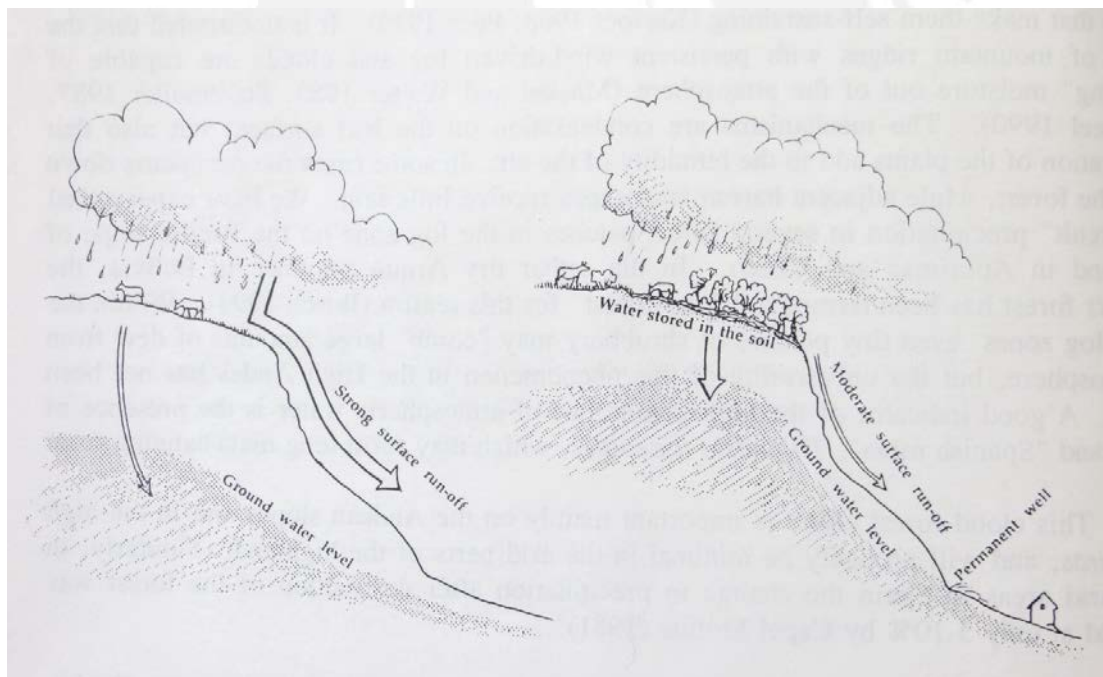
1.1.3.2 Usos de *Polylepis* en el área andina

Los bosques de *Polylepis*, al ser bosques de montaña, constituyen para los pobladores de las zonas andinas un elemento primordial en su vida diaria, no solo en la actualidad sino desde la época prehispánica, al formar parte de su economía andina, respetando y aprovechando de la mejor manera cada piso ecológico y cada microclima existente (Ansión, 1986). Actualmente, estos bosques cumplen para las zonas andinas una gran importancia por los servicios ecosistémicos que brindan a diferentes niveles, siendo considerados en cierta medida como protectores de las cuencas hidrográficas (Pretell et al, 1985).

Fjeldså & Kessler (2004) mencionan algunos de los principales servicios ambientales que los bosques de queñua provisionan tanto al ser humano como al medio natural:

- El incremento de la precipitación; las áreas cubiertas de grandes bosques en la zona tropical pueden, al rescatar la humedad de la atmósfera a manera de rocío, producir un clima local haciéndolas de esta manera auto sostenibles.
- La capacidad de captura de agua, permitiendo tener agua subterránea a manera de manantial de forma permanente para los valles agrícolas en las zonas más bajas, esto sucede ya que hay una filtración lenta del agua y por ende un buen almacenamiento de este recurso, lo que conlleva a la regulación de la escorrentía de agua.
- Promueven un sistema de agua limpio y potable ya que el suelo del bosque retiene las impurezas y degrada los componentes orgánicos que se filtran del agua de lluvia, llevando corriente abajo agua libre de sedimentos y apta para beber.
- También ofrecen un control de la erosión, protegiendo y estabilizando el suelo contra la escorrentía superficial del agua generada por el impacto de la lluvia. De esta manera, permiten que el agua se almacena en el suelo y permite un escurrimiento superficial moderado hacia las partes bajas (ver Figura 1.5).

Figura 1.5.: Comparación entre dos situaciones de flujo de agua subterránea, con y sin bosques de montaña.



Fuente: Fjeldsá & Kessler, 1996

- La retención de sedimentos y nutrientes producida ya sea por el bosque mismo, la vegetación herbácea que habita en él y escombros, o por los distintos animales que habitan y generan sus desechos en el sitio.

- Otra característica es su rol como productores de madera; al ser su madera muy dura es utilizada como leña para construcciones en el campo, manufactura de herramientas y como combustible.
- Por otro lado, al ser hábitat de una variedad de plantas también generan productos no maderables: tubérculos comestibles, plantas medicinales y arbustos aromáticos.
- Estos bosques permiten la agroforestería ya que poseen un microclima más cálido, libre de heladas, y apta para la siembra de diversos tubérculos y cereales.
- Finalmente, sirven como refugio de muchos animales.

De igual manera, estos bosques son utilizados por el ser humano para diferentes fines. Uno de estos fines, indican Reynel & Felipe-Morales (1987), es que son aptos para la reforestación en la zona andina. Sirven como cerco vivo alrededor de la hacienda y vivienda del agricultor, esto permite proteger al cultivo del clima, el viento, las heladas, y para proteger los suelos ante la erosión. Esta es una forma de manejar las laderas para que se pueda utilizar la zona para la actividad agrícola. También se emplea para la construcción de vallas y cercos para el ganado (Reynel & Marcelo, 2009).

Entre otros de los usos que posee el género *Polylepis* está el utilizar su madera para la carpintería, elaborando mangos de herramientas de labranza y artesanías. Al contar con una madera de alta durabilidad natural, se le utiliza en la construcción rural de vigas, puertas y ventanas, así como de herramientas agrícolas (yugos, raucanas, taellas) (Yacovleff & Herrera, 1935; Soukup, 1970; Lao et al., 1990).

A la vez, las hojas y ramas, al ser trituradas y hervidas, generan un tinte que es empleado para teñir prendas de lana y algodón, así como para curtir el cuero (Soukup, 1970; Gade, 1975); mientras que su corteza interna se utiliza con fines medicinales (*P. racemosa*) y en la medicina tradicional a manera de infusión para las afecciones respiratorias (Weberbauer, 1945; Reynel & Marcelo, 2009).

1.1.3.3 Distribución geográfica del género

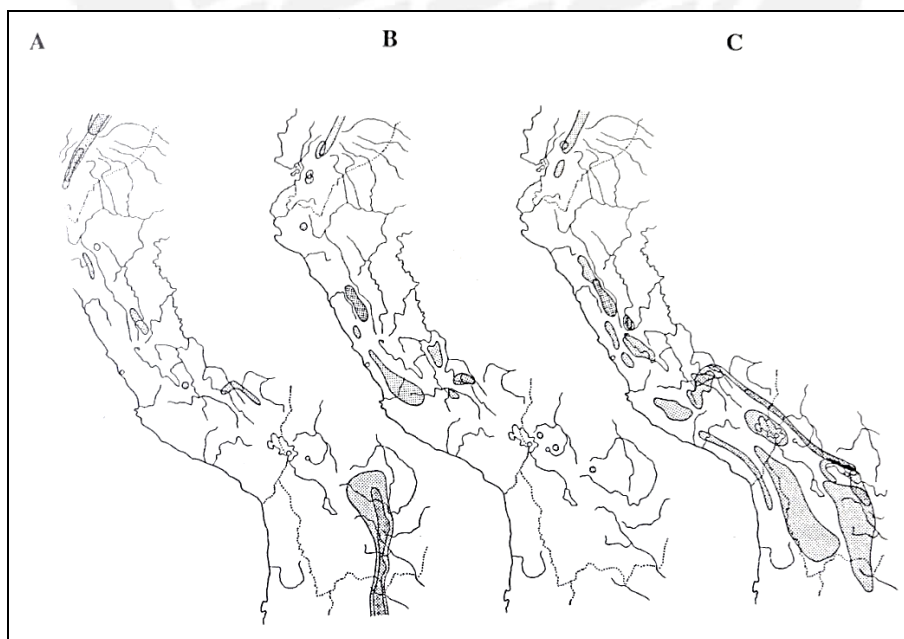
El género *Polylepis* es exclusivo de los Andes tropicales de América del Sur, distribuyéndose desde el norte de Venezuela hasta el norte de Chile confluyendo con Argentina (Kessler, 2002). Muchas de las especies crecen a elevaciones extremadamente altas, sobre los 5000 msnm, pero también hay otras especies que pueden crecer en elevaciones mucho más bajas, llegando a los 1800 msnm (Simpson, 1979), por lo cual, el

género tiene una distribución bastante variada y cada especie posee características ecológicas exclusivas de acuerdo al área de distribución dentro de los Andes (Zutta et al., 2012).

Su distribución natural fue y sigue siendo debatida, debido principalmente a la alta fragmentación que estos bosques presentan (Zutta et al., 2012), sin embargo, se ha podido establecer distribuciones específicas de acuerdo a ciertas variables. Por ejemplo, Fjeldså & Kessler (1996) establecen una distribución de las especies de acuerdo a la edad evolutiva de las mismas. Los autores indican que su evolución está en función al desarrollo que tuvo el género *Polylepis* (a través del número de folíolos y flores, el grosor de las hojas, la presencia de una capa protectora de pelos en las hojas, el tamaño de los árboles, entre otras características) para adaptarse a los ambientes más fríos y difíciles de las elevaciones más altas. De esta manera, las especies más jóvenes serían las más especializadas a estos ambientes. Aunque afirman que este patrón no provee ninguna indicación acerca de los orígenes geográficos de *Polylepis*, sí asumen que hay más probabilidad de que se haya originado en el bosque húmedo montano que en la zona de puna. Por consiguiente, ambos autores dividen la distribución de *Polylepis* de la siguiente manera (ver Figura 1.6):

- A. Las especies más primitivas: distribuidas a lo largo de laderas andinas húmedas.
- B. Las especies de edad media: en las cordilleras de Ecuador y Perú.
- C. Las especies jóvenes: Perú y Bolivia, en las cordilleras altas y la zona de puna.

Figura 1.6.: Distribución de especies de *Polylepis* según su edad evolutiva.



Fuente: Fjeldså & Kessler, 1996

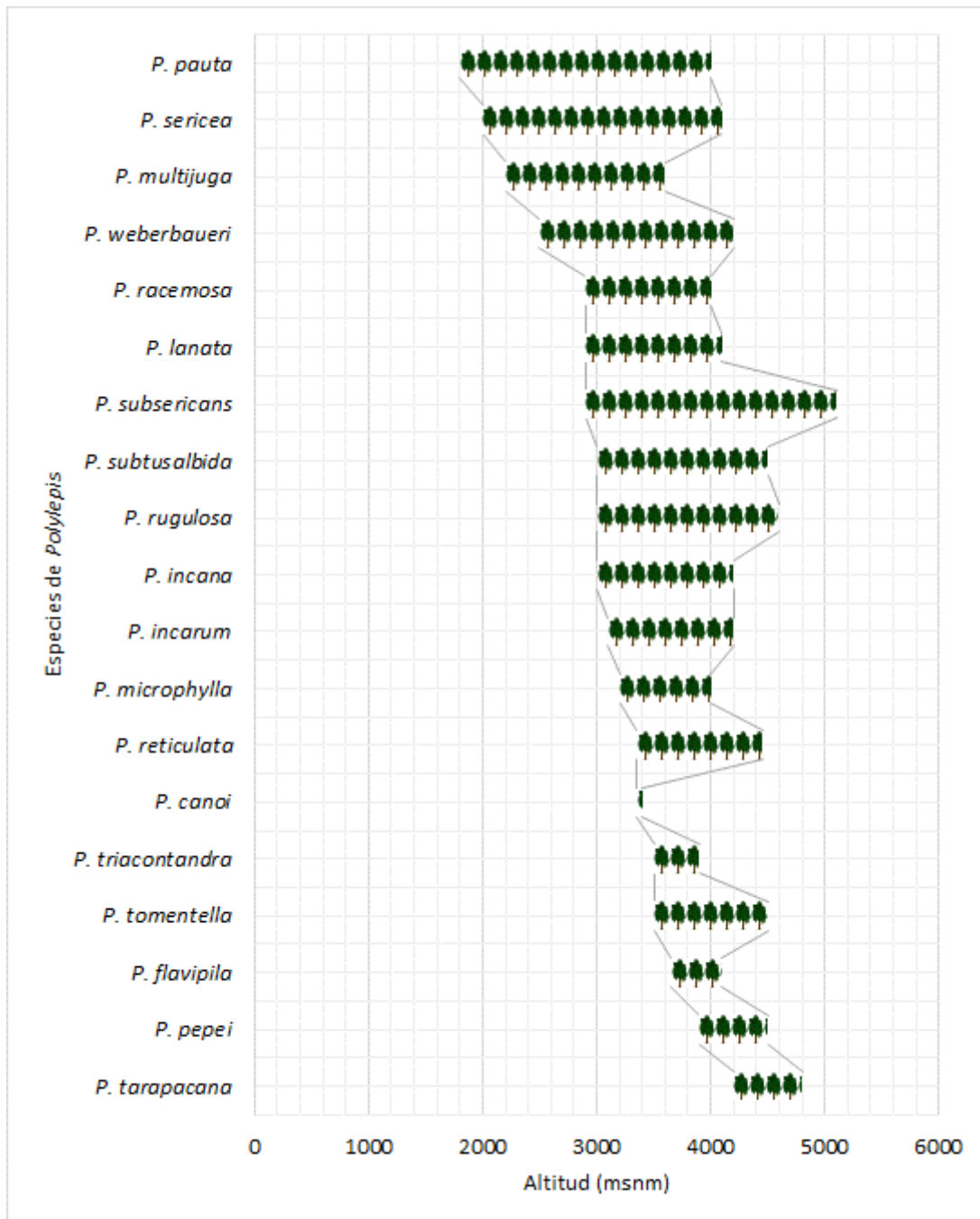
Para el caso de las especies de *Polylepis* que solo se distribuyen en el territorio peruano, Mendoza & Cano (2012) afirman que la especie más primitiva se puede haber originado en los Andes del norte del Perú. Esto debido a que en esta zona se desarrolla la especie *Polylepis multijuga*, una de las más primitivas de todo el género. A partir de esta especie se pudo dar la colonización a lo largo de los Andes hasta el sur del Perú donde actualmente hay una gran concentración de especies. Los autores establecen una distribución a partir de factores climáticos y edáficos en tres zonas dentro del Perú:

- Zona 1 - Ceja de Selva, Selva Alta o Yunga: con una precipitación anual de 1500 a 3000 mm y una temperatura media de 8-19 °C. Algunas especies llegan a formar parches homogéneos. Principalmente distribuidas en la Cordillera Oriental.
- Zona 2 - Puna Húmeda: con una precipitación anual de 250 a 1200 mm y una temperatura media de <0-8 °C. Son bosques fragmentados ubicados en los valles interandinos y parte de la Cordillera Oriental.
- Zona 3 - Puna Seca: con una precipitación anual de 250-500 mm y una temperatura media de <0-15 °C. Son bosques fragmentados ubicados en los valles interandinos y parte de la Cordillera Occidental.

En lo referente a la riqueza del género, distintos autores han venido estimando un distinto número de especies. MacBride (1938) y Herrera (1943) mencionan la existencia de 12 especies, Simpson (1979) de 10 especies, Brako & Zarucchi (1993) de 9 especies, Fjeldså & Kessler (1996) de 11 especies y Kessler & Schmidt-Lebuhn (2006) mencionan la presencia de 14 especies de *Polylepis* dentro del territorio peruano. Sin embargo, actualmente se ha estimado la existencia de 19 especies, de un total de 27 especies registradas (Mendoza & Cano, 2011, 2012) en 19 de los 24 departamentos, dentro de los cuáles, los departamentos de Cusco, Ayacucho, Ancash, Junín y Lima son los que mayor riqueza de especies de *Polylepis* poseen.

Estas 19 especies identificadas se distribuyen altitudinalmente en los Andes peruanos desde los 1800 msnm con la especie *P. pauta*, hasta los 5100 msnm con la especie *P. subsericans*; sin embargo, la mayoría de las especies se encuentran distribuidas entre los 3000 a 4000 msnm (Mendoza & Cano, 2012). La Figura 1.7 muestra el rango de distribución altitudinal de las especies de *Polylepis* del territorio peruano, basado en el estudio hecho por Mendoza & Cano (2012).

Figura 1.7.: Rango de distribución altitudinal de las especies de *Polylepis* identificadas para el Perú.



Elaboración propia

Empero, pese a la información existente, desde el siglo pasado se arguye la dificultad de determinar la distribución geográfica de cualquier especie de *Polylepis* con exactitud. Simpson (1979) fundamentó que es debido a dos razones:

- a) Las especies de este género suelen ocurrir en altas elevaciones y en micro hábitats, por lo que las colecciones que se realizan de las mismas tienden a concentrarse en

zonas con mayor accesibilidad dando como resultado una visión muy parcial de los lugares de ubicación de los rodales.

- b) El continuo crecimiento de la población humana a través de los siglos ha incrementado la deforestación de estos bosques, lo que sumado a la muerte natural de los mismos generó una modificación en la extensión espacial del género; ante este proceso de deforestación el poblador andino comenzó a plantar árboles de queñua cerca de sus casas creando rodales nuevos.

De esta manera, en la actualidad, la distribución del género *Polylepis* se vería sesgada por un patrón de distribución aparente que no guarda relación con la distribución original que en algún momento tuvo la especie debido a) al tipo de muestreo que se utiliza para recolectar los especímenes, y b) a la ubicación desordenada de las especies de queñuales a raíz de la deforestación de los bosques, resultado de la presión ejercida por las poblaciones humanas en los Andes a lo largo del tiempo a través del pastoreo del ganado, el fuego y la expansión de las carreteras (Kessler, 2002; Zutta et al., 2012).

1.2 ANTECEDENTES

1.2.1 Historia de los bosques alto andinos en el Perú

Los bosques alto andinos son ecosistemas forestales que poseen diversas especies arbóreas o arbustivas endémicas adaptadas especialmente a las características del medio andino, como el clima, la humedad y/o la pendiente. Su rango altitudinal varía de acuerdo a los países, pero en general se distribuyen desde los 800 a 4800 msnm (Rham & van Dam, 2005). A lo largo del tiempo los Andes han sufrido un impacto en el paisaje, producto de la acción del clima y los humanos, los cuáles resultan en la actual extensión de los bosques alto andinos (Kuentz et al., 2011).

En el Pleistoceno, durante los períodos glaciares, ocurrió una etapa de alteración ecológica de la superficie de la puna altiplánica. A lo largo de ambas laderas de las cordilleras de Venezuela, Colombia y Ecuador, y también en los Andes orientales de Perú y Bolivia, hubo una disminución de las zonas de vegetación y fragmentación de las poblaciones existentes, causando la diferenciación entre taxones y la propagación de distintas especies de alta montaña (Simpson, 1975). Llegado el periodo postglacial del Holoceno (hace 11 000 años atrás) ocurrieron los principales cambios ambientales en las zonas altas de los Andes centrales, relacionadas con la variabilidad climática y la influencia de las circulaciones del

Pacífico y del Atlántico, además de que estas zonas comenzaron a ser colonizadas (Kuentz et al., 2011). Esta variabilidad climática afectó severamente a algunas especies arbóreas alto andinas, generando una reducción en su manto forestal, sin embargo, algunas otras especies, como *Polylepis* (*P. tarapacana* y *P. tomentella*), sí fueron capaces de adaptarse por lo que su distribución se vio aumentada (Dolifus, 1981 citado en Ansión 1986; Baied, 1999 citado en Capriles, 2002).

Además, estos bosques también se vieron expuestos a incendios naturales debido a periodos largos de sequía y a deslizamientos de tierra, los cuales llegaban a producir la reconfiguración de la topografía e hidrografía de la zona (Gade, 1999). Sin embargo, es con la aparición de la agricultura y el pastoreo que, hace aproximadamente 5000 años, se da una conversión del paisaje; quemando las áreas de los bosques para convertirlas en pastizales aptos para el pastoreo de llamas, tarucas y vicuñas se produjeron cambios ecológicos muy significativos (Ansión, 1986; Gade, 1999; Herrera & Ali, 2009; MINAM, 2014). Las sociedades prehispánicas utilizaban la madera de los bosques como leña y para la construcción de diversos productos: para elaborar los telares, puentes, techos, instrumentos musicales, figuras, armas de mano, herramientas para la agricultura (chaquillacta) y como forma de tributo (Ansión, 1986; Gade, 1999; Capriles, 2002). En el caso de los bosques de *Polylepis* ubicados en Bolivia, estos eran usados por el grupo étnico Carangas como combustible, pero también como ornamentos para adornar los caminos, para el transporte de piedras y para fines religiosos, ya sea en forma de keros como parte de ritos funerarios o como vigas en la arquitectura religiosa (Capriles, 2002). A pesar de su amplia utilización para diversos fines, las sociedades prehispánicas también manejaban la reforestación de esta especie como una práctica esencial para la gestión del combustible (Johannessen & Hastorf, 1990). Además, los árboles y la madera en los Andes poseían una dimensión social, simbólica y política (Hastorf & Johannessen, 1991 citado en Capriles, 2002; Kuentz et al., 2011), llegando a ser considerados como entes sagrados (Ansión, 1986); sin embargo, este vínculo se rompió debido a factores culturales después de la conquista española, lo cual aceleró la destrucción de muchos bosques en los Andes (Gade, 1999).

La utilización de la madera de los bosques alto andinos se incrementó durante la Colonia, la conversión de bosques nativos a tierras agrícolas fue mucho mayor tras aplicarse nuevas técnicas agrícolas para el uso de las tierras; asimismo, trajo cambios en el patrón normal de uso de la leña de los bosques como combustible (Johannessen & Hastorf, 1990), siendo utilizada en hornos de minería, hornos de cal y ladrillos, y hornos para preparar pan.

También hubo una mayor necesidad de leña para construir ciudades y para abastecer a las minas, las cuáles se desarrollaron en gran medida y tuvieron un efecto negativo en la vegetación arbórea (Ansión, 1986). Por ejemplo, en Huancavelica, los bosques fueron utilizados por los mineros españoles para alimentar sus hornos de mercurio (Favre, 1975:420 citado en Gade, 1999; Capriles, 2002). Por otro lado, la introducción y domesticación de ganado vacuno, caprino y ovino generó la práctica del pastoreo, la cual necesitaba de amplias áreas de pastos para pastar, pero menos gente que la agricultura (Peñaherrera del Águila et al., 1986b; Rham & van Dam, 2005). Esta práctica permite a los animales limpiar las áreas, provocando la erosión del suelo e impidiendo el crecimiento de árboles alto andinos leñosos (Johannessen & Hastorf, 1990; Purcell, Brelsford & Kessler, 2004); así, con la expansión territorial gracias al pastoreo, el suministro de leña caía. Sin embargo, los centros urbanos establecidos por los españoles utilizaban más madera que la gente nativa (MINAM, 2016). Según Cobo (1956 citado en Gade 1999), más leña se quemaba en la casa de un español en un día, que en la vivienda de un indio en un mes.

Este cambio en el sistema social provocó una degradación mucho mayor de los bosques de los Andes; por ejemplo, según Hastorf, Whitehead & Johannessen (2005), en el Valle del Mantaro, la mayoría de las especies leñosas fueron taladas durante los primeros 50 años de su ocupación y utilizada, para el caso específico de los queñuales, como carbón y leña (ver también Jiménez de la Espada, 1885). Sin embargo, cabe resaltar que la madera ya era escasa antes de la conquista española, dado que era un recurso valioso como leña y de importancia económica (Purcell, Brelsford & Kessler, 2004). De esta manera, desde antes de la conquista, ya existían restricciones en cuanto al acceso, cuidado y comercio de la leña de los bosques andinos. Durante el Imperio Incaico, el Inca controlaba los bosques y establecía reglas para la siembra y el uso de los lotes de madera, recogiendo grandes cantidades de madera en forma de tributo para fines ceremoniales y variados (Hastorf, Whitehead & Johannessen, 2005). Durante la Colonia, en 1551, en Lima, se instituyó un programa de plantación de árboles, y ciertas ordenanzas que regían la tala de árboles y el uso de combustible (Jiménez de la Espada, 1965 citado en Johannessen & Hastorf, 1990, 78). En este, se ordenaba a los propietarios de tierras que plantaran árboles, y se les imponía sanciones tanto a los españoles como a los indios que fabricaran carbón vegetal, cortaran leña y/o la utilizaran en hornos. Posteriormente, según Sherbondy (1986 citado en Johannessen & Hastorf, 1990, 78), en 1590, en el valle de Cuzco, los españoles instauraron un programa de reforestación de 2400 árboles en distintos grupos comunitarios, plantándose

árboles de las especies *Buddleja*, *Escallonia*, *Alnus* y *Polylepis*. Por ende, el control sobre los recursos forestales y el combustible fue un instrumento importante para las distintas autoridades a lo largo del tiempo, en el periodo preincaico, con el Inca y luego con las ordenanzas españolas.

En conclusión, los bosques alto andinos han sufrido una transformación en su manto forestal debido a cambios ambientales hace miles de años y la continua destrucción por parte del ser humano mediante la agricultura de roza y quema, la ganadería extensiva y la tala con fines madereros (Walschburger, 1988). Sin embargo, esto no implica que no hayan existido también reglamentaciones para su cuidado y protección. Actualmente, el proceso de degradación de los bosques continua, y el día de hoy, la leña sigue siendo utilizada como fuente de energía en el medio rural y los campesinos continúan quemando las punas para obtener pastos frescos y así poder alimentar al ganado (MINAM, 2014, 2016). Esto provoca una alteración en los sistemas de regulación hídrica, ya que no hay vegetación que pueda retener el agua de lluvias, lo cual fomenta el desborde y secado de ríos -en la época húmeda y seca respectivamente-, y el aumento de erosión en los valles aluviales (Walschburger, 1988). Además, a esto se le suman otras amenazas como el fuego, la expansión urbana, el desarrollo de infraestructuras y la minería (Tejedor Garavito, Newton, Golicher & Oldfield, 2015).

1.2.2 El cambio climático y su impacto en la distribución de especies andinas

El cambio climático es un fenómeno inequívoco, caracterizado por la alteración de los sistemas climáticos debido al aumento en las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI). Este aumento es ocasionado, principalmente, por el uso de combustibles fósiles y los procesos industriales, producto de las distintas actividades humanas iniciadas en la era preindustrial, las cuales han contribuido en un 78% al aumento de las emisiones de GEI entre los años 1970-2010 (IPCC, 2014). Esta alteración climática produce varias respuestas ambientales, entre las que se encuentra el calentamiento de la atmósfera y el océano, la disminución de los volúmenes de nieve y hielo, sequías, alteración en los regímenes de precipitaciones, la elevación del nivel del mar y la ocurrencia de fenómenos climáticos extremos. Igualmente, como consecuencias de estas variaciones, muchas especies terrestres y marinas han, e irían, modificado sus áreas de distribución geográfica, sus actividades estacionales y comportamientos migratorios (IPCC, 2014; MINAM, 2015a).

Estas respuestas ambientales generan una serie de impactos tanto en los ecosistemas humanos como naturales, siendo estos últimos los que mayor evidencia presentan. Los glaciares son el indicador más visible del cambio climático, debido a su sensibilidad a las variaciones climáticas que permite notar el crecimiento o desglaciación de los mismos y la rapidez con la que ocurren (Vuille et al., 2008, IPCC, 2014). En las últimas décadas existe una tendencia a la desglaciación, y esta altera los sistemas hidrológicos, lo que progresivamente viene a afectar la disponibilidad de los recursos hídricos para los humanos y para el medio natural, ya que estos son utilizados para el uso doméstico, la agricultura, la generación de energía, lucha contra incendios y la industria (Haerberli & Zemp, 2012; Earls, 2014). Asimismo, también afecta, y de manera directa, a los ecosistemas de montaña, los cuáles, al estar condicionados por las bajas temperaturas, son más susceptibles al incremento de estas y las consecuencias de las mismas (Kaeslin, Redmond & Dudley, 2013; Pauli et al., 2015).

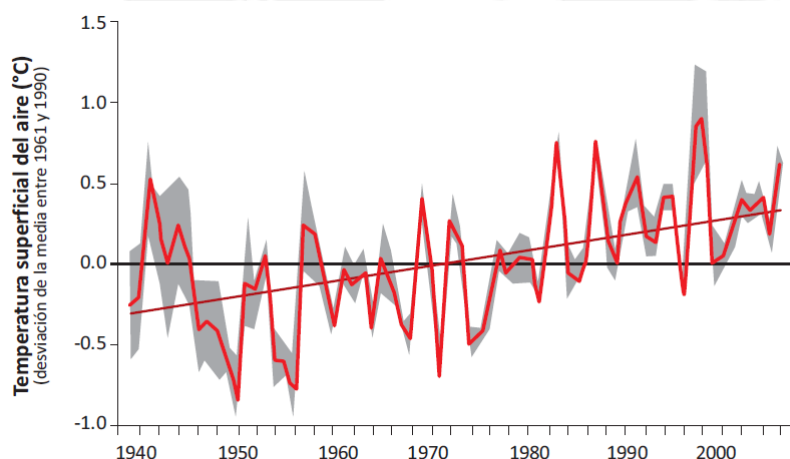
Los ecosistemas de montaña poseen características únicas. Presentan una topografía compleja que genera que sus microclimas varíen en pequeñas distancias. Por otro lado, la temperatura cambia con la altitud, por lo que un incremento de temperatura impactará de distinta manera de acuerdo a la elevación; por eso, las zonas más cercanas a la línea de nieve permanente serían las más afectadas. Finalmente, las montañas cumplen un rol influenciando los climas regionales y globales, ya que actúan como barreras del flujo del viento (Neu, 2012).

Esta compleja topografía y diversidad de condiciones físicas crean hábitats únicos, como es el caso de los bosques alto andinos. Al ser espacios sumamente especiales, las consecuencias de una alteración climática en estas áreas son más que sólo la pérdida de hielo glacial. Ante las variaciones de temperatura, cambios en el balance hídrico y aumento de la insolación, se podría generar una contracción o expansión en términos de área geográfica para estos ecosistemas, lo cual provocaría consecuencias en la estructura física de los mismos, ya que este nuevo ambiente físico al que estarían expuestos podría conducir a la desaparición o migración de las especies en caso de que no llegaran a adaptarse (Cuesta et al., 2012). Esta migración y/o desaparición, podría favorecer a las especies de crecimiento rápido, como las hierbas y plantas invasoras, reduciendo así la biodiversidad de los bosques y recursos naturales aprovechables. Además, estos ecosistemas serían más vulnerables ante las perturbaciones como fenómenos naturales o plagas (MINAM, 2016a). De igual manera, se generaría un impacto en los servicios ecosistémicos que proveen los bosques alto andinos. Al

ser reguladores hídricos de agua subterránea, su ausencia afectaría los patrones de escorrentía y así, el abastecimiento de agua, generación de energía y producción agrícola. A la vez, habría una disminución de la estabilidad y seguridad en las laderas, ya que estos bosques tienen un papel fundamental en el control de la erosión y estabilidad de las mismas (Young & Lipton, 2006; Anderson et al., 2012).

Desde hace un tiempo, el rango de variabilidad climática natural de los Andes tropicales ha empezado a sobrepasar los umbrales históricamente documentados (ver Figura 1.8.), aumentando progresivamente desde los años 1970, y, según Kaeslin, Redmond & Dudley (2013), debido al calentamiento global, para el 2050 se habrán extinguido una gran parte de las especies endémicas, muchas de las cuales se encuentran en las zonas alto andinas y brindan sus recursos al ser humano. En el caso de los recursos forestales, estos sustentan la vida de cientos de millones de personas en las comunidades que dependen de los bosques, teniendo a la leña como su principal fuente de energía.

Figura 1.8.: Desviación anual de temperatura en los Andes tropicales.



Fuente: Anderson et al., 2012

La continua emisión de GEI ocasionará un calentamiento mucho mayor, al igual que cambios más pronunciados, duraderos e irreversibles tanto para los humanos como para los ecosistemas (IPCC, 2014). Los bosques alto andinos, además de constituir una reserva importante de carbono a nivel mundial, son una fuente de bienes y servicios de gran importancia para las comunidades que los habitan y dependen de estos; por ende, cualquier alteración en los patrones climáticos normales provocaría la alteración de los ecosistemas, afectando el rol que cumple cada especie dentro de la cadena trófica y, por consiguiente, afectando a las comunidades naturales y humanas que se desarrollan en estas, volviéndolas más vulnerables y sensibles.

1.2.3 Troll vs. Ellenberg: un debate respecto a la distribución natural de *Polylepis*

Son muchos los procesos, tanto naturales como antrópicos, que han intervenido a lo largo de los años en la formación de los bosques alto andinos, y que han ido moldeando la distribución de los mismos. Debido a esto, resulta difícil determinar con exactitud los patrones de distribución geográfica de las especies alto andinas. En el caso específico del género *Polylepis*, estos bosques se han venido distribuyendo en pequeños rodales restringidos (Kessler, 2006), conformando un reducido porcentaje dentro de la zona andina. Sin embargo, existe el debate entre si esa baja densidad arbórea ha caracterizado al género *Polylepis* desde siempre o, por el contrario, es resultado de un proceso de varios años.

Este debate fue liderado por los alemanes Carl Troll y Heinz Ellenberg. Carl Troll fue un ecólogo y geógrafo que introdujo el concepto de ecología del paisaje en 1939, una disciplina que resulta de la intersección de la geografía física y la ecología, y a la cual planteaba como una perspectiva espacial, geográfica, que permite entender fenómenos naturales complejos en base a dos aspectos fundamentales: la estructura geográfico-paisajística y el orden biológico-ecológico. Además, desarrolló investigaciones en otros campos, como la geomorfología, la fitogeografía, la climatología, la glaciología, la cartografía de montaña, estudios de paisaje y la historia de la geografía (Bocco, 2003; Gonzáles, 2012). Heinz Ellenberg fue un botánico, ecólogo y biólogo que, además, realizó estudios en las áreas de la zoología, química y geología. Tuvo investigaciones en el análisis de ecosistemas y la ecología de paisajes, así como la aplicación de la ciencia de la vegetación a la agricultura y la silvicultura. Ellenberg demostró la diferencia entre el comportamiento fisiológico y ecológico de las plantas, acuñando los términos de óptimo fisiológico y óptimo ecológico, lo que ayudó a aclarar la causalidad de los patrones de distribución de las plantas en la naturaleza (Leuschner, 1997; Mueller-Dombois, 1997).

Tanto Troll como Ellenberg tuvieron grandes contribuciones en los campos de la ecología moderna. En lo que respecta al debate sobre la distribución del género *Polylepis*, ambos autores establecieron dos visiones contrapuestas que explican las razones para que los bosques de queñua estén configurados de la manera en que lo están en la actualidad.

Por un lado, Troll, tras un trabajo de campo en los Andes durante 1926-1927, establece que el clima es el determinante de la cubierta forestal (Gade, 1999). Para Troll, la falta de lluvias, las temporadas largas de sequía y temperaturas muy frías imposibilitaban el crecimiento de los bosques en la mayor parte de los andes alto andinos, por ende, si había árboles presentes

era debido a un patrón natural basado en las condiciones microclimáticas del lugar. Al ser un tipo especializado de vegetación que se encuentra restringida a ciertas áreas tales como pendientes rocosas, cursos fluviales, los fondos de valles o laderas (Simpson, 1979), las condiciones microclimáticas estaban regidas por factores que permitían su crecimiento, como la temperatura y la humedad, *más no por un impacto cultural* (Gade, 1999; Kessler, 2002),

Por el otro lado, Ellenberg considera que si bien hay varios factores naturales que también contribuyen para determinar el patrón y estructura de la vegetación, es el hombre quien se ha convertido en un “factor super-orgánico” que maneja el ecosistema directa e indirectamente debido a que ha estado interactuando con el mismo por 10 000 años (Engel, 1976 citado en Ellenberg, 1979). Tras realizar numerosas investigaciones que le permitieron elaborar diferentes diagramas mostrando los tipos de climax para distintos ecosistemas de los países andinos tropicales, Ellenberg llegó a la conclusión de que en condiciones naturales una gran parte de las tierras altas de los Andes aún estarían cubiertas por bosques, sobre todo en las partes más húmedas del altiplano, si los humanos no hubieran interferido destruyéndolos por el corte y extracción de leña, la quema provocada de las zonas de pastos adyacentes y por el pastoreo excesivo del ganado introducido (Ellenberg, 1979; Simpson, 1979; Kessler, 2002).

Sin embargo, según Kessler (2002), gran parte de la discusión entre Troll y Ellenberg tendría como base tres malentendidos e ideas erróneas: el tema de la localización de los estudios de *Polylepis*, la idea de que los bosques fueron destruidos por la tala y extracción, y la idea de que todos los Andes fueron naturalmente forestados.

El primer malentendido parte con la localización de los estudios que han realizado tanto Ellenberg como Troll para debatir este problema. Los argumentos de Ellenberg se basan en una única especie de *Polylepis* presente en Venezuela (*Polylepis sericea*), mientras que los argumentos de Troll están fundados en base a las evidencias de *Polylepis* en Ecuador, Perú y Bolivia, países que cuentan entre 7 a 10 especies nativas de este género. Por otro lado, Ellenberg toma sus ejemplos a partir de situaciones artificiales, a la vez que sus comparaciones se basan en áreas geográficas poco similares a las andinas a nivel climático (Simpson, 1979). Por consiguiente, se debe tener en cuenta las diferencias entre los Andes norteños y los centrales entre ambas hipótesis, ya que la distribución del género será más limitada en lugares con menor cantidad de diversidad de especies y/o diferentes características ambientales (Kessler, 2002).

Por otro lado, el segundo malentendido va con el tema de la destrucción de los bosques por la tala. Mientras que Troll afirma que es improbable que las culturas humanas pasadas hayan sido capaces de destruir de manera eficiente grandes porcentajes de bosque, Ellenberg, por el contrario, expone que el destructor principal de los bosques es el uso indiscriminado de fuego. Ahora, si bien la tala y producción de carbón puede jugar y haber jugado un rol en la destrucción del bosque, hay poca evidencia que respalde que los fuegos naturales hayan sido de una magnitud relativamente significativa para ocasionar la destrucción de los bosques de *Polylepis* (Kessler, 2002).

Finalmente, el tercer y último malentendido está relacionado al tema de la reforestación natural y el nivel de deforestación existente. Por ambos lados es difícil determinar el nivel de impacto tanto en destrucción como en deposición de polen para *Polylepis*, esta última debido a la difícil interpretación de los datos ya que el polen de *Polylepis* es confundido con el polen de la especie de arbustos *Acanea*, por lo que no habría una certeza viable para explicar la expansión natural de los bosques (Gade, 1999; Kessler, 2002; Zutta et al., 2012).

En síntesis, por un lado, la distribución actual del género *Polylepis* no podría ser explicada, y seguiría siendo inestable, en parte por la falta de evidencia histórica que sustente la ocurrencia de uno u otro factor con precisión y hasta entender de forma más completa las condiciones naturales donde se produce (Simpson, 1979). Sin embargo, por otro lado, el tratar de regirlo ya sea solo por causas naturales o por causas humanas sería negar la existencia de una interacción entre los factores bióticos y abióticos en todos los ecosistemas; por el contrario, se podría concluir que se trataría de un resultado de varios factores y procesos combinados, en lugar de un efecto independiente (Lomolino, 2001).

1.2.4 Estudios previos al género *Polylepis* en los Andes centrales

A lo largo de los años se han venido realizando una serie de estudios ecológicos del género *Polylepis* en todos los Andes centrales. Uno de los primeros trabajos es el elaborado por Simpson (1979), el cual buscó determinar el número de especies dentro del género *Polylepis* a lo largo de los Andes tropicales, y sus relaciones entre sí, a partir diversos estudios de morfología macroscópica, anatomía foliar, morfología del polen y diversas observaciones de campo. Esta publicación consta de la descripción de 15 especies de *Polylepis*, junto con claves para su identificación, ilustraciones y mapas de distribución de las localidades de colectas de cada especie.

En el año 1996, Fjeldså & Kessler publican un trabajo que buscó contribuir al manejo sostenible de los recursos andinos, con especial énfasis en los bosques de *Polylepis* de Perú y Bolivia. Su publicación describe detalladamente cuál es el manejo que se le ha venido dando a estos ecosistemas alto andinos, el valor ecológico que poseen y las consecuencias de su uso por los humanos. También provee una descripción muy completa de la ecología y biodiversidad de los bosques de *Polylepis* junto con un plan de acción para identificar prioridades y métodos que minimicen la pérdida de biodiversidad y regeneren las áreas perdidas. Posteriormente, en el 2006, Kessler publica un artículo sobre los bosques de *Polylepis* detallando de manera puntual la taxonomía, ecología, vegetación, distribución y conservación de los mismos, dando un panorama mucho más actual y específico en aras de comprender mejor este género y la evolución que ha experimentado a lo largo del tiempo.

Otros estudios los ha elaborado Toivonen et al. (2011), quienes buscaron percibir la variación estructural de los parches de *Polylepis* y predecir si la degradación de los mismos podría estar relacionada con la accesibilidad que los humanos tienen con los bosques. Este estudio utilizó índices de biomasa forestal y la proporción de regeneración vegetativa de los bosques como sus variables forestales, las cuáles luego relacionaron con la accesibilidad en términos de la distancia geográfica al pueblo, carretera o mercado más próximo. Esto buscó identificar cuáles bosques tenderían a ser los más o menos degradados por el hombre y los que necesitarían una mayor protección. Más adelante, la primera autora, publica una tesis estudiando los aspectos ecológicos, fisiológicos, ambientales y antropogénicos que determinarían la distribución de los bosques de *Polylepis* (Toivonen, 2014a). En este estudio evalúa las características que permiten a las especies de este género crecer en zonas con condiciones bastante extremas, así como los factores que restringen la distribución de estos bosques, sirviendo como un buen estudio para entender de manera más completa los factores de crecimiento y distribución altitudinal de *Polylepis*.

Otras investigaciones encontradas se centran principalmente en los Andes bolivianos. Uno de los estudios buscó identificar los factores ecológicos que limitan la distribución de *Polylepis*, estimando cuál es la cobertura que podría tener el género en los Andes bolivianos de no ser por las actividades humanas que restringen su regeneración, o por altitudes y/o tipos de suelo poco competentes (Kessler, 1995). Por otro lado, se ha estudiado la extensión, distribución, estado actual y configuración de los fragmentos de una especie de *Polylepis* (*P. subtusalbida*) mediante imágenes satelitales en cinco cuencas de la Cordillera Tunari, al norte de Cochabamba (Zárate, 2007). Y finalmente, se hizo una revisión de la literatura

existente para la diversidad de los bosques remanentes de *Polylepis* para evaluar su estado de conservación, determinar su nicho trófico y la riqueza de especies en relación a la elevación y ciertas variables climáticas (Gareca, 2010).

Para el Perú también se han venido realizando diversos estudios sobre las diferentes especies de *Polylepis* que conforman parte de los Andes centrales peruanos. Sin embargo, son Mendoza & Cano (2011, 2012) quienes han realizado los principales estudios respecto a la distribución y diversidad del género en la actualidad, recopilando información de campo y de materiales de herbario para estimar la diversidad a nivel departamental. De igual manera, realizan una descripción taxonómica y morfológica muy específica, además de indicar la distribución altitudinal de cada una de las especies de *Polylepis* que se desarrollan en los Andes peruanos.

A nivel departamental, los departamentos que cuentan con investigaciones son: Ancash (ECOAN, 2005; Dourojeanni 2008), Ayacucho (ECOAN, 2007; Mendoza & Roque, 2007), Cusco (Servat, Mendoza & Ochoa, 2002; Jameson & Ramsay, 2007), Junín, (Valenzuela & Villalba, 2015), Lima (Arce, 1992; Florencio & Valencia, 2013), Puno (Yallico, 1992; ECOAN, 2006) y San Martín (Quinteros, 2010). Un grupo de estas investigaciones, que son la mayoría, se enfocan en realizar una evaluación de la biodiversidad sobre los bosques de *Polylepis*; estas abarcan la recolección de data ausente, determinar la estructura física y genética de los bosques, su composición a nivel de flora y fauna, análisis de distribución, el grado de conservación que presentan, así como exponer la situación actual de los bosques en distintas zonas. El otro grupo de investigaciones tienen enfoques más específicos.

En el caso de Ancash, se generó una propuesta del bosque como banco genético para la restauración ecológica, el cual consistía en reforestar gran parte del Corredor de Conchucos (ECOAN, 2005). Estos bosques soportan el uso que los pobladores de las comunidades campesinas aledañas le dan como fuente de energía, además de utilizar su suelo como zonas donde se practica la actividad agrícola y ganadera. Debido a esta actividad antrópica, la zona de bosques presentaba el riesgo de una posible desaparición generando un efecto negativo en la flora, fauna y en todo el ecosistema del medio. A raíz de la falta de información básica sobre la distribución de la especie de *Polylepis* en la zona del Corredor de Conchucos, el proyecto se encargó de establecer una evaluación de la biodiversidad de los bosques de queñua en la zona de Huaraz, el cual sirvió como línea base para promover programas de conservación y manejo de estos recursos. En síntesis, el proyecto mostró la diversidad

existente dentro de los bosques mismos a la vez que constituyó una propuesta de restauración ecológica por el peligro al que estaban expuestos estos bosques, que desencadenó en diferentes alternativas como la propagación de un género de *Polylepis* y la ubicación de viveros dentro del espacio del Corredor.

Por otro lado, Dourojeanni (2008) realizó una investigación estudiando la distribución y la conectividad de los bosques alto andinos de *Polylepis* en la cuenca alta del río Pativilca. La investigación buscó documentar la ubicación de los rodales de *Polylepis* y a partir de los datos obtenidos, proponer las zonas adecuadas para la reforestación del ecosistema arbóreo. Para lograr esto, se mapeó la distribución de los rodales en varias salidas de campo a través de la toma de puntos GPS, y posteriormente se trabajó con el software ArcGis para el análisis de imágenes satélites de la zona. También se estudiaron tres factores físicos que son determinantes para la distribución de este género: la altitud, la pendiente y la exposición solar de las laderas; con el estudio de estos tres factores se establecieron los parámetros físicos que determinan la localización de los bosques de *Polylepis*.

Para el departamento de Cusco, Jameson & Ramsay (2007) se encargaron de determinar la evolución de la cobertura vegetal para la zona de la Cordillera de Vilcanota en un periodo de tiempo de 50 años, utilizando fotos aéreas, así como observaciones de campo y fotografías. Este estudio también incluyó un registro de las percepciones de los agricultores locales frente al cambio que ha sufrido la cobertura forestal en las últimas décadas, ya que ellos son los que están en contacto y utilizan estos bosques; de esta manera, no solo se generó un análisis a nivel cuantitativo respecto a la transformación de los bosques, sino que también se incluyeron detalles a nivel cualitativo, como el cambio a nivel de tamaño y forma de los individuos.

En el caso de Lima, la comunidad de Carampoma en la provincia de Huarochirí alberga rodales de *Polylepis flavipila* en la zona de Japaní, la cual actualmente constituye un proyecto ecoturístico que fomenta la conservación y el manejo forestal sostenible dentro de la comunidad. Mediante un proceso participativo con la comunidad se logró la zonificación del bosque, la elaboración del plan general de uso ecoturístico y de manejo forestal, así como la identificación preliminar de las especies de flora y fauna asociadas al bosque (Florencio & Valencia, 2013).

Finalmente, en el año 2015, en el departamento de Junín se determinó una nueva especie de *Polylepis* procedente de la zona de amortiguamiento del Bosque de Protección Pui-Pui:

Polylepis rodolfo-vasquezii, la cual difiere de una especie ya conocida (*P. subsericans*) por el número de foliolos presentes en la hoja (Valenzuela & Villalba, 2015). Esta investigación explicó la taxonomía, distribución, ecología y estado actual de esta nueva especie identificada.

1.2.5 Estudios metodológicos en MDE en los Andes centrales

De igual manera, en toda la zona andina se han venido realizando diversos estudios en el tema de modelamiento de especies. En el 2007, Beck et al. determinó la abundancia de 435 especies endémicas de quince grupos focales de plantas vasculares a lo largo de los Andes de Perú y Bolivia. Se compilaron registros de distintos herbarios para las especies seleccionadas y se georreferenciaron las localidades mediante diccionarios geográficos y mapas digitales para poder insertar la data en Maxent. Los resultados fueron mapas de abundancia para las diferentes especies endémicas, los cuales sustentaron y agregaron data a los patrones de endemismo existentes en la zona.

Por otro lado, de manera mucho más específica, la aplicación de los MDE para estimar la distribución de bosques de *Polylepis* también se ha venido realizado ampliamente. Zutta et al. (2012) modelaron la distribución de dos especies del género *Polylepis*, *P. sericea* y *P. weberbaueri*, para toda la Cordillera Andina, desde Venezuela a Bolivia. Mediante imágenes satelitales, una serie de variables bioclimáticas y el software Maxent, se construyeron los modelos de distribución para cada una de las especies de *Polylepis*. Toda esta investigación tenía como fin la sostenibilidad en pro de la conservación, manejo y restauración de los bosques de *Polylepis*.

En Argentina, Renison et al. (2013) realizó la distribución y el estado de conservación de las poblaciones de árboles y arbustos del género *Polylepis*. En este estudio se utilizó el software Maxent para modelar cinco especies de *Polylepis*, distribuidas a lo largo de las montañas del centro y noroeste del país, a partir de los datos de presencia conseguidos de viajes de campo, bibliografía, consulta de herbarios nacionales y extranjeros y consulta a bases de datos disponibles en internet. Los resultados obtenidos sirvieron para determinar el estado de conservación de los bosques y así poder obtener áreas de referencia para realizar estrategias de conservación y restauración.

En Ecuador, Mejía (2013) realizó una distribución potencial del género *Polylepis* dentro de la cuenca del río Paute, pero, además, consideró incluir un escenario de cambio climático

para obtener una distribución potencial a futuro de estos bosques, pudiendo, de esta manera, determinar hacia dónde, por qué razones y en qué dimensión cambiaría la dinámica espacial de *Polylepis*. Con esto recalcó que es importante considerar el clima futuro al momento de establecer cualquier estrategia para la conservación de los recursos naturales, puesto que hay distintos factores ambientales que pueden modificar la distribución de una especie.

Además de estudios de modelamiento con especies vegetales, también se han desarrollado varios estudios que modelan la distribución de especies animales. Velez-Liendo et al. (2013) utilizaron los MDE para estimar el hábitat potencial del oso andino (*Tremarctos ornatus*) en los Andes bolivianos. En este estudio se utilizaron dos modelos, uno basado en tres funciones ecológicas para estimar el hábitat del oso: la alimentación, el refugio y el acceso al agua. Y otro basado en ciertos predictores ambientales relacionados con la topografía, la vegetación y las actividades humanas. Sin embargo, se obtuvieron discrepancias a nivel de extensión y alcance de distribución entre ambos modelos, por lo que se concluyó que la elección de las variables influye directamente en la delimitación de las áreas potenciales de conservación de esta o cualquier otra especie.

Por otro lado, Marino et al. (2011) utilizaron el algoritmo Maxent para identificar los nichos bioclimáticos del gato andino (*Leopardus jacobita*), una especie en peligro de extinción, a lo largo de los Andes y la estepa patagónica, lo que incluyó a los países de Perú, Bolivia, Chile y Argentina. Dentro de sus resultados afirmaron que, si bien los modelos bioclimáticos son útiles para establecer el nicho potencial de especies raras y poco conocidas, se podrían incluir variables mucho más específicas relacionadas al paisaje donde habita y desarrolla el gato andino, para que las predicciones a obtener sean mucho más precisas y aplicables para temas de conservación.

Debido a que existe diversidad de métodos para modelar la distribución de las especies, muchos estudios han establecido comparaciones entre ellos para establecer cuál es mejor de acuerdo a ciertas exigencias (Benito de Pando & Peñas de Giles, 2007). Un ejemplo de esto es el estudio que realizó Naoki et al. (2006) en Bolivia. Este estudio contempló una comparación entre cuatro modelos de distribución de especies para determinar cuál modelo era el mejor en predecir la distribución potencial de tres especies de vida silvestre en Bolivia. El estudio arrojó diversas diferencias entre los modelos en base a su sensibilidad, especificidad, tamaño y forma de la distribución, sobrepredicción, entre otros, y se planteó la posibilidad de considerar otros datos para un análisis de modelos más detallado.

En conclusión, se puede afirmar que diversos estudios sobre el género *Polylepis* y la aplicación de los MDE se han venido desarrollando en los Andes, sirviendo como base científica y metodológica para otras investigaciones. La utilización de los modelos de distribución de especies, más la información existente acerca de los impactos que han sufrido los bosques alto andinos por el hombre y el cambio climático, abren la puerta a la posibilidad no solo de resolver el difícil debate sobre cuál es la distribución natural de *Polylepis*, sino de generar estrategias de adaptación para hacer frente a más impactos, tanto naturales como antrópicos, en las zonas alto andinas, teniendo en cuenta el importante rol que cumplen los bosques de *Polylepis* como soporte de los ecosistemas alto andinos, y brindando servicios eco sistémicos a las poblaciones humanas que viven en estas áreas.



CAPÍTULO 2

ÁREA DE ESTUDIO

Este segundo capítulo hará una descripción del área de estudio escogida en esta investigación para determinar la distribución potencial del género *Polylepis* en el Perú. Se presentará un análisis del territorio de manera general, describiendo el medio natural y el medio humano que presenta el área, así como todos los elementos que los componen. De esta manera, se identificarán todas las influencias a las que se ven expuestos los bosques alto andinos, estableciendo la situación actual en la que se encuentran los bosques de *Polylepis* en el Perú.

2.1. Localización geográfica

El área de estudio de esta investigación se centra principalmente en la región alto andina dentro de los Andes centrales del Perú donde se desarrolla el género *Polylepis*, definida desde los 1800 hasta aproximadamente los 6700 msnm. Se eligió trabajar con este rango altitudinal ya que el mismo envuelve de manera más exacta los límites mínimos y máximos aproximados de distribución de las especies del género *Polylepis* localizadas en el Perú, de acuerdo a Mendoza & Cano (2012); por ende, a pesar de que cada especie posea su propio rango de distribución, el rango adoptado para esta investigación permite un trabajo general con un hábitat de distribución más amplio.

Dado que el área de estudio abarca un umbral altitudinal bastante amplio, estaría formando parte de tres regiones naturales, según Pulgar Vidal (1987), la región Suni, Puna y Janca; y de dos regiones fitogeográficas, según Brack & Mendiola (2000), la serranía esteparia y la puna y los altos andes. Ambas clasificaciones formarían parte de la región geográfica de la Sierra, la cual comprende aproximadamente de 37 a 39 millones de hectáreas (Brack, 1994) y 19 departamentos (ver Mapa 2.1).

Esta área es de suma importancia para la población peruana debido a que determina las variantes climáticas para el Perú; a la vez, propicia la actividad ganadera y agrícola, posee una amplia biodiversidad, es una zona de abastecimiento de agua, reserva de minerales, fuente de recursos genéticos y una zona de alta afluencia turística por todos los recursos, paisajes y culturas que alberga (Alva, 2005).

Mapa 2.1.: Mapa del área de estudio.



Leyenda

- Países fronterizos
- Área de estudio (rango altitudinal)**
- 1,800 - 6,680 msnm



 PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ		
MAPA DEL ÁREA DE ESTUDIO		
Ubicación	Andes Centrales del Perú	
Proyección	WGS 1984	
Escala	1:5,000,000	
Fuente de datos	DivaGis, MINAM	
Elaboración	Gabriela Flores	
Junio 2017		

2.2. Descripción del medio natural

La región andina se ubica por encima de los 1000 msnm. Esta zona presenta una morfología bastante variada, de vertientes muy pronunciadas y fuertemente erosionadas con cañones angostos y profundos, producto del levantamiento andino ocurrido en la era Terciaria (Cenozoica). Estas vertientes terminan en mesetas de altitudes por encima de los 3000 a 4000 msnm, las cuales son conocidas como punas, abarcando el área de distribución de la mayoría de las especies de *Polylepis* (Mendoza & Cano, 2012). Las áreas de puna son de extensión variable y presentan un área ondulada debido a las antiguas acumulaciones glaciares y a la acción erosiva de la esorrentía en las rocas por el derretimiento glaciar (Peñaherrera del Águila et al., 1986). Peñaherrera del Águila et al., dividen a la puna en tres grupos teniendo en cuenta la altitud:

- Mesetas o punas de altitudes medias (3500 - 4000 msnm)

En estas altitudes la temperatura media anual es entre 7° a 10 °C, con temperaturas mínimas inferiores a los 0 °C, y máximas por encima de los 20 °C. Las diferencias térmicas entre el día y la noche son más marcadas, al igual que se pueden observar dos estaciones bien definidas, una seca (mayo-octubre) y otra lluviosa (noviembre-marzo), con precipitaciones superiores a los 400 mm anuales.

- Altas mesetas o punas altas (4000 - 4500 msnm)

Presentan un clima frío de alta montaña. La temperatura media anual es entre 0° a 7 °C, con temperaturas máximas superiores a los 15 °C, y mínimas por debajo de los 0 °C en las noches, llegando al punto de congelar las masas de agua. Al igual que en el intervalo anterior, las diferencias térmicas entre día y noche son bien marcadas. Las precipitaciones estacionales son de octubre a marzo y superiores a 200 mm, mientras que la estación seca se da de mayo a setiembre. Esta zona presenta sequedad en la atmósfera y baja presión atmosférica, por lo que hay menos oxígeno. Por otro lado, debido a la presencia de gramíneas, el área constituye una zona de pastoreo, existiendo ganadería extensiva de ovinos y auquénidos.

- Muy altas mesetas o punas bravas (4500 - 5000 msnm)

Presentan características muy similares a las de altas mesetas, principalmente, que las temperaturas son positivas durante el día y negativas durante la noche. Una característica única es que hay más porcentaje de hielo y precipitaciones sólidas.

En síntesis, la zona de puna presenta un clima muy crudo debido a la baja presión atmosférica, la variación de las temperaturas entre el día y la noche, la alta radiación debido a la altura y altitud, vientos secos y fríos y la presencia de heladas (Brack & Mendiola, 2000).

Respecto al tipo de suelo predominante en esta región, Brack (1994), establece una división de acuerdo a su ubicación dentro de la zona andina:

- El flanco occidental andino: entre los 1000 y 5000 msnm. Debido al relieve escabroso y con altas pendientes, predominan los suelos superficiales y pedregosos.
- La zona alto andina de punas y páramos: entre los 4000 y 5000 msnm. Son suelos ricos en materia orgánica principalmente cubiertos por pastos, sin embargo, las condiciones climáticas no permiten que se desarrollen las actividades agrícolas y forestales adecuadamente.
- Los valles interandinos altos e intermedios: entre los 2200 y 4000 msnm. Predominan los suelos con acumulación de materiales sedimentarios, siendo los valles los constituyentes de la actividad agrícola.
- El borde oriental: entre los 2200 y 3600 msnm. Son suelos superficiales con altas pendientes y cobertura boscosa donde el ser humano aún no interviene.

La región andina presenta numerosos cursos de agua, más de 12 000 lagos y lagunas que pueden ser salobres, de agua dulce y/o con totorales, además del 71% de los glaciares tropicales del mundo (Brack & Mendiola, 2000; Cordero, 2012). Todos funcionan como importantes recursos hídricos para la región y para la costa, en el caso de los ríos. Los lagos y lagunas permiten el hábitat de importante flora y fauna acuática, mientras que los glaciares sirven como reservorios naturales de agua que nutren las cuencas de los ríos (Brack, 1994).

Por otro lado, según Cuesta et al. (2012), la vegetación en esta región está compuesta principalmente por pajonales, matorrales y vegetación arbustiva baja, presentando poca o nada de cobertura boscosa más que algunos remanentes de bosques (ver también Brack, 1994). Entre las principales formaciones vegetales podemos encontrar los pajonales, los

tolares, los bosques que *Polylepis*, rodales de ccara (*Puya raimondii*) y las plantas almohadillas. También, en las depresiones topográficas y cerca de los cursos de agua, existen humedales y las turberas. Dentro de cada una de estas formaciones habita una fauna muy variada (Brack & Mendiola, 2000):

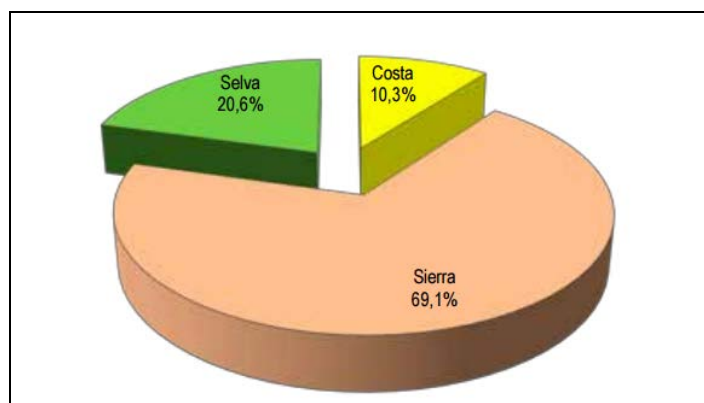
- Pajonal: la vicuña, el zorro andino, el cuy silvestre, el puma, los gatos silvestres y las perdices.
- Vegetación mixta: la taruca o ciervo andino, el venado gris, los gatos silvestres y diversas aves.
- Bosques de *Polylepis*: la taruca, el puma y diversas aves.
- Almohadillas: la taruca y el ganso andino. Además, predomina el pastoreo de alpacas.
- Barrancos rocosos: la vizcacha, los gatos silvestres y diversas aves como la gargacha.
- Semi desiertos: la vicuña y el suri.

Tanto las especies animales como vegetales poseen ciertas adaptaciones morfológicas y fisiológicas para poder desarrollarse en esta región andina, debido a las características extremas que esta posee a nivel físico. Por ejemplo, al no haber suficiente cobertura vegetal alta, como bosques, las especies de fauna poseen colores miméticos con el ambiente, de manera que pueden pasar desapercibidas en medio del paisaje para sus depredadores y/o el ser humano. Por otro lado, la mayoría de las especies se reproducen al final de la época seca o durante el verano, ya que la época seca es muy fría y, por el contrario, la época húmeda les permite acceder a una mayor fuente de alimentos (Brack & Mendiola, 2000).

2.3. Descripción del medio humano

En la actualidad, la Sierra peruana cubre el 27.9% del territorio nacional, lo que equivale a 358 988.94 km², albergando a un 29.7% de la población peruana (9 265 072 Abs) (INEI, 2015) y también el 69.1% de la pobreza extrema del país (ver Figura 2.1), la cual se concentra en las zonas rurales de la Sierra (INEI, 2016). Para el año 2015 la población económicamente activa (PEA) fue solo del 32.87%, contando con un ingreso promedio mensual de 979.7 soles (INEI, s.f., s.f.b).

Figura 2.1.: Localización por regiones naturales de la población en pobreza extrema para el año 2015.



Fuente: INEI, 2016

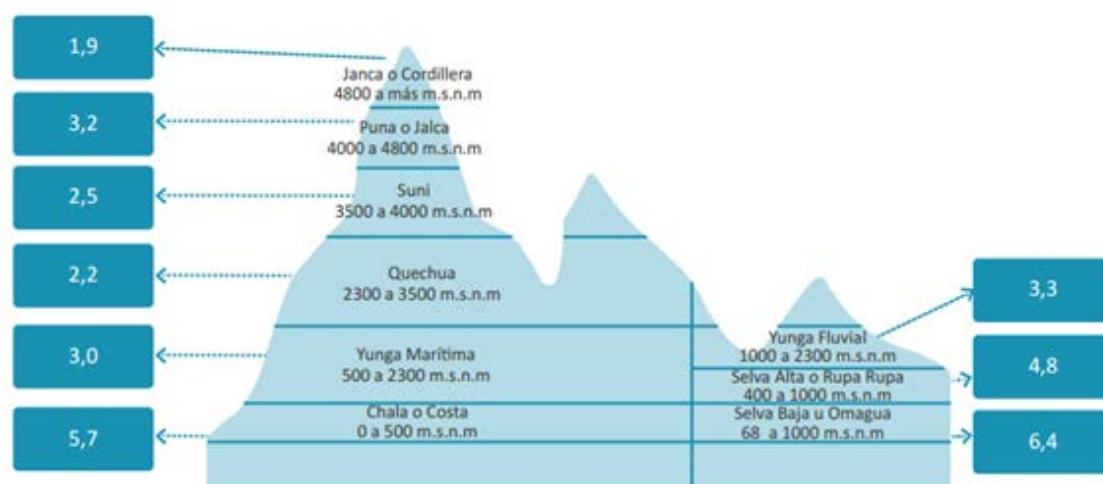
Esta situación de extrema pobreza implica para la población, por un lado, un menor capital educativo a comparación de la población no pobre; por ejemplo, para el año 2014, las mujeres y hombres mayores de 17 años con secundaria completa conformaban solo la mitad de la población total de la región (INEI, s.f.c). Por otro lado, también implica un menor acceso a los recursos básicos como el agua (un 15.7% de los hogares pobres aún siguen utilizando agua de río, acequia o manantial para abastecerse) o el sistema de alcantarillado (un 22% usa pozo séptico o letrina, y un 18% no posee) (INEI, 2016).

En cuanto a la organización social actual de los Andes, esta está basada en la tierra con una orientación hacia las actividades agropecuarias y de cooperación mutua y comunal. Sin embargo, hay una distinción en las actividades que se realizan dependiendo de la zona altitudinal en la que la población esté ubicada. Así, según Pulgar Vidal (1987), mientras que en la región Suni (3500 - 4000 msnm) predominan los suelos para agricultura, en la región Puna (4000 - 4800 msnm) el pastoreo es la actividad dominante. De esta manera, se desarrolla principalmente la agricultura y la ganadería, siendo los principales cultivos la papa, el maíz, el trigo y los cereales andinos (quinua, maca, tarwi, kiwicha); mientras que los bovinos, cerdos y camélidos son los animales característicos del sector ganadero (Suárez, Naranjo, Espinosa & Sabogal, 2012). No obstante, también existen diversas otras actividades como la silvicultura, acuicultura y la minería (cobre, zinc, plomo, plata) (Brack, 1994).

Según el Censo Nacional Agropecuario del año 2012 (INEI, 2013), la superficie agropecuaria total para la región de la Sierra fue de 22 269 271 hectáreas, un 57,7% del total nacional. Así, la Sierra es la región que alberga el mayor número de unidades agropecuarias, con 1 444 530 unidades, lo que equivale a un 63,9% unidades del total nacional. Sin embargo, en esta región predominan las pequeñas unidades agropecuarias. En comparación

de la Costa y Selva, donde los productores conducen unidades de más superficie, en la Sierra los productores agropecuarios administran 2,8 parcelas aproximadamente. A su vez, existe una diferenciación de superficie entre unidades agropecuarias dependiendo del piso altitudinal en donde estén ubicadas (ver Figura 2.2), de esta manera, un productor de la zona de la puna administra 3,2 ha en promedio, mientras que el de la región Janca un promedio de 1,9 ha. En cuanto a las actividades complementarias que realizan para conseguir otros ingresos, un 43% de los productores agropecuarios se dedican a la agricultura, ganadería y pesca, un 19% al comercio y un 18% la construcción. En menor porcentaje están los que se dedican a la fabricación de prendas de vestir, a trabajar en restaurantes y hoteles, y al transporte.

Figura 2.2.: Promedio de hectáreas que conduce el productor agropecuario por pisos altitudinales.



Fuente: IV Censo Nacional Agropecuario 2012.

Del total de superficie agropecuaria estimado en el Censo Nacional Agropecuario (INEI, 2013), la superficie agrícola productiva para el año 2012 fue de 15% (3 296 008 ha), mientras que el 60% (18 973 263 ha) fue de superficie no agrícola, conformada por los pastos naturales en un 70% y los montes y bosques un 7%.

En lo que respecta a la agricultura, que es la actividad más importante de la región, el sistema productivo se basa en la diversificación de los cultivos. De acuerdo con Earls (2014), “en las altitudes andinas, las actividades agrícolas están basadas en el manejo de los pisos ecológicos y/o las zonas de producción, cada uno con su asociación particular de cultivos, su tecnología y su sistema organizativo”. De esta manera, de acuerdo a la altitud, se produce un cultivo específico con una técnica de manejo específica para el mismo, bajo un sistema de organización particular (D’Altroy, 2000; Earls, 2014):

- 3500 - 4000 msnm: cultivo de tubérculos por manejo de precipitación. Bajo control comunal.
- 2300 - 3500 msnm: cultivo de maíz con irrigación. Turnos de riego controlados por la comunidad.
- Por encima de los 4000 msnm: pastoreo, condicionado por el estado de bofedales y patrón de lluvias.

Debido a la compleja topografía y diversidad de condiciones físicas de los andes, las poblaciones andinas han desarrollado desde la época prehispánica distintas técnicas y mecanismos que aprovechan el aumento de los fenómenos microclimáticos para manipularlos y, así, producir ambientes con características específicas que favorecen a ciertos cultivos específicos. De esta manera, el hombre andino ha podido obtener alimentos, medicinas, fibras, condimentos, aromas, abonos y tintes, además de crear una serie de tecnologías agrícolas para ayudarlo a adaptarse a las condiciones ambientales agrestes: instrumentos de trabajo, técnicas de ingeniería (modificar el suelo, creación de terrazas), tecnologías de riego y drenaje, métodos de fertilización, formas de conservación de los alimentos, dispersión de riesgos y cultivos de rotación (Brack, 1994; Brack y Mendiola, 2000). Por ejemplo, los ríos han sido utilizados desde épocas prehispánicas, en las actividades agropecuarias, para el riego de los campos agrícolas captando el agua mediante canales y bocatomas. Las aguas subterráneas también se utilizan como agua potable para los centros urbanos, para la agricultura y la industria (Peñaherrera del Águila et al., 1986). Algunos mecanismos existentes son la formación artificial de grandes bofedales para que, al desviar los cursos de agua, se inundan los terrenos bajos y se amplíen las áreas ganaderas; y la construcción de andenes para crear suelos aptos para la agricultura (Pulgar Vidal, 1987).

Actualmente, el 51% de la agricultura corresponde a una agricultura de secano, sin embargo, lo que más predomina es el riego por gravedad. También se utiliza el riego por aspersión, por goteo y por exudación, aunque este último en mucho menor porcentaje (INEI, 2013). Por ende, la falta de agua es una de las razones que impide el desarrollo de los cultivos, además de la escasez de tierras cultivables por la deforestación, lo cual genera que la población migre a la ciudad y deje las zonas andinas (Pulgar Vidal, 1987).

En cuanto a la superficie no agrícola, y en referencia a los bosques andinos, actualmente, como consecuencia del uso de las tierras por los pobladores locales, muchos de estos bosques han sido talados y quemados para dar lugar a la práctica de la agricultura (MINAM,

2015; Sabogal, 2015), a la vez que vienen siendo aprovechados por la población rural como leña, carbón, para la fabricación de cercos y trabajos de artesanía. Debido a esto, solo quedan intactos algunos fragmentos en las áreas de menos tránsito y más alejadas de los centros poblados (Pariente, García, Moreano & Ríos, 2016). Sin embargo, también se han desarrollado varias iniciativas de reforestación de los mismos (ECOAN, 2005) y proyectos ecoturísticos para su revalorización y conservación (Florencio & Valencia, 2013).

Tabla 2.1.: Superficie nacional de bosques naturales andinos.

Bosques naturales andinos	Superficie (ha)	%
Bosque relicto mesoandino	27 478	0,02
Bosque relicto mesoandino de coníferas	1160	0,001
Bosque montano occidental andino	90 002	0,07
Bosque relictos alto andino (queñoal)	101 533	0,08
Total	220 173	0,17

Fuente: MINAM, 2015

Para el año 2015, según el Mapa Nacional de Cobertura Vegetal del Perú, los bosques naturales andinos comprendían un 0.17% de la superficie nacional, y solo un 0.08% de estos equivalían a relictos de *Polylepis* (MINAM, 2015) (ver Tabla 2.1). Esta es la única información actualizada, ya que desde 1995 hasta el 2013, la superficie territorial cubierta por los bosques de *Polylepis* permanecía constante en 93 700 ha (INRENA, 1997; INEI, 2010, 2011, 2012, 2013b). Empero, a pesar de ser los bosques naturales andinos con mayor superficie dentro del territorio peruano, los bosques de *Polylepis* están en constante amenaza, por la tala y quema, siendo calificados por la Lista Roja de Especies Amenazadas de la IUCN (2016) como elementos vulnerables.

En conclusión, la zona alto andina peruana es un área muy compleja y de suma importancia, ya que es una fuente de recursos de abastecimiento para todo el Perú. Además, está llena de una diversidad de formas de vida, con especies de morfología variada que presentan adaptaciones especiales para los climas extremos de la zona. Es un área que el ser humano ha ocupado e influido desde hace 11 000 - 10 000 años (Engel, 1976 citado en Ellenberg, 1979; Lynch, 1990 citado en Gade, 1999), generando el desarrollo de diversas actividades productivas, las cuáles están adaptadas a las distintas zonas altitudinales; pero también permitiendo el deterioro de muchos de los recursos naturales existentes, como la cobertura forestal.

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

El tercer capítulo procederá a explicar la metodología y los métodos utilizados para esta investigación, los cuales comprenden el uso de softwares de modelamiento, de análisis y de manejo de Sistemas de Información Geográfica. Se detallarán las plataformas utilizadas para obtener la información y los pasos a seguir de manejo y transformación de la data para, finalmente, obtener los modelos de distribución potencial para cada especie de *Polylepis*.

3.1. Recopilación de la información y procesamiento de puntos de presencia

Para determinar los patrones de distribución del género *Polylepis* en los Andes centrales del Perú se partió por identificar, en primer lugar, en cuáles y cuántos departamentos del Perú existe este género. Para esto, se remitió a Mendoza & Cano, quienes en el 2011 habían establecido la riqueza de especies del género *Polylepis* en el Perú y por departamento. Con esta información, se procedió a utilizar la plataforma de base de datos que posee el Herbario del Jardín Botánico de Missouri, *Tropicos*³, para contabilizar y descargar el número de colecciones existentes en todos los departamentos del Perú. *Tropicos* es una de las bases de datos botánica más grande del mundo con cerca de 1.2 millones de nombres publicados y más de 4 millones de registros de especímenes, por esta razón, se utilizó como línea base para establecer la cantidad de colectas realizadas en el Perú para el género *Polylepis*.

Posteriormente, se necesitaron de otras fuentes de datos botánicas para complementar la base de datos general de colectas de este género. Por un lado, se utilizó la información de otras colecciones existentes y/o disponibles virtualmente:

- El Museo de Historia Natural de Chicago⁴.
- El Herbario del Jardín Botánico de New York⁵.
- El Herbario Nacional de Estados Unidos del Instituto Smithsonian⁶.
- El Herbario de la Universidad de Aarhus de Dinamarca⁷.
- El Jardín Botánico de Berlín.

³ Tropicos.org. Missouri Botanical Garden. 4 Dec 2014 <<http://www.tropicos.org>>

⁴ <http://fm1.fieldmuseum.org/vrrc/>

⁵ <http://sciweb.nybg.org/science2/vii2.asp>

⁶ <http://collections.mnh.si.edu/search/botany/>

⁷ http://www.aubot.dk/search_form.php

- El Instituto de Investigación Botánica de Texas⁸.
- La plataforma de datos GBIF (Global Biodiversity Information Facility)⁹.
- El Herbario Forestal Nacional de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM).

Por otro lado, se hizo una revisión de literatura para hallar colectas botánicas con los datos suficientes para poder realizar su georreferenciación. De esta manera, se revisaron las publicaciones hechas por Simpson (1979), Arce (1992), Fjeldså & Kessler (1996), ECOAN (2005, 2006) y Valenzuela y Villalba (2015).

Esta información dio como resultado una base de datos que recopila información de 18 departamentos del Perú, un total de 352 colecciones de 19 especies de *Polylepis* en el periodo de 1925 al 2015. Dentro de este total, las especies con mayor número de colectas únicas fueron las siguientes:

Tabla 3.1.: Especies de *Polylepis* colectadas en el Perú.

<i>Especie de Polylepis</i>	<i>Número de colectas</i>	<i>Departamento con colectas</i>
<i>Polylepis weberbaueri</i> Pilg.	81	Cajamarca, Ancash, Lima, Piura, Huánuco, Cusco, Apurímac
<i>Polylepis sericea</i> Weed.	59	Ancash, Cusco, Junín, Puno, Lima
<i>Polylepis incana</i> Kunth	49	Ayacucho, Ancash, La Libertad, Lima, Cusco, Huancavelica, Apurímac, Pasco, Huánuco
<i>Polylepis racemosa</i> Ruiz & Pav.	39	Lima, Junín, Cusco, Huánuco, Ancash, Cajamarca, Ayacucho, La Libertad, Pasco
<i>Polylepis besseri</i> Hieron. (*)	18	Cusco, Ayacucho, Tacna, Lima, Arequipa, Pasco, Puno, Moquegua
<i>Polylepis incarum</i> (Bitter) M.Kessler & Schmidt-Leb.	15	Cusco, Puno, Arequipa
<i>Polylepis pauta</i> Hieron.	12	Cusco, San Martín, Amazonas
<i>Polylepis lanata</i> (Kuntze) M.Kessler & Schmidt-Leb.	11	Cusco
<i>Polylepis multijuga</i> Pilg.	10	La Libertad, Amazonas, Cajamarca
<i>Polylepis tomentella</i> Weed.	10	Ayacucho

⁸ <http://atrium.andesamazon.org/>

⁹ <http://www.gbif.org/>

<i>Especie de Polylepis</i>	<i>Número de colectas</i>	<i>Departamento con colectas</i>
<i>Polylepis subsericans</i> J.F.Macbr.	9	Cusco, Cajamarca, Lima, Huancavelica
<i>Polylepis triacontandra</i> Bitter	8	Lima, Cusco, Ancash, Puno
<i>Polylepis reticulata</i> Hieron.	7	Cajamarca, Ancash, La Libertad, Junín, Lima
<i>Polylepis rugulosa</i> Bitter	7	Moquegua, Arequipa, Tacna
<i>Polylepis microphylla</i> (Wedd.) Bitter	5	Cusco, Ancash, Lima
<i>Polylepis pepeii</i> B.B.Simpson	4	Puno, Ancash
<i>Polylepis flavipila</i> (Bitter) M.Kessler & Schmidt-Leb.	3	Lima
<i>Polylepis tarapacana</i> Phil.	3	Tacna
<i>Polylepis canoi</i> W. Mend.	2	Cusco
(*) La identidad de <i>P. besseri</i> , una especie boliviana, es cuestionable por motivos de identificación botánica.		

Fuentes: Simpson (1979), Arce (1992), Fjeldsá & Kessler (1996), ECOAN (2005, 2006), Valenzuela y Villalba (2015); herbarios AAU, AT, B, F, NY, MO, MOL, SI (ver Anexo 4).

Entre la información considerada para elaborar la base de datos se encuentra:

- El herbario de procedencia de la colecta.
- El nombre del colector.
- El número de colección asignado.
- El nombre específico de la especie.
- El país de procedencia de la colecta.
- El departamento en donde fue colectado.
- La fecha en la que se hizo la colecta.
- La localidad.
- La elevación.
- Las coordenadas de la fuente de datos.
- Las coordenadas corregidas – georreferenciadas.
- El índice de confianza de la georreferenciación.

La información obtenida para cada colecta fue revisada, ordenada, verificada y mejorada, sobre todo para el caso de los datos de localidad y coordenadas de ubicación. Una vez pasado este filtro de corrección de los datos, se procedió a georreferenciar las coordenadas de cada muestra, esto se realizó con los programas Google Earth y ArcGis, obteniendo varios archivos con formato kml con la ubicación de cada colecta. Con este procedimiento se

aseguró la correcta ubicación de cada muestra dentro del área de estudio y permitió descartar muestras repetidas y/o geográficamente poco exactas.

Obtenida la georreferenciación, se fue indicando el índice de confianza para cada colecta, este índice es una clasificación propia que representa qué tan exacta y confiable es la georreferenciación del dato a partir de los datos provistos por los colectores. El índice va de 1 a 4, en donde 1 representa confiabilidad plena en el dato, es decir, que la colecta es bastante precisa y posee la información suficiente que asegure su localización; y 4 es poca confiabilidad en el dato debido a la falta de información que indique su ubicación. En esta investigación solo se trabajaron con colectas que tuvieran índices de 1 o 2, por lo que muchos puntos fueron omitidos debido a la poca exactitud en su localización.

3.2. Elección de variables y modelos climáticos globales

Las variables bioclimáticas, que servirán como nuestras variables independientes al momento de crear nuestros modelos de distribución de especies son las que se encuentran en la página de *Worldclim*¹⁰ (Hijmans et al., 2005). Esta plataforma permite acceder a un conjunto de capas climáticas globales con una resolución de entre 900 metros a 1 km. Estas variables se derivan de la interpolación de datos observados representativos entre los años 1960-1990, trabajando con los valores anuales extremos (mínimas y máximas) de temperatura y precipitación. Cada variable bioclimática está descrita en la tabla siguiente:

Tabla 3.2.: Lista de variables bioclimáticas de Worldclim.

Código	Variable Bioclimática
BIO1	Temperatura Media Anual
BIO2	Rango de temperatura diurna media (Temp. Máxima – Temp. Mínima)
BIO3	Isotermalidad (BIO2/BIO7) (*100)
BIO4	Estacionalidad de temperatura (desviación estándar *100)
BIO5	Temperatura máxima del mes más caliente
BIO6	Temperatura mínima del mes más frío
BIO7	Rango de temperatura anual (BIO5-BIO6)
BIO8	Temperatura media del trimestre más húmedo
BIO9	Temperatura media del trimestre más seco
BIO10	Temperatura media del trimestre más caliente
BIO11	Temperatura media del trimestre más frío

¹⁰ <http://www.worldclim.org/>

Código	Variable Bioclimática
BIO12	Precipitación anual
BIO13	Precipitación del mes más húmedo
BIO14	Precipitación del mes más seco
BIO15	Estacionalidad de la precipitación (Coeficiente de Variación)
BIO16	Precipitación del trimestre más húmedo
BIO17	Precipitación del trimestre más seco
BIO18	Precipitación del trimestre más caliente
BIO19	Precipitación del trimestre más frío

Fuente: Worldclim

En el caso de las variables bioclimáticas futuras, éstas están basadas en distintos modelos climáticos globales (GCM), creados por centros de investigación alrededor del mundo, que representan distintos procesos físicos que se dan tanto en la atmósfera, el océano y la superficie terrestre; estos simulan la respuesta que estos procesos tendrían ante una variación en las cantidades de gases de efecto invernadero, tanto a nivel geográfico como físico (IPCC, 2013). Dado que no existe un modelo climático que sea el mejor, porque todos varían a nivel espacial al momento de simular un cambio en patrones climáticos específicos, es necesario utilizar más de un modelo climático para integrar diferentes condiciones y evitar la incertidumbre con los resultados (Beaumont, Hughes & Pitman, 2008). Para esta investigación, se utilizaron tres modelos climáticos globales para las proyecciones a futuro del género *Polylepis*, realizando de esta manera un mejor análisis climático que integre diversos componentes y procesos físicos.

El primer modelo utilizado fue el Beijing Climate Center Climate System Model (BCC-CSM1-1). Este modelo posee una sensibilidad climática mucho mayor que sus modelos predecesores, pudiendo simular los cambios en la concentración de CO₂ en la atmósfera producto de las emisiones antropogénicas, así como los impactos de estos cambios en el clima global y episodios de enfriamiento durante el último milenio (Wu et al., 2014).

El segundo modelo que se utilizó fue el Hadley Centre Global Environmental Model version 2 Earth System (HadGEM2-ES), el cual considera las perturbaciones antropogénicas como una condición para la dinámica de la vegetación, a la vez que simula los efectos biofísicos y bioquímicos de la cobertura vegetal y su evolución natural en respuesta al clima, el cambio climático y las emisiones de CO₂ (Jones et al., 2011).

El último modelo utilizado fue el Community Climate System Model versión 4 (CCSM4), el cual contiene información de cuatro componentes: la atmósfera, océano, superficie terrestre y hielo marino. Este modelo es utilizado para realizar simulaciones realistas del promedio climático de la tierra frente a un amplio rango de resoluciones espacial, para estudiar épocas paleo climáticas, el clima del pasado cercano y para hacer proyecciones frente a un posible cambio climático (Hoffman et al., 2006; Gent et al., 2011).

Para el caso de la reconstrucción pasada, se buscó incluir los mismos modelos que la proyección a futuro, sin embargo, se utilizó un solo modelo climático (CCSM4) debido a que no estaban disponibles los datos climáticos para los otros modelos elegidos.

3.3. Elaboración de mapas de distribución potencial

En esta investigación se elaboraron mapas de distribución potencial de manera específica para las diferentes especies de *Polylepis* colectadas en Perú, dado que cada especie tiene una distribución geográfica específica y condiciones de vida únicas; y también mapas de distribución potencial a nivel de género.

Para la obtención de los mapas de distribución potencial a tiempo presente, pasado y futuro el procedimiento utilizado fue la técnica de modelamiento de distribución de especies a partir del programa Maxent¹¹ (versión 3.3.3k) (Phillips et al., 2006), el cual permitió establecer la distribución potencial del género y las especies de *Polylepis* a partir de datos de presencia previamente obtenidos, los cuales, combinados con una serie de variables bioclimáticas, permitieron estimar las localidades más propicias para la existencia del taxón a distintas escalas temporales. El procedimiento que se siguió estuvo basado en el manual y guía elaborados por Phillips & AT&T Research (s/f.), Scheldeman & van Zonneveld (2011) y Timaná & Cuentas (2016).

Todos los resultados obtenidos en cada uno de los procedimientos a ejecutar se trabajaron dentro de una sola carpeta designada específicamente para la investigación, dentro de la cual se fueron creando nuevas carpetas de trabajo.

Área de trabajo

La investigación se centró en analizar la distribución geográfica del género *Polylepis* en los Andes Centrales del Perú, sin embargo, para la elaboración de los mapas de distribución

¹¹ <https://www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent/>

potencial no se utilizaron los límites del área de estudio (Mapa 2.1.) como capa base para el modelamiento en Maxent. Si bien la recopilación de datos solo abarcó las especies que se desarrollan en el territorio peruano, limitarse a modelar teniendo en cuenta sólo los Andes Centrales del Perú implicaba confinar el área de distribución y, por consiguiente, los resultados. Es importante tener en cuenta que el objeto de estudio, así como otros elementos vegetales y animales, no responden a límites administrativos (como las fronteras entre países) para ejercer su distribución y/o moverse.

Dado que los objetivos fueron identificar las zonas de distribución potencial actuales para el género *Polylepis* e identificar las posibles áreas de ocurrencia del mismo en tres escenarios temporales (pasado, presente y futuro), fue necesario contar con un área de trabajo que admitiera una visión biogeográfica mucho más amplia de todo el territorio donde estos bosques actualmente existen. Así, se tendría un análisis completo y sin restricciones u omisión de algún resultado que pudiera obtenerse en los análisis posteriores.

Por ende, se consideró todo el territorio que circundaba al área de estudio y en donde el taxón está y ha estado presente. Ya que el género *Polylepis* tiene una distribución a lo largo de todos los Andes, desde Venezuela hasta el norte de Chile y Argentina, la capa base elegida para aplicar la técnica de modelamiento fue toda Sudamérica. Esta capa base será referida más adelante como el “área de trabajo”.

3.3.1. Elaboración de los mapas de distribución potencial actual

A continuación, se explicarán los pasos que se siguieron para elaborar los mapas de distribución potencial de *Polylepis*:

Etapas 1: Preparar los puntos de presencia

En primer lugar, se elaboró una base de datos en Excel con los puntos de presencia de nuestra especie. Aunque nuestra base de datos contenía muchas columnas de información, para el trabajo de modelamiento solo se trabajaron con tres columnas en el siguiente orden: Nombre de la especie/Longitud/Latitud de los puntos en grados decimales (ver Figura 3.1). Es importante que la data esté en grados decimales y en el orden correcto ya que es así como el programa Maxent podrá procesar el archivo sin problemas.

Figura 3.1.: Datos en Excel requeridos para ser utilizados en el programa Maxent.

	A	B	C
1	Especie	Longitud	Latitud
2	Polylepis	-69.958191	-17.440428
3	Polylepis	-72.089509	-13.262894
4	Polylepis	-73.789135	-14.907746
5	Polylepis	-71.3166	-16.4666
6	Polylepis	-71.3385	-16.38633
7	Polylepis	-70.68	-16.97
8	Polylepis	-70.36667	-15.16667
9	Polylepis	-76.16667	-10.6
10	Polylepis	-70.31317	-13.7985

Para esta investigación, se decidió trabajar la técnica de modelamiento solo con las especies de *Polylepis* para las cuales se obtuvo 20 o más puntos de colecta en total, estas fueron: *P. weberbaueri* (81), *P. sericea* (59), *P. incana* (49) y *P. racemosa* (39). La excepción fue *P. besseri*, la cual no se consideró para el análisis a nivel de especie ya que, si bien poseía 20 puntos de colecta, no estaba correctamente identificada (ver Tabla 3.1.). Además del análisis de estas cuatro especies, se hizo el análisis a nivel de género, el cual incluyó todos los puntos de colecta de las 19 especies (352 puntos). Para cada uno de los cinco casos se elaboró un archivo Excel con la información requerida y, posteriormente, se creó un archivo en formato csv (delimitado por comas) para la misma data, ya que es el formato con el cual se trabajan los datos de presencia en el Maxent.

Al finalizar esta etapa se obtuvieron dos tipos de archivos:

- Archivos en formato Excel, los cuales se convertirán a formato shapefile (*Click derecho* → *Data* → *Export Data*) para poder visualizar los puntos de colecta dentro del programa ArcMap.
- Archivos en formato csv para utilizarlos con el programa Maxent.

Etapa 2: Preparar las variables climáticas

En segundo lugar, se descargó el shapefile de nuestra área de trabajo desde la página de *DivaGis*¹². Esta página provee data espacial gratuita a nivel de país para todo el mundo; incluye límites administrativos, carreteras, ferrocarriles, la altitud, la ocupación del suelo, la densidad de población, entre otra información. Se descargó los límites administrativos del mundo en formato zip, los cuales luego se cortaron en el programa ArcMap (*Spatial Analyst Tools* → *Extraction* → *Extract by Mask*) para trabajar solo con el área de Sudamérica.

¹² <http://www.diva-gis.org/gdata>

A la vez, se procedió a descargar las variables bioclimáticas desde la página de *Worldclim*¹³. Desde aquí se descargó la data climática existente para las condiciones actuales (para el periodo de 1960-1990), futuras (de acuerdo a dos de las cuatro proyecciones climáticas hechas por el IPCC) y pasadas (correspondientes a mediados del Holoceno, hace 6000 años atrás). Toda la data está en una resolución espacial de 30 segundos ya que es la que posee mejor resolución. Para trabajar con las condiciones climáticas actuales, se descargaron dos archivos, el de variables bioclimáticas y altitud, ambos en formato BIL para que, de esta manera, puedan ser trabajados por Maxent.

Las variables bioclimáticas tuvieron que pasar por un proceso de control en ArcMap, para precisar su referencia espacial y definir la proyección espacial en el formato WGS-1984 (*Data Management Tools* → *Projections and Transformation* → *Raster* → *Project Raster*), además, se les recortaron de acuerdo al área de trabajo definida. Luego de este paso se convirtieron a un nuevo formato (ASCII) para poder ser utilizadas en Maxent (*Conversion Tools* → *From Raster* → *Raster to ASCII*).

En un inicio, y de manera adicional, se incluyeron tres variables más para complementar la investigación: la pendiente, la orientación y la evapotranspiración. Estas variables fueron elegidas ya que son tres factores físicos determinantes en la distribución del género *Polylepis*:

- La pendiente: esta variable se incluyó debido a que juega un rol fundamental en la distribución de las especies de *Polylepis*, constituyendo el hábitat de las especies. Es a partir de la variable de altitud descargada que se generó un archivo que representaba la pendiente (*Spatial Analyst Tools* → *Surface* → *Slope*).
- La orientación: la cual ejerce una influencia en la presencia o no de vegetación según la latitud (Dourojeanni, 2008). A partir de la variable de altitud descargada es que se generó un archivo que represente la orientación de la ladera (*Spatial Analyst Tools* → *Surface* → *Aspect*).
- La evapotranspiración: ya que está correlacionada con el crecimiento de la especie (periodos secos-húmedos). Esta variable se descargó de la página CGIAR-CSI (<http://www.cgiar-csi.org/data/global-aridity-and-pet-database>).

Estas tres nuevas variables se convirtieron al formato ASCII para poder ser utilizadas en el modelamiento con Maxent. La variable pendiente y orientación se utilizaron para el

¹³ <http://www.worldclim.org/>

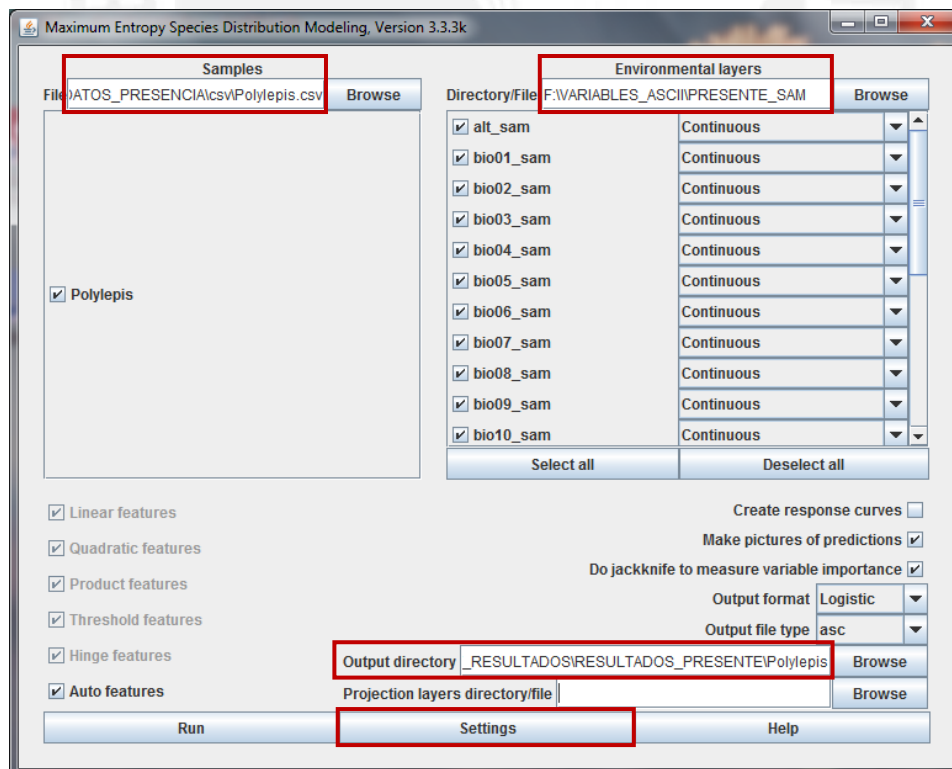
modelamiento en los tres tiempos (pasado, presente y futuro), sin embargo, la variable evapotranspiración solo se utilizó para el modelamiento a tiempo presente y futuro, para evitar asumir que los procesos de evapotranspiración en el pasado eran los mismos que en el presente.

Etapa 3: Modelamiento con Maxent

En tercer lugar, y una vez que todos los datos estuvieron en los formatos correctos, se procedió a abrir Maxent para iniciar el proceso de modelamiento, ejecutando el archivo en el formato *Executable Jar File*.

Ya en el programa Maxent, se agregaron los archivos en formato csv creados para los puntos de presencia de cada especie en la pestaña *Samples*, y las variables bioclimáticas convertidas a formato ASCII en la sección de *Environmental layers*. La carpeta donde van los resultados obtenidos se indicó en el *Output directory*. En la pestaña *Settings*, se verificó que la opción *Remove duplicate presence records* esté seleccionada y que la opción *Crossvalidate* esté indicada en *Replicate run type*. Luego de esto, se procedió a ejecutar el programa dando clic en *Run*.

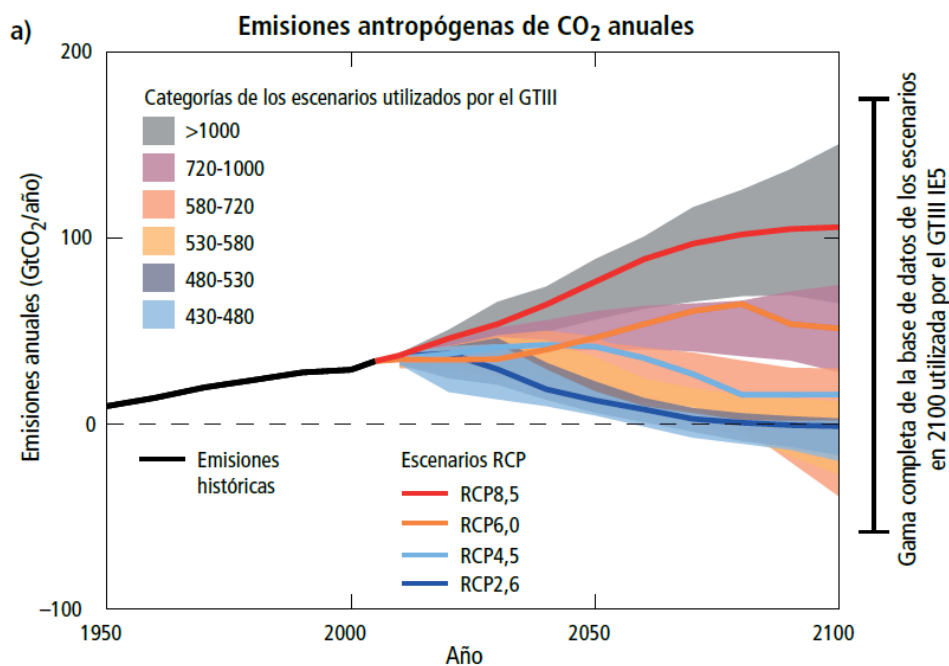
Figura 3.2.: Plataforma Maxent con los datos ingresados para su ejecución.



3.3.2. Elaboración de los mapas de distribución potencial al futuro

Para elaborar los mapas de distribución potencial a futuro, se descargaron las variables bioclimáticas para las condiciones futuras. Dentro de la plataforma Worldclim hay información bioclimática proyectada para dos períodos de tiempo: el año 2050 (un promedio entre 2041-2060) y el año 2070 (un promedio entre 2061-2080); esta investigación trabajó con las proyecciones para el año 2050. A su vez, para cada uno de los GCM se utilizaron dos de las cuatro trayectorias de concentración representativas (RCP) establecidas por el IPCC para los gases de efecto invernadero (GEI); estas son las más recientes proyecciones dispuestas en el Quinto Informe de Evaluación del IPCC (IPCC, 2014). Estos RCP consideran las perturbaciones externas impuestas al sistema climático de la Tierra, las concentraciones de GEI y la trayectoria de las emisiones a lo largo del tiempo (Moss et al., 2008). En la Figura 3.4 se puede observar que de acuerdo al escenario RCP, las emisiones anuales de CO₂ van a presentar un crecimiento distinto hasta llegar al año 2100. De esta manera, dependiendo de la concentración de los GEI, cada uno de los RCP describirán un escenario climático con cierto grado de amenaza: un escenario de mitigación estricto (RCP 2.6), dos escenarios intermedios (RCP 4.5 y RCP 6.0), y un escenario con un nivel muy alto de emisiones de GEI (RCP 8.5).

Figura 3.3.: Emisiones históricas de dióxido de carbono (CO₂) según escenarios RCP.



Fuente: IPCC, 2014

Para esta investigación, se trabajó con el RCP 2.6, el cual representa un escenario bajo de emisiones GEI, y el RCP 8.5, el cual representa un escenario más extremo de emisiones GEI. La siguiente tabla muestra las características de ambos escenarios:

Tabla 3.3.: Características de los RCP.

Escenario	Cambio medio global de las temperaturas superficiales del 2046-2065 (°C)		Emisiones acumuladas de CO ₂ del 2012 al 2100 (GtCO ₂) (*)	
	Media	Rango probable	Media	Rango
RCP 8.5	2.0	1.4 – 2.6	6180	5185 - 7005
RCP 2.6	1.0	0.4 – 1.6	990	510 - 1505

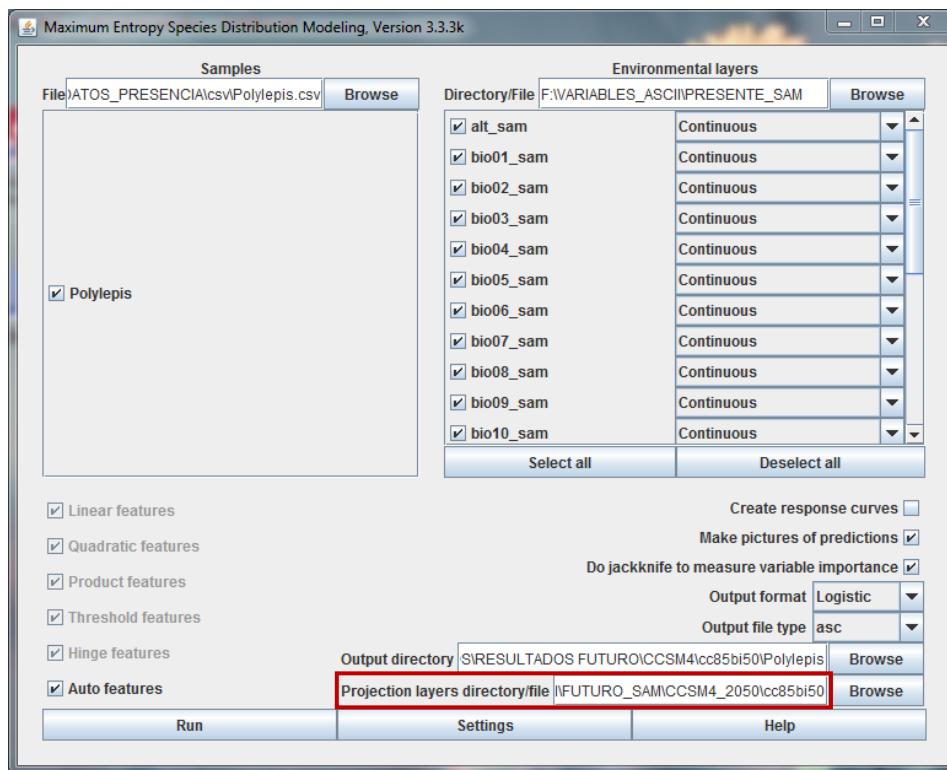
(*) Gigaton de dióxido de carbono.

Fuente: IPCC, 2013.

Por ende, se descargaron para el año 2050 los archivos de las variables bioclimáticas (bi) en una resolución de 30 segundos para los tres GCM a utilizar (BCC-CSM1-1, CCSM4 y HadGEM2-ES), y en los dos escenarios de RCP a utilizar (RCP 2.6, 8.5).

A continuación, se siguió el mismo procedimiento descrito en el apartado anterior para preparar las variables climáticas. Para el modelamiento con Maxent, sin embargo, además de las variables bioclimáticas a tiempo presente, se utilizaron las variables bioclimáticas futuras. Estas variables deben tener el mismo nombre que las variables presentes y su carpeta de ubicación debe estar señalada, dentro de la ventana de Maxent, en la opción *Projection layers directory/file*. Ya que lo que se buscó era crear un mapa binario (ausencia-presencia), en la pestaña *Settings*, dentro de la pestaña *Advanced settings*, en la opción *Applied threshold rule*, se debe seleccionar *10 percentile training presence*. Así, se compararon las condiciones actuales con las proyecciones futuras para generar dos tipos de áreas de distribución potencial: unas en las que el cambio climático afectará severamente y otras donde no afectará en gran medida. De esta manera, se obtienen las áreas de ocurrencia natural de la especie en un futuro (Scheldeman & van Zonneveld, 2011).

Figura 3.4.: Plataforma Maxent con los datos ingresados para la proyección a futuro.



3.3.3. Elaboración de los mapas de distribución potencial pasada

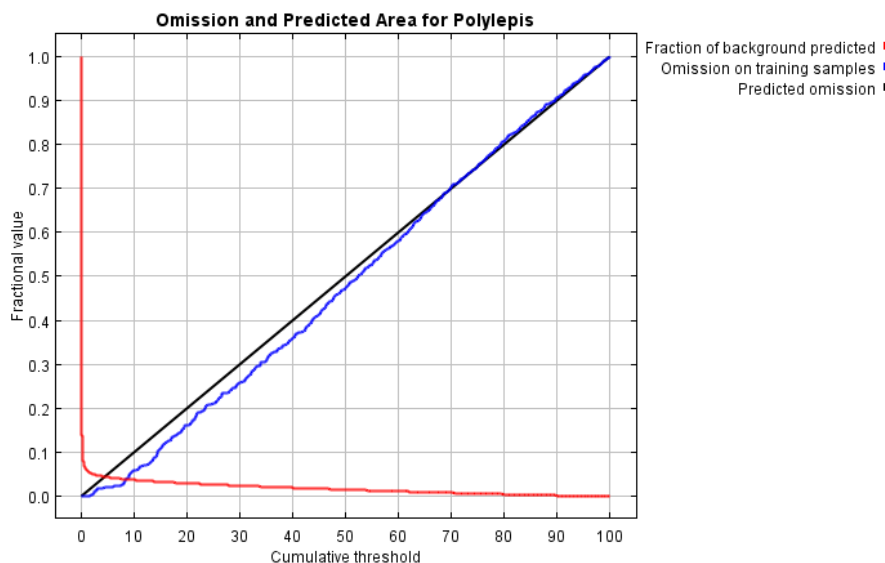
Para elaborar los mapas de distribución potencial pasada, se siguió el mismo procedimiento utilizado para la elaboración de los mapas de distribución potencial a futuro descrito en el apartado anterior. La diferencia radica en las variables bioclimáticas a utilizar, éstas serán datos climáticos para el pasado a partir de simulaciones con un solo GCM (CCSM4). Se accedieron a estas capas climáticas desde la página Worldclim, en donde hay data para el período correspondiente a mediados del Holoceno (hace 6000 años atrás) y para la última glaciación máxima (hace 22 000 años atrás). En esta investigación, se trabajó con el período de mediados del Holoceno, descargándose el archivo de las variables bioclimáticas (bi), en una resolución espacial de 30 segundos. Se escogió este periodo de tiempo ya que, según Fjeldså & Kessler (2004), la evidencia para la distribución de los bosques alto andinos desde la última glaciación es “limitada y conflictiva”, y, por otro lado, se cuenta con evidencia de presencia temprana de humanos en el último período del Pleistoceno, por lo que se puede suponer que para el período del Holoceno ya habría existido un tipo de uso de los bosques o impacto en ellos. La elección de este periodo de tiempo fue importante para la investigación ya que se buscó trabajar con un espacio temporal dinámico.

3.4. Interpretación y manejo de la data resultante

Al culminar la ejecución del Maxent, dentro de la carpeta de resultados aparecerán una serie de archivos de los cuáles tendremos que abrir el que tiene formato html, esto nos llevará a una página web que muestra cinco resultados claves que se explicarán a continuación para su posterior análisis en el capítulo de discusión. Para interpretar la data se hizo uso del “Manual de Capacitación en Análisis Espacial de Diversidad y Distribución de Plantas” de Scheldeman & van Zonneveld (2011).

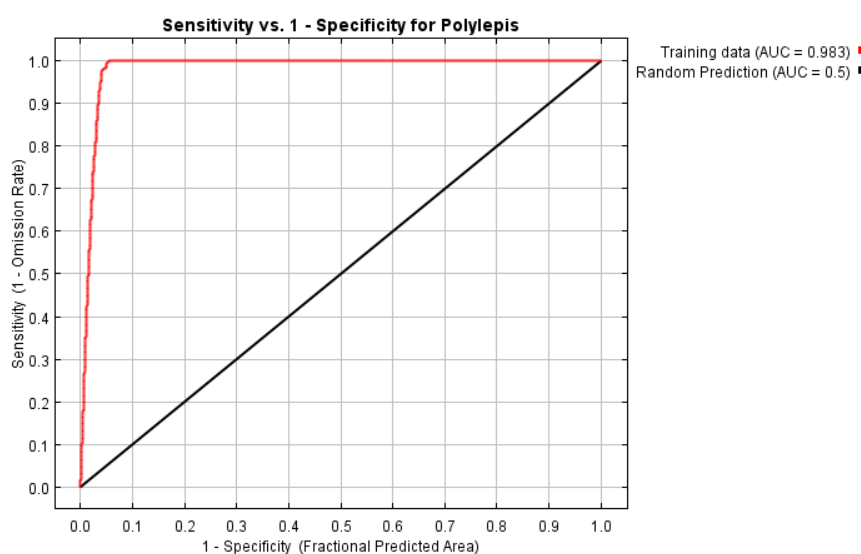
Al abrir el enlace html, en primer lugar, se obtiene una matriz de “Omission and Predicted Area” (ver Figura 3.5). Esta matriz, consta de tres líneas. La línea negra es una línea de referencia; la azul representa los puntos de presencia ubicados fuera del área potencial del modelo de Maxent; y la línea roja representa los puntos aleatorios al área de trabajo que se incluyeron como parte del modelo. Lo más resaltante de este resultado es el comportamiento de la línea azul; en caso esta se ubique muy por debajo de la línea de referencia se puede inferir que el modelo está sobre ajustado.

Figura 3.5.: Matriz de omisión y área prevista del modelo de distribución.



En segundo lugar, se obtiene una matriz que representa la curva operacional ROC (Característica de funcionamiento del receptor) y el parámetro AUC (Área por debajo de la curva) (ver Figura 3.6). Al igual que en la matriz anterior, la línea negra es una línea de referencia, mientras que la línea roja representa el ajuste del modelo a los datos de muestreo, es decir, el grado de predicción del modelo en base a la data de presencia.

Figura 3.6.: Matriz ROC del modelo de distribución.



Según Scheldeman & van Zonneveld (2011), la mayor capacidad de predecir de un modelo generado por Maxent se alcanza cuando el AUC tiene un valor de 1, y, teniendo 1 como valor máximo. Araújo, Pearson, Thuiller & Erhard (2005b) realizan la siguiente interpretación del AUC (ver Tabla 3.4), agrupándolo por rangos de acuerdo a la calidad del resultado. Esto indica qué tan confiables son los resultados obtenidos en Maxent.

Tabla 3.4.: Rangos de valorización del parámetro AUC.

Rango del AUC	
Excelente	> 0.90
Buena	0.80 <AUC< 0.90
Aceptable	0.70 <AUC< 0.80
Mala	0.60 <AUC< 0.70
No válida	0.50 <AUC< 0.60

Elaboración propia

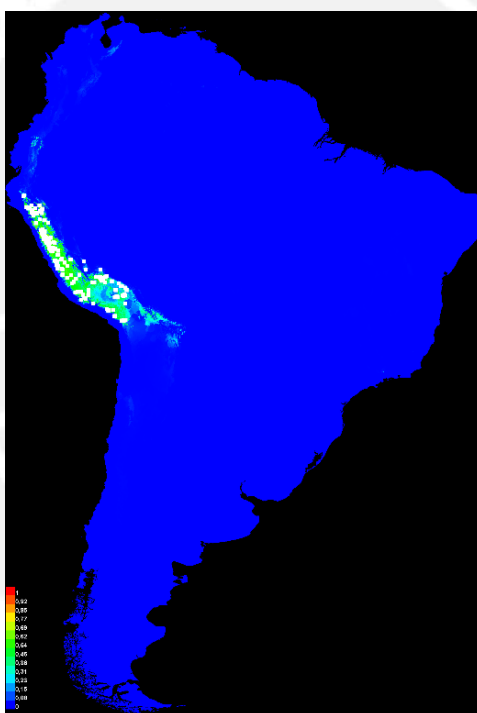
En tercer lugar, se obtiene una tabla que contiene el umbral “10 percentile training presence” (ver Figura 3.7), el cual indica el límite entre los datos que se encuentran dentro del área potencial de distribución y los que no están dentro de ella. Este límite se define por una tasa de omisión del 10% de los datos que por errores o por condiciones micro climáticas raras no permiten que la especie tenga las condiciones adecuadas para distribuirse en ciertas zonas. De esta manera, este valor permitirá establecer la distribución exacta del 90% de los datos que sí se encuentran dentro del área potencial y poder elaborar el mapa de distribución dentro de ArcGis.

Figura 3.7.: Tabla logística que indica el percentil 10 del modelo de distribución.

Cumulative threshold	Logistic threshold	Description	Fractional predicted area	Training omission rate
1.000	0.032	Fixed cumulative value 1	0.061	0.000
5.000	0.222	Fixed cumulative value 5	0.044	0.021
10.000	0.342	Fixed cumulative value 10	0.038	0.060
1.646	0.063	Minimum training presence	0.054	0.000
14.442	0.390	10 percentile training presence	0.034	0.099
8.554	0.306	Equal training sensitivity and specificity	0.039	0.039
1.646	0.063	Maximum training sensitivity plus specificity	0.054	0.000
0.655	0.019	Balance training omission, predicted area and threshold value	0.067	0.000
3.091	0.149	Equate entropy of thresholded and original distributions	0.048	0.018

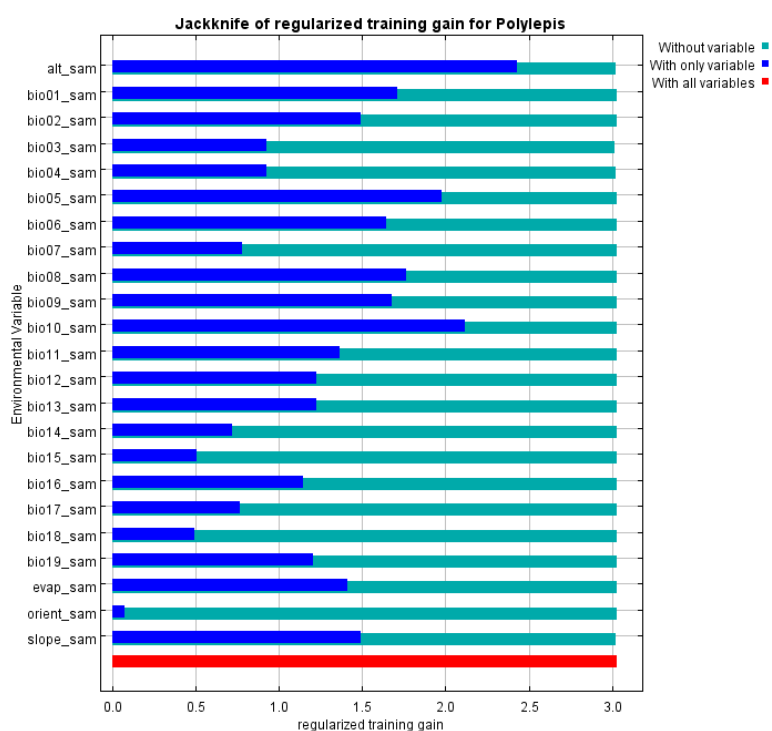
En cuarto lugar, se muestra una imagen del modelo obtenido junto a una gama de colores que indican las áreas con mejores condiciones previstas para la distribución de la especie modelada (los colores más cálidos) (ver Figura 3.8). A la vez, se muestran ubicados los puntos de presencia utilizados para generar el modelo.

Figura 3.8.: Representación del modelo obtenido en Maxent.



Finalmente, se obtiene una tabla de la prueba “Jackknife” (ver Figura 3.9), que muestra el nivel de contribución de cada variable bioclimática utilizada, con lo cual se puede determinar cuáles fueron las variables más útiles y cuáles no aportaron mucho en el modelo. Esto permite conocer cuáles variables influyen más en la distribución potencial de una especie, pudiendo prescindir de las que no son tan importantes para realizar otro análisis más preciso.

Figura 3.9.: Prueba de Jackknife para el modelo de distribución.



3.4.1. Procesamiento de resultados en ArcGis

En esta investigación se utilizó la versión 10 de ArcMap para procesar los resultados obtenidos con Maxent, y, así, poder crear los mapas de distribución potencial y calcular el total de las áreas potenciales a ocupar por las especies de *Polylepis*. Para esto, se utilizó “Modelamiento de distribución de especies con MaxEnt: Una guía práctica” de Timaná & Cuentas (2016), y se trabajaron con los archivos en formato ASCII que se generaron en la carpeta de resultados de cada una de las especies.

Creación de mapas

El primer paso, fue abrir el archivo ASCII en el programa ArcMap y convertirlo a formato ráster para poder trabajar con la data (*Conversion Tools* → *To Raster* → *ASCII to Raster*). Luego de convertido a formato ráster, se le asignó una referencia espacial, dado que no contaba con una (*Data Management Tools* → *Projections and Transformations* → *Raster* → *Project Raster*), proyectándolo a un sistema de coordenadas geográfico: WGS 1984. Una vez proyectado el ráster, se procedió a modificar la simbología del mismo y clasificarlo en clases de acuerdo al valor del percentil 10 y a partir de este en intervalos iguales, para distinguir entre las zonas de distribución que son más o menos idóneas para la especie (*Click derecho* → *Properties* → *Symbolology* → *Classified*) (ver Tabla 3.5).

Dado que cada especie tenía un valor del percentil 10 diferente (ver anexo 2), para poder establecer una mejor comparación de los resultados se estableció una clasificación más general que permitiera un mejor análisis, más comprensible, uniforme y que integrara todos los resultados de las especies analizadas a pesar de que los valores entre ellas no sean los mismos. La clasificación elaborada se da a partir del valor 0.5 de los datos considerando que, a partir de este valor y por encima del mismo, los datos indicarían la presencia de la especie en el área de trabajo. La clasificación elaborada fue la siguiente:

Tabla 3.5.: Clasificación de la idoneidad del hábitat.

Clasificación de valores de idoneidad de hábitat	
Poco óptimo	< 0.5
Óptimo	0.5 - 0.7
Muy óptimo	0.7 - 0.9
Altamente óptimo	0.9 - 1

Elaboración propia

A cada intervalo se le designó un color, el cuál sirvió para poder identificar las zonas más o menos idóneas de distribución potencial de las especies de *Polylepis* de acuerdo a la clasificación adoptada. Finalmente, se compararon las zonas de mayor idoneidad con los puntos de colecta por cada especie y los límites departamentales de Perú, para ver en qué áreas estaban ubicadas las nuevas zonas, y si coincidían con los hábitats reales de cada especie.

Cálculo de áreas

Al archivo ráster se le tuvo que dar una nueva referencia espacial, con un sistema de coordenadas que tuviera unidades lineares para que, de esta manera, se pueda realizar el cálculo de áreas sin problemas (*Data Management Tools* → *Projections and Transformations* → *Raster* → *Project Raster*). Para esto, se utilizó un sistema de coordenadas proyectadas y la proyección Cilíndrica equivalente (Cylindrical Equal Area).

Luego de esto, se reclasificó el ráster con la nueva proyección en clases de acuerdo al valor del percentil 10, y a partir de este en intervalos iguales, del mismo modo que se realizó al crear los mapas de distribución potencial (*3D Analyst Tools* → *Raster Reclass* → *Reclassify*). Cada intervalo tuvo un nuevo valor, representado por un número, de esta manera, se agruparon todos los valores correspondientes a un mismo intervalo en una sola

categoría. Fue importante saber qué número representa a cada intervalo ya que, al momento de sacar las áreas totales, esta información fue útil.

Una vez reclasificado el ráster, se convirtió el mismo a polígono (*Conversion Tools* → *From Raster* → *Raster to Polygon*). Obtenido el polígono, se abrió su tabla de atributos y se creó un nuevo campo en la tabla (*Add Field*) con el nombre “Area_ha”, dado que se buscaba calcular el área en hectáreas; en este nuevo campo se seleccionó la opción calcular geometría (*Click derecho en “Area_ha”* → *Calculate Geometry*). Realizando esto se obtuvo la cantidad de hectáreas correspondientes para cada categoría (*GRIDCODE*), sin embargo, estas se encontraban divididas en varios registros. Para poder hallar el total del área ocupada para cada categoría se hizo un resumen de estadísticas (*Click derecho en “GRIDCODE”* → *Summarize* → *seleccionar Area_ha* → *seleccionar Sum*), esto nos dio un archivo Excel con el total de las hectáreas para cada categoría, las cuáles se sumaron y, así, se obtuvo la cantidad de hectáreas totales de distribución potencial para cada especie de *Polylepis*.

Posteriormente, se hizo el cálculo de la variación porcentual entre áreas, con el fin de comparar los espacios temporales entre sí y ver la variación que habían sufrido en términos porcentuales. Para esto, se utilizó la siguiente fórmula:

$$\text{Variación porcentual} = \left[\frac{(\text{Valor al final del periodo} - \text{Valor al inicio del periodo})}{\text{Valor al inicio del periodo}} \right] \times 100$$

El “valor al inicio del periodo” fue representado por la distribución potencial presente, mientras que el “valor al final del periodo” por la distribución potencial pasada y futura. El valor obtenido mostró el porcentaje de cambio (ascendente o descendente) que experimentaron las hectáreas de cada una de las cuatro especies, y del género *Polylepis* en relación a la distribución potencial presente (ver Tabla 4.7).

Con la información de las hectáreas de superficie ocupadas, más los mapas elaborados de distribución potencial de *Polylepis*, se pudo discutir e interpretar los resultados, comparando las áreas resultantes entre los espacios temporales y generando, a partir de esto, estimaciones del grado de distribución existente para cada uno de los espacios temporales de estudio.

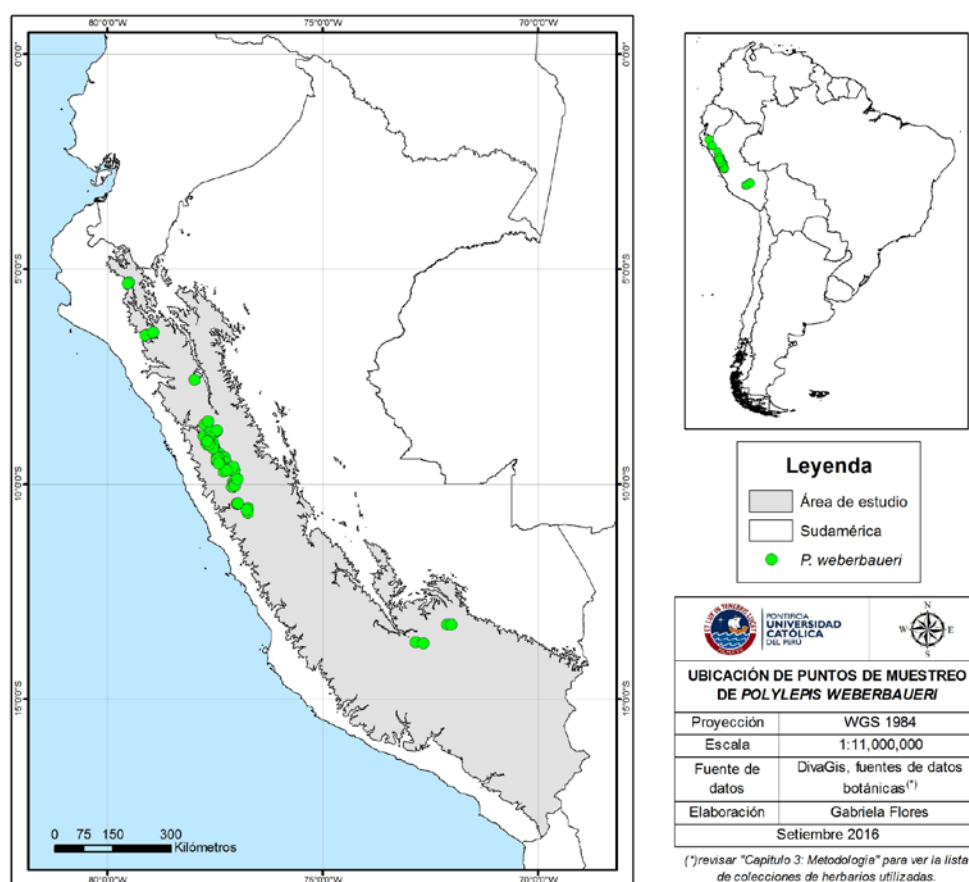
CAPÍTULO 4

RESULTADOS

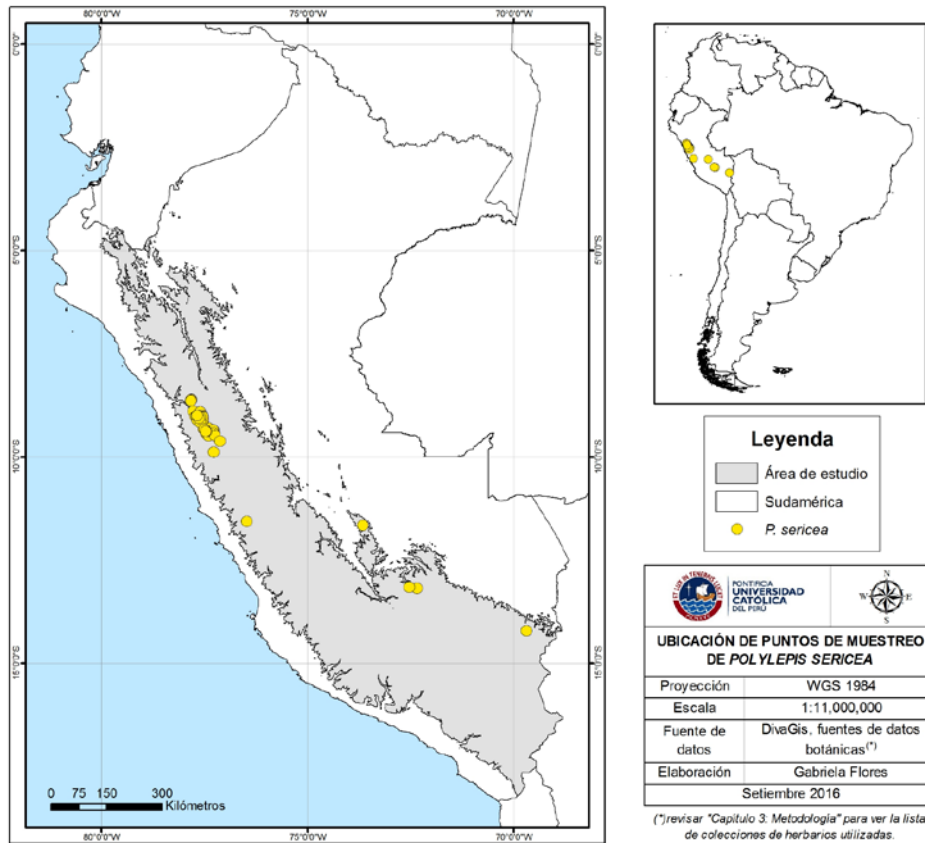
A continuación, se presentarán los mapas de distribución potencial actual, pasada y futura obtenidos con Maxent para las cuatro especies de *Polylepis* analizadas además del análisis del género. A la vez, se expondrán los resultados del rango AUC y los cambios de cobertura por área en hectáreas y en porcentaje.

Para modelar las cuatro especies seleccionadas se utilizaron cantidades diferentes de puntos de colecta, según la data recopilada para cada especie. Los puntos utilizados fueron los que tuvieron un índice de georreferenciación entre 1-2, distribuyéndose de diferente manera en el territorio peruano de acuerdo a la especie de *Polylepis*: *P. weberbaueri* (81 puntos), *P. sericea* (59 puntos), *P. incana* (49 puntos), *P. racemosa* (39 puntos). Por otro lado, para el análisis del género se utilizaron el total de 352 puntos de muestreo, los cuáles incluyeron a todas las 19 especies identificadas.

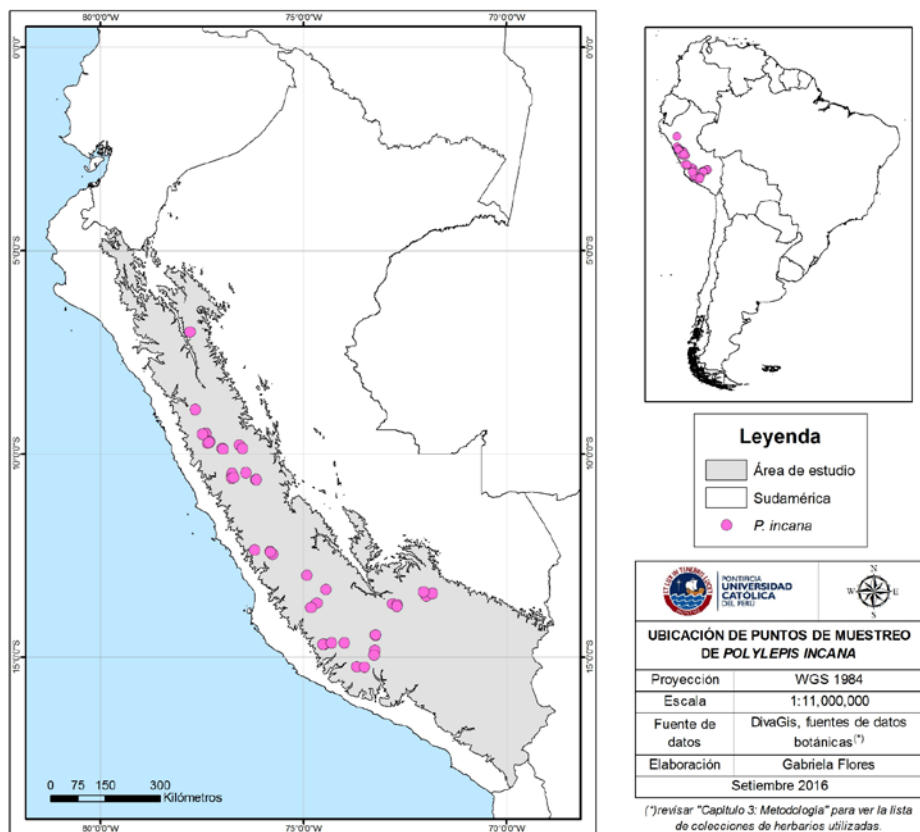
Mapa 4.1.: Mapa de ubicación de puntos de muestreo para *Polylepis weberbaueri*.



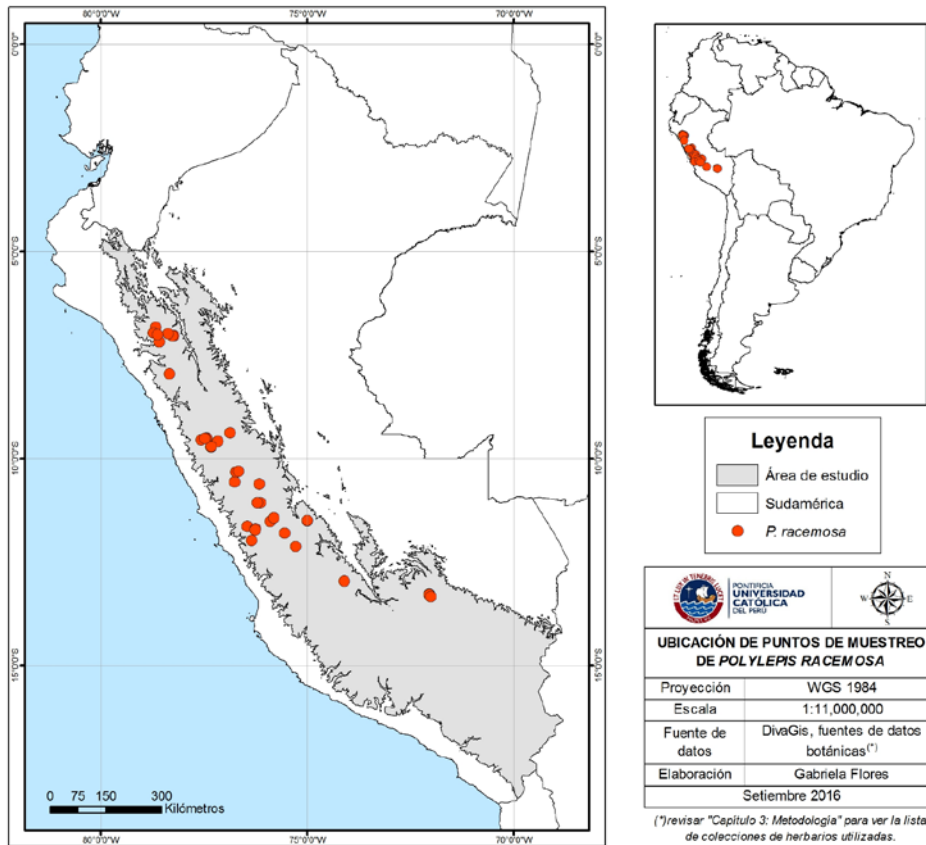
Mapa 4.2.: Mapa de ubicación de puntos de muestreo para *Polylepis sericea*.



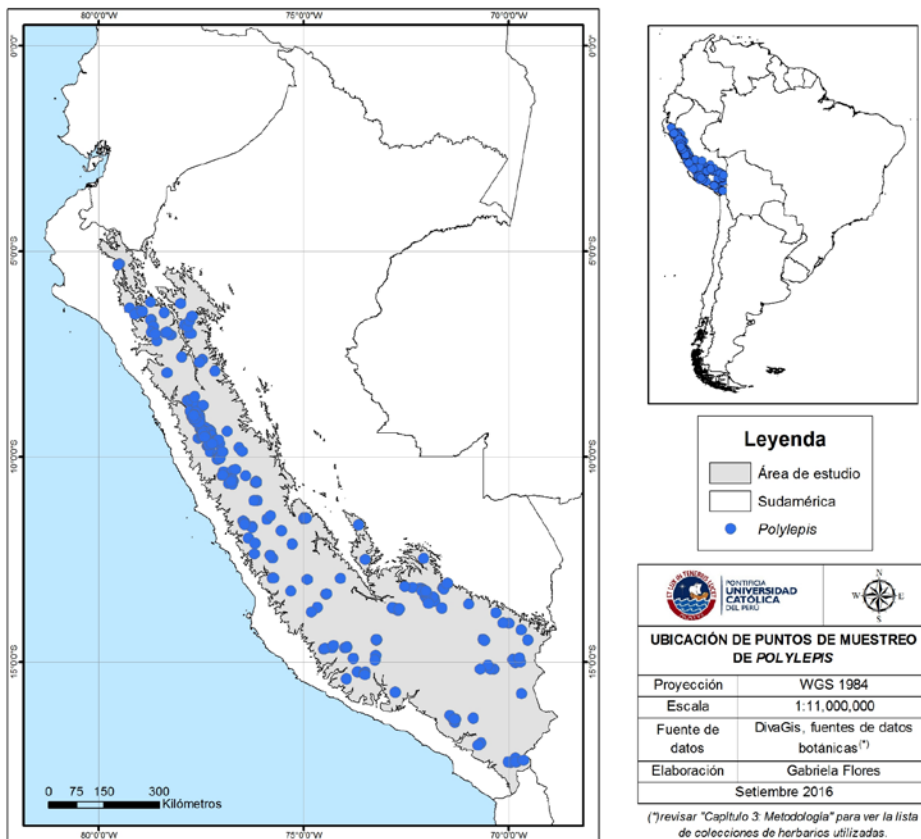
Mapa 4.3.: Mapa de ubicación de puntos de muestreo para *Polylepis incana*.



Mapa 4.4.: Mapa de ubicación de puntos de muestreo para *Polylepis racemosa*.



Mapa 4.5.: Mapa de ubicación de puntos de muestreo para el género *Polylepis*.



4.1. Contribución de las variables

Tras una prueba inicial con el programa Maxent, la prueba Jackknife mostró la cantidad de contribución de cada una de las variables al modelo generado, siendo la variable orientación la que menos contribución tenía en cada una de las especies y con todos los GCM utilizados. La variable pendiente respondió bien al modelo, sin embargo, dada la correlación existente entre esta y la variable orientación, se optó por tomar con precaución esta respuesta y omitir ambas de la investigación.

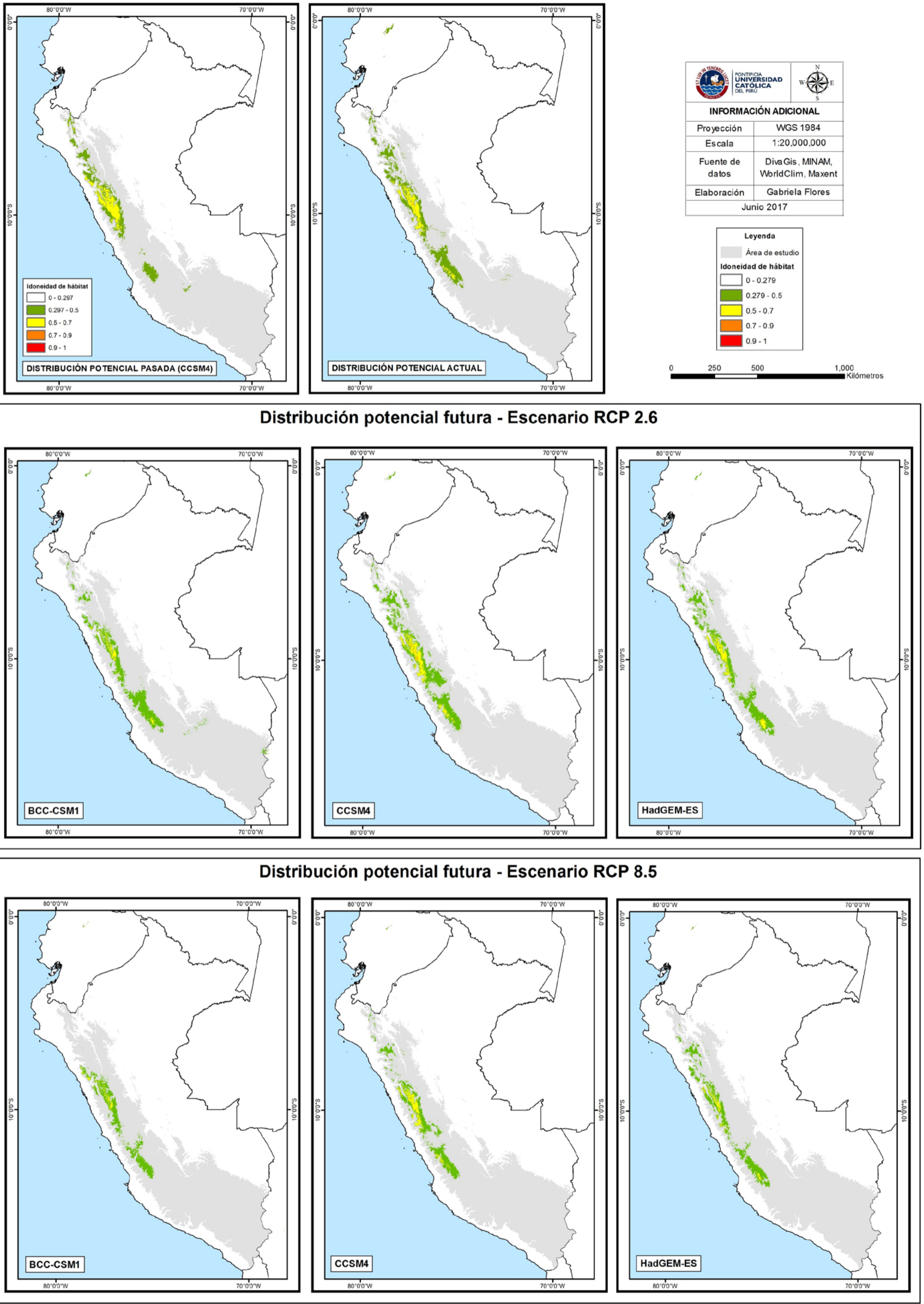
Así, a pesar de que estas variables fueron elegidas en un inicio porque son parte de tres factores físicos determinantes en la distribución del género *Polylepis*, se decidió dejar de considerar a las variables orientación y pendiente, y volver a procesar todos los datos sin ellas. A partir de estos nuevos resultados es que se procedió a crear los mapas de distribución potencial y a hacer el análisis de los mismos.

4.2. Resultados del análisis con Maxent

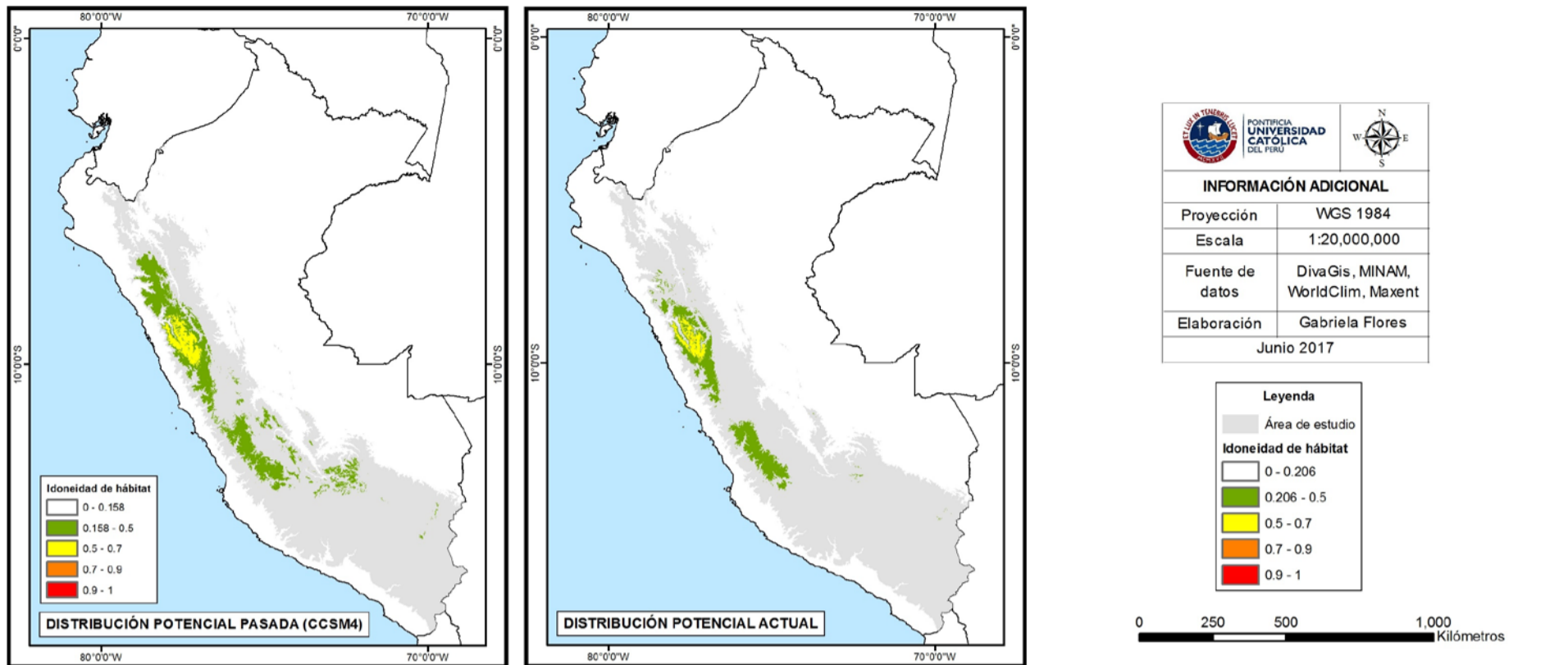
El parámetro AUC para las cuatro especies modeladas y en todos los escenarios de predicción fue de 0.995 hasta 0.997, mientras que el parámetro AUC para el género *Polylepis* fue de 0.983. Por ende, el grado de predicción de los modelos en base a la data de presencia existente obtuvo un valor de “excelente” según la clasificación de Araújo et al. (2005b), resultado corroborado por el comportamiento de las matrices de omisión y predicción del área potencial obtenida para las cuatro especies, las cuales mostraban una conducta normal del modelo. Esto indica que los resultados obtenidos son confiables (ver anexo 1).

A continuación, se presentarán los mapas elaborados a partir de los resultados obtenidos y en base a la clasificación de idoneidad del hábitat (ver Tabla 3.5). Los cinco mapas resultantes contienen tres resultados: la distribución potencial pasada con el GCM CCSM4, la distribución potencial presente, y la distribución potencial futura al año 2050 para los tres modelos climáticos globales utilizados y en los dos escenarios de RCP elegidos. Todos los mapas representan las zonas de idoneidad de hábitat a través de una clasificación de cuatro colores: verde para las áreas poco óptimas, amarillo para las zonas óptimas, anaranjado para las zonas muy óptimas y rojo para las zonas altamente óptimas a ocupar por las especies de *Polylepis* dentro del territorio peruano.

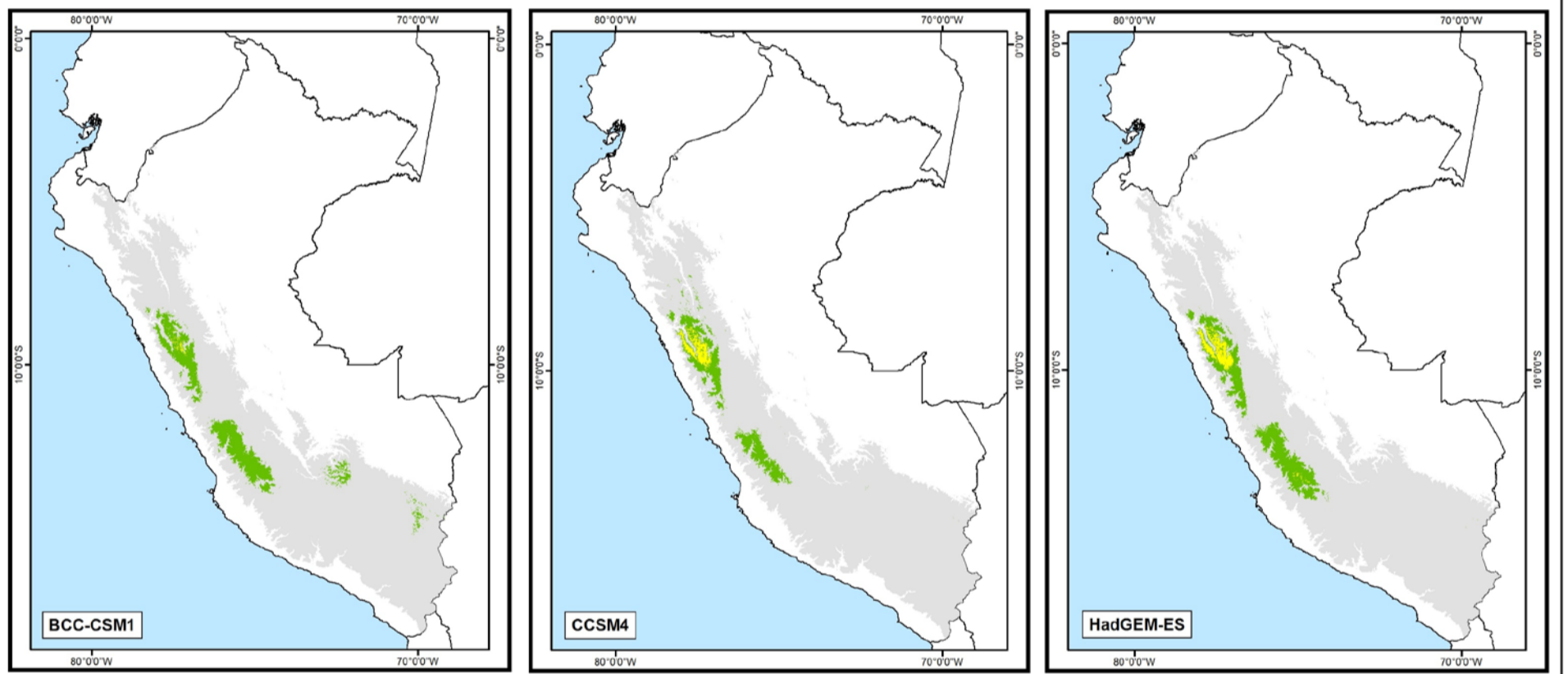
Mapa 4.6. Distribución potencial de *Polylepis weberbaueri*



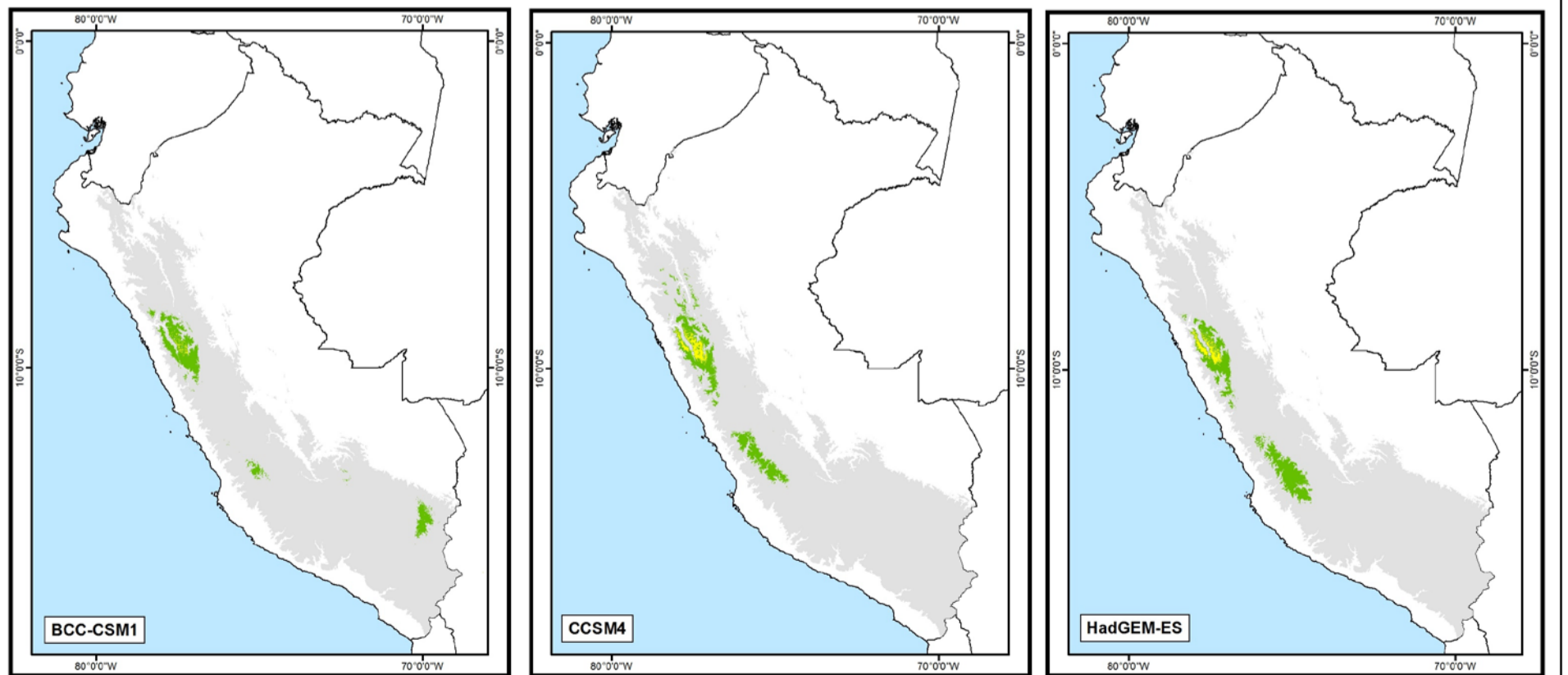
Mapa 4.7. Distribución potencial de *Polylepis sericea*



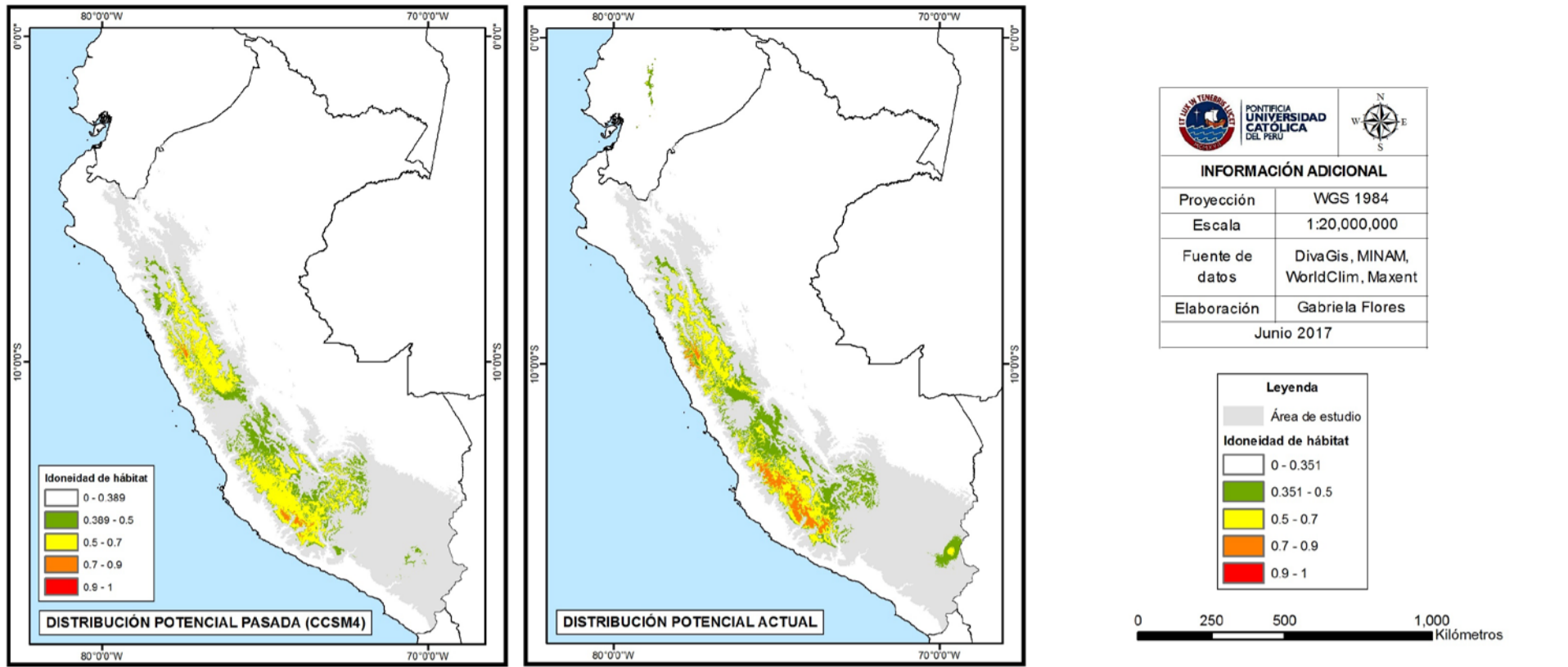
Distribución potencial futura - Escenario RCP 2.6



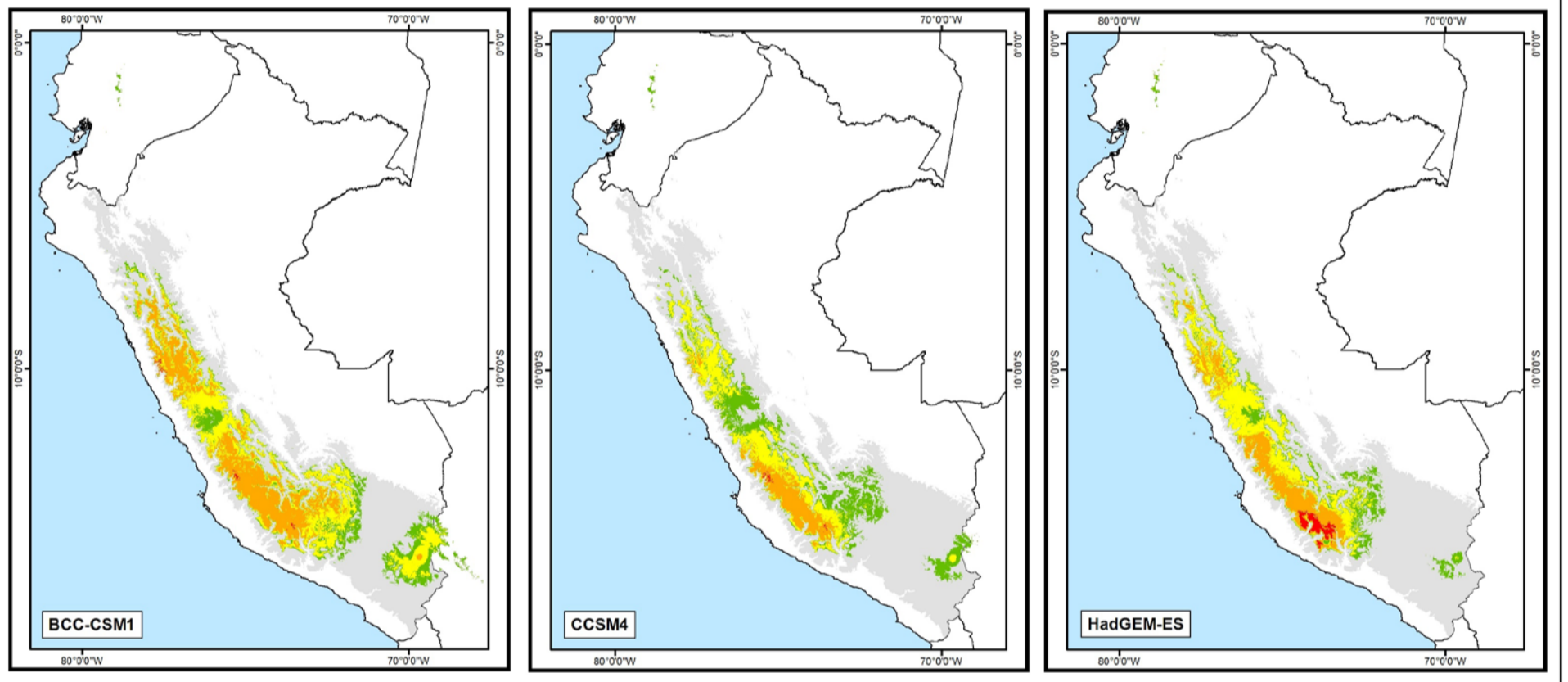
Distribución potencial futura - Escenario RCP 8.5



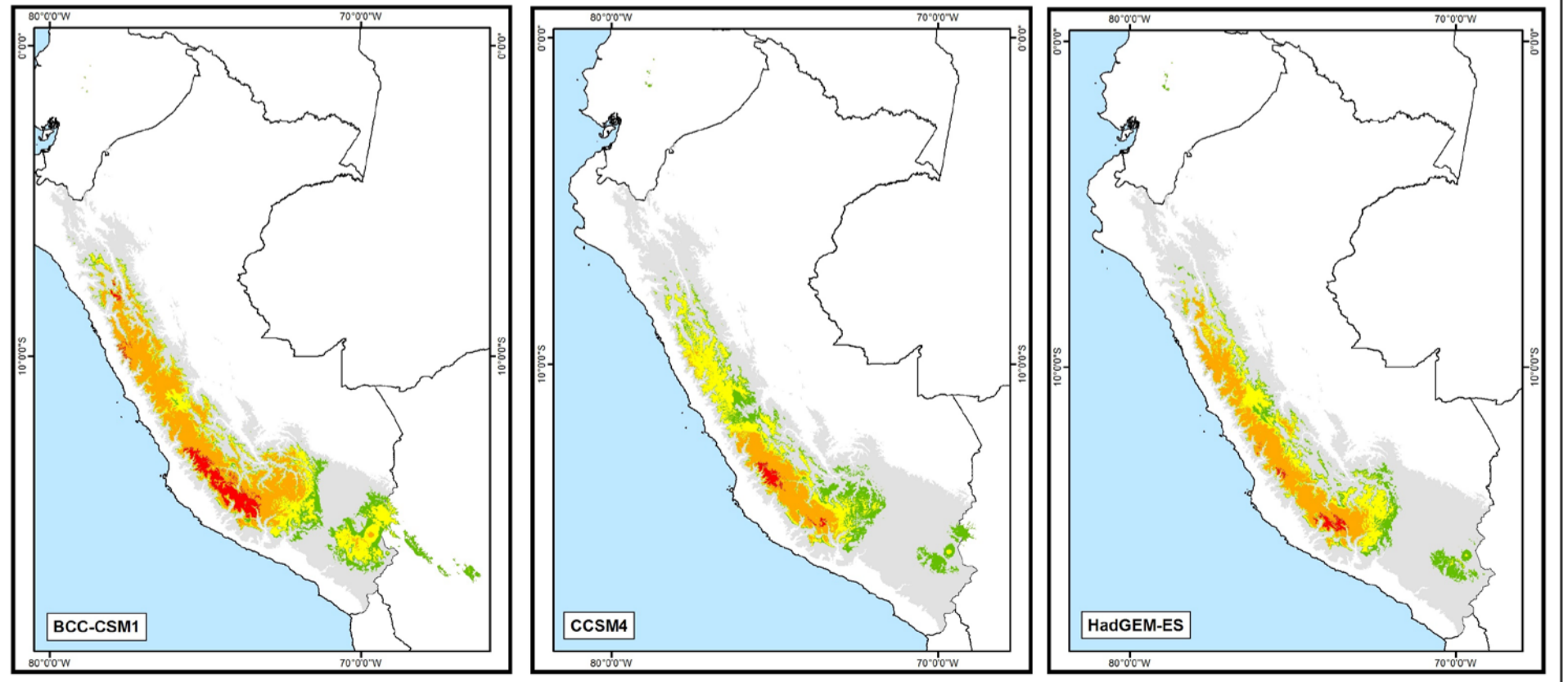
Mapa 4.8. Distribución potencial de *Polylepis incana*



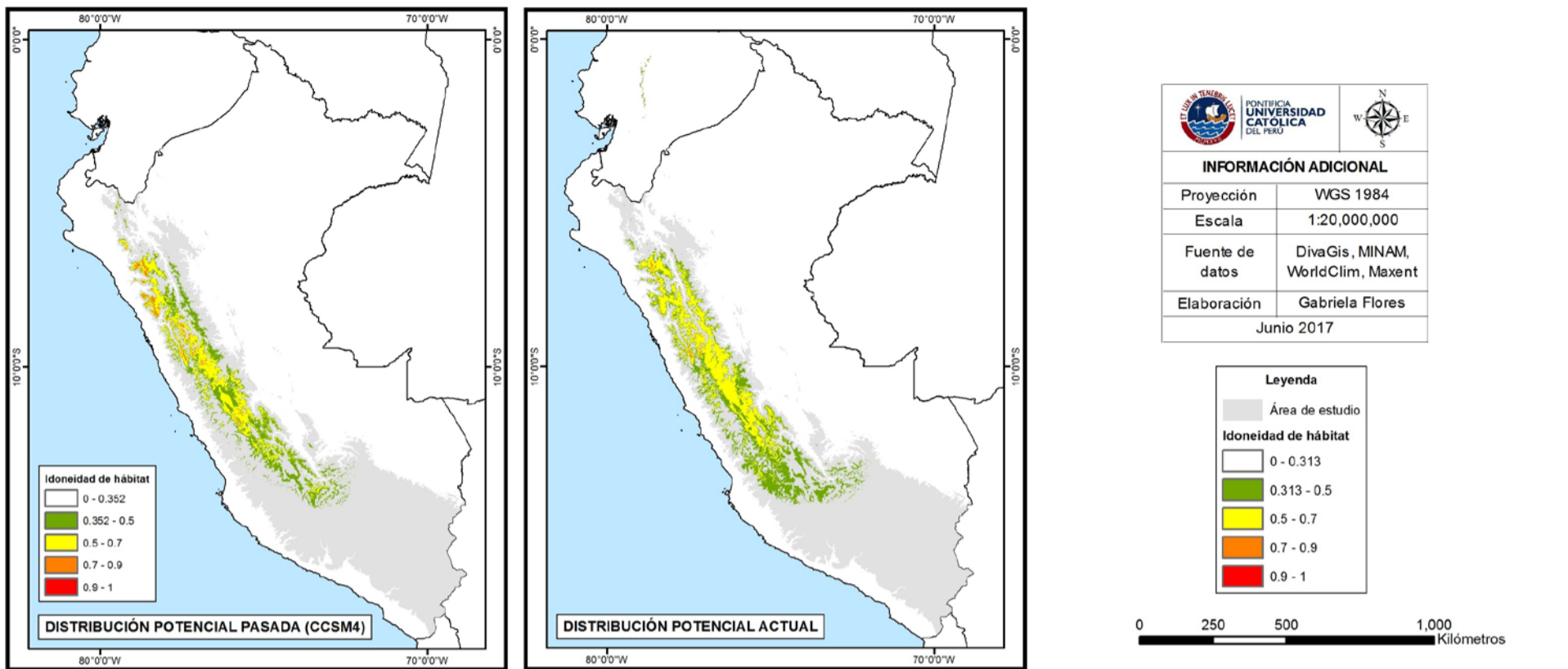
Distribución potencial futura - Escenario RCP 2.6



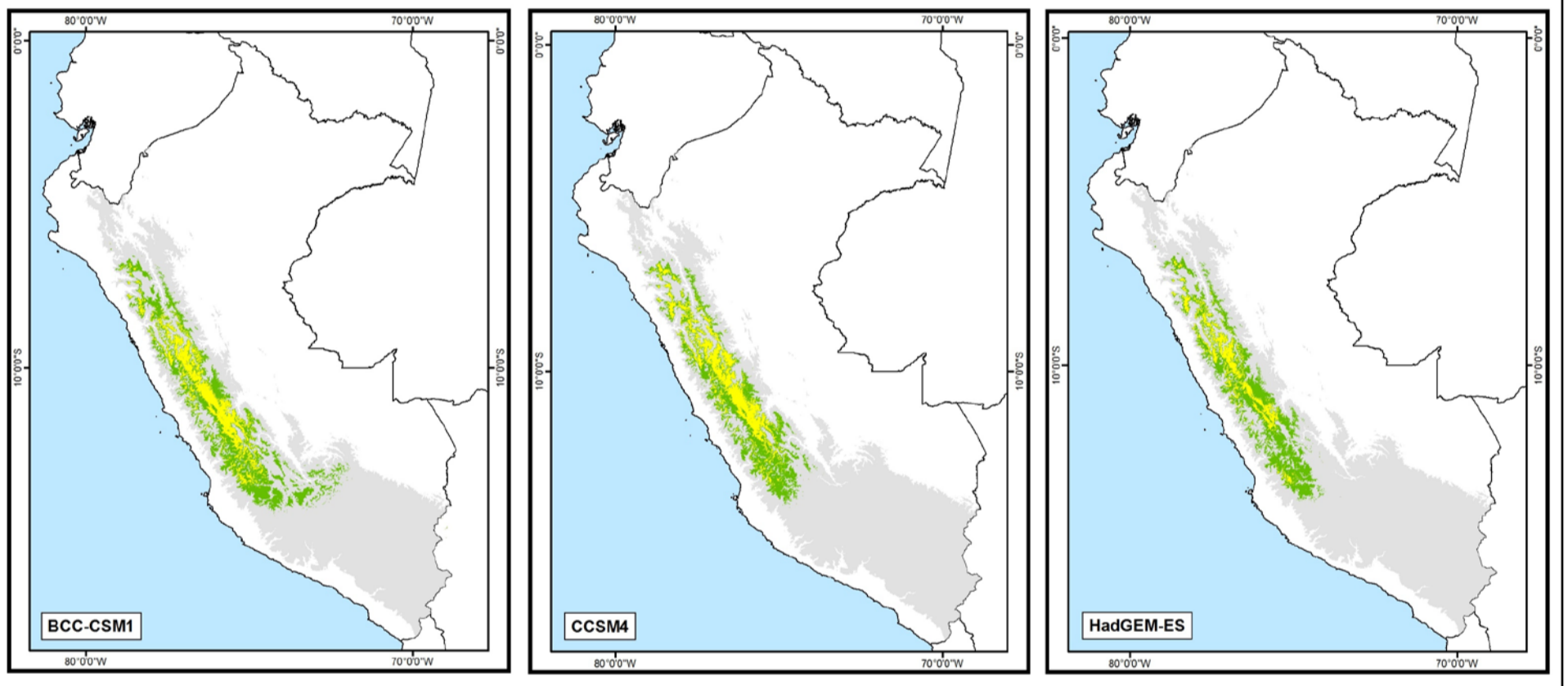
Distribución potencial futura - Escenario RCP 8.5



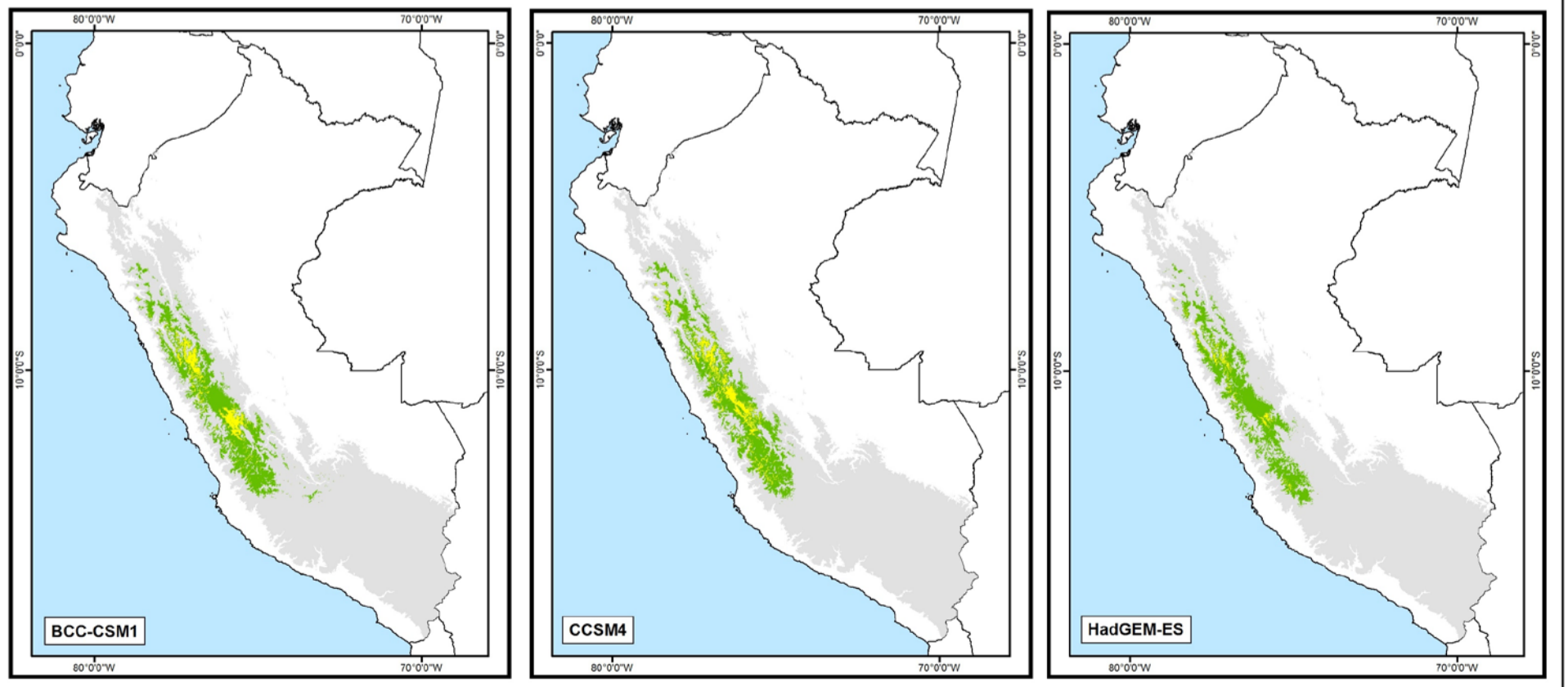
Mapa 4.9. Distribución potencial de *Polylepis racemosa*



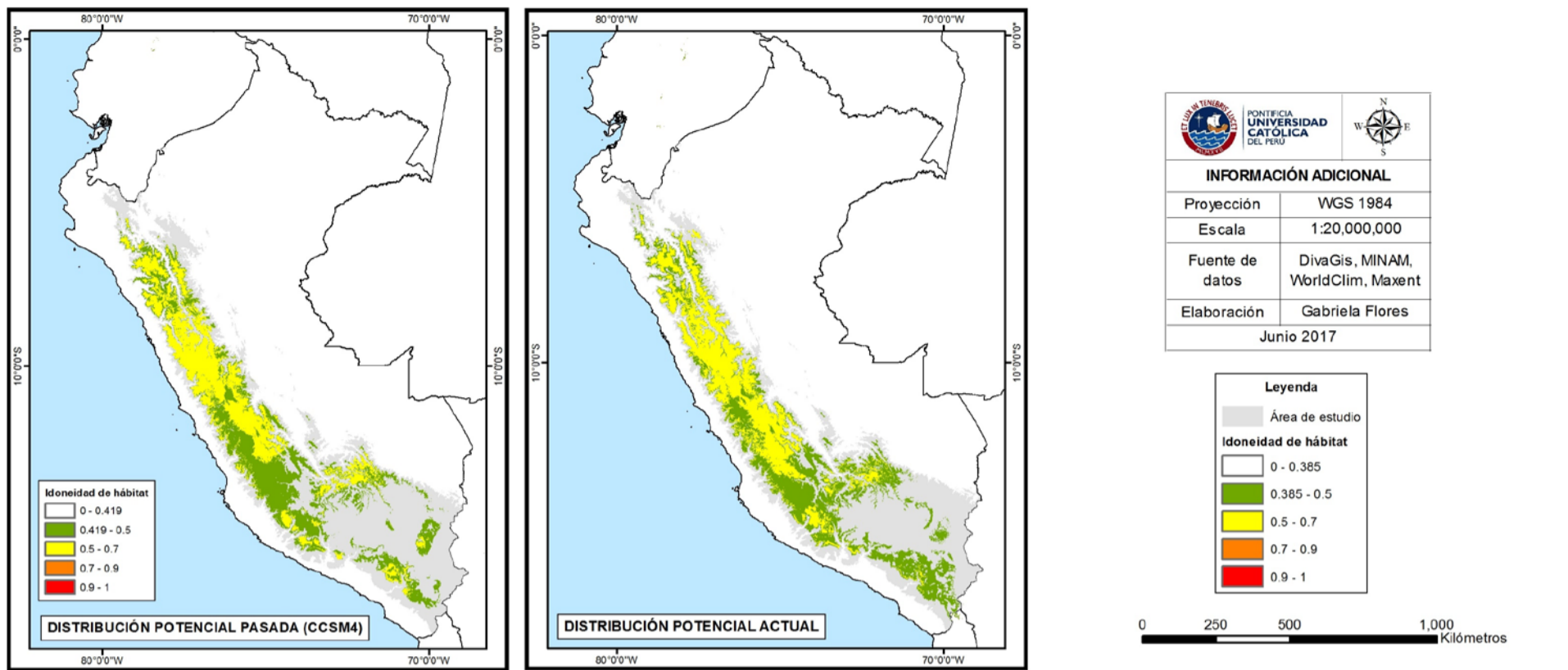
Distribución potencial futura - Escenario RCP 2.6



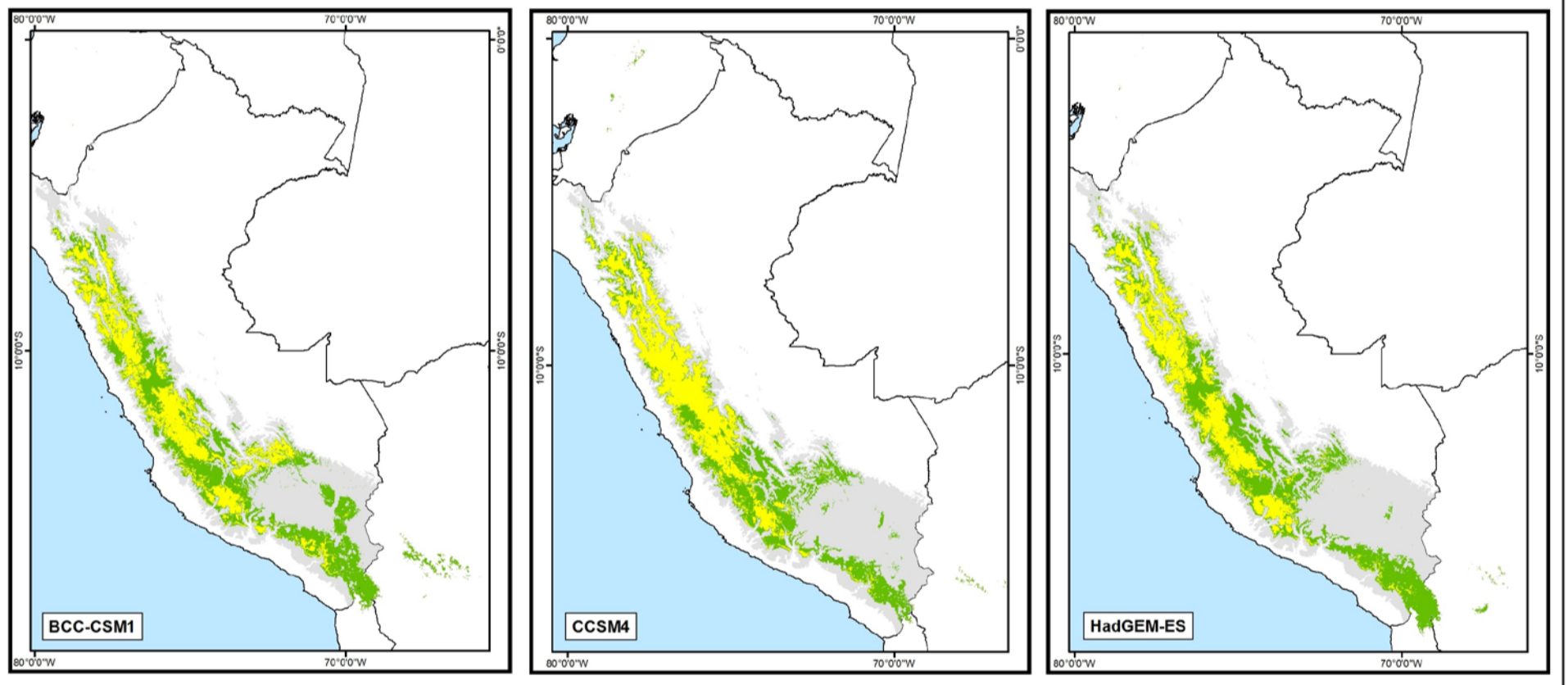
Distribución potencial futura - Escenario RCP 8.5



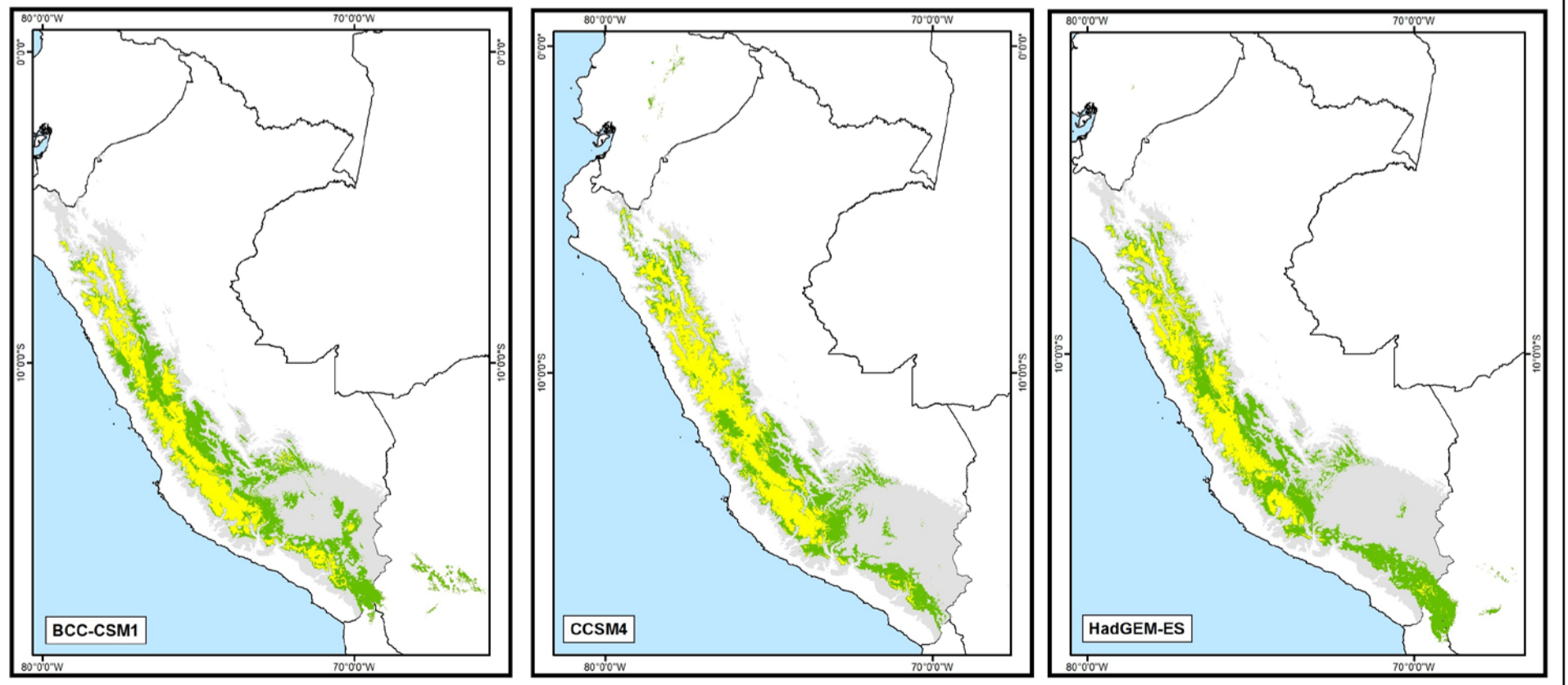
Mapa 4.10. Distribución potencial del género *Polylepis*



Distribución potencial futura - Escenario RCP 2.6



Distribución potencial futura - Escenario RCP 8.5



4.3. Cuantificación de las áreas de distribución potencial

Para hallar el área en hectáreas de la distribución potencial solo se consideraron los valores por encima de 0.5 como determinantes para cuantificar el área obtenida, es decir los valores “óptimo”, “muy óptimo” y “altamente óptimo” según la clasificación elaborada en la tabla 3.5. Se tomó esta decisión ya que son los valores que indicaban mayor seguridad para la existencia de un hábitat idóneo donde puedan desarrollarse las especies.

A continuación, se mostrarán los resultados obtenidos para las cuatro especies y el género como tal, según cada escenario de predicción y modelo climático global.

4.3.1. Distribución potencial actual y pasada

Para la distribución potencial actual y pasada, se obtuvieron unos únicos resultados tras la proyección de los datos del clima actual, para el tiempo presente, y utilizando solamente la data del modelo climático global CCSM4 para el tiempo pasado. En ambos casos, se pudo establecer la existencia de una distribución potencial actual y pasada para las cuatro especies y el género *Polylepis* (ver Tabla 4.1).

Tabla 4.1.: Distribución potencial actual y pasada para cada especie modelada.

Especies	Distribución potencial actual (ha)	Distribución potencial pasada – CCSM4 (ha)
<i>P. weberbaueri</i>	955 963.67	1 171 223.82
<i>P. sericea</i>	542 671.64	861 859.70
<i>P. incana</i>	5 897 357.44	6 183 931.65
<i>P. racemosa</i>	4 474 052.70	3 486 303.02
<i>Polylepis</i>	9 341 680.13	8 968 022.78

Elaboración propia

A nivel de género, el total de hectáreas de distribución potencial actual es de 9 341 680.13 ha, las cuales abarcarían la gran parte de los andes del norte y centro del Perú, sin embargo, la zona sur presentaría pocas áreas idóneas para su distribución. En el caso de la distribución potencial actual a nivel de especies, la especie con mayor área fue *P. incana* con 5 897 357.44 ha, seguida por *P. racemosa* con 4 474 052.70 ha. Según los mapas elaborados, en el caso de *P. incana*, su distribución potencial se concentraría en la zona central, sur y norte del Perú en los departamentos de Huancavelica, Ayacucho, Lima, Junín, Pasco, Huánuco, Áncash y La Libertad; en el segundo caso, *P. racemosa* se distribuiría en la zona centro y

norte del país, lo que corresponde a los departamentos de Huancavelica, Junín, Pasco, Lima, Áncash, La Libertad y Cajamarca. De esta manera, estas dos especies son las que, en la actualidad, tendrían la mayor extensión dentro del territorio peruano. Por otro lado, *P. sericea* y *P. weberbaueri* estarían extendiéndose principalmente en el centro-norte del Perú, lo que correspondería a los departamentos de Huancavelica, Lima y Áncash.

Al comparar estos resultados con la distribución potencial pasada, se observó que en el pasado las áreas de distribución potencial de las especies *P. weberbaueri*, *P. sericea* y *P. incana* habrían sido mayores, aumentando en un 22.52%, 58.82 % y 4.86% su área total, respectivamente, en comparación con el presente, y llegando incluso a ubicarse en zonas más altas, como se ve en el mapa de distribución potencial para la especie *P. incana*. Por el contrario, el área de distribución potencial de *P. racemosa* habría sido menor, con una reducción del 22.08%, pero que habría llegado a abarcar zonas más al sur dentro del departamento de Apurímac. A nivel de género, la distribución potencial de *Polylepis* en el pasado habría sido menor, presentando una reducción del 4% en su distribución en las zonas de Lima, Junín y Ayacucho, pero extendiéndose mucho más al sur en las zonas de Arequipa, Moquegua, Puno y Cusco. Sin embargo, el análisis a nivel de especie en el pasado, muestra que la mayoría de las especies estudiadas habrían tenido una distribución potencial mucho más amplia a la actual, como es el caso de *P. sericea* cuya distribución habría aumentado en miles de hectáreas. Esto muestra la existencia de una discrepancia entre los dos tipos de análisis (a nivel de especies y género), ya que en los resultados a nivel de género este aumento no se ve reflejado.

4.3.2. Distribución potencial futura

Para la distribución potencial futura, se obtuvieron resultados por cada modelo climático global en el escenario más leve y más extremo de cambio climático (RCP 2.6 y 8.5). Al igual que las distribuciones potenciales presente y pasada, se pudo establecer la existencia de una distribución potencial futura para las cuatro especies y el género *Polylepis*.

Distribución con el modelo BCC-CSM1

Con el modelo BCC-CSM1 (ver Tabla 4.2), *P. incana* fue la especie con mayor distribución potencial en ambos escenarios, llegando a aumentar su distribución del escenario más leve al más extremo en un 15.29%, pasando de los 14 millones de hectáreas a 16 millones y medio de hectáreas. Las zonas de distribución potencial futura de esta especie con el RCP 2.6 se

concentrarían a lo largo de todos los Andes peruanos, desde Puno, atravesando Cusco, Apurímac, Arequipa, Ayacucho, Huancavelica, Junín, Lima y Pasco, Huánuco, Áncash y hasta La Libertad; con el RCP 8.5 su extensión aumentaría en las zonas de Apurímac, Lima, Junín y Pasco, y se extendería con mayor intensidad dentro de los departamentos de Ayacucho y Huancavelica. Caso contrario sucede con las demás especies estudiadas, las cuales podrían experimentar una disminución en sus áreas de distribución potencial futuras del RCP 2.6 al 8.5. La especie *P. racemosa* disminuiría en su número de hectáreas en un 66.91% con el aumento del RCP, de esta manera, mientras que con el RCP 2.6 su distribución potencial se daría en el área correspondiente a los departamentos de Huancavelica, Junín, Pasco, Huánuco y Áncash, con el RCP 8.5 su distribución se limitaría únicamente a las zonas de Áncash y Junín. En el caso de *P. weberbaueri*, esta disminuiría un 37.36%, de extenderse a las zonas de Huancavelica, Ancash y La Libertad, a solo concentrarse en las dos últimas. *P. sericea* por su parte disminuiría un 9.30% en su extensión dentro del departamento de Ancash. A nivel de género se calculó una reducción del 2.36% entre el escenario de RCP más leve y el más extremo, sobre todo en las zonas de Cusco, Huancavelica y Huánuco.

Tabla 4.2.: Distribución potencial futura según el GCM BCC-CSM1.

Especies	Distribución potencial futura con el GCM BCC-CSM1 (ha)	
	RCP 2.6	RCP 8.5
<i>P. weberbaueri</i>	351 867.39	220 397.67
<i>P. sericea</i>	59 063.32	53 570.30
<i>P. incana</i>	14 391 301.06	16 592 124.36
<i>P. racemosa</i>	2 878 607.81	952 575.15
<i>Polylepis</i>	9 038 108.84	8 824 777.80

Elaboración propia

En comparación con la distribución potencial actual, en este modelo climático global, *P. incana* es la única especie que aumentaría considerablemente el número de hectáreas conforme las condiciones de cambio climático son más extremas, llegando a incrementarse del presente al futuro en un 144.03% y un 181.35% con cada uno de los RCP. Las demás especies estudiadas, disminuirían su área entre un 76-90% mientras las condiciones de cambio climático se hacen más adversas (RCP 8.5); a nivel de género, *Polylepis* disminuiría en un 5.53%, concentrando su distribución en la cordillera occidental de los Andes.

Distribución con el modelo CCSM4

Con el modelo CCSM4 (ver Tabla 4.3), *P. incana* nuevamente es la especie que aumentaría su distribución del escenario más leve al escenario más extremo en un 18.54%, distribuyéndose con el RCP 2.6 principalmente en la zona sur del Perú, conformada por los departamentos de Apurímac, Ayacucho y Huancavelica, pero también en la zona central y norte del mismo, territorios que vendrían a ocupar los departamentos de Lima, Junín, Huánuco, Ancash y La Libertad. Con el RCP 8.5 su distribución potencial se mantendría principalmente al sur, con un foco importante en el departamento de Huancavelica, pero también aumentando en la zona central (Lima, Junín) y norte. Las demás especies estudiadas tuvieron una disminución en su extensión, del escenario con el RCP 2.6 al 8.5: *P. racemosa* se reduciría en un 61.11% en las zonas de Huancavelica, Junín, Pasco, Huánuco, Ancash, La Libertad y Cajamarca; *P. weberbaueri* se reduciría en un 35.72% en las zonas de Lima y Ancash; y finalmente, *P. sericea* disminuiría en un 32.85% en zonas del departamento de Ancash. A nivel de género, *Polylepis* tendría un aumento mínimo del 2.42% entre escenarios climáticos, extendiéndose de manera más uniforme a lo largo de los Andes, sobre todo en el departamento de Ayacucho, al sur en Moquegua y pequeñas zonas de Arequipa.

Tabla 4.3.: Distribución potencial futura según el GCM CCSM4.

Especies	Distribución potencial futura con el GCM CCSM4 (ha)	
	RCP 2.6	RCP 8.5
<i>P. weberbaueri</i>	1 054 369.52	677 800.64
<i>P. sericea</i>	473 464.50	317 912.59
<i>P. incana</i>	7 386 424.09	8 755 609.57
<i>P. racemosa</i>	3 017 132.73	1 173 461.83
<i>Polylepis</i>	9 662 554.02	9 896 134.86

Elaboración propia

En comparación con la distribución potencial actual, en este modelo climático global el área de *P. incana* aumentaría a la par con el aumento de las condiciones de cambio climático en un 25.25% con el RCP 2.6, y luego en un 48.47% con el RCP 8.5. En el caso de *P. racemosa* y *P. sericea*, el área potencial se reduciría con el cambio de escenario de RCP en un 32.56% y 73.77%, para *P. racemosa*, y en un 12.75% y 41.42% para *P. sericea*. Con respecto a *P. weberbaueri*, para el escenario con el RCP 2.6 esta especie sí obtendría un aumento, de 10.29%, en su área de extensión, sin embargo, para el escenario con el RCP 8.5 habría un

descenso notable en las áreas potenciales del 29.10%, obteniéndose así una distribución incluso menor a la obtenida en las condiciones presentes. A nivel de género, el área de distribución potencial del género *Polylepis* aumentaría entre un 3 a 6% en toda la zona de los Andes peruanos, a pesar de las condiciones climáticas adversas.

Distribución con el modelo HadGEM-ES

Finalmente, con el modelo HadGEM-ES (ver Tabla 4.4), *P. incana* fue también la especie con mayor distribución potencial, sin embargo, su número de hectáreas solo aumentaría del RCP 2.6 al RCP 8.5 aproximadamente en un 4.33%, extendiéndose de manera más uniforme por los departamentos de La Libertad, Ancash, Lima y Huancavelica. Las otras especies, por el contrario, disminuirían su distribución conforme los escenarios climáticos son más adversos: *P. racemosa* disminuiría en un 81.30%, quedando reducida su distribución potencial solo a las zonas de los departamentos de Áncash y Junín; por su parte, *P. weberbaueri* y *P. sericea* se reducirían en un 56%, focalizándose en áreas más reducidas dentro de los departamentos de Huancavelica y Ancash.

Tabla 4.4.: Distribución potencial futura según el GCM HadGEM-ES.

Especies	Distribución potencial futura con el GCM HadGEM-ES (ha)	
	RCP 2.6	RCP 8.5
<i>P. weberbaueri</i>	679 700.64	297 939.44
<i>P. sericea</i>	600 874.02	264 198.42
<i>P. incana</i>	10 114 942.11	10 553 107.95
<i>P. racemosa</i>	1 716 133.97	320 972.35
<i>Polylepis</i>	7 942 583.76	7 302 337.70

Elaboración propia

En comparación con la distribución potencial actual, en este modelo climático global *P. incana* muestra un aumento en su distribución que iría de un 71.52% en el escenario de cambio climático más leve, a un 78.95% en el escenario de cambio climático más extremo. En el caso de las otras especies, para el escenario con el RCP 2.6, *P. sericea* aumentaría su distribución en un 10.73%, sin embargo, en el escenario con el RCP 8.5 su distribución potencial se reduciría en un 51.32%. Para las especies *P. weberbaueri* y *P. racemosa*, ambas verían reducida su distribución potencial en ambos escenarios, llegando hasta un 68.83% y 92.83% de reducción, respectivamente, en el escenario con el RCP 8.5. A nivel de género, con este modelo climático, *Polylepis* experimentaría la reducción más alta en su extensión de

área potencial frente a los otros modelos utilizados, reduciéndose hasta en un 21.83% en el escenario más extremo de cambio climático, pero abarcando el mismo patrón de distribución a lo largo del área de estudio.

A continuación, se mostrarán dos tablas resumen que engloban todos los resultados obtenidos, y explicados anteriormente, que permitirán una mejor apreciación de la variación en hectáreas y en porcentaje de las áreas de distribución potencial por especie y género, según cada escenario de predicción.



Tabla 4.5.: Tabla resumen de las áreas de distribución potencial (hectáreas)

Especie	Escenarios de predicción							
	Distribución potencial presente (ha)	Distribución potencial pasada – CCSM4 (ha)	Distribución potencial futura (ha)					
			RCP 2.6			RCP 8.5		
			BCC-CSM1	CCSM4	HadGEM-ES	BCC-CSM1	CCSM4	HadGEM-ES
<i>P. weberbaueri</i>	955 963.67	1 171 223.82	351 867.39	1 054 369.52	679 700.64	220 397.67	677 800.64	297 939.44
<i>P. sericea</i>	542 671.64	861 859.70	59 063.32	473 464.50	600 874.02	53 570.30	317 912.59	264 198.42
<i>P. incana</i>	5 897 357.44	6 183 931.65	14 391 301.06	7 386 424.09	10 114 942.11	16 592 124.36	8 755 609.57	10 553 107.95
<i>P. racemosa</i>	4 474 052.70	3 486 303.02	2 878 607.81	3 017 132.73	1 716 133.97	952 575.15	1 173 461.83	320 972.35
<i>Polylepis</i>	9 341 680.13	8 968 022.78	9 038 108.84	9 662 554.02	7 942 583.76	8 824 777.80	9 896 134.86	7 302 337.70

Leyenda	
	Distribución presente referencial
	La distribución es mayor
	La distribución es menor

Tabla 4.6.: Tabla resumen de las áreas de distribución potencial (porcentaje de cambio)

Especie	Escenarios de predicción							
	Distribución potencial presente (ha)	Distribución potencial pasada – CCSM4 (%)	Distribución potencial futura (%)					
			RCP 2.6			RCP 8.5		
			BCC-CSM1	CCSM4	HadGEM-ES	BCC-CSM1	CCSM4	HadGEM-ES
<i>P. weberbaueri</i>	955 963.67	22.52	-63.19	10.29	-28.90	-76.94	-29.10	-68.83
<i>P. sericea</i>	542 671.64	58.82	-89.12	-12.75	10.73	-90.13	-41.42	-51.32
<i>P. incana</i>	5 897 357.44	4.86	144.03	25.25	71.52	181.35	48.47	78.95
<i>P. racemosa</i>	4 474 052.70	-22.08	-35.66	-32.56	-61.64	-78.71	-73.77	-92.83
<i>Polylepis</i>	9 341 680.13	-4.00	-3.25	3.43	-14.98	-5.53	5.94	-21.83

Leyenda	
	Distribución presente referencial
	La distribución es mayor
	La distribución es menor

CAPÍTULO 5

DISCUSIÓN

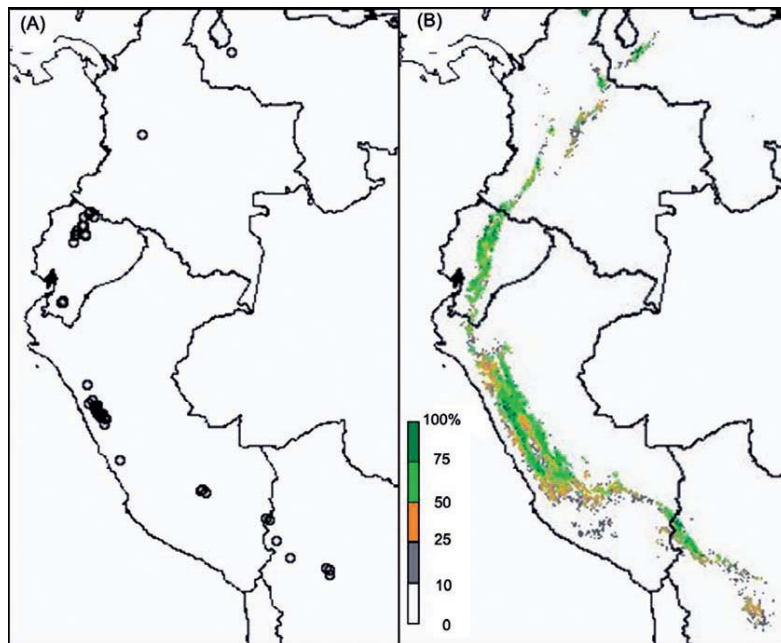
La investigación realizada generó una serie de resultados, estos se analizaron en base a investigaciones y estudios previos, obteniendo así una serie de conclusiones y propuestas de conservación para el género *Polylepis*. Este capítulo discute los resultados obtenidos entre la distribución potencial pasada, presente y futura, para llegar a comprobar la hipótesis planteada en un inicio. De igual manera, se explican los aspectos positivos y limitantes de la metodología utilizada.

5.1. Distribución potencial presente - pasada

La cobertura de los bosques naturales de *Polylepis* fue estimada para el año 2015 por el MINAM en 101 533 ha, sin embargo, los resultados obtenidos para la distribución potencial presente alcanzada por el género *Polylepis* dio un total de 9 341 680.13 ha, distando enormemente de la cifra estimada en millones de hectáreas. Esta diferencia muestra, por un lado, la potencialidad que tienen estos bosques de existir a lo largo de los Andes peruanos, y, por otro lado, la existencia de ciertos factores, que los modelos no incluyeron, y que impiden que actualmente se dé esta distribución potencial, tales como las interacciones con el uso humano a través de la deforestación y la quema continua de los bosques para crear zonas de pastoreo (Fjeldså & Kessler, 1996).

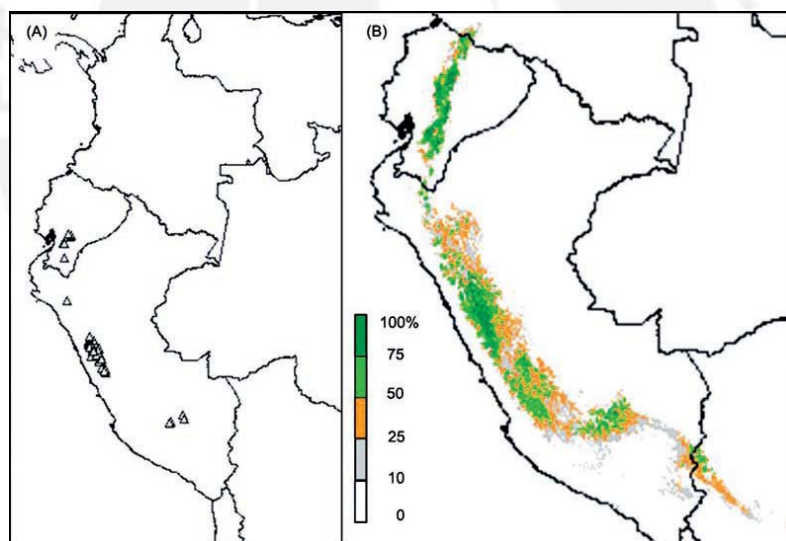
En lo que respecta al análisis por especies, por un lado, *P. incana* y *P. racemosa* fueron las dos especies de *Polylepis* que obtuvieron mayor distribución potencial presente en el área de estudio, lo cual refleja en cierta medida el hecho de que estas dos especies han sido ampliamente utilizadas para reforestar los Andes por el rápido crecimiento que presentan y porque no demandan demasiadas condiciones para desarrollarse (Mendoza y Cano, 2012; Arica, s.f.). Por otro lado, a diferencia de *P. incana* y *P. racemosa*, en el caso de *P. weberbaueri* y *P. sericea*, ya se han realizado estudios previos para determinar la distribución potencial de estas dos especies. Zutta et al. (2012) determina su distribución potencial teniendo en cuenta todas las áreas donde estas especies se desarrollan, sin limitarse al territorio peruano, y utilizando una cantidad parecida de puntos de ocurrencia a los utilizados en esta investigación (ver Figura 5.1 y 5.2).

Figura 5.1.: Las localidades para *P. sericea* desde Venezuela hasta Bolivia y su distribución potencial.



Fuente: Zutta et al., 2012

Figura 5.2.: Las localidades para *P. weberbaueri* desde Ecuador y poblaciones aisladas en Perú y su distribución potencial.



Fuente: Zutta et al., 2012

Al comparar ambas investigaciones, se puede notar que las áreas potenciales no coinciden entre sí, siendo las obtenidas en esta investigación considerablemente menores; sin embargo, sí se pudo rescatar que los focos de mayor idoneidad de área sí ocurren en las mismas zonas, correspondientes al departamento de Áncash. La falta de coincidencia entre los modelos se debería a la diferencia en la distribución de los puntos de colectas, la cual hasta cierto punto fue limitada y no reflejó todas las zonas de distribución potencial de las especies del género *Polylepis*; y las variables climáticas utilizadas, siendo las empleadas por Zutta et al. en

mayor número y más específicas; además de las variables de Bioclim y la elevación digital del terreno, utilizó datos de productividad neta, estacionalidad y densidad de la vegetación, porcentaje de cobertura arbórea y datos sobre la rugosidad, estacionalidad y humedad de superficie para ambas especies de *Polylepis*. De esta manera, a pesar de utilizarse un mismo algoritmo (Maxent), el resultado obtenido puede variar dependiendo de la complejidad del modelo en base a las variables incluidas (Shcheglovitova & Anderson, 2013; Anderson, 2015). Es importante resaltar que en esta investigación los modelos de distribución potencial aplicados no incluyeron otros factores ambientales relevantes para la distribución de *Polylepis*, ni tampoco el factor humano, por lo que estos estarían evaluando solamente en base a ciertos factores climáticos, siendo la distribución potencial obtenida una muestra de la situación ideal de extensión de los bosques de *Polylepis* en un escenario sin agentes antrópicos. Aunque en un primer momento se incluyeron las variables de pendiente y orientación en el análisis, esta última no contribuía en las proyecciones y se decidió no utilizarla, al igual que la variable pendiente. Probablemente, si se incluyera el impacto humano y los factores determinantes para cada especie de *Polylepis*, los resultados variarían y serían más exactos, más al no considerar ciertos factores límites de las especies de *Polylepis*, el área de distribución potencial obtenida es limitada. Sin embargo, es importante resaltar que si bien entre más variables consideras el modelo resultante será más complejo y, por ende, las áreas predichas más restringidas, la exageración en el uso de variables también puede llegar a sobre ajustar el modelo. Debido a esto, el conocimiento específico de cada especie es fundamental para poder identificar las variables ambientales relacionadas con los requerimientos ambientales de la especie a analizar.

Con respecto a los resultados obtenidos a nivel de género y por especie, se muestra una discrepancia entre las zonas idóneas resultantes para el género *Polylepis* y, de manera individual, para cada una de las especies modeladas. Al momento de incluir los puntos de ocurrencia de todas las especies del género para determinar la distribución general de *Polylepis*, la distribución potencial resultante incluye zonas que son habitadas por especies que no fueron modeladas (por ejemplo: al sur del territorio peruano, donde se ubica la especie *P. tarapacana*), pero también omite ciertas áreas que son altamente idóneas para otras especies, como es el caso de *P. incana*, la cual posee un foco de distribución potencial bastante alto para la zona centro-sur del Perú que se pierde en el análisis de género. De esta manera, el resultado de la distribución potencial a nivel de género no representaría de manera exacta la distribución potencial de todas las especies de *Polylepis* ya que hay áreas

con vacíos de información que en los análisis individuales de las especies modeladas sí se logran llenar. Esto hace notar que cada especie posee sus propias condiciones ecológicas y estrategias de vida (Renison et al., 2013) y, en el caso de *Polylepis*, incluir todas las especies para un análisis de género concibe una pérdida de información, desvalorizando zonas con hábitats propicios de ocurrencia para algunas especies. Lo más óptimo a realizar en un futuro, sería la obtención de los hábitats idóneos para cada una de las especies de *Polylepis* y superponerlos, para así poder crear y hallar una distribución potencial a nivel de género más real y sin omitir ninguna zona importante.

Este análisis de la distribución potencial presente para las especies del género *Polylepis* nos da un panorama general de las zonas dentro de los Andes que potencialmente estarían cubiertas por bosques alto andinos en la actualidad; sin embargo, la diferencia entre la cobertura estimada por el MINAM y los resultados obtenidos, confirman que a través del tiempo se ha ido generando un impacto en los bosques de *Polylepis* que ha transformado su hábitat hasta extenderse en rodales restringidos en laderas rocosas, quebradas o matorrales en laderas montañosas (Kessler, 2006). Para poder definir los patrones causantes de la distribución de *Polylepis* en los Andes peruanos, es necesario analizar esta distribución potencial actual en base a la distribución potencial pasada y ver cómo es que estos bosques han evolucionado hasta el presente.

Distribución potencial pasada

Los resultados obtenidos para el tiempo pasado, nos indicarían que el hábitat potencial de *Polylepis* habría sido menor que el determinado para el presente; sin embargo, a nivel de especies, el hábitat potencial de la mayoría de las especies modeladas (*P. weberbaueri*, *P. sericea*, *P. incana*) habría sido mucho más amplio durante mediados del Holoceno (hace 6000 años atrás); la única excepción sería *P. racemosa*, cuya distribución potencial reflejó que en el pasado esta especie habría tenido un menor hábitat de extensión que en la actualidad. Esta heterogeneidad en las áreas de distribución potencial indicaría, por un lado, que habría existido una tendencia de aumento del hábitat en ciertas especies del género *Polylepis* en tiempos pasados y, por otro lado, que la manera de reaccionar por parte de las especies de *Polylepis* ante los cambios ambientales que se vivieron en el periodo de mediados del Holoceno fueron diversas. Los momentos claves donde los bosques de *Polylepis* habrían sufrido pérdidas en su extensión serían: hace 5000-3000 años, en el

periodo prehispánico y durante la conquista española y el periodo colonial (Kessler & Driesch, 1993 citado en Toivonen, 2014; Erickson, 2000).

El periodo de mediados del Holoceno, que comprende los últimos 6000 años, está caracterizado por haber presentado condiciones más secas que hoy en las regiones de los Andes meridionales; sin embargo, no fue una sequía uniforme y persistente, se trató más bien un periodo extremadamente propenso a la sequía, pero con intervalos entre eventos húmedos y secos (Wasson & Claussen, 2002; Wanner et al., 2008; Valencia, Urrego, Silman & Bush, 2010; Schittek et al., 2015). Mayewski et al. (2004 citado en Wanner et al., 2008) indican cinco períodos de cambio climático significativo durante los últimos 6000 años, identificando cuatro eventos con un patrón de desarrollo de “polos frescos, trópicos secos” entre los 6000-5000, 4200-3800, 3500-2500 y 1200-1000 años AP (antes del presente). Estos eventos indican la presencia de fluctuaciones y cambios constantes a lo largo de todo el periodo de estudio, los cuales debieron impactar de alguna manera en la distribución de la vegetación; esto se ve sustentado actualmente, cuando se observa que los animales y plantas aparecen y desaparecen de una localidad ante las más ligeras modificaciones del clima (García y Merino, 1878). Para poder determinar estos cambios de los ecosistemas en el pasado se realizan estudios paleo biogeográficos, los cuales se basan en los registros fósiles para estimar el cambio en los rangos de distribución de especies pasadas (Gosling, Hanselman, Knox, Valencia & Bush, 2009).

En un estudio realizado por Gosling, Bush, Hanselman & Chepstow-Lusty (2008), se obtuvo que, para el caso de los bosques de *Polylepis*, estos fueron más extensos debido a que se encontró una mayor presencia de polen en el Lago Titicaca (fluctuaciones entre 0% - 20%), durante los periodos más cálidos y húmedos en el último ciclo glacial-interglacial. Los picos en polen de *Polylepis/Acanea* ocurrían en periodos de transición entre estados glaciales e interglaciales, por lo que estos bosques parecen ser más extensos durante los periodos más cálidos y húmedos en medio de esta transición entre estados, como los ocurridos a partir de mediados del Holoceno (Bräuning, 2009). En otro estudio (Gosling et al., 2009), uno de sus resultados fue la obtención de una elevada concentración de carbón fósil en estrecha relación con una mayor proporción de polen de *Polylepis* y condiciones cálidas, inter glaciales o de transición. Así, Gosling et al. demuestra que las fluctuaciones de temperatura sí llegan a tener un impacto en la vegetación, revelando la sensibilidad de los ecosistemas alto andinos ante la presión del ambiente. Esto lo corroboran investigaciones previas como la de Van der Hammen (1974, citado en Simpson, 1983), donde obtiene que los perfiles de polen de

Polylepis mostraban variaciones entre la ampliación de su área de distribución, y la restricción de la misma, momento en el cual las hierbas dominaban la zona. Bush et al. (2015) también realizan un análisis de polen fósil y carbón vegetal de especies alto andinas en el Parque Nacional del Manu, donde obtiene que debido al calentamiento en curso de las temperaturas en los últimos 2000 años (durante el Holoceno tardío), se produjo una migración ascendente de las malezas, por lo que hubo un reemplazo de los bosques alto andinos, volviéndolos a estos más transitorios. Además, resalta la degradación de los bosques debido también a la introducción del fuego para la mejora del pastoreo. Esta fragilidad de los ambientes de alta elevación frente a un clima cambiante, y elementos externos como los incendios; sumada a los resultados obtenidos, donde la extensión de área para el pasado en comparación con la distribución potencial actual varió según cada especie de *Polylepis*, revela la importancia de la ubicación geográfica para determinar las consecuencias de posibles cambios que pueden sufrir estos ecosistemas (Kuentz, Ledru & Thouret, 2011).

Sin embargo, es importante tener en cuenta que la reconstrucción de paleo bosques es complicada dada la limitación del registro fósil, ya que este no está distribuido de manera uniforme a nivel temporal o espacial, por lo que los datos de ocurrencia fósiles no podrían ser usados como un indicador directo de la distribución y abundancia de una especie (Varela et al., 2011). En el caso del polen fósil proveniente de los bosques de *Polylepis*, este es similar morfológicamente al del género *Acanea*, por lo que su identificación es problemática. Además, muchos de los núcleos de polen están ubicados en zonas que no son aptas para el género en la actualidad, por lo que es difícil determinar con exactitud su deposición en épocas pasadas (Kessler, 2002; Zutta et al., 2012). De esta manera, la información geográfica proporcionada por los datos fósiles está sujeta a limitaciones, sin las cuáles se podría realizar un mejor análisis y mejorar la información paleo climática que se posee. Un ejemplo de esto es la información generada en el Mapeo Global de la Palaeovegetación (BIOME 6000¹⁴) desarrollado por el Bristol Research Initiative for the Dynamic Global Environment (BRIDGE) de la Universidad de Bristol, donde, a diferencia de otras zonas del mundo, en la actualidad hay un gran vacío de información para América del Sur.

El Holoceno también define el período durante el cual se desarrolla la civilización, siendo a mediados del Holoceno el momento en el que comenzaría la deforestación antropogénica

¹⁴ http://www.bridge.bris.ac.uk/resources/Databases/BIOMES_data

(Wanner et al., 2008). Se ha estimado que los humanos habrían habitado por primera vez los Andes hace aproximadamente 7000-3000 años atrás (Baied & Wheeler 1993; Kessler & Driesch 1993 citado en Toivonen, Horna, Kessler, Ruokolainen & Hertel, 2014b). A partir de ese momento, los Andes se han visto afectados por el uso intensivo de sus tierras (Young, 2009). De acuerdo a Fjeldså & Kessler (1996), el fuego, y por consiguiente la aridez, fue el transformador clave de los ecosistemas andinos durante el periodo del Holoceno, siendo utilizado para limpiar las áreas de pastos para los camélidos domesticados (Williams, Gosling, Brooks, Coe & Xu, 2011) hace 5000-3000 años, durante el desarrollo de los asentamientos permanentes y la agricultura en los Andes (Fjeldså, 2002). Esta práctica se dio y da en los valles alto andinos y la puna húmeda, los cuales forman parte del rango de distribución central de los bosques de *Polylepis*, como consecuencia, la cubierta forestal de *Polylepis* disminuyó ampliamente. Esto demuestra que antes de la formación del Imperio Incaico ya existía una práctica de deforestación por las primeras civilizaciones humanas (Fjeldså & Kessler, 1996). Además, con la agricultura, también se transformó el paisaje boscoso predominante, en uno compuesto por parcelas de labranza, terrazas de cultivo, canales de riego y caseríos (Cornejo, 2015). Sin embargo, la tasa de destrucción de los bosques en los Andes se aceleró e intensificó con la conquista española (Ansión, 1986; Gade, 1999). En este periodo, los controles para el corte de los árboles fueron menos estrictos, por lo que los bosques fueron desbrozados para utilizarse como leña, construcción y para permitir el pastoreo del ganado (Gade, 1999). Posteriormente, en la época de la república, al expandirse las haciendas y la minería, las comunidades andinas se ven desplazadas hacia zonas de mayor altitud, provocando el deterioro del bosque tras la alta demanda de leña para los pueblos, minas y fundiciones (Fjeldså & Kessler, 1996; Recharte et al., 2011 citado en Sabogal, 2014). De esta manera, al día de hoy es raro encontrar extensiones continuas de bosque nativo. En la actualidad, el paisaje arbóreo andino está conformado en su mayoría por pinos y eucaliptos, estos últimos importados entre la mitad y fines del siglo XIX (Dickinson, 1969; Luzar, 2007); mientras que los bosques naturales se han visto reemplazados y están reducidos a parches de reducida extensión, dispersos por las laderas escarpadas y de poca accesibilidad (Johannessen & Hastorf, 1990, Herrera & Ali, 2009). Esto refleja el resultado directo de la acción humana a lo largo de los milenios, y cómo es que estos impactos humanos en los ecosistemas de bosques alto andinos han jugado un papel clave en la distribución de las especies de *Polylepis* a lo largo del tiempo (Nogués-Bravo, 2009).

Los resultados obtenidos para la distribución potencial pasada de las especies de *Polylepis* nos indican que, en la mayoría de los casos, hay un aumento en la extensión potencial, lo cual se constataría con los registros de polen que afirman que los bosques fueron más extensos solo durante los periodos de transición ocurridos a mediados del Holoceno. Sin embargo, este periodo también marca el inicio de la deforestación antropogénica y una disminución de la extensión de los bosques de *Polylepis* en los Andes. Por lo tanto, habría evidencia tanto de causas naturales como antropogénicas para sustentar la actual distribución fragmentada de los bosques.

Si bien el género *Polylepis* ha mostrado ser sensible a los periodos de transición climáticos (húmedos-cálidos) y poseer una mayor extensión potencial, este aumento en su distribución solo se limitaría a estos periodos. Las fluctuaciones de abundancia (que no pasaron del 20%) de los datos de polen entre periodos, también revelarían que *Polylepis* no formó bosques permanentes continuos hace 12 000 años, antes de que los humanos habiten los Andes. Empero, los hallazgos de Gareca, Breyne, Vandepitte, Cahill, Fernandez & Honnay (2013) no apoyan esta idea de fragmentación. El análisis genético que realiza en su investigación se basa en que “la fragmentación del hábitat tiene fuertes efectos sobre la genética de las poblaciones de especies vegetales, ya que reduce el tamaño de la población y dificulta el flujo de los genes entre los fragmentos”. Dado que sus resultados arrojaron que la población de *Polylepis* no presentó una diferenciación genética muy elevada, los bosques no podrían haber presentado una distribución aislada y en pequeños rodales hace miles de años, sugiriendo que la fragmentación del hábitat de *Polylepis* sería probablemente un fenómeno más reciente, posterior al comienzo de la conquista española y producto del impacto humano. Sin embargo, sus resultados obtenidos también variaron de acuerdo a las especies de *Polylepis*, siendo *P. incana* la única especie a la que sí se le encontró evidencia genética de los efectos de fragmentación a largo plazo. Esto indicaría que las fluctuaciones climáticas del periodo del Holoceno sí tuvieron un impacto en la distribución de los bosques, más no de la misma manera e intensidad en cada especie. Por lo tanto, se demuestra que los factores climáticos pueden llevar a un cambio rápido de la vegetación y modificar la distribución y abundancia de los bosques de *Polylepis* (Gosling et al., 2009). Por ende, la distribución desigual que actualmente presenta el género *Polylepis* no sería producto solamente del impacto de la actividad humana, a pesar de que ha sido un factor clave a lo largo de la historia, sino que los cambios ambientales del Holoceno habrían afectado su distribución en

un primer momento, variando la distribución continua a lo largo de los Andes para ciertas especies de *Polylepis*.

En lo que respecta al debate entre Troll y Ellenberg por las causantes de la distribución en rodales del género *Polylepis* para el caso del territorio peruano, se podría afirmar que, considerando todas las premisas antes planteadas, la distribución de los bosques de *Polylepis* ha sufrido variaciones a lo largo de miles de años y no han mantenido una distribución uniforme en todo momento, dado que tanto las fluctuaciones climáticas, en un primer momento, como el impacto humano han repercutido en su extensión espacial. Aunque las evidencias de la distribución de los bosques de *Polylepis* a partir del Holoceno apuntan en su mayoría a una distribución limitada y fragmentada (Williams et al., 2011), sería incorrecto afirmar que esto ocurrió en todos los casos para todas las especies. Los resultados obtenidos en esta investigación, que se basaron en factores climáticos, apuntan a una distribución potencial continua, mucho más extensa pero fragmentada en cierto nivel sobre todo en las especies que ocupan un área de distribución más amplia a lo largo de los Andes (*P. incana* y *P. racemosa*); en los casos de las especies *P. weberbaueri* y *P. sericea* que poseen un hábitat más restringido, su distribución potencial pasada no muestra una fragmentación demasiado visible. Es difícil excluir tanto al ser humano como a los factores climáticos como no causantes de la distribución arbórea de *Polylepis* ya que tanto factores naturales como humanos han venido interviniendo en el desarrollo de estos ecosistemas por periodos de tiempo. A partir de la literatura revisada y los resultados obtenidos, se puede sustentar que *los factores climáticos son los que habrían regido la distribución en el periodo del Holoceno, mientras que los factores humanos lo habrían hecho a partir del periodo prehispánico*, modificado de manera extrema, y luego más velozmente, el ecosistema alto andino hasta tiempos más modernos. A pesar de todo, es necesaria una combinación no solo entre factores climáticos y humanos, sino también entre factores paleoclimáticos, geológicos y ecológicos para poder explicar los patrones de diversidad de los bosques alto andinos en la actualidad (Simpson, 1983).

Kessler (2002), afirma que la distribución actual no puede ser explicada por factores ecológicos como un microclima especial; sin embargo, hay ciertos factores ambientales que, dependiendo de las condiciones climáticas del momento, favorecerían o restringirían el crecimiento del árbol y la extensión del bosque. Los factores ambientales que determinarían la distribución de *Polylepis* en diferentes altitudes serían: la temperatura, la insolación solar, la humedad, la pendiente, el suelo y la disponibilidad de agua (Fjeldså & Kessler, 1996;

Kessler, 2006; Gosling et al., 2009; Kessler, Toivonen, Sylvester, Kluge & Hertel, 2014; Sabogal, 2014; Toivonen, 2014); a su vez, estos factores serían modificados por la elevación, latitud y topografía de la región, habiendo una distinción en los requerimientos de las especies que se asientan en diferentes regiones geográficas de los Andes (Churchill & Luteyn, 2000). Por ejemplo, en las regiones secas, los bosques de *Polylepis* alcanzan las elevaciones más altas debido al efecto positivo de la radiación solar y las condiciones de temperaturas bajas, favorables para su crecimiento, así como también una adecuada disponibilidad de agua. En las regiones húmedas, constituidas por los bosques nubosos, la distribución de *Polylepis* está controlada por las temperaturas y la insolación solar, pero además por la competencia con otros taxones de árboles (Toivonen, 2014). Estos requerimientos también varían entre especies, así, aunque en muchas localidades pueden crecer hasta tres especies de *Polylepis* de manera simpátrica, lo harán con sutiles diferencias ecológicas en relación a los factores determinantes de su distribución mencionados anteriormente. De esta manera, la alteración de estos factores conduciría a un cambio en la respuesta de los bosques, modificando su distribución normal. En lo que respecta a las especies estudiadas, estas preferirían principalmente los hábitats húmedos (Zutta et al., 2012), sin embargo, tendrían que analizarse de manera individual cada una de las especies de *Polylepis* para determinar los factores ambientales que rigen su crecimiento y distribución específica.

La transformación de los bosques también estaría determinada por el impacto humano, que es el que ha producido las mayores modificaciones en la cubierta forestal en las zonas alto andinas. Estas partirían de ciertos factores como: los incendios forestales, la extracción de madera, la expansión de las actividades agrícolas (quinua, papa), ganaderas (llamas, alpacas, vacas) y mineras, y el pastoreo de animales (Ansión, 1986; Williams et al., 2011; Toivonen, 2014; Bush et al., 2015); esta última causa sería una de las principales amenazas para los bosques de *Polylepis* restantes en la actualidad, ya que es realizada con grandes densidades de ganado que sobrepasan la capacidad sostenible de ecosistema, por lo que degrada el hábitat, restringiendo los patrones de regeneración de los bosques (Kessler, 2006).

En síntesis, los resultados obtenidos muestran que en el pasado la mayoría de las especies de *Polylepis* estudiadas habría experimentado un aumento en su distribución potencial. Aunque esto concuerda con los estudios revisados, es importante resaltar que hace 6000 años ocurrieron fluctuaciones de abundancia en la vegetación alto andina en medio de la transición entre estados secos y húmedos, por lo que se asumiría que desde mediados del

Holoceno la extensión de los bosques de *Polylepis*, aunque podría haber sido mayor, no habría sido constante en todo el periodo. Estas rápidas fluctuaciones experimentadas por las especies del género *Polylepis* indicarían la gran sensibilidad del ecosistema a presiones ambientales, y también una potencial vulnerabilidad a futuros impactos humanos y al cambio climático (Gosling et al., 2008). Por ende, el impacto antropogénico ocurrido en los bosques alto andinos, los cuáles se acentuaron en la época de la conquista, pero se desarrollaron a la par con los periodos de fluctuaciones climáticas, también habrían deforestado gran parte de los bosques de *Polylepis*, produciendo una repercusión considerable en la distribución de estos y en el paisaje de los Andes (García y Merino, 1878).

Dado que la distribución potencial pasada muestra los hábitats más idóneos, podríamos afirmar que el modelo muestra los picos máximos de distribución potencial que *Polylepis* habría tenido en los periodos de fluctuaciones entre estados, teniendo en cuenta que esta no fue la única distribución presentada y que esta variación en la distribución geográfica del género variaría según los cambios climáticos sufridos y los requerimientos de la especie de *Polylepis*.

5.2. Distribución potencial presente - futura

En los Andes tropicales, diversos estudios sugieren un aumento significativo de la temperatura y cambios en los patrones de precipitación y humedad, los cuales, afectarían el tamaño y la distribución de los glaciares y los humedales, la integridad de los ecosistemas existentes, así como la disponibilidad de agua para el consumo humano, el riego y la producción de energía (Urrutia & Vuille, 2009; Young, 2009; Kuentz et al., 2011). Estas proyecciones se ven respaldadas por testimonios de campesinos, que recalcan que las alteraciones a nivel micro climático se vienen dando desde los años setenta. Por otro lado, es evidente la presencia de un fuerte y constante proceso de desertificación como resultado de una serie de actividades productivas inapropiadas, erosivas e insostenibles que dañan a los frágiles ecosistemas alto andinos (Torres & Gómez, 2010). Los modelos de distribución potencial futura de especies hallados para el género *Polylepis* buscaron evaluar los impactos climáticos para el año 2050, e indicar las transformaciones sustanciales que el cambio climático podría generar en la distribución de las especies de *Polylepis* (Beaumont et al., 2008). Los resultados variaron según los escenarios de cambio climático y el GCM utilizado.

Por un lado, las especies analizadas no respondieron de manera homogénea a los dos escenarios de cambio climático (RCP 2.6, 8.5), para los tres GCM utilizados, siendo *P.*

incana la especie que respondió de mejor modo al mostrar un incremento en su área de distribución potencial a pesar de las condiciones extremas. Por el contrario, las demás especies mostraron una inclinación a disminuir su distribución potencial conforme las condiciones se hacían más adversas. El análisis a nivel de género, por su lado, mostró una tendencia de reducción del área de distribución potencial en casi todos los modelos; sin embargo, el porcentaje de cambio obtenido no fue tan elevado en comparación con los resultados de cada una de las especies del género *Polylepis*. Esto quiere decir que a nivel de género se proyectó una reducción en la extensión de los bosques, pero no en grandes magnitudes, como sí ocurrió con los análisis a nivel de especies.

En cuanto a las especies vegetales, estas serían las más afectadas de manera negativa por los impactos del cambio climático (Ramírez-Villegas, Cuesta, Devenish, Peralvo, Jarvis & Arnillas, 2014). Según Anderson et al. (2012), las proyecciones climáticas muestran que el calentamiento de los Andes tropicales aumenta con la altitud, siendo mayor, más rápido y severo, en las altitudes superiores a los 4000 msnm, tanto en la vertiente oriental como occidental andina, debido a que son regiones donde las especies se encuentran cerca de su tolerancia fisiológica (Cuyckens, Christie, Domic, Malizia & Renison, 2016). Ante este calentamiento climático, los ecosistemas de montaña se ven afectados de distintas maneras: mediante cambios fisiológicos producto del aumento en la concentración de CO₂, y cambios en la respuesta de los organismos a los nuevos parámetros de temperatura, humedad e intensidad de la luz (Haslett, 1997). Las variaciones climáticas naturales han afectado en el pasado las condiciones climáticas en los Andes (por ejemplo, durante los periodos glaciales), como se pudo analizar en el apartado anterior. En la actualidad, la respuesta de muchas comunidades vegetales ha sido la retracción de las mismas; por ejemplo, con la distribución de varias especies de robles y pinos de los bosques templados de México, así como con la mayoría de las especies de *Polylepis* a lo largo de los Andes (Pacheco, Malizia & Cayuela, 2010; Mejía, 2013). Esto se ve confirmado en el trabajo de Pacheco et al. (2010), donde desarrolla modelos de distribución con variables climáticas en bosques subtropicales, las cuales coinciden en el patrón general de futura retracción de las áreas actuales y migración ascendente del bosque pre montano a lo largo de los Andes, debido al aumento de la temperatura. En referencia a los resultados obtenidos para las especies *P. weberbaueri*, *P. sericea* y *P. racemosa*, esta tendencia a la retracción de los bosques de *Polylepis*, conforme aumentan las temperaturas según cada escenario climático, se ve corroborada. En el caso de *P. incana*, esta especie tendría el efecto contrario y su extensión aumentaría, distribuyéndose

principalmente a lo largo de la vertiente occidental de los Andes. Esta respuesta implicaría un cambio en el uso del hábitat en relación con la distribución de las nuevas condiciones ambientales, lo que se conoce como un nicho dinámico, a diferencia de las otras especies que al mantener las condiciones ambientales en las que habitan vendrían a ser nichos estáticos (Michel & Knouft, 2012).

En el caso de la distribución potencial futura para todo el género *Polylepis*, aunque demuestra una disminución en su extensión a nivel cuantitativo, su distribución potencial geográfica a futuro sería más uniforme dentro de los Andes peruanos, pudiendo potencialmente ocurrir en zonas más bajas y orientadas hacia el lado de la vertiente occidental. Como se mencionó anteriormente, la distribución potencial actual obtenida a nivel de género no mostraría una proyección exacta que incluya las zonas de distribución estimadas para cada una de las 19 especies identificadas para Perú; para el caso de la distribución potencial futura ocurre lo mismo. Esto se debe a que algunos rasgos funcionales relevantes que permiten a las especies de *Polylepis* soportar condiciones frías y secas, muestran variaciones genéticas entre especies (Toivonen et al., 2014b), por ende, los movimientos de las especies bajo el efecto del cambio climático futuro deben entenderse de manera individual, ya que los atributos geográficos específicos de las especies pueden influir en el comportamiento de los modelos (Heikkinen, Luoto, Araújo, Virkkala, Thuiller & Sykes, 2006). De esta manera, el resultado a nivel de género debe tomarse solo como una aproximación general de la situación futura para el género *Polylepis*.

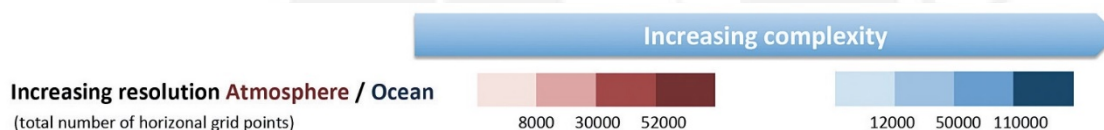
Por otro lado, los modelos climáticos globales utilizados para determinar la distribución potencial futura experimentaron variaciones notables en los resultados obtenidos para cada una de las especies, llegando a variar por varios millones de hectáreas. A pesar de las diferencias cuantitativas, en la gran mayoría de las especies, a nivel cualitativo sí llegaron a coincidir y se pudo identificar una constante ya sea de disminución o aumento del área de distribución potencial a futuro, la cual se concentra principalmente en las zonas del centro, centro-norte y centro-sur del territorio peruano. Hay una amplia selección de modelos climáticos disponibles que simulan el funcionamiento del sistema climático global, por lo que fue importante la utilización de varios de estos, primero, porque no existe el “mejor modelo climático”, ya que los modelos varían a nivel espacial y temporal en sus habilidades para simular climas actuales, y poseen diferentes alcances y parámetros de análisis (atmósfera, océano, hielo marino y componentes de tierra-superficie) (Fenech, Comer & Gough, 2007; Beaumont et al., 2008); y segundo, para poder generar una contraposición y

comparación de las áreas idóneas resultantes; de esta manera, se pudo tener una idea más completa de cómo sería la distribución potencial futura de cada una de las especies del género *Polylepis* modeladas y cuál modelo es el que proporcionaba un uso del hábitat más realista (Baldwin, 2009).

La función de los tres GCM utilizados en la investigación es la misma, comprender la dinámica de los componentes físicos del sistema climático (ya sea atmósfera, océano, tierra y hielo marino), y hacer proyecciones basadas en las futuras emisiones de gases de efecto invernadero (Flato et al., 2013); sin embargo, cada uno tiene un nivel de complejidad distinto (ver Tabla 5.1).

Tabla 5.1.: Nivel de complejidad de los modelos utilizados en la investigación.

Modelo climático		Atmosphere–Ocean General Circulation Models (AOGCMs)		
		Atmósfera	Superficie de tierra	Océano
BCC-CSM1-1	China			
CCSM4	EE.UU.			
HadGEM2-ES	Reino Unido			



Fuente: Flato et al., 2013

A partir de la tabla anterior, se puede distinguir que la complejidad del modelo va a depender de la resolución del mismo, en base a la cantidad de puntos representados en forma de una cuadrícula que cubre la superficie de la Tierra (grid points). De esta manera, si el modelo presenta los componentes físicos del clima a mayor resolución, se generará un análisis mucho más preciso (Climate Prediction, febrero 2017). En el caso de los modelos climáticos globales utilizados, el modelo con mayor complejidad según la tabla anterior fue el CCSM4, el cual, según Gent et al. (2011), tiene una mejor representación de eventos extremos, como olas de calor y lluvias fuertes. Este fue el único de los modelos que predijo un incremento de la extensión de bosques para *P. weberbaueri* en el escenario RCP 2.6; y a nivel de género, un aumento en la extensión de los bosques para ambos escenarios. Si bien el análisis a nivel de género tiene una serie de limitaciones antes explicadas, es importante tomar en cuenta que, bajo este modelo de mayor resolución, los bosques de *Polylepis* en un futuro, a pesar de las condiciones climáticas, tendrían un área idónea mucho más extensa para distribuirse, y de las cuatro especies analizadas, dos podrían aumentar su área para el escenario de emisiones de

CO₂ más leve. Para elaborar una comparación con respecto a los otros GCM utilizados (BCC-CSM1-1 y HadGEM2-ES), se pondrá énfasis en el mapa de distribución potencial futuro para la especie *P. incana* con el escenario RCP 8.5, ya que es el que posee una distribución más visible para su análisis (ver Mapa 4.8).

En las proyecciones a futuro resultantes para *P. incana*, se puede notar que la distribución potencial planteada con los modelos climáticos globales BCC-CSM1-1 y HadGEM2-ES, tienen valores de idoneidad bastantes altos a lo largo de los Andes, a diferencia del modelo CCSM4, para el cual los valores de idoneidad se centran en la zona centro-sur del área de estudio. De los tres modelos, el BCC-CSM1-1 es el que presentó una mayor área de distribución potencial para la especie, no solo por los niveles de idoneidad del hábitat y la extensión cuantitativa, sino también por el alcance de la proyección. A pesar de no haber contado con ningún punto de colecta en el departamento de Puno al momento de realizar el proceso de modelamiento, todas las proyecciones establecieron un área de distribución potencial de la especie en esta zona, lo que confirma que las proyecciones serían correctas, ya que Puno forma parte del área de presencia de la especie *P. incana*; sin embargo, el modelo BCC-CSM1-1 es el único que identificó una zona más extensa con valores más altos de distribución. Por su parte, el modelo HadGEM2-ES presenta para esta especie una distribución potencial intermedia entre los otros dos modelos, con una distribución similar al CCSM4 y los niveles de idoneidad altos a lo largo de los Andes como el BCC-CSM1-1.

En síntesis, el modelado de nichos es un método que ha demostrado ser muy útil e importante para representar el clima observado y los cambios climáticos pasados, así como para generar proyecciones de distribución de especies ante el cambio climático futuro (Randall et al., 2007). El área alto andina se caracteriza por poseer una gran heterogeneidad espacial; los gradientes altitudinales, la topografía y la cubierta del suelo interactúan para crear complejos hábitats y afectar los patrones de distribución y tipo de interacciones entre los organismos (Haslett, 1997). Dependiendo de la ubicación de las especies, y del escenario climático considerado, el aumento de las temperaturas previstas a ocurrir en el futuro puede variar y, por ende, afectar de distinta manera a las especies alto andinas (Urrutia & Vuille, 2009). De esta manera, la especie que respondería de mejor manera a los escenarios de cambio climático para el año 2050 sería *P. incana*, la cual aumentaría su distribución, concentrándose en las zonas a lo largo de la vertiente occidental de los Andes. Las demás especies responderían de manera negativa, sufriendo una retracción hacia las zonas más altas en sus áreas de distribución. Cabe resaltar, que esta distribución potencial futura obtenida

para las especies de *Polylepis* no implica necesariamente la presencia real o la desaparición futura de las especies, pero sí implicaría un aumento del riesgo de extinción local si su distribución se ve disminuida (Cuyckens et al., 2016).

Las estimaciones generadas por los modelos de distribución potencial son útiles para medir posibles impactos y tendencias generales, alcanzando distintos resultados a nivel de especie y a partir de las características ecológicas, la interacción con otras especies y su respuesta fisiológica al estrés del ambiente que rige a cada especie (Ramírez-Villegas et al., 2014). Como se mencionó anteriormente, hay una serie de factores ambientales que determinarían la distribución de *Polylepis* a diferentes altitudes (la temperatura, la insolación solar, la humedad, la pendiente, el suelo y la disponibilidad de agua). En esta investigación se utilizaron ciertos factores climáticos para describir la distribución potencial actual de *Polylepis*, más éstos no son suficientes para determinar completamente la distribución potencial de las especies (Cuyckens et al., 2016). De igual manera, muchas de las variables que se incluyen en los modelos de Maxent a menudo tienen poca influencia en los patrones de distribución de una determinada especie, por lo que la eliminación de las variables que no contribuyen en gran medida a los modelos según la prueba Jackknife aumentaría la exactitud del mismo (Baldwin, 2009). Así, la identificación del área más realista de distribución del género *Polylepis* dependerá de las áreas individuales de distribución potencial de cada una de las especies que conforman el género, de acuerdo a las variables ambientales que las determinan y las complejas interacciones entre los diversos factores que afectan a las distribuciones; por ende, las decisiones de modelado deben estar dirigidas a especies específicas (Pearson y Dawson, 2003 citado en Heikkinen et al., 2006; Merow, Smith & Silander., 2013).

Es importante reconocer que los modelos climáticos no están intentando predecir lo que sucederá en un lugar y punto específico en el tiempo, sino que buscan determinar cómo las condiciones climáticas cambiarán y cómo es que esto afectará a los organismos que se desarrollan en un área particular. Por ende, no se puede establecer a un solo GCM como el modelo con la proyección más confiable para la distribución potencial futura de las especies de *Polylepis*, por el contrario, cada uno de los modelos utilizados en esta investigación brinda ciertos indicios de la posible distribución potencial futura de los bosques de *Polylepis*, complementándose entre sí, brindando distintas perspectivas y limitaciones. Conocer la forma en que las condiciones climáticas modificarían a los bosques alto andinos y la sensibilidad de estos y de los factores biofísicos que controlan su distribución y abundancia

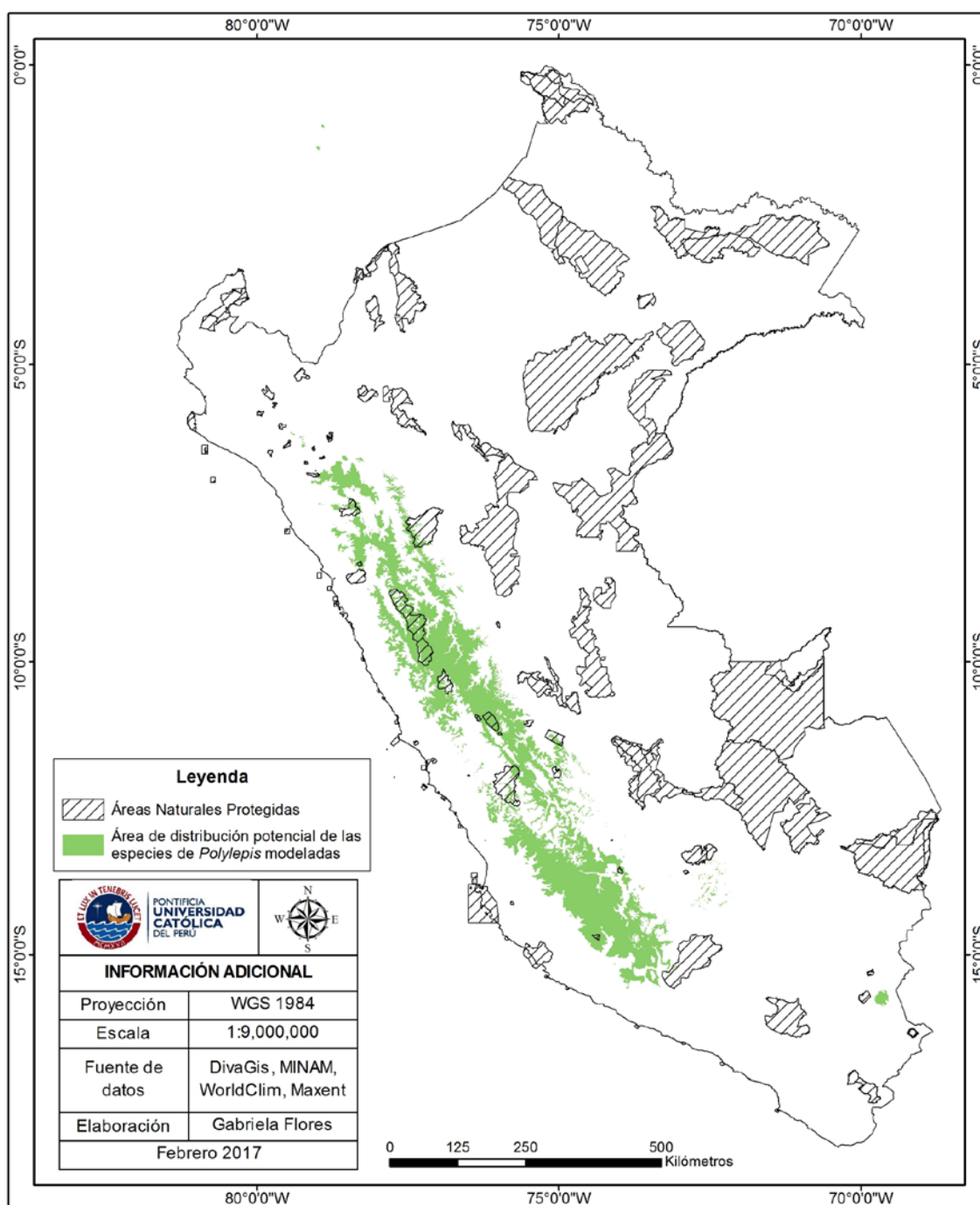
(Young, 2009) es necesario para poder planificar los posibles impactos ambientales y humanos, salvaguardar los bienes y servicios ambientales de gran importancia a nivel local, regional y nacional que estos bosques brindan (Llerena, Yalle & Silvestre, 2014). A partir de esto, será posible la creación medidas de adaptación y mitigación diseñadas especialmente para estos ecosistemas, en base al desplazamiento que proyecten (Tovar, Arnillas, Cuesta & Buytaert, 2013).

5.3. Conservación de los bosques de *Polylepis*

La sensibilidad experimentada ante las fluctuaciones climáticas en el Holoceno, y los efectos del cambio climático que actualmente se viven y que alteran la forma y contenido de la vegetación (Haslett, 1997), hacen muy vulnerable a la biodiversidad alto andina, siendo la desertificación el principal proceso que desencadena los cambios micro climáticos en los ecosistemas de montaña tropicales andinos. Aunque en las culturas locales andinas hay una tradición de adaptación a la variabilidad climática de aproximadamente 5000 años, actualmente estas poblaciones se encuentran en una situación de vulnerabilidad debido a la pobreza; además, se prevé que las futuras anomalías en la temperatura serán más altas y tendrán tasas de cambio más rápidas que en el pasado, por lo que los escenarios de cambio climático significan una amenaza mucho mayor para estas poblaciones (Torres & Gómez, 2008; Tovar et al., 2013).

La biodiversidad de los hábitats de montaña es una fuente importante de servicios ambientales, jugando un papel clave en el abastecimiento de agua para las zonas bajas, manejo de suelos, retención de sedimentos y nutrientes, producción de madera y como fuente de subsistencia de muchos seres vivos (Fjeldså & Kessler, 1996; Urrutia & Vuille, 2009). Por lo mismo, comprender la respuesta de los ecosistemas alto andinos a los cambios climáticos (identificando las áreas estables a largo plazo, áreas de retracción o expansión) es esencial para poder conservarlos a través del tiempo, garantizar la permanencia de la diversidad de hábitats que ocurren en ellos y para mitigar cualquier efecto desfavorable para las comunidades locales (Pacheco et al., 2010). Para lograr esto, a finales del siglo XIX, cuando ocurre la etapa de deforestación más extrema de los bosques, se dan los primeros intentos por salvaguardar los bosques nativos en parques y reservas naturales (Herrera & Ali, 2009).

Mapa 5.1. Distribución potencial actual de *Polylepis* con respecto a las Áreas Naturales Protegidas



Fuente: Elaboración propia.

El mapa 5.1 muestra la superposición entre las áreas de distribución potencial actuales obtenidas para las especies *P. incana*, *P. racemosa*, *P. weberbaueri* y *P. sericea*, combinadas en una sola área de distribución potencial; y las Áreas Naturales Protegidas (ANP) de Perú, sobre las cuáles se construyen las medidas de conservación (Cuyckens et al., 2016). A partir de esto, se observa que el área en los Andes que puede contener zonas de distribución potencial actual de los bosques de *Polylepis* es mayor que las zonas que se encuentran

protegidas y forman parte de la red de ANP existentes en la actualidad. Solo algunas zonas donde las especies de *Polylepis* tienen una mayor idoneidad de área están dentro de una ANP, entre las que se encuentran el Coto de Caza Sunchubamba, el Santuario Nacional de Calipuy, el Santuario Nacional Huayllay, el Santuario Histórico Chacamarca, la Zona Reservada Cordillera Huayhuash, el Bosque de Protección Pui Pui, el Parque Nacional Río Abiseo, la Reserva Nacional de Junin, la Reserva Paisajística Nor Yauyos-Cochas, la Reserva Nacional Pampa Galeras y el Parque Nacional Huascarán. A pesar de esto, la mayoría del área potencial se encuentra sin protección. Dado que en el modelamiento no se incluyó el factor humano, es probable que muchas de las zonas que son idóneas para las especies de *Polylepis* y que no está protegidas, sean actualmente ocupadas por alguna ciudad o pueblo, utilizadas para la actividad agrícola y/o hayan sido deforestadas; sin embargo, es importante resaltar que la cantidad de ANP presentes en la zona andina es escasa e insuficiente para cubrir la demanda de, en este caso, especies alto andinas en peligro de extinción como lo es *Polylepis*.

Para una óptima planificación de la conservación es importante saber dónde se encuentra realmente cada especie, teniendo en cuenta las variaciones microclimáticas, variaciones del suelo, la insolación y disponibilidad de humedad de cada especie a estudiar; así como considerar la distribución de la especie en respuesta a condiciones climáticas futuras (Gosling et al., 2009; Cuyckens et al., 2016). Para esta labor, utilizar la técnica de modelamiento es de gran ayuda; por lo tanto, es necesario seguir desarrollando datos espaciales detallados para las especies alto andinas sobre sus distribuciones pasadas y futuras, así como sus densidades de población para diferentes momentos históricos, esto ayudará a tener un mejor manejo sobre estos ecosistemas y sobre las actuales y futuras áreas a proteger.

Además de la escasa cantidad de ANP que protegen los bosques de *Polylepis*, estos actualmente presentan algunos obstáculos que impiden su buen manejo y conservación. Por un lado, hay una falta de información básica que permita realizar un estudio a nivel de ecológico, una falta de información sobre distribución espacial de especies alto andinas, sobre la pérdida del bosque andino y el impacto de la actividad humana. Por otro lado, no se han centrado esfuerzos para la creación de información de distribución potencial futura específicamente sobre los bosques de los Andes tropicales, debiéndose posiblemente a que esta región representa un reto particular para el modelado del clima dada la compleja topografía y los empinados gradientes climáticos (Urrutia & Vuille, 2009). Actualmente, se

les da un menor énfasis a los bosques alto andinos respecto al tema de manejo de espacios forestales, siendo los bosques amazónicos los que acaparan la atención de las propuestas y políticas que se establezcan. Esto se puede observar en la información y datos estadísticos existente en el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) y en la Estrategia Nacional sobre Bosques y Cambio Climático (MINAM, 2016). Este documento es un trabajo colaborativo multisectorial liderado por el Ministerio del Ambiente, el cual se enfoca en la “gestión de paisajes forestales sostenibles”, teniendo como objetivos el reducir la deforestación y la degradación de los bosques de manera articulada mediante el manejo forestal sostenible. Sin embargo, y aunque los objetivos se refieran a los bosques de manera general, el lineamiento que sigue es sesgado y de aplicación exclusiva para la región amazónica. Sin embargo, a nivel regional sí existen programas dedicados a los bosques alto andinos, como el Programa Bosques Andinos y Cambio Climático¹⁵ el cual provee información científica sobre los bosques alto andinos de toda la región, y busca con esto propiciar la creación de políticas públicas para su conservación y uso sostenible, así como estrategias de adaptación y mitigación frente al cambio climático.

Los resultados a experimentar en las zonas alto andinas, ante este cambio en los patrones climáticos, en la mayoría de las especies modeladas, no son positivos, por lo que el riesgo de experimentar una reducción en el área de distribución de *Polylepis* se hace más evidente en caso no se adopte alguna medida en el corto a mediano plazo para revertir estos posibles escenarios. Esto incrementa la necesidad de encontrar soluciones ante el continuo retroceso de los bosques y los acelerados procesos de degradación de suelos que actualmente se viven en los Andes, así como “desarrollar una mejor comprensión de la eficacia de la conservación en los climas futuros de los Andes” (Araujo et al., 2004 citado en Ramírez-Villegas et al., 2014). Por ende, es necesario que las estrategias de manejo forestal actuales, tanto a escala nacional como local, incluyan a los ecosistemas andinos en las decisiones oficiales.

Partiendo de esto, debe haber un aumento en las investigaciones relacionadas a los bosques de *Polylepis* para lograr un manejo adecuado de los mismos. En primer lugar, se deben de conocer las dinámicas ecológicas de estas especies, las interacciones que el género tiene con otras especies y los factores que afectan su distribución y que podrían jugar un rol clave en el futuro frente a un escenario de cambio climático. En segundo lugar, se deben de conocer las actuales amenazas a las cuales se ven expuestos estos bosques, tanto a nivel ambiental como

¹⁵ <http://www.bosquesandinos.org/>

humano: el nivel de deforestación existente, cuál es el uso que se le da a los bosques, el impacto que sufre por parte del ganado y el hombre, qué esfuerzos de conservación existen y se llevan a cabo, así como los esfuerzos de reforestación a nivel nacional. En tercer lugar, y con respecto a la aplicación de la técnica de modelamiento, se deben de mejorar la representatividad espacial de las especies a partir de los puntos de referencia existentes para las especies de este género. Las colectas existentes, utilizadas para los trabajos de modelamiento, deben de abarcar todos los hábitats de ocurrencia posibles, y no solo los más accesibles para los colectores. Esto garantizará una adecuada proyección potencial que ayudará de manera más exacta a los planes de conservación para estos bosques. Además, se deben de utilizar modelos climáticos de mayor resolución y variables climáticas que perfilen el hábitat de las especies correctamente, adecuándose a sus requerimientos ambientales específicos; por ende, el conocimiento previo de las condiciones ecológicas de las especies es de suma importancia.

La evidencia muestra que el cambio climático es inminente y las consecuencias que este causaría en los Andes tropicales son negativas, por lo mismo, resulta fundamental una investigación continua y a profundidad sobre estos bosques alto andinos, así mismo como la inclusión de políticas que aseguren un manejo forestal sostenible de las zonas alto andinas, en aras de salvaguardar los servicios ecosistémicos de los bosques de *Polylepis* y garantizar su adaptación ante las venideras variaciones climáticas.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Distribución potencial actual

- La distribución potencial presente obtenida para las especies del género *Polylepis* nos dio un panorama general de las zonas dentro de los Andes que potencialmente estarían cubiertas por bosques alto andinos en la actualidad. La distribución potencial presente alcanzada por el género *Polylepis* fue de 9 341 680.13 ha, mientras que las dos especies que obtuvieron una mayor distribución potencial y mayor cobertura de área a lo largo de los Andes peruanos fueron *P. incana* (5 897 357.44 ha) y *P. racemosa* (4 474 052.70 ha). En todos los casos, la extensión de las hectáreas proyectadas fue mayor a la que se tenía estimada en el año 2015 por el MINAM (101 533 ha).
- Se obtuvo una discordancia entre las zonas idóneas resultantes a nivel de especies y de género. Los resultados de la distribución potencial del género representaron las áreas de distribución de las diecinueve especies de *Polylepis* colectadas para esta investigación; sin embargo, la proyección omitió algunas áreas que resultaron ser altamente idóneas para ciertas especies, como en el caso de *P. incana*. Por ende, a nivel de género, las áreas de distribución potencial de *Polylepis* son generalizadas y no reflejan todas las áreas posibles de extensión.
- Este contraste hace notar que existe una variación ecológica a nivel de especies, por lo que cada especie posee sus propias condiciones ecológicas de vida y responde de manera diferente a los factores ambientales determinantes de su distribución espacial. En el caso de *Polylepis*, incluir todas las especies para el análisis de género desestimó el hábitat que podrían ocupar algunas de las especies del género, generando una pérdida de información espacial importante y una visión diferente del territorio; por ende, para el caso de los bosques de *Polylepis* es vital realizar cualquier análisis de manera individual y considerando las particularidades ambientales específicas de cada especie.

Distribución potencial pasada

- El periodo de mediados del Holoceno (hace 6000 años atrás), está caracterizado por condiciones más áridas que las de hoy, pero con fluctuaciones climáticas e intervalos

entre eventos húmedos y secos; de igual manera, es el periodo donde se desarrollan las civilizaciones prehispánicas y comienza la deforestación antropogénica. Para este periodo, la distribución potencial pasada alcanzada por el género *Polylepis* habría menor que la determinada para el tiempo presente. A nivel de especies, la distribución potencial de la mayoría de las especies modeladas (*P. incana*, *P. sericea* y *P. weberbaueri*) habría aumentado durante mediados del Holoceno, con excepción de *P. racemosa*, cuya distribución potencial reflejó que en el pasado esta especie habría tenido una extensión menor a la actual.

- Esta heterogeneidad en las distribuciones resultantes demostraría que los factores climáticos llevan a un cambio en los bosques alto andinos, al punto de modificar la distribución y abundancia de los mismos. Asimismo, indicaría que la manera de reaccionar de cada una de las especies del género *Polylepis* ante los cambios ambientales climáticos pasados fue desigual entre sí.
- La distribución de los bosques de *Polylepis* ha sufrido variaciones a lo largo de los años, y no ha mantenido una distribución uniforme en todo momento, ya que las fluctuaciones climáticas y los impactos humanos han repercutido en su extensión espacial. Por ende, y con respecto al debate entre Troll y Ellenberg por los determinantes de la distribución del género *Polylepis*, es complicado excluir a alguno de estos factores como no causantes de la distribución arbórea de *Polylepis* en el Perú ya que ambos habrían modificado el paisaje andino: los factores climáticos habrían regido el patrón de distribución en el periodo del Holoceno, mientras que los factores humanos lo habrían hecho a partir de la época prehispánica.
- Los factores ambientales determinantes de la distribución de *Polylepis* en el Perú, que favorecerían o restringirían la extensión del bosque, serían la temperatura, la insolación solar, la humedad, la pendiente, el suelo y la disponibilidad de agua, los cuales serían modificados por la elevación, latitud y topografía de la región. Esto variaría según las especies de *Polylepis* y su ubicación geográfica en los Andes. Para las cuatro especies estudiadas, estas preferirían los hábitats húmedos de manera general, sin embargo, cada una dependería de factores ambientales con características únicas. Por otro lado, los factores humanos determinantes serían los incendios, la deforestación, la expansión de actividades agrícolas, ganaderas y mineras, y el pastoreo; todos estos contribuyen a la degradación del hábitat y la restricción de los patrones naturales de distribución.

- Tanto los factores ambientales como humanos determinantes de la distribución de las especies de *Polylepis* deben de estudiarse con mayor profundidad, así se tendrá una idea más exacta de cuáles son los elementos más importantes que aseguran el desarrollo de cada especie.

Distribución potencial futura

- Para el año 2050, prevaleció una distribución potencial negativa para las especies de *Polylepis*. La única especie que tuvo una respuesta positiva en todos los escenarios de cambio climático fue *P. incana*, aumentando su distribución en las zonas de la vertiente occidental de los Andes conforme las condiciones se hacían más extremas. Las demás especies reducirían su distribución, distribuyéndose hacia las zonas más altas. Por ende, de manera general, la mayoría de las especies de *Polylepis* se verían afectadas por los cambios climáticos venideros constituidos por un aumento de temperatura.
- Los dos escenarios de cambio climático utilizados (RCP 2.6 y 8.5) no afectaron de manera homogénea a las especies analizadas. Predominó una disminución constante conforme las condiciones climáticas se volvían más extremas, de esta manera, hubo un mayor porcentaje de cambio para el escenario más extremo de emisión de GEI (8.5) tanto para las especies de *Polylepis* que redujeron como para las que aumentaron su área de extensión. Ante esto, se puede estimar que las condiciones de cambio climático tendrían efectos cada vez más agudos para los bosques de *Polylepis*, llegando a modificar todo el ecosistema alto andino circundante.
- Los modelos climáticos globales utilizados (BCC-CSM1, CCSM4 y HadGEM-ES) experimentaron variaciones en los resultados obtenidos para cada especie de *Polylepis*, discrepando por varios millones de hectáreas de modelo a modelo. A pesar de estas diferencias cuantitativas, a nivel cualitativo sí hubo coincidencia y se pudo identificar que las áreas de distribución potencial se concentrarían principalmente en las zonas del centro, centro-norte y centro-sur del territorio peruano. Por ende, ningún modelo fue mejor que otro, dado que entre ellos se complementan la información que un modelo puede estar omitiendo, como es el caso de *P. incana* para el escenario con el RCP 8.5.

Marco metodológico

- La técnica de modelamiento empleada permitió dar un acercamiento a las condiciones de los bosques de *Polylepis* en un escenario pasado, presente y futuro en base a una serie de variables ambientales. Para las cuatro especies modeladas y en todos los escenarios de predicción, el parámetro AUC fue de 0.995 hasta 0.997, mientras que para el análisis a nivel de género fue de 0.983, lo cual indica que, en todos los casos, los resultados obtenidos fueron confiables.
- La utilización de varios modelos para determinar los resultados fue de suma importancia para ver las distintas variantes y similitudes entre las proyecciones, sin embargo, esto no pudo realizarse en la distribución potencial pasada por falta de información disponible para los modelos BCC-CSM1 y HadGEM-ES. Sería recomendable hacer una comparación con otros modelos globales climáticos para ver si los resultados en la distribución potencial pasada de *Polylepis* varían o confirman los resultados obtenidos en esta investigación.
- La representatividad espacial de los puntos de colecta de *Polylepis* no mostraron el hábitat de las especies del género de manera completa, dado que hubo varios focos de concentración de puntos en una misma zona, sobre todo para las especies *P. weberbaueri* y *P. sericea*. De esta manera, es necesaria la colecta de más puntos de presencia que no se limiten a mostrar solamente las zonas de mayor y fácil acceso a estos bosques, sino todo el rango de distribución existente para las especies. La actualización de esta información es vital para desarrollar un buen trabajo de modelamiento y conocimiento local del ecosistema.
- Con respecto a las variables utilizadas para el modelamiento, por un lado, las variables ambientales no incluyeron la mayoría de los factores identificados que determinan la distribución de las especies de *Polylepis*. Para una planificación de la conservación de estos bosques es importante saber exactamente qué área podría ocupar cada especie, por ende, se tienen que incluir variables ambientales más específicas para cada especie de *Polylepis* analizada. Por otro lado, al no incluirse las variables humanas para el trabajo del modelamiento, se perdió la influencia directa de los impactos de las acciones humanas en la distribución de *Polylepis*, por ende, es necesario que se incluyan ciertas variables humanas que se involucran en el desarrollo de estos bosques y que están relacionadas más que nada a las amenazas a

las que se ve expuesto el género por el continuo impacto de las actividades humanas como, por ejemplo, el cambio de uso de suelo.

- La investigación omitió, con excepción del caso de las variables orientación y pendiente, la eliminación de las variables bioclimáticas que no aportaron al modelo proyectado. Sin embargo, esta práctica es importante y se deberían de excluir en futuras investigaciones las variables que no contribuyen y, por ende, no son útiles para el modelo. Así, con la filtración de estas variables, se podrá tener una proyección más exacta y real del área de distribución potencial de la especie estudiada.

Conservación de bosques alto andinos

- Los resultados obtenidos en esta investigación complementan los estudios locales existentes para el género *Polylepis*, así como la historia de distribución de estos bosques desde el periodo del Holoceno. La generación de esta información es importante para el trabajo de modelamiento de distribución de especies alto andinas en el Perú, además de que puede servir como fuente base para la toma de medidas de conservación y/o prevenciones pertinentes ante los efectos del cambio climático en los bosques alto andinos.
- Se halló que las Áreas Naturales Protegidas existentes en la zona de los Andes no cubren la mayoría del área de distribución potencial actual obtenida de los bosques de queñuales. Además de la escasa cantidad de ANP que protegen estos bosques, otros de los obstáculos que demuestran una falta de gestión en la conservación de los ecosistemas alto andinos son: la falta de información básica sobre bosques alto andinos (ecología, distribución espacial, impacto de la actividad humana, estadísticas de pérdida de área forestal), la falta de creación de información sobre distribución espacial a futuro y pasado, y el poco énfasis que los estudios nacionales le ponen a los bosques alto andinos.
- A futuro se espera que el impacto humano y climático aumente, transformado y desapareciendo importantes áreas del paisaje alto andino, como son los bosques de queñuales, y los bienes que estos proveen al sistema natural y a las poblaciones locales. Por ende, para frenar la vulnerabilidad latente de este ecosistema es necesario la creación y aplicación de políticas diseñadas específicamente para los bosques alto andinos; normar y controlar el acceso y manejo de estos ecosistemas frágiles, así como asegurar medidas de adaptación y mitigación frente al cambio climático.

BIBLIOGRAFÍA

Alva, W. (2005). *Geografía General del Perú*. Lima: San Marcos.

Anderson, E.P.; Marengo, J.A.; Villalba, R.; Halloy, S.R.P.; Young, B.E.; Cordero, D.; Gast, F.; Jaimes, E. & Ruiz Carrascal, D. (2012). Consecuencias del Cambio Climático en los Ecosistemas y Servicios Ecosistémicos de los Andes Tropicales. En Herzog, S.K., Martinez, R., Jørgesen, P.M. & Tiessen, H. (Ed.), *Cambio Climático y Biodiversidad en los Andes Tropicales* (pp. 1-22). Paris: Instituto Interamericano para la Investigación del Cambio Global (IAI), Sao José dos Campos, y Comité Científico sobre Problemas del Medio Ambiente (SCOPE).

Anderson, R. (2015). El modelado de nichos y distribuciones: no es simplemente “clic, clic, clic.” *Biogeografía*, 8:4–27.

Ansión, J. (1986). *El árbol y el bosque en la sociedad andina*. Lima: Ministerio de Agricultura del Perú, FAO.

Araújo, M.B. & Pearson, R.G. (2005). Equilibrium of species' distributions with climate. *Ecography*, 28(5): 693-695.

Araújo, M.B.; Pearson, R.G.; Thuiller, W. & Erhard, M. (2005b). Validation of species–climate impact models under climate change. *Global Change Biology*, 11: 1-10.

Araújo, M.B. & Guisan, A. (2006). Five (or so) challenges for species distribution modelling. *Journal of Biogeography*, 33: 1677–1688.

Arce, R. (1992). *Distribución Geográfica y Situación Actual de los Polylepis en los Departamentos de Ancash y Lima* (Tesis de maestría). Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.

Arica, D. (s.f.). Algunas Especies Forestales Nativas Para la Zona Altoandina. En *La Red Espacio Compartido en Sistemas Agroforestales (ECO-SAF)*. Recuperado de <http://www.ecosaf.org/altiplano/Especies%20forestales%20Condesan.pdf>

Asociación Ecosistemas Andinos (ECOAN) (2005). *Evaluación de la biodiversidad de los Bosques de Polylepis del Corredor de Conchucos – Huaraz, Ancash*. Perú: Conservación Internacional.

Asociación Ecosistemas Andinos (ECOAN) (2006). *Evaluación de la Biodiversidad en Bosques de Polylepis de la Región Puno*. Cusco: American Bird Conservancy, Gordon & Betty Moore Foundation.

Asociación Ecosistemas Andinos (ECOAN) (2007). *Evaluación de la biodiversidad de los bosques de Polylepis en la zona sur oeste del Parque Nacional Otishi*. Perú: Conservación Internacional.

Austin, M.P. (2002). Spatial prediction of species distribution: an interface between ecological theory and statistical modelling. *Ecological Modelling*, 157: 101-118.

Baldwin, R. (2009). Use of Maximum Entropy Modeling in Wildlife Research. *Entropy*, 11: 854-866, doi:10.3390/e11040854.

Beaumont, L. J.; Hughes, L. & Pitman, A. J. (2008). Why is the choice of future climate scenarios for species distribution modelling important?. *Ecology Letters*, 11: 1135-1146.

Beck, S.G.; Hernandez, P.A.; Jørgensen, P.M.; Paniagua, L.; Timaná, M.E. & Young, B.E. (2007). Plantas vasculares. En Young, B.E. (Ed.), *Distribución de las especies endémicas en la vertiente oriental de los Andes en Perú y Bolivia* (pp. 18-34). Arlington, Virginia, EE UU: NatureServe.

Benito de Pando, B. & Peñas de Giles, J. (2007). Aplicación de modelos de distribución de especies a la conservación de la biodiversidad en el sureste de la Península Ibérica. *GeoFocus. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, (7): 100-119.

Bocco, G. (2003). Carl Troll y la ecología del paisaje. *Gaceta Ecológica*, 68: 69-70.

Brack, A. (1994). La sierra del Perú: pobreza y posibilidades. *Revista Allpanchis*, 43-44(1): 87-116.

- Brack, A. (1999). *Diccionario enciclopédico de plantas útiles del Perú*. Cusco: CBC.
- Brack, A. (2008). *Perú, país de bosques*. Lima: Graph.
- Brack, A. y Mendiola, C. (2000). *Ecología del Perú*. Lima: Bruño.
- Brako, L. & Zarucchi, J.L. (1993). Catalogue of the Flowering Plants and Gymnosperms of Peru = Catálogo de las Angiospermas y Gimnospermas del Perú. *Monographs in Systematic Botany from the Missouri Botanical Garden*, 45: 1007.
- Bräuning, A. (2009). Climate variability of the tropical Andes since the late Pleistocene. *Advances in Geosciences*, 22: 13-25.
- Bravo Cadena, J.; Sánchez Rojas, G. & Gelviz-Gelvez, S. (2011). Estudio de la distribución de las especies frente al cambio climático. *Cuadernos de Biodiversidad*, 35: 12-18.
- Brown, J. & Lomolino, M. (1998). *Biogeography, 2nd edition*. Massachusetts: Sinauer Associates, Inc.
- Bush, M.; Alfonso-Reynolds, A.; Urrego, D.; Valencia, B.; Correa-Metrio, A.; Zimmermann, M. & Silman, M. (2015). Fire and climate: contrasting pressures on tropical Andean timberline species. *Journal of Biogeography*, 42: 938-950.
- Capriles, J. & Flores Bedregal, E. (2002). The economic, symbolic and social importance of the “keñua” (*Polylepis* spp.) during prehispanic times in the Andean highlands of Bolivia. *ECOTROPICA*, 8: 225-231.
- Cayuela, L.; Golicher, D.J.; Newton, A.C.; Kolbs, M.; De Albuquerque, F.S.; Arets, E.; Alkemade, J. & Pérez, A.M. (2009). Species distribution modeling in the tropics: problems, potentialities, and the role of biological data for effective species conservation. *Tropical Conservation Science*, 2(3): 319-352.
- Chaverri-Polini, A. (1998). Las montañas, la diversidad biológica y su conservación. *Unasylva*, 195(49). Recuperado de <http://www.fao.org/docrep/w9300s/w9300s09.htm>

Churchill, S. & Luteyn, J. (2000). Vegetation of the Tropical Andes: An Overview. En Lentz, D. (Ed.) (2000). *Imperfect balance: landscape transformations in the Precolumbian Americas* (pp. 281-310). New York: Columbia University Press.

Climate Prediction (febrero 2017) *Horizontal resolution (Grids)*. Obtenido de <http://www.climateprediction.net/climate-science/glossary/horizontal-resolution-grids/>

Cordero, D. (ed.) (2012). *Una mirada integral a los bosques del Perú*. Quito: UICN.

Cornejo, M. (2015). Adaptación Tecnológica a los Cambios Climáticos en los Andes Peruanos. *Revista de Arqueología Americana*, 33: 115-151.

Cox, C.B. & Moore, P.D. (2005). *Biogeography: An Ecological and Evolutionary Approach*, 7th edition. Oxford: Blackwell Publishing.

Cuesta, F. Peralvo, M & Valarezo, N. (2009). Los bosques montanos de los Andes Tropicales. Una evaluación regional de su estado de conservación y de su vulnerabilidad a efectos del cambio climático. *Serie Investigación y Sistematización #5*. Quito: Programa Regional ECOBONA – INTERCOOPERATION.

Cuesta F., Muriel, P., Beck, S., Meneses, R.I., Halloy, S., Salgado, S., Ortiz E. & Becerra, M.T. (Eds.) (2012). *Biodiversidad y Cambio Climático en los Andes Tropicales - Conformación de una red de investigación para monitorear sus impactos y delinear acciones de adaptación*. Lima-Quito: Red Gloria-Andes.

Cuyckens, G.; Christie, D.; Domic, A.; Malizia, L. & Renison, D. (2016). Climate change and the distribution and conservation of the world's highest elevation woodlands in the South American Altiplano. *Global and Planetary Change*, 137: 79-87.

D'Altroy, T. (2000). Andean Land Use at the Cusp of History. En Lentz, D. (Ed.). *Imperfect balance: landscape transformations in the Precolumbian Americas* (pp. 357-390). New York: Columbia University Press.

Dettelbach, M. (2016). Humboldt, Alexander Von (1769-1859). En Pillsbury, Joanne (Ed.), *Fuentes documentales para los estudios andinos 1530-1900*. Lima: Fondo Editorial PUCP.

Dickinson, J. (1969). The Eucalypt in the Sierra of Southern Perú. *Annals of the Associations of American Geographers*, 59(2): 294-307.

Dourojeanni, P. (2008). *Distribución y conectividad de bosques altoandinos (Polylepis) en la cuenca alta del río Pativilca* (Tesis de licenciatura). Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú.

Earls, J. (2014). Compatibilización de conocimientos climáticos: una aproximación. En Damonte, G & Vila, G. (Ed.) (2014). *Agenda de Investigación en Tems Socioambientales en el Perú: Una aproximación desde las ciencias sociales*. Lima: Centro de Investigaciones Sociológicas, Económicas, Políticas y Antropológicas de la Pontificia Universidad Católica del Perú.

Ellenberg, H. (1979). Man's Influence on Tropical Mountain Ecosystems in South America. *Journal of Ecology*, 67(2): 401-416.

Erickson, C. (2000). The Lake Titicaca Basin: A Precolumbian Built Landscape. En Lentz, D. (Ed.) (2000). *Imperfect balance: landscape transformations in the Precolumbian Americas* (pp. 311-356). New York: Columbia University Press.

Espinosa, D.; Morrone, J.; Llorente, J. & Flores, O. (2002). *Introducción al análisis de patrones en biogeografía histórica*. Mexico D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México.

Fenech, A.; Comer, N. & Gough, B. (2007). Selecting a Global Climate Model for Understanding Future Projections of Climate Change. En Fenech, A & MacLellan, J. (2007) *Linking Climate Models to Policy and Decision-Making* (pp. 133-145). Toronto: Environment Canada.

Fjeldså, J. (2002). *Polylepis* forests - Vestiges of a vanishing ecosystem in the Andes. *Ecotropica*, 8: 111-123.

Fjeldså, J. & 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*. Copenhagen: NORDECO.

Flato, G.; Marotzke, J.; Abiodun, B.; Braconnot, P.; Chou, S.; Collins, W.; Cox, P.; Driouech, F.; Emori, S.; Eyring, V.; Forest, C.; Gleckler, P.; Guilyardi, E.; Jakob, C.; Kattsov, V.; Reason, C. & Rummukainen, M. (2013). Evaluation of Climate Models. En Stocker, T.; Qin, D.; Plattner, G.; Tignor, M.; Allen, S.; Boschung, J.; Nauels, A.; Xia, Y.; Bex, V. & Midgley, P. (Ed.) (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 741-866). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom & New York, NY, USA.

Florencio, C. & Valencia, N. (2013). Japaní: Conservación, Ecoturismo y Manejo Forestal en la Comunidad Campesina "Santiago De Carampoma". En: *III Congreso Ecología y Conservación de los Bosques de Polylepis*. [online] Lima. Disponible en <http://congresoquenoaonaf.wixsite.com/congreso/ponencias3>

Franklin, J. (2010). *Mapping Species Distributions. Spatial Inference and Prediction*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Gade, D.W. (1975) *Plants, Man and the Land in the Vilcanota Valley of Peru*. The Hague: W. Junk.

Gade, D.W. (1999). Deforestation and Reforestation of the Central Andean Highlands. En *Nature and culture in the Andes*. Madison, Wisconsin: University of Wisconsin Press.

García y Merino, M. (1878). *Las epidemias de las plantas en la costa del Perú*. Recuperado de <http://www.banrepcultural.org/sites/default/files/brblaa625815.pdf>

Gareca, E.; Hermy, M.; Fjeldså, J.; Honnay, O. (2010). *Polylepis* woodland remnants as biodiversity islands in the Bolivian high Andes. *Biodiversity and Conservation*, 19(12): 3327-3346.

Gareca, E.; Breyne, P.; Vandepitte, K.; Cahill, J.; Fernandez, M. & Honnay, O. (2013). Genetic diversity of Andean *Polylepis* (Rosaceae) woodlands and inferences regarding their fragmentation history. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 172: 544-554.

Gent, P.; Danabasoglu, G.; Donner, L.; Holland, M.; Hunke, E.; Jayne, S.; Lawrence, D.; Neale, R.; Rasch, P.; Vertenstein, M.; Worley, P.; Yang, Z. & Zhang, M. (2011). The Community Climate System Model Version 4. *Journal of Climate*, 24(19): 4973–4991.

González, J. (2012). Carl Troll y la Geografía del Paisaje: vida, obra y traducción de un texto fundamental. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 59: 173-200.

Gosling, W.; Bush, M.; Hanselman, J. & Chepstow-Lusty, A. (2008). Glacial-Interglacial changes in moisture balance and the impact on vegetation in the southern hemisphere tropical Andes (Bolivia/Peru). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 259(1): 35-50.

Gosling, W.; Hanselman, J.; Knox, C.; Valencia, B. & Bush, M. (2009). Long-term drivers of change in *Polylepis* woodland distribution in the central Andes. *Journal of Vegetation Science*, 20: 1041-1052.

Graham, C.H., Loiselle, B.A, Velásquez-Tibatá, J. & Cuesta Camacho, F. (2012). Modelos de Distribución de Especies y el Desafío de Pronosticar Distribuciones Futuras. En Herzog, S.K., Martínez, R., Jørgesen, P.M. & Tiessen, H. (Ed.), *Cambio Climático y Biodiversidad en los Andes Tropicales* (pp. 349-368). Paris: Instituto Interamericano para la Investigación del Cambio Global (IAI), Sao José dos Campos, y Comité Científico sobre Problemas del Medio Ambiente (SCOPE).

Gregory, D., Johnston, R., Pratt, G., Watts, M.J. & Whatmore, S. (2009). *The Dictionary of Human Geography*. Reino Unido: Wiley-Blackwell.

Haeberli, W. & Zemp, M. (2012). Mountain Glaciers: On Thin Ice. En: Kohler T. y Maselli D. (Ed.). *Mountains and Climate Change, from Understanding to Action* (pp. 21-30). Bern: Geographica Bernensia.

Haslett, J. (1997). Mountain ecology: organism responses to environmental change, an introduction. *Global Ecology and Biogeography Letters*, 6(1): 3-6.

Hastorf, C., Whitehead, W. & Johannessen, C. (2005). Late Prehistoric Wood Use in an Andean Intermontane Valley. *Economic Botany*, 59(4): 337-355.

Heikkinen, R.; Luoto, M.; Araújo, M.; Virkkala, R.; Thuiller, W. & Sykes, M. (2006). Methods and uncertainties in bioclimatic envelope modelling under climate change. *Progress in Physical Geography*, 30(6): 1-27.

Herrera F. (1943). Sinopsis de las especies del género *Polylepis* (La Qqueuña). *Boletín del Museo de Historia Natural "Javier Prado"*, 7 (26-27): 219-228.

Herrera, A. & Ali, M. (2009). Paisajes del desarrollo: la ecología de las tecnologías andinas. *Antípoda*, 8: 169-194.

Hijmans, R.J., S.E. Cameron, J.L. Parra, P.G. Jones & A. Jarvis (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, (25): 1965-1978.

Hoffman, F.; Fung, I.; Randerson, J.; Thornton, P.; Foley, J.; Covey, C.; John, J.; Levis, S.; Mac, W.; Vertenstein, M; Stockli, R.; Running, S.; Heinsch, F; Erickson, D. & Drake, J. (2006). Terrestrial Biogeochemistry in the Community Climate System Model. *Journal of Physics: Conference Series*, 46: 363–369.

Hopkins, M. (2007). Modelling the known and unknown plant biodiversity of the Amazon Basin. *Journal of Biogeography*, 34: 1400-1411.

Huggett, R.J. (2004). *Fundamentals of Biogeography, Second Edition*. Nueva York: Routledge.

Humboldt, A. & Bonpland, A. (1855). *Ideas para una Geografía de las Plantas. Más un cuadro de los países tropicales*. Bogotá: Jardín Botánico "José Celestino Mutis". Recuperado de http://www.colombiaaprende.edu.co/html/mediateca/1607/articles-266665_archivo_fuente.pdf

Illoldi-Rangel, P. & Escalante, T. (2008). De los modelos de nicho ecológico a las áreas de distribución geográfica. *Biogeografía*, 3: 7-12.

Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) (s.f.). *Población económicamente activa, según ámbitos geográficos, 2004-2015*. Recuperado de <https://www.inei.gob.pe/estadisticas/indice-tematico/ocupacion-y-vivienda/>

Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) (s.f.b). *Ingreso promedio mensual proveniente del trabajo, según ámbitos geográficos, 2004-2015*. Recuperado de <https://www.inei.gob.pe/estadisticas/indice-tematico/ocupacion-y-vivienda/>

Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) (s.f.c). *Mujeres y hombres de 17 a más años de edad con al menos secundaria completa, según ámbito geográfico*. Recuperado de <https://www.inei.gob.pe/estadisticas/indice-tematico/brechas-de-genero-7913/>

Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) (2010) *Perú: Anuario de Estadísticas Ambientales 2010*. Lima: INEI. <https://www.inei.gob.pe/biblioteca-virtual/publicaciones-digitales/>

Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) (2011) *Perú: Anuario de Estadísticas Ambientales 2011*. Lima: INEI. <https://www.inei.gob.pe/biblioteca-virtual/publicaciones-digitales/>

Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) (2012) *Perú: Anuario de Estadísticas Ambientales 2012*. Lima: INEI. <https://www.inei.gob.pe/biblioteca-virtual/publicaciones-digitales/>

Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) (2013). *Resultados Definitivos. IV Censo Nacional Agropecuario 2012*. Lima: INEI, Ministerio de Agricultura y Riego.

Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) (2013b) *Perú: Anuario de Estadísticas Ambientales 2013*. Lima: INEI. <https://www.inei.gob.pe/biblioteca-virtual/publicaciones-digitales/>

Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) (2015). *Estado de la Población Peruana 2015*. Recuperado de <https://www.inei.gob.pe/biblioteca-virtual/publicaciones-digitales/>

Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) (2016). *Perú: Perfil de la Pobreza por Dominios Geográficos, 2004-2015*. Lima: INEI.

Instituto Nacional de Recursos Naturales (INRENA) (1997). *Compendio Estadístico de la Actividad Forestal del Perú: 1980-1996*. Lima: MINAG, INRENA

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2013). *What is a GCM?*. Recuperado de http://www.ipcc-data.org/guidelines/pages/gcm_guide.html

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2014). *Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Ginebra: IPCC.

International Union for Conservation of Nature (IUCN) (2016). *Red List of Threatened Species*. Recuperado de <http://www.iucnredlist.org>

Jameson, J.S. & Ramsay, P.M. (2007). Changes in high-altitude *Polylepis* forest cover and quality in the Cordillera de Vilcanota, Perú, 1956-2005. *Biological Conservation*, 138(1-2): 38-46.

Jiménez de la Espada, M. (1885). *Relaciones geográficas de Indias. Perú. Tomo II*. Madrid: Tip. de Manuel G. Hernández, 1881-1897.

Johannessen, S. & Hastorf, C. (1990). A History of Fuel Management (A.D. 500 to the Present) in the Mantaro Valley, Peru. *Journal of Ethnobiology*, 10(1): 61-90.

Jones, C.D.; Hughes, J.K.; Bellouin, N.; Hardiman, S.C.; Jones, G.S.; Knight, J.; Liddicoat, S.; O'Connor, F.M.; Andes, R.J.; Bell, C.; Boo, K.O.; Bozzo, A.; Butchart, N.; Cadule, P.; Corbin, K.D.; Doutriaux-Boucher, M.; Friedlingstein, P.; Gornall, J.; Gray, L.; Halloran, P.R.; Hurtt, G.; Ingram, W.J.; Lamarque, J.F.; Law, R.M.; Meinshausen, M.; Osprey, S.; Palin, E.J.; Parsons Chini, L.; Raddatz, T.; Sanderson, M.G.; Sellar, A.A.; Schurer, A.; Valdes, P.; Wood, N.; Woodward, S.; Yoshioka, M. & Zerroukat, M. (2011). The HadGEM2-ES implementation of CMIP5 centennial simulations. *Geoscientific Model Development*, 4: 543-570.

Kaeslin, E.; Redmond, I. & Dudley, N. (Ed.) (2013). *La fauna silvestre en un clima cambiante*. Roma: FAO.

Kessler, M. (1995) Present and Potencial Distribution of *Polylepis* (Rosaceae) Forests in Bolivia. En Churchill, S.P.; Balsley, H.; Forero, E. & Luteun, J.L. (Ed.) (1995). *Biodiversity and Conservation of Neotropical Montane Forests* (pp. 281-294). New York: New York Botanical Garden.

Kessler, M. (2002). The *Polylepis* Problem: Where do we stand?. *Ecotropica*, 8: 97-110.

Kessler, M. (2006). Bosques de *Polylepis*. *Botánica Económica de los Andes Centrales*, 110-120.

Kessler, M. & Schmidt-Lebuhn, A. (2006). Taxonomical and distributional notes on *Polylepis* (Rosaceae) [Electronic Supplement]. *Organisms Diversity & Evolution*, 6(1): 1-10.

Kessler, M. & Schmidt-Lebuhn, A (2006b). Taxonomical and distributional notes on *Polylepis* (Rosaceae). *Organisms Diversity & Evolution*, 6(1): 67-69.

Kessler, M.; Toivonen, J.; Sylvester, S.; Kluge, J. & Hertel, D. (2014). Elevational patterns of *Polylepis* tree height (Rosaceae) in the high Andes of Peru: role of human impact and climatic conditions. *Frontiers in Plant Science*, 5(194): 1-12.

Kuentz, A.; Ledru, M.P. & Thouret, J.C. (2011). Environmental changes in the highlands of the western Andean Cordillera, southern Peru, during the Holocene. *The Holocene*, 22(11): 1215-1226.

Lao, R., Zevallos, P., & De la Cruz, H. (1990). Información preliminar de la ecología, dendrología y distribución geográfica de las especies del genero *Polylepis* en el Perú. *Espacio y Desarrollo*, 2: 47-62.

Leuschner, C. (1997). Heinz Ellenberg (1913-1997). *Phytocoenologia*, 27(4): 457-462.

Llerena, C.; Yalle, S. & Silvestre, E. (Consultores) (2014). *Los bosques y el cambio climático en el Perú: situación y perspectivas*. Documento base de la consultoría para la

aplicación en el Perú de las “Directrices sobre cambio climático para gestores del manejo forestal” (FAO 2013). Lima: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

Lomolino, M. (2001). Elevation gradients of species-density: historical and prospective views. *Global Ecology & Biogeography*, 10: 3-13.

Luzar, J. (2007). The Political Ecology of a “Forest Transition”: Eucalyptus forestry in the Southern Peruvian Andes. *Ethnobotany Research & Applications*, 5: 85-93.

Macbride J. (1938). Flora of Perú. Parte II. *Field Museum Natural History. Botanical Series*, 8(3): 1090-1095.

Mateo, R., Felicísimo, A. & Muñoz, J. (2011). Modelos de distribución de especies: Una revisión sintética. *Revista Chilena de Historia Natural*, 84: 217-240.

Marino, J.; Bennett, M.; Cossios, D.; Iriarte, A.; Lucherini, M.; Pliscoff, P.; Sillero-Zubiri, C.; Villalba, L. & Walker, S. (2011). Bioclimatic constraints to Andean cat distribution: A modelling application for rare species. *Diversity and Distributions*, 17: 311-322.

Mejía Coronel, D. (2013). *Distribución Potencial del Género Polylepis dentro de la Cuenca del Río Paute en un Escenario de Cambio Climático* (Tesis de Posgrado de Magister). Universidad del Azuay, Cuenca, Ecuador.

Mendoza, W. (2005). Especie nueva de *Polylepis* (Rosaceae) de la cordillera Vilcabamba (Cusco, Perú). *Revista Peruana de Biología*, 12(1): 103-106.

Mendoza, W. & Cano, A. (2011). Diversidad del género *Polylepis* (Rosaceae, Sanguisorbeae) en los Andes peruanos. *Revista Peruana de Biología*, 18(2): 197-200.

Mendoza, W. & Cano, A. (2012). *El Género Polylepis en el Perú. Taxonomía, Morfología y Distribución*. Alemania: Editorial Académica Española.

Merow, C.; Smith, M. & Silander, J. (2013). A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: what it does, and why inputs and settings matter. *Ecography*, 36: 1058-1069, doi: 10.1111/j.1600-0587.2013.07872.x.

Michel, M. & Knouft, J. (2012). Niche Variability and Its Consequences for Species Distribution Modeling. *PLoS ONE*, 7(9), doi:10.1371/journal.pone.0044932.

Ministerio del Ambiente (MINAM) (2014). *Perú, reino de bosques*. Lima: MINAM.

Ministerio del Ambiente (MINAM) (2015). *Mapa nacional de cobertura vegetal: memoria descriptiva*. Lima: MINAM.

Ministerio del Ambiente (MINAM) (2015a). *Estrategia Nacional ante el Cambio Climático*. Lima: MINAM.

Ministerio del Ambiente (MINAM) (2016). *Historia Ambiental del Perú. Siglos XVIII y XIX*. Lima: MINAM.

Ministerio del Ambiente (MINAM) (2016a). *Estrategia Nacional sobre Bosques y Cambio Climático*. Lima: Programa Nacional de Conservación de Bosques para la Mitigación del Cambio Climático, Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (SERFOR), Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI).

Morales, N. (2012). Modelos de distribución de especies: Software Maxent y sus aplicaciones en Conservación. *Revista Conservación Ambiental*, 2(1): 1-5.

Moss, R.; Babiker, M.; Brinkman, S.; Calvo, E.; Carter, T.; Edmonds, J.; Elgizouli, I.; Emori, S.; Erda, L.; Hibbard, K.; Jones, R.; Kainuma, M.; Kelleher, J.; Lamarque, J.F.; Manning, M.; Matthews, B.; Meehl, J.; Meyer, L.; Mitchell, J.; Nakicenovic, N.; O'Neill, B.; Pichs, R.; Riahi, K.; Rose, S.; Runci, P.; Stouffer, R.; van Vuuren, D.; Weyant, J.; Wilbanks, T.; Van Ypersele, J.P. & Zurek, M. (2008). *Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies*. Technical Summary. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change.

Mueller-Dombois, D. (1997). IAVS News. *Journal of Vegetation Science*, 8: 891-894.

Naoki, K.; Gómez, M.I.; López, R.P.; Meneses, R.I. & Vargas, J. (2006). Comparación de modelos de distribución de especies para predecir la distribución potencial de vida silvestre en Bolivia. *Ecología en Bolivia*, 41(1): 65-78.

Neu, U. (2012). Climate change in mountains. En: Kohler T. y Maselli D. (Ed.). *Mountains and Climate Change, from Understanding to Action* (pp. 5-10). Bern: Geographica Bernensia.

Nogués-Bravo, D. (2003). El Estudio de la Distribución Espacial de la Biodiversidad: Conceptos y Métodos. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 29: 67-82.

Nogués-Bravo, D. (2009). Predicting the past distribution of species climatic niches. *Global Ecology and Biogeography*, 18: 521-531.

Pacheco, S.; Malizia, L. & Cayuela, L. (2010). Effects of climate change on subtropical forests of South America. *Tropical Conservation Science*, 3(4): 423-437.

Pariante, E., García, L., Moreano, V. & Ríos, L. (2016). Refugios de flora y su situación actual en los Andes del Perú. *Arnaldoa*, 23(2): 547-568.

Pauli, H.; Gottfried, M.; Lamprecht, A.; Niessner, S.; Rumpf, S.; Winkler, M.; Steinbauer, K. and Grabherr, G., coordinating authors and editors (2015). *The GLORIA field manual—standard Multi-Summit approach, supplementary methods and extra approaches. 5th edition*. Vienna: GLORIA-Coordination, Austrian Academy of Sciences & University of Natural Resources and Life Sciences.

Phillips, S.J. & AT&T Research (s/f.). *A Brief Tutorial on Maxent*. Recuperado de <https://www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent/tutorial/tutorial.doc>

Phillips, S.J., Anderson, R.P. & Schapire, R.E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190: 231–259.

Phillips, S.J. & Dudík, M. (2008). Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, 31: 161-175.

Peñaherrera del Águila, C., Iberico Miranda, M., Ferreyra, R., Brack Egg, A., Dourojeanni, M.J., Zender, J., Vegas Vélez, M., Malleux, J., Samamé Boggio, M., Fernández Baca, M. & Mejía Baca, J. (1986). *Gran geografía del Perú: naturaleza y hombre*. Volumen 1. Barcelona: Monfer: J. Mejía Baca.

Peñaherrera del Águila, C., Iberico Miranda, M., Ferreyra, R., Brack Egg, A., Dourojeanni, M. J., Zender, J., Vegas Vélez, M., Malleux, J., Samamé Boggio, M., Fernández Baca, M. & Mejía Baca, J. (1986a). *Gran geografía del Perú: naturaleza y hombre*. Volumen 4. Barcelona: Monfer: J. Mejía Baca.

Pliscoff, P. & Fuentes-Castillo, T. (2011). Modelación de la distribución de especies y ecosistemas en el tiempo y en el espacio: una revisión de las nuevas herramientas y enfoques disponibles. *Revista de Geografía Norte Grande*, 48: 61-79.

Pretell, J., Ocaña, D., Jon R. & Barahona, E. (1985) *Apuntes sobre algunas especies forestales nativas de la sierra peruana*. Lima: Proyecto FAO/Holanda/INFOR.

Pulgar Vidal, J. (1987). *Geografía del Perú: las ocho regiones naturales: la regionalización transversal: la microregionalización*. Lima: PEISA.

Purcell, J., Brelsford, A. & Kessler, M. (2004). The World's Highest Forest. *American Scientist*, 92(5): 454-461.

Quinteros, N. (2010). *Genetic Structure of Fragmented Polylepis Multijuga Plige (Rosaceae) Forests* (Tesis de maestría). Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.

Ramirez-Villegas, J., Cuesta, F., Devenish, C., Peralvo, M., Jarvis, A. y Arnillas, C. (2014) Using species distributions models for designing conservation strategies of Tropical Andean biodiversity under climate change. *Journal for Nature Conservation*, 22(5): 391-404, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnc.2014.03.007>.

Randall, D.; Wood, R.; Bony, S.; Colman, R.; Fichet, T.; Fyfe, J.; Kattsov, V.; Pitman, A.; Shukla, J.; Srinivasan, J.; Stouffer, R.; Sumi, A. & Taylor, K. (2007). Climate Models and Their Evaluation. En Solomon, S.; Qin, D.; Manning, M.; Chen, Z.; Marquis, M.; Averyt,

K.; Tignor, M. & Miller, H. (Ed.). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 590-662). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Renison, D.; Cuyckens, G.; Pacheco, S.; Guzmán, G.; Grau, H.; Marcora, P.; Robledo, G.; Cingolani, A.; Dominguez, J.; Landi, M.; Bellis, L. & Hensen, I. (2013). Distribución y estado de conservación de las poblaciones de árboles y arbustos del género *Polylepis* (Rosaceae) en las montañas de Argentina. *Ecología Austral*, 23: 27-36.

Reynel, C. & Felipe-Morales, C. (1987). *Agroforestería tradicional en los Andes del Perú*. s/l.: Proyecto FAO/Holanda/INFOR.

Reynel, C. & Marcelo, J. (2009). Árboles de los Ecosistemas Forestales Andinos. Manual de identificación de especies. *Serie Investigación y Sistematización #9*. Lima: Programa Regional ECOBONA – INTERCOOPERATION.

Rham, Philippe; van Dam, Chris (2005). *Bosque nativo en el mundo campesino*. s/l.: COSUDE, DELEGACIÓN INTERCOOPERATION ANDES.

Sabogal, A. (2014). *Ecosistemas del Páramo Andino*. Lima: Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (CONCYTEC).

Sabogal, A. (2015). Instrumentos de gestión ambiental y los bosques en el Perú. Bernex, N. & Castro, A. (Ed.) (2015). *Río+20. Desafíos y Perspectivas*. Lima: Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú.

Schittek, K.; Forbriger, M.; Mächtle, B.; Schäbitz, F.; Wennrich, V.; Reindel, M. & Eitel, B. (2015). Holocene environmental changes in the highlands of the southern Peruvian Andes (14°S) and their impact on pre-Columbian cultures. *Climate of the Past*, 11: 27-44.

Scheldeman, X. & van Zonneveld, M. (2011). *Manual de Capacitación en Análisis Espacial de Diversidad y Distribución de Plantas*. Roma, Italia: Bioversity International.

Servat, G. P., Mendoza, W. y Ochoa, J. A. (2002) Flora y fauna de cuatro bosques de *Polylepis* (Rosaceae) en la cordillera del Vilcanota (Cusco, Perú). *Ecología Aplicada*, 1 (1), 25-35.

Shcheglovitova, M. & Anderson, R. (2013). Estimating optimal complexity for ecological niche models: A jackknife approach for species with small sample sizes. *Ecological Modelling*, 269: 9-17.

Simpson, B. (1975). Pleistocene Changes in the Flora of the High Tropical Andes. *Paleobiology*, 1(3): 273-294.

Simpson, B. (1979). *A Revision of the Genus Polylepis (Rosaceae: Sanguisorbeae)*. Washington: Smithsonian Institution Press.

Simpson, B. (1983). An Historical Phytogeography of the High Andean Flora. *Revista Chilena de Historia Natural*, 56: 109-122.

Soukup, J. (1970). *Vocabulario de los nombres vulgares de la flora peruana*. Lima: Colegio Salesiano.

Suárez, C.; Naranjo, L.; Espinosa, J. & Sabogal, J. (2012). Cambios en el Uso del Suelo y sus Sinergias con el Cambio Climático. En Herzog, S.K., Martinez, R., Jørgesen, P.M. & Tiessen, H. (Ed.), *Cambio Climático y Biodiversidad en los Andes Tropicales*. Paris: Instituto Interamericano para la Investigación del Cambio Global (IAI), Sao José dos Campos, y Comité Científico sobre Problemas del Medio Ambiente (SCOPE).

Tejedor Garavito, N., Álvarez, E., Arango Caro, S., Araujo Murakami, A., Blundo, C., Boza Espinoza, T.E., La Torre Cuadros, M.A., Gaviria, J., Gutierrez, N., Jørgesen, P.M., León, B., López Camacho, R., Malizia, L., Millán, B., Moraes, M., Pacheco, S., Rey Benayas, J.M., Reynel, C., Timaná de la Flor, M., Ulloa Ulloa, C., Vacas Cruz, O. & Newton, A.C. (2012). Evaluación del estado de conservación de los bosques montanos en los Andes tropicales. *Ecosistemas*, 21(1-2): 148-166.

Tejedor Garavito, N., Newton, A., Golicher, D. & Oldfield, S. (2015). The Relative Impact of Climate Change on the Extinction Risk of Tree Species in the Montane Tropical Andes. *PLoS ONE*, 10(7): e0131388. doi:10.1371/journal.pone.0131388.

Timaná, M. & Cuentas, M.A. (2015). Biogeografía predictiva: técnicas de modelamiento de distribución de especies y su aplicación en el impacto del cambio climático. *Espacio y Desarrollo*, 27: 159-179.

Timaná, M. & Cuentas, M.A. (2016). Modelamiento de distribución de especies con MaxEnt: Una guía práctica. Material del curso Biogeografía y Manejo Ambiental. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.

Tobón, C. (2009). Los bosques andinos y el agua. *Serie Investigación y sistematización #4*. Quito: Programa Regional ECOBONA – INTERCOOPERATION.

Toivonen, J.; Kessler, M.; Ruokolainen, K. & Hertel, D. (2011). Accessibility predicts structural variation of Andean *Polylepis* forests. *Biodiversity and Conservation*, 20(8): 1789-1802.

Toivonen, J. (2014a). *Determinants of Polylepis (Rosaceae) Forest Distribution and Treeline Formation in the High Andes* (Tesis doctoral). University of Turku, Turku, Finlandia.

Toivonen, J.; Horna, V.; Kessler, M.; Ruokolainen, K. & Hertel, D. (2014b). Interspecific variation in functional traits in relation to species climatic niche optima in Andean *Polylepis* (Rosaceae) tree species: evidence for climatic adaptations. *Functional Plant Biology*, 41: 301-312.

Torres, J. & Gómez, A. (Ed.) (2008). *Adaptación al cambio climático: de los fríos y los calores en los Andes*. Lima: Soluciones Prácticas-ITDG.

Torres, R. & Jayast, J. P. (2010). Modelos Predictivos de Distribución para cuatro especies de mamíferos (Cingulata, Artiodactyla y Rodentia) típicas del Chaco en Argentina. *Mastozoología Neotropical*, 17(2): 335-352.

Tovar, C.; Arnillas, C.; Cuesta, F. & Buytaert, W. (2013). Diverging Responses of Tropical Andean Biomes under Future Climate Conditions. *PLoS ONE*, 8(5), doi:10.1371/journal.pone.0063634.

Urrutia, R. & Vuille, M. (2009). Climate change projections for the tropical Andes using a regional climate model: Temperature and precipitation simulations for the end of the 21st century. *Journal of Geophysical Research*, 114(D2), doi:10.1029/2008JD011021.

Valencia, B.; Urrego, D.; Silman, M. & Bush, M. (2010). From ice age to modern: a record of landscape change in an Andean cloud forest. *Journal of Biogeography*, 37: 1637-1647.

Valenzuela, L. & Villalba, I. (2015) A new species of *Polylepis* (Rosaceae) from Peru. *Arnaldoa*, 22 (2): 329-338.

Vargas, J.H., Consiglio, T., Jørgensen, P.M. y Croat, T.B. (2004). Modelling distribution patterns in a species-rich plant genus, *Anthurium* (Araceae), in Ecuador. *Diversity and Distribution*, 10, 211-216.

Varela, S., Lobo J. M., & Hortal, J. (2011). Using species distribution in paleobiogeography: A matter of data, predictors and concepts. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 310: 451 – 463.

Velez-Liendo, X.; Strubbe, D. & Matthysen, E. (2013). Effects of variable selection on modelling habitat and potential distribution of the Andean bear in Bolivia. *Ursus*, 24(2): 127-138.

Vuille, M.; Francou, B.; Wagnon, P.; Juen, I.; Kaser, G.; Mark, B. & Bradley, R.S. (2008). Climate change and tropical Andean glaciers: past, present, future. *Earth-Science Reviews*, 89: 79-96.

Walschburger, A. (1988). *Los Andes*. Madrid: Anaya, Sociedad Estatal para la Ejecución de Programas del Quinto Centenario.

Wanner, H.; Beer, J.; Bütikofer, J.; Crowley, T.; Cubasch, U.; Flückiger, J.; Goosse, H.; Grosjean, M.; Joos, F.; Kaplan, J.; Küttel, M.; Müller, S.; Prentice, C.; Solomina, O.;

Stocker, T.; Tarasov, P.; Wagner, M. & Widmann, M. (2008). Mid- to Late Holocene climate change: an overview. *Quaternary Science Reviews*, 27: 1791-1828.

Wasson, R. & Claussen, M. (2002). Earth system models: a test using the mid-Holocene in the Southern Hemisphere. *Quaternary Science Reviews*, 21: 819-824.

Weberbauer, A. (1945) *El mundo vegetal de los Andes peruanos: estudios fitogeográficos*. Ministerio de Agricultura: Lima.

Williams, J.; Gosling, W.; Brooks, S.; Coe, A. & Xu, S. (2011). Vegetation, climate and fire in the eastern Andes (Bolivia) during the last 18,000 years. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 312: 115-126.

Wu Tongwen, Song Lianchun, Li Weiping, et al. (2014): An overview of BCC climate system model development and application for climate change studies. *Journal of Meteorological Research*, 28(1): 34-56, doi: 10.1007/s13351-014-3041-7.

Yacovleff, E., & Herrera, F. L. (1935). *El mundo vegetal de los antiguos peruanos*. Lima: Impr. del Museo Nacional.

Yallico, E. (1992). *Distribución de Polylepis en el sur de Puno*. Puno: Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación – COSUDE.

Young, K. (2009). Andean land use and biodiversity: humanized landscapes in a time of change. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 96(3): 492-507.

Young, K. (2012). Introducción a la Geografía Andina. En Herzog, S.K., Martínez, R., Jørgesen, P.M. & Tiessen, H. (Ed.), *Cambio Climático y Biodiversidad en los Andes Tropicales*. Paris: Instituto Interamericano para la Investigación del Cambio Global (IAI), Sao José dos Campos, y Comité Científico sobre Problemas del Medio Ambiente (SCOPE).

Young, K. & Lipton, J. (2012). Adaptive Governance and Climate Change in the Tropical Highlands of Western South America. *Climatic Change*, 78: 63-102.

Zárate, M. (2007). Estado actual de bosque de *Polylepis subtusalbida* en el Parque Nacional Tunari de Cochabamba, Bolivia. *Revista Boliviana de Ecología y Conservación Ambiental*, 21: 19-26.

Zunino, M. & Zullini, A. (2003). *Biogeografía: la dimensión espacial de la evolución*. México D.F.: Fondo de Cultura Económica.

Zutta, B.R., Rundel, P.W., Saatchi, S., Casana, J.D., Gauthier, P., Soto, A., Velazco, Y. & Buermann W. (2012). Prediciendo la distribución de *Polylepis*: bosques Andinos vulnerables y cada vez más importantes. *Revista Peruana de Biología*, 19(2): 205-212.





ANEXOS

Anexo 1: Valores del parámetro AUC

Especie	Escenarios de predicción							
	Distribución potencial presente	Distribución potencial pasada – CCSM4	Distribución potencial futura					
			RCP 2.6			RCP 8.5		
			BCC-CSM1	CCSM4	HadGEM-ES	BCC-CSM1	CCSM4	HadGEM-ES
<i>P. weberbaueri</i>	0.995	0.996	0.995	0.995	0.995	0.995	0.995	0.995
<i>P. sericea</i>	0.997	0.997	0.997	0.997	0.997	0.997	0.997	0.997
<i>P. incana</i>	0.995	0.996	0.995	0.995	0.995	0.995	0.995	0.995
<i>P. racemosa</i>	0.996	0.997	0.996	0.996	0.996	0.996	0.996	0.996
<i>Polylepis</i>	0.983	0.983	0.983	0.983	0.983	0.983	0.983	0.983

Anexo 2: Umbral de presencia del percentil 10

Especie	Escenarios de predicción							
	Distribución potencial presente	Distribución potencial pasada – CCSM4	Distribución potencial futura					
			RCP 2.6			RCP 8.5		
			BCC-CSM1	CCSM4	HadGEM-ES	BCC-CSM1	CCSM4	HadGEM-ES
<i>P. weberbaueri</i>	0.279	0.297	0.279	0.279	0.279	0.279	0.279	0.279
<i>P. sericea</i>	0.206	0.158	0.206	0.206	0.206	0.206	0.206	0.206
<i>P. incana</i>	0.351	0.389	0.351	0.351	0.351	0.351	0.351	0.351
<i>P. racemosa</i>	0.313	0.352	0.313	0.313	0.313	0.313	0.313	0.313
<i>Polylepis</i>	0.385	0.419	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385	0.385

Anexo 3: Valor máximo de alcance de los datos

Especie	Escenarios de predicción							
	Distribución potencial presente	Distribución potencial pasada – CCSM4	Distribución potencial futura					
			RCP 2.6			RCP 8.5		
			BCC-CSM1	CCSM4	HadGEM-ES	BCC-CSM1	CCSM4	HadGEM-ES
<i>P. weberbaueri</i>	0.754	0.710	0.697	0.786	0.713	0.677	0.793	0.690
<i>P. sericea</i>	0.729	0.715	0.583	0.738	0.733	0.571	0.684	0.680
<i>P. incana</i>	0.932	0.785	0.971	0.942	0.971	0.983	0.968	0.964
<i>P. racemosa</i>	0.811	0.802	0.771	0.758	0.751	0.711	0.695	0.636
<i>Polylepis</i>	0.680	0.653	0.686	0.685	0.674	0.673	0.683	0.692

Anexo 4: Puntos de colecta georreferenciados

Especies de <i>Polylepis</i>	Coordenadas		Fuente ¹⁶
	Latitud	Longitud	
<i>Polylepis weberbaueri</i>	-9.863670	-76.999528	AAU
	-8.616000	-77.750000	AAU
	-10.572469	-76.766563	AAU
	-9.113638	-77.533141	AAU
	-9.100000	-77.533000	AAU
	-9.101107	-77.532490	AAU
	-9.483000	-77.250000	AAU
	-9.516000	-77.400000	AAU
	-9.513953	-77.400084	AAU
	-8.988851	-77.651248	AAU
	-9.513731	-77.399435	AAU
	-9.380290	-77.466877	AAU
	-9.383000	-77.433000	AAU
	-8.763889	-77.594444	Arce, 1992
	-8.758333	-77.593056	Arce, 1992
	-8.761111	-77.455556	Arce, 1992
	-8.750000	-77.455556	Arce, 1992
	-9.156944	-77.550000	Arce, 1992
	-10.560800	-76.743918	Arce, 1992
	-10.672222	-76.740278	Arce, 1992
	-8.911111	-77.631944	Arce, 1992
	-10.458333	-76.983333	Arce, 1992
	-10.448611	-76.975000	Arce, 1992
	-10.065658	-77.095861	Arce, 1992
	-10.065664	-77.107364	Arce, 1992
	-9.705556	-77.305556	Arce, 1992
	-9.677778	-77.230556	Arce, 1992
	-8.986111	-77.673611	Arce, 1992
	-9.444444	-77.458333	Arce, 1992
	-9.594248	-77.115005	ECOAN, 2005
	-9.619575	-77.123870	ECOAN, 2005
	-9.631275	-77.120345	ECOAN, 2005
	-9.656482	-77.136744	ECOAN, 2005
	-9.658832	-77.125218	ECOAN, 2005
	-9.681204	-77.103076	ECOAN, 2005
	-9.678346	-77.052452	ECOAN, 2005
	-9.590439	-77.084299	ECOAN, 2005

¹⁶ Código de herbarios de acuerdo a Thiers, B. [actualizado continuamente]. *Index Herbariorum: A global directory of public herbaria and associated staff*. New York Botanical Garden's Virtual Herbarium. <http://sweetgum.nybg.org/ih/>

Anexo 4: Continuación

Especies de <i>Polylepis</i>	Coordenadas		Fuente ¹⁶
	Latitud	Longitud	
	-9.940654	-77.080271	ECOAN, 2005
	-9.996738	-77.055494	ECOAN, 2005
	-10.014782	-77.049863	ECOAN, 2005
	-10.036741	-77.039103	ECOAN, 2005
	-9.883333	-76.983333	Fjeldsa & Kessler, 1996
	-9.683333	-77.233333	Fjeldsa & Kessler, 1996
	-8.533333	-77.666667	Fjeldsa & Kessler, 1996
	-10.600000	-76.766667	Fjeldsa & Kessler, 1996
	-13.266667	-72.116667	Fjeldsa & Kessler, 1996
	-13.681149	-72.848781	Fjeldsa & Kessler, 1996
	-13.700000	-72.666667	Fjeldsa & Kessler, 1996
	-9.516667	-77.416667	Fjeldsa & Kessler, 1996
	-8.996349	-77.681367	Fjeldsa & Kessler, 1996
	-5.333333	-79.533333	Fjeldsa & Kessler, 1996
	-6.466667	-78.933333	Fjeldsa & Kessler, 1996
	-13.266667	-72.016667	Fjeldsa & Kessler, 1996
	-9.071159	-77.636133	GBIF
	-6.528908	-79.089221	MO
	-7.576512	-77.976055	MO
	-6.533800	-79.108800	MO
	-9.375975	-77.436970	MO
	-9.378145	-77.443486	MO
	-9.133675	-77.530395	MO
	-9.300000	-77.400000	MO
	-9.369528	-77.421921	MO
	-9.383330	-77.450000	MO
	-9.493036	-77.404871	MO
	-9.434199	-77.445273	MO
	-9.466956	-77.466292	MO
	-9.686188	-77.248383	MO
	-9.383330	-77.283330	MO
	-8.989100	-77.649941	MO
	-9.016660	-77.716660	MO
	-8.939203	-77.657316	MO
	-8.883330	-77.766660	MO
	-8.918255	-77.598423	MO
	-9.016660	-77.616660	MO
	-8.983330	-77.566660	MO
	-9.083330	-77.683330	MO
	-10.560991	-76.741978	MO
	-10.452199	-77.002225	MO
	-5.302222	-79.498333	MO

Anexo 4: Continuación

Especies de <i>Polylepis</i>	Coordenadas		Fuente ¹⁶
	Latitud	Longitud	
	-9.061027	-77.633212	MO
	-9.050000	-77.600000	MOL
<i>Polylepis sericea</i>	-14.216000	-69.700000	AAU
	-14.215892	-69.700853	AAU
	-9.383000	-77.466000	AAU
	-9.113823	-77.533436	AAU
	-9.100774	-77.533139	AAU
	-9.101068	-77.532771	AAU
	-9.350000	-77.300000	AAU
	-9.350169	-77.299648	AAU
	-9.421794	-77.284368	AAU
	-9.421597	-77.284820	AAU
	-9.483170	-77.249895	AAU
	-8.999203	-77.683222	AAU
	-9.380286	-77.466487	AAU
	-9.377755	-77.460211	AAU
	-8.999297	-77.683270	AAU
	-9.027778	-77.541667	Arce, 1992
	-9.030556	-77.541667	Arce, 1992
	-9.048611	-77.601389	Arce, 1992
	-9.070833	-77.650000	Arce, 1992
	-9.097222	-77.679167	Arce, 1992
	-9.105556	-77.679167	Arce, 1992
	-11.560800	-76.478000	Arce, 1992
	-9.165278	-77.604167	Arce, 1992
	-8.613889	-77.816667	Arce, 1992
	-8.620833	-77.830556	Arce, 1992
	-8.636111	-77.837500	Arce, 1992
	-9.330556	-77.511111	Arce, 1992
	-9.002778	-77.694444	Arce, 1992
	-9.619575	-77.123870	AT
	-9.027500	-77.545600	ECOAN, 2005
	-11.658333	-73.667222	F
	-9.883333	-77.283333	Fjeldsa & Kessler, 1996
	-9.379690	-77.476050	Fjeldsa & Kessler, 1996
-9.065710	-77.639638	GBIF	
-8.991219	-77.675284	MO	
-9.025426	-77.717738	MO	
-8.892205	-77.774605	MO	
-9.025844	-77.722596	MO	
-9.000000	-77.683330	MO	
-9.006979	-77.694632	MO	

Anexo 4: Continuación

Especies de <i>Polylepis</i>	Coordenadas		Fuente ¹⁶
	Latitud	Longitud	
	-8.916660	-77.600000	MO
	-9.366660	-77.283330	MO
	-9.466660	-77.250000	MO
	-9.450505	-77.449981	MO
	-9.492457	-77.404365	MO
	-9.320179	-77.523003	MO
	-9.116660	-77.533330	MO
	-9.300000	-77.416660	MO
	-9.383330	-77.483330	MO
	-9.081415	-77.650817	MO
	-9.047608	-77.586005	MO
	-9.078618	-77.647430	MO
	-9.000000	-77.550000	MO
	-9.035158	-77.615996	MO
	-9.080330	-77.651437	MO
	-9.080296	-77.653017	MO
	-9.029006	-77.546361	MO
	-13.179720	-72.352770	MO
	-13.161072	-72.536426	MO
<i>Polylepis incana</i>	-14.450000	-73.233000	AAU
	-10.635823	-76.170359	AAU
	-10.635290	-76.170368	AAU
	-9.783000	-76.583000	AAU
	-9.864030	-76.999600	AAU
	-10.572109	-76.766864	AAU
	-14.683000	-74.500000	AAU
	-14.466000	-73.233000	AAU
	-14.451919	-73.230934	AAU
	-15.238348	-73.691582	AAU
	-10.577778	-76.765278	Arce, 1992
	-12.469444	-75.762500	Arce, 1992
	-12.413889	-75.809722	Arce, 1992
	-9.724515	-77.333603	Arce, 1992
	-9.738889	-77.354167	Arce, 1992
	-13.501432	-71.980570	B
	-12.400637	-75.825748	B
	-9.510924	-77.398795	F
	-10.633333	-76.166667	Fjeldsa & Kessler, 1996
	-9.866667	-76.500000	Fjeldsa & Kessler, 1996
	-9.883333	-76.983333	Fjeldsa & Kessler, 1996
	-9.700000	-77.316667	Fjeldsa & Kessler, 1996
	-9.716667	-77.333333	Fjeldsa & Kessler, 1996

Anexo 4: Continuación

Especies de <i>Polylepis</i>	Coordenadas		Fuente ¹⁶
	Latitud	Longitud	
	-10.600000	-76.766667	Fjeldsa & Kessler, 1996
	-14.683333	-74.516667	Fjeldsa & Kessler, 1996
	-14.650000	-74.316667	Fjeldsa & Kessler, 1996
	-14.650000	-74.000000	Fjeldsa & Kessler, 1996
	-14.450000	-73.233333	Fjeldsa & Kessler, 1996
	-13.683333	-72.800000	Fjeldsa & Kessler, 1996
	-13.703264	-72.704413	Fjeldsa & Kessler, 1996
	-13.750000	-72.700000	Fjeldsa & Kessler, 1996
	-9.516667	-77.483333	Fjeldsa & Kessler, 1996
	-10.583333	-76.716667	Fjeldsa & Kessler, 1996
	-10.466667	-76.416667	Fjeldsa & Kessler, 1996
	-13.666667	-74.666667	Fjeldsa & Kessler, 1996
	-13.783333	-74.816667	Fjeldsa & Kessler, 1996
	-15.250000	-73.500000	Fjeldsa & Kessler, 1996
	-14.833333	-73.250000	Fjeldsa & Kessler, 1996
	-14.950000	-73.266667	Fjeldsa & Kessler, 1996
	-10.589029	-76.768797	GBIF
	-13.429231	-71.830909	GBIF
	-13.333330	-74.450000	MO
	-8.916660	-77.666660	MO
	-9.493285	-77.403917	MO
	-7.002900	-77.791267	MO
	-13.399046	-72.045005	MO
	-12.364184	-76.201755	MOL
	-12.983674	-74.919463	MOL
	-10.484119	-76.760374	Simpson, 1979
<i>Polylepis racemosa</i>	-11.066000	-76.133000	AAU
	-9.724326	-77.333155	AAU
	-7.033000	-78.266000	AAU
	-9.583000	-77.166000	AAU
	-7.183000	-78.583000	AAU
	-11.698611	-76.259722	Arce, 1992
	-11.726389	-76.262500	Arce, 1992
	-10.616667	-76.166667	Fjeldsa & Kessler, 1996
	-11.066667	-76.216667	Fjeldsa & Kessler, 1996
	-11.433333	-75.816667	Fjeldsa & Kessler, 1996
	-9.716667	-77.333333	Fjeldsa & Kessler, 1996
	-9.516667	-77.483333	Fjeldsa & Kessler, 1996
	-11.983333	-76.350000	Fjeldsa & Kessler, 1996
	-11.800000	-75.550000	Fjeldsa & Kessler, 1996
	-12.129167	-75.280556	Fjeldsa & Kessler, 1996
	-6.988000	-78.367330	GBIF

Anexo 4: Continuación

Especies de <i>Polylepis</i>	Coordenadas		Fuente ¹⁶
	Latitud	Longitud	
	-10.327167	-76.725220	GBIF
	-10.311021	-76.664283	GBIF
	-6.970940	-78.716500	GBIF
	-7.009700	-78.623100	GBIF
	-7.961873	-78.335840	GBIF
	-10.565717	-76.757229	MO
	-11.521779	-75.896097	MO
	-13.279144	-72.051733	MO
	-13.282184	-72.049569	MO
	-13.284898	-72.049608	MO
	-13.281750	-72.051732	MO
	-9.383333	-76.866667	MO
	-9.505610	-77.430950	MO
	-9.516660	-77.466660	MO
	-9.550000	-77.566660	MO
	-9.725892	-77.334613	MO
	-6.833330	-78.666660	MO
	-12.963512	-74.104729	MO
	-7.033333	-78.233333	MO
	-11.500000	-75.000000	MOL
	-11.644336	-76.449311	MOL
	-11.496151	-75.001693	MOL
	-13.333000	-72.017000	NY
<i>Polylepis besseri</i>	-16.400000	-71.300000	Fjeldsa & Kessler, 1996
	-14.443303	-70.633874	Fjeldsa & Kessler, 1996
	-14.907746	-73.789135	GBIF
	-16.466600	-71.316600	GBIF
	-16.386330	-71.338500	GBIF
	-16.970000	-70.680000	GBIF
	-15.166670	-70.366670	GBIF
	-10.600000	-76.166670	GBIF
	-13.798500	-70.313170	GBIF
	-16.366600	-70.866600	GBIF
	-13.348480	-74.457880	GBIF
	-13.416670	-72.000000	GBIF
	-13.517220	-71.810830	MO
	-15.304263	-73.515471	MO
	-14.915011	-73.794739	MO
	-17.440428	-69.958191	MO
	-13.262894	-72.089509	MOL
	-17.425461	-70.017899	Simpson, 1979
<i>Polylepis incarum</i>	-15.166000	-70.366000	AAU

Anexo 4: Continuación

Especies de <i>Polylepis</i>	Coordenadas		Fuente ¹⁶
	Latitud	Longitud	
	-15.166708	-70.366091	AAU
	-15.166734	-70.366214	AAU
	-14.043013	-70.135076	ECOAN, 2006
	-15.018185	-69.833020	ECOAN, 2006
	-14.936643	-69.908260	ECOAN, 2006
	-14.895460	-69.743979	ECOAN, 2006
	-15.000000	-69.716667	Fjeldsa & Kessler, 1996
	-15.166667	-70.450000	Fjeldsa & Kessler, 1996
	-15.072851	-70.512318	Fjeldsa & Kessler, 1996
	-15.166667	-70.700000	Fjeldsa & Kessler, 1996
	-15.770470	-69.689220	GBIF
	-16.378860	-71.357340	GBIF
	-13.683610	-71.639440	MO
	-14.472197	-70.595198	MO
<i>Polylepis pauta</i>	-13.083397	-71.499871	AT
	-7.632513	-77.474327	F
	-12.477360	-72.080270	GBIF
	-6.578850	-77.719320	GBIF
	-13.201913	-71.608090	MO
	-13.083330	-71.500000	MO
	-13.176325	-71.595687	MO
	-13.216660	-71.583330	MO
	-13.583699	-70.975577	MO
	-7.635023	-77.476358	MO
	-7.636142	-77.476197	MO
	-7.916667	-77.166667	Simpson, 1979
<i>Polylepis lanata</i>	-13.250000	-72.083000	AAU
	-13.304911	-72.047183	MO
	-13.296976	-72.049117	MO
	-13.278940	-72.048898	MO
	-13.281528	-72.051207	MO
	-13.289482	-72.050058	MO
	-13.281869	-72.051730	MO
	-13.200830	-72.155550	MO
	-13.227819	-72.106586	MO
	-13.279143	-72.051616	MO
	-13.517220	-71.810830	MO
<i>Polylepis multijuga</i>	-6.793261	-77.913055	F
	-6.683333	-77.783333	Fjeldsa & Kessler, 1996
	-6.663102	-78.718532	GBIF
	-6.448381	-79.010423	GBIF
	-6.673697	-78.735664	GBIF

Anexo 4: Continuación

Especies de <i>Polylepis</i>	Coordenadas		Fuente ¹⁶
	Latitud	Longitud	
	-6.233300	-78.733700	GBIF
	-6.489717	-78.407642	GBIF
	-7.000000	-77.750000	MO
	-6.270000	-78.000000	MO
	-6.833000	-77.833000	NY
<i>Polylepis tomentella</i>	-14.666000	-74.483000	AAU
	-14.666391	-74.483499	AAU
	-14.633000	-73.950000	AAU
	-14.664533	-74.481802	AAU
	-14.600000	-74.283000	AAU
	-14.633168	-73.950862	AAU
	-15.298596	-73.514003	MO
	-15.304263	-73.515471	MO
	-14.915011	-73.794739	MO
	-15.405937	-73.966499	MOL
<i>Polylepis subsericans</i>	-13.283100	-72.050600	AT
	-11.616667	-76.450000	Fjeldsa & Kessler, 1996
	-12.950000	-75.733333	Fjeldsa & Kessler, 1996
	-13.266667	-75.316667	Fjeldsa & Kessler, 1996
	-11.650912	-76.445161	Fjeldsa & Kessler, 1996
	-6.971939	-78.338670	GBIF
	-13.285318	-72.051853	MO
	-13.278237	-72.050086	MO
	-13.283973	-72.052612	MO
<i>Polylepis triacontandra</i>	-14.056252	-70.001266	ECOAN, 2006
	-14.043013	-70.135076	ECOAN, 2006
	-14.895460	-69.743979	ECOAN, 2006
	-14.464028	-69.534568	Fjeldsa & Kessler, 1996
	-12.112885	-76.186420	MO
	-13.563421	-71.957371	MO
	-9.675830	-77.331660	MO
	-9.514236	-77.440291	MO
<i>Polylepis reticulata</i>	-10.653100	-76.839200	AT
	-10.550000	-76.766700	AT
	-7.698931	-77.540059	F
	-6.383333	-79.250000	MO
	-9.450000	-77.450000	MO
	-7.694290	-77.542168	MO
	-11.497526	-75.003964	MOL
<i>Polylepis rugulosa</i>	-16.296839	-71.439489	AAU
	-16.385475	-71.295279	AT
	-16.393003	-71.324268	AT

Anexo 4: Continuación

Especies de <i>Polylepis</i>	Coordenadas		Fuente ¹⁶
	Latitud	Longitud	
	-15.733333	-72.766667	Fjeldsa & Kessler, 1996
	-17.333333	-69.833333	Fjeldsa & Kessler, 1996
	-16.391830	-71.304330	GBIF
	-17.018004	-70.746630	MO
<i>Polylepis microphylla</i>	-8.991535	-77.672435	AAU
	-13.416000	-71.850000	AAU
	-9.001722	-77.688970	AT
	-10.366260	-76.958450	GBIF
	-13.683176	-71.639300	MO
<i>Polylepis pepeii</i>	-14.216833	-69.700638	AAU
	-14.216521	-69.701022	AAU
	-9.996738	-77.055494	ECOAN, 2005
	-14.464028	-69.534568	Fjeldsa & Kessler, 1996
<i>Polylepis flavipila</i>	-12.955339	-75.773777	AAU
	-11.616000	-76.433000	AAU
	-11.616266	-76.432592	AAU
<i>Polylepis tarapacana</i>	-17.383917	-69.640817	F
	-17.425349	-69.810123	MO
	-17.426214	-69.827220	MO
<i>Polylepis canoi</i>	-12.500000	-73.500000	F
	-12.500373	-73.501146	F

LISTA DE FUENTES UTILIZADAS	
Abreviación	Nombre y ubicación
AAU	Base de datos del Herbario de la Universidad de Aarhus, Dinamarca.
AT	Atrium, Instituto de Investigación Botánico de Texas.
B	Jardín Botánico de Berlín.
F	Museo Field de Historia Natural de Chicago, Illinois, EE.UU.
GBIF	Plataforma de datos GBIF (Global Biodiversity Information Facility).
MO	Herbario del Jardín Botánico de Missouri (Tropicos), Missouri, EE.UU.
MOL	Herbario Forestal Nacional de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNAM), Perú.
NY	Herbario del Jardín Botánico de New York, EE.UU.