
ARTÍCULOS / ARTICLES

BOSQUES DE *POLYLEPIS TARAPACANA* EN LA CUENCA MAURE, EXTREMO SUR DEL PERÚ. OPORTUNIDADES PARA SU CONSERVACIÓN

Pablo Franco

Herbario Takana (TKA), Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna
pfranco@unjbgu.edu.pe
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-6367-3515>

César Cáceres

Universidad Latinoamericana CIMA, Tacna
cncaceres@hotmail.com
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-5685-3315>

Marco Navarro

Universidad Latinoamericana CIMA, Tacna
Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre – SERFOR, Tacna
manavarrog76@gmail.com
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-0516-5990>

César Jove

Herbario Takana (TKA), Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna
cesarjove@gmail.com
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-0264-7767>

Javier Ignacio

Herbario Takana (TKA), Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna
jmignacionet@gmail.com
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-6089-8957>

Eduardo Oyague

Department of Forest and Rangeland Stewardship, Colorado State University, Fort Collins
eduardo.oyague@colostate.edu
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-3376-021X>

Recibido: 30/09/2019; Aceptado: 17/07/2020; Publicado: 17/06/2021

Cómo citar este artículo/citation: Franco, Pablo; Cáceres, César; Navarro, Marco; Jove, César; Ignacio, Javier y Oyague, Eduardo (2021). Bosques de *Polylepis tarapacana* en la cuenca Maure, extremo sur del Perú. Oportunidades para su conservación. *Estudios Geográficos*, 82 (290), e059. <https://doi.org/10.3989/estgeogr.202071.071>

Resumen: A pesar de la importancia de los bosques de *Polylepis* para la biodiversidad y la provisión de servicios ecosistémicos en el Altiplano del extremo sur del Perú (departamento de Tacna), se cuenta con muy poca información científica actualizada que sustente acciones efectivas de conservación. Mediante técnicas de sensoramiento remoto se ha delimitado la superficie de los bosques de *Polylepis tarapacana* en la cuenca Maure (Altiplano del departamento de Tacna) y evaluado los principales factores ambientales que afectan su desarrollo. Se comparó la superficie obtenida con factores ambientales influyentes para su desarrollo como la altitud, el clima y una serie de índices morfométricos como la orientación y la protección topográfica. A diferencia de otros bosques de *Polylepis*, la orientación dominante de estos parches de *Polylepis tarapacana* es N-NE-E, expuesto a insolación durante las horas previas al mediodía, además se desarrolla en sectores de baja protección del relieve y poca probabilidad de intercepción con acuíferos cercanos (valores negativos para el índice de humedad). El 56,66% del área identificada intercepta al polígono de *Polylepis* del Mapa Nacional de Ecosistemas del Perú del año 2018, el 30,12% se encuentra bajo una modalidad de conservación y el 74,49% se encuentra dentro de terrenos de seis comunidades campesinas. Esta investigación genera un polígono de bosque más preciso que los disponibles en la actualidad, y permite evaluar las alternativas para su protección. La ampliación del Área de Conservación Regional Vilacota – Maure emerge como la mejor opción para asegurar la preservación de este bosque, puesto que asegura la protección de la casi totalidad del área identificada.

Palabras clave: *Polylepis*, sensores remotos, cobertura, conservación, morfometría, áreas naturales protegidas

Polylepis tarapacana forests in Maure basin, southern Peru. Opportunities for its conservation

Abstract: Despite the importance of *Polylepis* forests for biodiversity and the environmental services provision in the southern Peruvian Altiplano (Tacna department), there is no updated scientific information to support effective conservation activities. Through remote sensing techniques the surface of *Polylepis tarapacana* forests in the Maure basin has been mapped and the main environmental factors were evaluated. The forest area obtained was compared with environmental factors such as altitude, climate, orientation and topographic protection. Unlike other *Polylepis* forests, the dominant orientation of *Polylepis tarapacana* patches is N-NE-E, exposed to solar insolation before the noon, and developing in areas with low morphometric protection and negative topographical wetness index (low probabilities to meet with shallow groundwater tables). 56,66% of the area obtained intercepts the *Polylepis* polygon of the 2018 National Map of Ecosystems of Peru, 30,12% is under regional conservation modality and 74,49% is located within the territories of six rural communities. This research generates a more precise forest polygon than those currently available, and allows the evaluation of alternatives for its protection. The expansion of the Regional Conservation Area Vilacota – Maure emerges as the best option to ensure the preservation of this forest, since it ensures the protection of almost all of the identified area.

Key words: *Polylepis*, remote sensing, cover, conservation, morphometry, natural protected areas

INTRODUCCIÓN

La distribución de los bosques de *Polylepis* en los altos Andes sudamericanos presenta un patrón notoriamente desagregado, debido tanto a causas naturales como antropogénicas (Gareca *et al.*, 2013) Etter y Villa (2000) y Servat, Mendoza, y Ochoa (2002) indican que estos bosques representan uno de los ecosistemas andinos más vulnerables, debido al incremento de los impactos generados por las actividades humanas en su ámbito de distribución. Mientras que Gareca *et al.* (2013, 2010), Zutta *et al.* (2012) y Zutta y Rundel (2017) refieren que, además de los impactos generados por la población humana, los bosques de *Polylepis* presentan un desarrollo naturalmente disperso, debido a diversos factores ambientales, entre los que se pueden incluir factores climáticos, geológicos, edafológicos y topográficos. Si a la presión humana y la distribución naturalmente discontinua de estos bosques, que representan el límite superior de la cobertura forestal en Sudamérica, se les suman los efectos potenciales del Cambio Climático, se vislumbra una situación compleja de posibles cambios en extensión y rangos de distribución futura (Cuyckens, Christie, Domic, Malizia, y Renison, 2016).

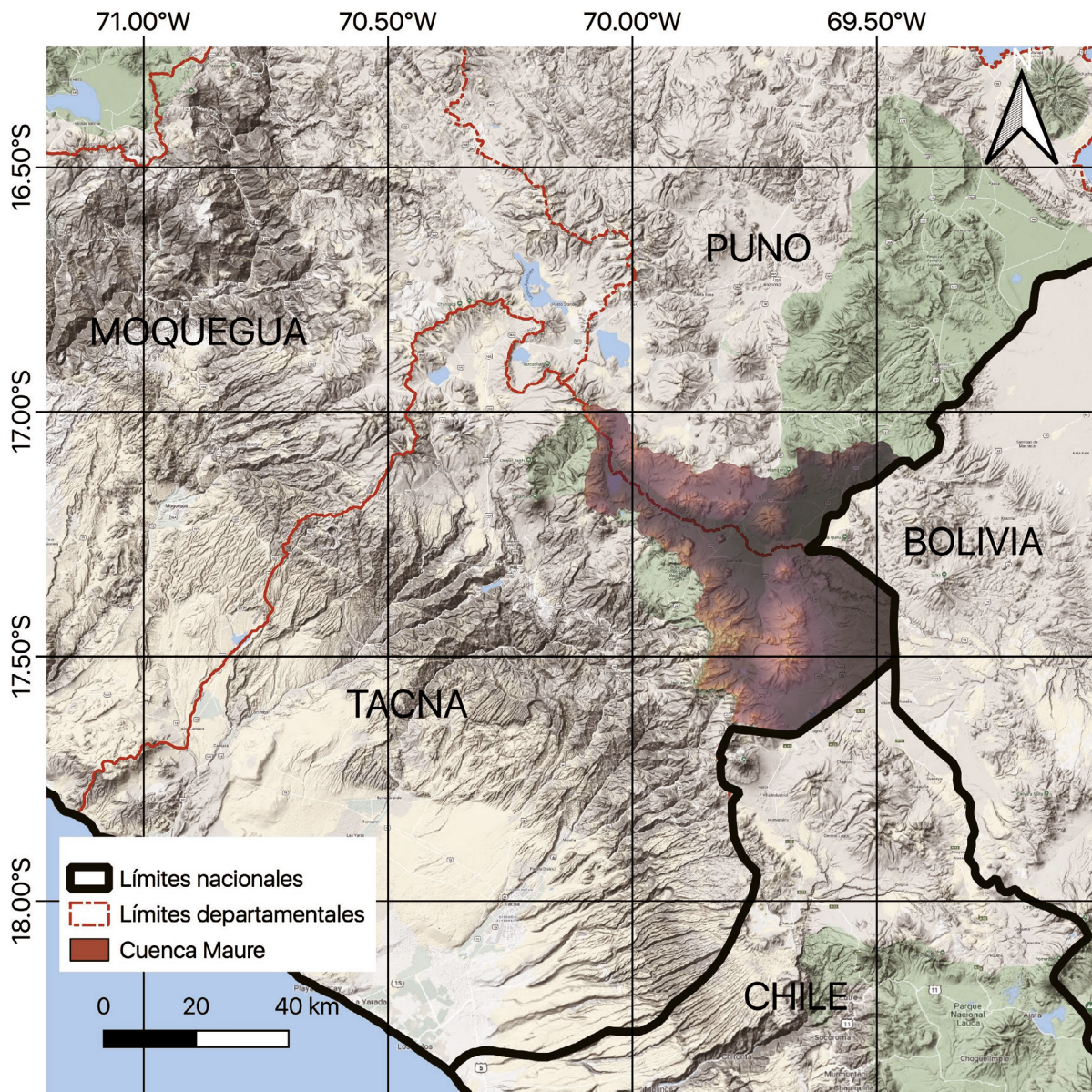
Mendoza y Cano (2011), reportan para el territorio peruano 19 de las 28 especies registradas de *Polylepis* (más del 70% de las especies que conforman el género). Éstas se distribuyen a lo largo de todo el territorio nacional, convirtiéndose de esta manera en el país con la mayor riqueza de especies registradas para este grupo, comparados con Bolivia (13), Ecuador (7), Argentina (5), Colombia (3), Chile (2) y Venezuela (1). Como ya se ha señalado, los bosques de *Polylepis* se distribuyen de forma desagregada, como parches o manchas aisladas sobre los 3800 metros de altitud en 19 de los 25 departamentos del país. La mayor riqueza de especies se encuentra en los departamentos de Cusco y Ayacucho (10 y 8 respectivamente) mientras que en Ancash se distribuyen las mayores extensiones

de bosque (Zutta *et al.*, 2012). En el departamento Tacna se reportan solo tres especies: *Polylepis subtusalbida*, *P. rugulosa* y *P. tarapacana*.

Todo el departamento de Tacna se encuentra en una zona árida en el extremo sur del Perú. La costa, y toda la vertiente occidental, se ubican directamente en lo que Rau *et al.* (2017) identifican como las unidades 7, 8 y 9 en su regionalización de lluvias de la vertiente del Pacífico, zonas con precipitación acumulada anual por debajo de los 400 mm. La zona costera específicamente corresponde al desierto de Atacama (Ritter *et al.*, 2019; Sarricolea, Herrera-Ossandon, y Meseguer-Ruiz, 2017) el más árido del mundo. La parte andina oriental de la región corresponde al sector centro-oeste del Altiplano, en el que la precipitación acumulada anual es relativamente baja (300 – 700 mm/año) y la variabilidad temporal es muy marcada (Garreaud, Vuille, y Clement, 2003; Valdivia, Thibeault, Gilles, García, y Seth, 2013). Adicionalmente, las tendencias actuales de cambio en los patrones climáticos han producido un distintivo y continuo incremento en la temperatura superficial, lo que puede generar efectos diversos en factores climáticos y eco-hidrológicos en los ecosistemas de todo el ámbito regional (Valdivia *et al.*, 2013).

Polylepis tarapacana es la más pequeña y la que alcanza mayor altitud de todas las especies conocidas del género (Cuyckens *et al.*, 2016; Zutta *et al.*, 2012). Distribuida en zonas áridas del extremo occidental del Altiplano en Perú, Bolivia, Chile y Argentina (Cuyckens *et al.*, 2016), esta especie se desarrolla en una región de condiciones climáticas complejas. Las poblaciones tacneñas de *P. tarapacana* se distribuyen en la zona altiplánica, en la cuenca del río Maure (Figura 1). Sin embargo, dos recientes trabajos de clasificación de cobertura vegetal desarrollados por el Ministerio del Ambiente del Perú (MINAM, 2015, 2018) no consideran o subestiman la existencia de este bosque en el territorio departamental. Esta deficiencia en la infor-

FIGURA 1.
ÁREA DE ESTUDIO. DEPARTAMENTO DE TACNA Y CUENCA DE MAURE



mación oficial se debería a dos motivos: (i) la escala a la que se realiza la clasificación de coberturas en los mapas nacionales de cobertura vegetal (MINAM 2015) y de ecosistemas (MINAM 2018) y (ii) la escasa información científica que se produce sobre ecología y conservación en la región andina de Tacna. Con respecto al último factor, aún se desconoce la real extensión de los bosques de *Polylepis* en muchas regiones del país (Zutta y Rundel, 2017), los factores ambientales que determinan su presencia, su caracterización, fenología, usos, presión y estado de conservación. Por todo ello, las acciones de conservación y restauración

son débiles y poco eficientes, a pesar de que muchas de estas especies se encuentran dentro de las categorías más altas de amenaza, de acuerdo a la lista oficial de especies de flora categorizada del Perú (Decreto Supremo N°043-2006-AG). La importancia de los bosques de *Polylepis* en la región andina radica en los servicios ecosistémicos que estos proveen, como la protección de la biodiversidad y la mitigación de los efectos del cambio climático, mediante la captura CO_2 atmosférico (Zutta *et al.*, 2012). También son fuente importante de recursos para los habitantes locales, contribuyen en la formación de suelos, entre la

vegetación asociada se encuentran numerosas plantas medicinales y contribuyen con la regulación del ciclo hidrológico promoviendo la infiltración del agua, reduciendo la escorrentía y controlando la erosión (Camel *et al.*, 2019; Toivonen, Gonzales-Inca, Bader, Ruokolainen, y Kessler, 2017; Valencia, Gosling, Bush, Coe, y Orren, 2018).

Bajo este contexto, es válido preguntarse ¿cuál es la distribución geográfica y las principales características ecológicas de los bosques de *Polylepis tarapacana* en el extremo sur del Perú? Buscando responder a las necesidades más urgentes, se realizó una delimitación de los bosques de *P. tarapacana* en los altos Andes de la región Tacna, utilizando técnicas de sensoramiento remoto. Con el nuevo polígono definido, se evaluaron algunas variables ambientales que influyen en el desarrollo de la especie en su hábitat natural, esto con el objetivo de conocer factores determinantes que, en el futuro, ayuden a plantear estrategias de manejo, conservación y restauración óptimas, costo-eficientes y con alto potencial de éxito. Finalmente, con toda la información generada se ha analizado la modalidad de conservación más oportuna que permita consolidar una buena gestión de este recurso.

METODOLOGÍA

Área de estudio

El departamento de Tacna está localizado en el extremo sur del Perú, limitando por el noroeste con el departamento de Moquegua, por el noreste con Puno, por el sur con la República de Chile, por el este con la República de Bolivia y por el oeste con el Océano Pacífico (Figura 1). Tiene una superficie territorial de 16 075,73 km² que representa el 1,25% del país y está dividida en cuatro provincias Tacna, Tarata, Candarave y Jorge Basadre. (Gobierno Regional de Tacna, 2014). Según Brako y Zarucchi (1993) la especie *P. tarapacana* se distribuye en Tacna entre los 4200 hasta los 4800 metros de altitud, y generalmente se encuentra en las laderas orientales del sector oeste del Altiplano (Cuyckens *et al.*, 2016), por lo que el área de estudio se limitó a la cuenca del río Maure, que ocupa la totalidad del Altiplano en el departamento.

Delimitación del bosque de *Polylepis tarapacana*

Los bosques de *Polylepis tarapacana* se desarrollan en parches de baja densidad (Figura 2), lo que los hace

FIGURA 2.
VISTA GENERAL DE UN TÍPICO BOSQUE DE *POLYLEPIS TARAPACANA* EN TACNA (CERRO JUCURE)



difíciles de distinguir mediante sensores remotos en el ambiente árido del Altiplano. Para evitar este sesgo, su delimitación combina un método supervisado y un algoritmo de machine learning (Tuia, Pasolli, y Emery, 2011) con un ajuste manual basado en imágenes de alta resolución. Desde el repositorio del Servicio Geológico de los Estados Unidos de Norteamérica (USGS Earth Explorer, <https://earthexplorer.usgs.gov>) se descargó una imagen Landsat 8 (OLI) de agosto del 2018 (LC08_L1TP_002072_20180814_20180828_01_T1) en nivel 2 (corregida geométrica y radiométricamente). La corrección geométrica de la imagen fue validada con una serie de puntos característicos (confluencia de ríos, montañas y colinas notables) georeferenciados con un GPS de navegación cinética satelital (RTK, South Galaxy G1). Se generó una batería de 236 muestras de campo distribuidas en 7 categorías de cobertura (revítese la Tabla 1 y la Figura 3) recopiladas entre abril y junio del 2018. 120 de las 236 muestras iniciales se utilizaron para generar un archivo de entrenamiento para el proceso de aprendizaje activo en base al cual se aplicó el algoritmo Random Forest (Belgiu y Drăguț, 2016; Breiman, 2001). La primera clasificación fue ajustada en base a las 116 muestras restantes. La clasificación final fue validada con 139 muestras recopiladas en noviembre del 2018. Por último, para ajustar los bordes del bosque, se uti-

lizó una inspección visual en base a imágenes Google (Toivonen et al., 2017) de 2,4 x 2,4 metros de resolución (Google Maps a través de QGIS, imagen de marzo 2016, accedida en enero del 2019).

Factores ambientales (clima, geoformas y geología)

Para determinar los factores ambientales que pueden ser importantes para el desarrollo de *P. tarapacana*, se interceptó el polígono obtenido del análisis de cobertura, con la información vectorial (polígonos, líneas y puntos) generada en el proceso de zonificación ecológica y económica del departamento de Tacna (Ordenanza Regional N° 016-2012-CR/GOB.REG. TACNA, 2013), en particular con los datos de precipitación, humedad relativa, temperaturas (máxima, media y mínima), fisiografía, geología, geomorfología y tipo de suelos. Los datos climatológicos fueron extraídos de las bases grilladas PISCO generadas por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SE-NAMHI) que cubren el período histórico comprendido entre 1981 y 2016 (Aybar et al., 2017).

Índices topográficos

Se estimaron factores topográficos influyentes en el establecimiento de los parches de *Polylepis tarapacana*, para ello se utilizaron una serie de índices usual-

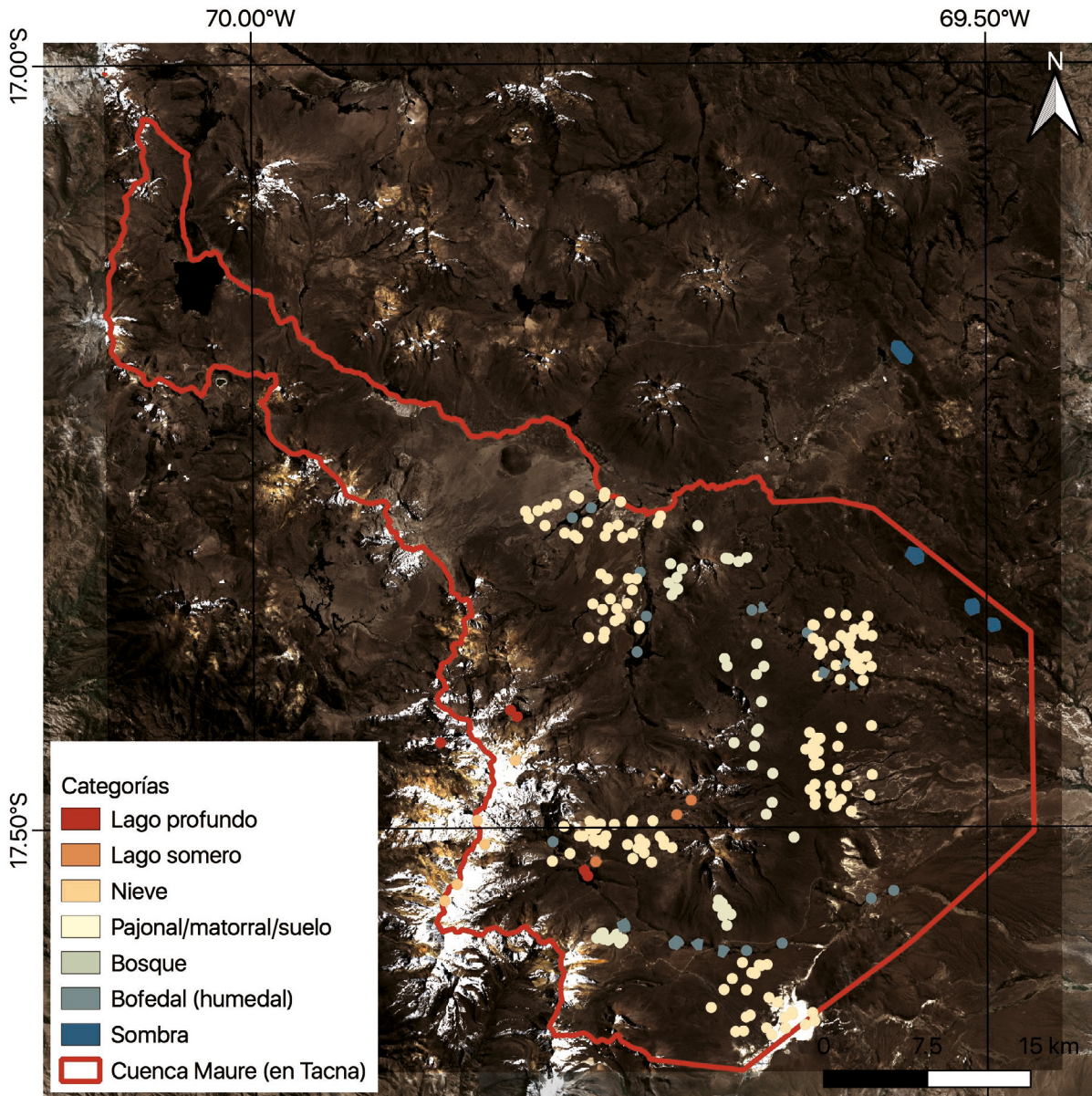
TABLA 1. CATEGORÍAS UTILIZADAS EN LA CLASIFICACIÓN DE COBERTURA VEGETAL

Tipo de cobertura	Código	Descripción
Lago profundo	1	Lagos profundos, generalmente de origen glaciar. Con una alta capacidad de absorción de radiación
Lago somero	2	Lagos someros, de origen glaciar, cercanos a cimas o en valles glaciares altos, con alta carga de sólidos suspendidos
Nieve	3	Nieve
Pajonal/matorral/suelo	4	Categoría miscelánea, en el ámbito de estudio las características del suelo, la vegetación de pastos (pajonal) y los matorrales de baja densidad, suelen presentar respuestas espectrales muy similares
Bosque	5	Bosque de <i>Polylepis tarapacana</i>
Bofedal	6	Bofedal es un término común usado en Perú, Bolivia y el norte de Chile para referirse a humedales de alta montaña
Sombra	7	Sombras sobre laderas de montaña

TABLA 2. VARIABLES E ÍNDICES TOPOGRÁFICOS DERIVADOS DEL MODELO DIGITAL DEL TERRENO (MDT), DESCRIPCIÓN Y CONDICIONES ECOLÓGICAS RELACIONADAS

Variable	Descripción	Condiciones relacionadas
Exposición Norte	Orientación con respecto al Norte en una escala relativa (1 a -1)	Cambios estacionales en la radiación solar
Exposición Este	Orientación con respecto al Este en una escala relativa (1 a -1)	Variaciones diarias en la radiación solar
Pendiente	Pendiente expresada en proporción (0 - 1)	Estabilidad del terreno, radiación, humedad
Índice de protección morfométrica	Nivel de protección o abrigo topográfico, calculado en base a distancias de 500 metros	Abrigo, radiación, extremos térmicos
Índice topográfico de humedad	Calculado en base al control topográfico de los procesos hidrológicos	Humedad del suelo, acceso a recursos hídricos subterráneos

FIGURA 3. MUESTRAS DE DIFERENTES TIPOS DE COBERTURA, RECOLECTADAS PARA EL SENSORAMIENTO REMOTO



mente considerados importantes para el desarrollo de especies forestales en regiones montañosas. Estos índices están generalmente correlacionados con niveles de radiación solar, condiciones hidrológicas del suelo, protección ante factores climatológicos como el viento y lluvias, y la estabilidad del suelo (Griffiths, Madritch, y Swanson, 2009).

Los índices topográficos (Tabla 2) se calcularon en base a un Modelo Digital de Terreno (MDT) derivado de imágenes Aster (Aster Global DTM, con resolución vertical de 8 m y 30 × 30 m de tamaño de pixel), utilizando los algoritmos explicados por Olaya (2009) y

Olaya y Conrad (2009), los cuales fueron implementados con el paquete raster 3.0-2 (Hijmans, 2019) en R 3.6.1 (R Core Team, 2019).

Oportunidades de conservación

Se comparó el polígono obtenido mediante nuestro análisis, con las extensiones y tipos de cobertura desarrollados por el Ministerio del Ambiente (MINAM, 2015, 2018). Se evaluó su representatividad en la base física del Sistema Nacional de Áreas Naturales Protegidas (SINANPE). Se evaluó la disponibilidad del territorio comparándolo con los límites de propiedad privada de

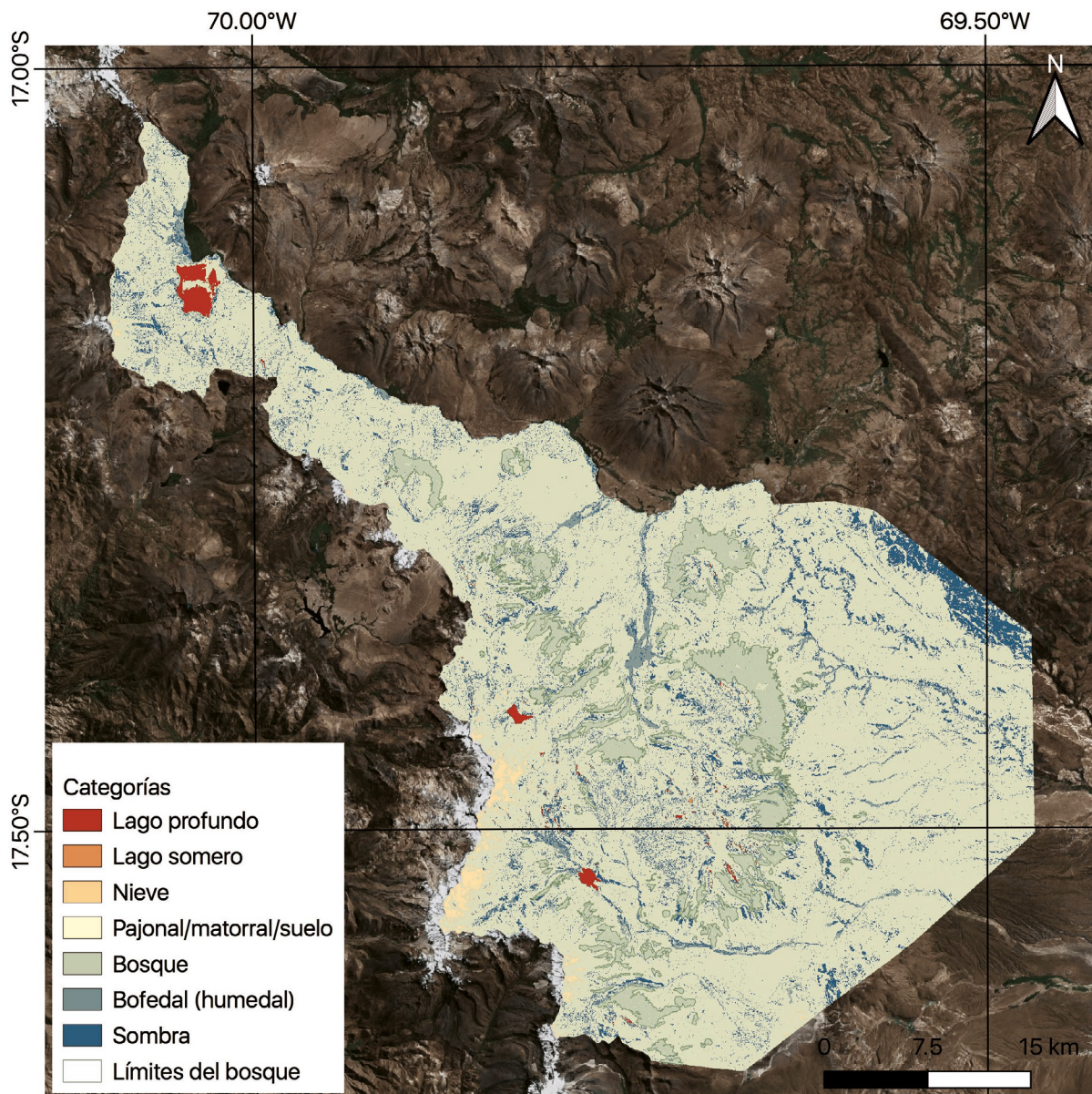
Comunidades Campesinas por intermedio de las Superintendencia Nacional de Registros Públicos (SUNARP). Se comparó con la extensión de los Sitios Prioritarios para la Conservación en Tacna a través del Sistema Regional de Áreas Naturales Protegidas (SIRANP). Este análisis fue utilizado para proponer una modalidad de conservación que promueva la gestión eficiente de los bosques de *P. tarapacana* dentro del marco legal peruano.

RESULTADOS

Clasificación de coberturas

El análisis de la imagen satélite permitió generar un mapa de cobertura que presenta un valor de ajuste del 84,17% (analizado en base a los datos de validación, 117/139 registros correctos). El mapa obtenido fue posteriormente re-digitalizado utilizando los límites obtenidos en la clasificación final, y una inspección visual de imágenes de alta resolución (Google Maps, 2,4 x 2,4 metros). En base al resultado final, los bosques de *Polylepis tarapacana* en el departamento de Tacna, cubren una superficie total de 128,94 km² y están ubicados entre los 4225 y 5175 metros de altitud (Figura 4).

FIGURA 4. RESULTADO DE LA CLASIFICACIÓN DE COBERTURAS (RANDOMFOREST)



Factores ambientales

Los factores climáticos indican una clara prevalencia de la precipitación y la temperatura en el desarrollo del bosque. El 77,6% de la cobertura forestal se desarrolla en zonas con promedios anuales de precipitación mayores a 600 mm, el 21,7% de la cobertura entre 500 y 600 mm y el 0,7% en zonas con precipitación de 400 mm o menor. La aridez es una característica de la región altiplánica (Canedo Rosso, Hochrainer-Stigler, Pflug, Condori, y Berndtsson, 2018; Vicente-Serrano *et al.*, 2015), la humedad relativa suele ser media a baja, y solo en condiciones climatológicas excepcionales puede superar el 75%, esta es una condición limitante para el desarrollo del bosque, de manera que el 96% de su superficie se distribuye en zonas con valores de humedad relativa entre 48 y 54% como promedio anual, de lo mas alto que puede registrarse en la región. El 98% de superficie de bosque se desarrolla en zonas que cuentan con una temperatura media entre 4,1 a 9°C mientras que solo el 2% en zonas que presentan valores entre 2,1 a 4°C.

La fisiografía es otro factor influyente en el desarrollo de la especie, el bosque se distribuye principalmente en cinco de once tipos fisiográficos identificados en la zona de estudio: el 46,6% en zonas de montaña

glaciar con laderas moderadamente empinadas, el 42,1% en montaña glaciar empinada, el 5,7% en montaña glaciar muy empinada, el 2% en pie de monte y el 1,2% en montaña de material volcánico con laderas muy empinadas. La geología de los Andes sur peruanos es sumamente compleja (Espurt *et al.*, 2009; Fletcher, Hawkins, & Tejada, 1989), de doce unidades geológicas presentes en la cuenca Maure, los bosques de *P. tarapacana* están principalmente en cinco: 50,54% sobre el grupo barroso, 34,82% sobre depósitos fluvioglaciares, 7,32% sobre depósitos morrénicos, 4,77% en el volcánico Purupuruni y 1,35% sobre el volcánico Paucarani. Con respecto a la geomorfología, los bosques de *P. tarapacana* se encuentran distribuidos en un 96,21% de su superficie en montañas, 3,27% en planicies, 0,47% en nevados y solo el 0,04% en zonas hidromórficas. De acuerdo a la taxonomía de suelos, la especie se desarrolla principalmente en los tipos inceptisol y entisol (con más del 98%) mientras que el 1,2% se encuentren el tipo misceláneo roca y el 0,1% en histosoles (suelos orgánicos, generalmente asociados a las zonas hidromórficas donde se desarrollan húmedales). Todos los factores ambientales evaluados, sus rangos y la proporción de bosque que se desarrolla en ellos, se presentan en la Tabla 3.

TABLA 3. VARIABLES AMBIENTALES (CLIMA, GEOFORMAS Y GEOLOGÍA), RANGOS REGISTRADOS Y PORCENTAJE DE BOSQUE PRESENTE EN ELAS

Variable ambiental	Rangos/categorías	% de bosque
Precipitación media anual (mm/año)	400 - 500	0,7
	500 - 600	21,7
	600 - más	77,6
Tipo de clima	Sub-húmedo – frígido	68
	Sub-húmedo – semifrígido	32
Humedad relativa (%) media anual	45 - 48	1
	48 - 51	42
	51 - 54	54
	54 - 57	3
Temperatura máxima anual (celsius)	8,9 - 11,8	38
	11,9 - 13,3	60
	13,4 - 14,8	2
Temperatura media anual (celsius)	2,1 - 4,0	2
	4,1 - 6,0	78
	6,1 - 8,0	20
Temperatura mínima anual (celsius)	-11,4 - -7,39	35
	-7,38 - -5,03	58
	-5,02 - -2,20	7
Fisiografía	Montaña glaciar	94,4
	Otros	6,6
Unidades geológicas	Grupo barroso	50,54
	Depósito fluvioglacial	34,82
	Deepósito morrénico	7,32
	Otros	7,32
Tipos de suelo	Inceptisol	58,5
	Entisol	40,1
	Misceláneo roca	1,2
	Histosol	0,1

Índices topográficos

Además de los factores ambientales (climáticos, geomorfológicos y geológicos) evaluados como importantes para el desarrollo de los bosques de *Polylepis tarapacana*, desarrollamos un análisis de índices topográficos, como la pendiente, la orientación (índices norte-este), índice de protección morfométrica e índice de humedad topográfica. Los resultados muestran un patrón de desarrollo peculiar, poco común en otras especies de *Polylepis* (Dourojeanni, 2008; Toivonen *et al.*, 2017; Camel *et al.*, 2019), pero concordante con lo que podría considerarse esperable para una especie como *P. tarapacana* cuya distribución geográfica está asociada a las laderas orientales de la margen oeste y suroeste del Altiplano (Morales *et al.*, 2012; Cuyckens *et al.*, 2016).

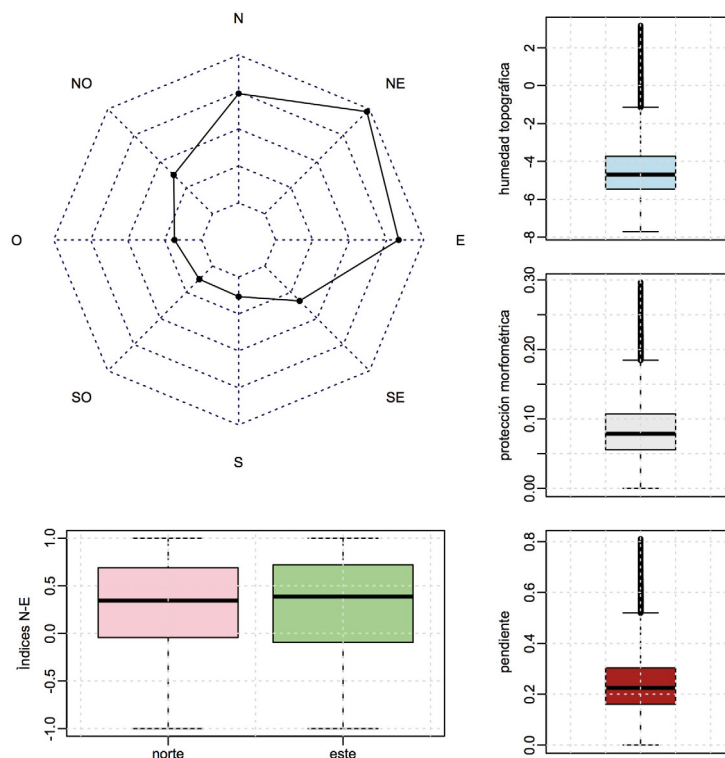
Los valores de orientación muestran un desarrollo predominante en laderas que apuntan hacia el noreste (Figura 5), ello implica, considerando la ubicación latitudinal del área de estudio, un mayor número de horas de exposición solar, esto es una diferencia importante con otras especies del género, que suelen desarrollarse protegidas de la radiación solar y su variabilidad diaria, prosperando principalmente en las laderas occidentales de las montañas. La orientación, combinada con las condiciones climáticas y de

insolación dominantes en el Altiplano (Garreaud *et al.*, 2003), determinan una mayor pérdida potencial de agua debido a procesos de evapotranspiración, pudiendo asumirse que la especie presenta un posible desarrollo adaptado a condiciones de estrés hídrico. Los valores registrados de pendiente e índice de protección topográfica muestran condiciones de desarrollo en espacios expuestos. La pendiente suele ser baja a media, generalmente por debajo del 50%, mientras que el índice de protección topográfica muestra valores generalmente inferiores a 0,2 unidades, lo que indica que la especie requiere de zonas ligeramente inclinadas y con poco abrigo para su desarrollo. Por último, para el índice topográfico de humedad se obtienen valores que pueden estar directamente relacionados con los anteriores, con una marcada dominancia de valores negativos, lo que implica que este bosque se desarrolla generalmente alejado de los fondos de valle y cauces potenciales, donde el nivel freático suele encontrarse más cerca de la superficie.

Factores importantes para proponer estrategias de conservación

Se encontró que la totalidad del polígono de *P. tarapacana* definido en este trabajo, no intercepta al

FIGURA 5. CARACTERIZACIÓN MORFOMÉTRICA: ORIENTACIÓN, HUMEDAD TOPOGRÁFICA, PROTECCIÓN MORFOMÉTRICA Y PENDIENTE



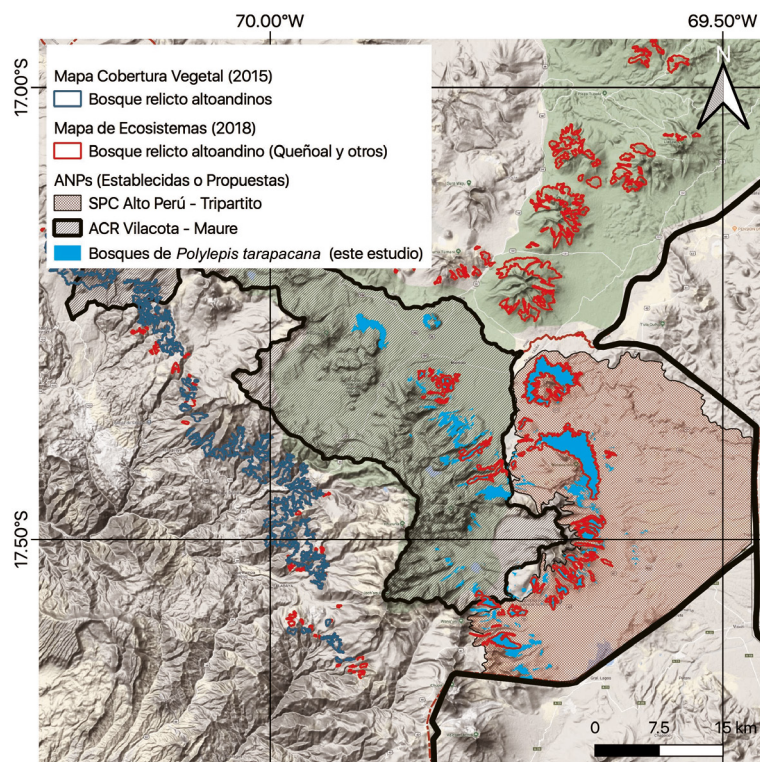
polígono de bosques andinos presentado por el Mapa Nacional de Cobertura Vegetal (MINAM, 2015, Figura 6), en tanto que el 56,66% intercepta al polígono de *Polylepis* del Mapa Nacional de Ecosistemas del Perú, desarrollado el año 2018. El 30,12% del nuevo polígono se encuentra incluido dentro del Área de Conservación Regional (ACR) Vilacota Maure, la que forma parte del Sistema Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado (SINANPE), mientras que el 66,94% de bosque se encuentra al interior del Sitio Prioritario de Conservación Alto Perú – Tripartito identificado por el gobierno regional de Tacna (SIAR-Tacna, 2009). Solo 2,94% se distribuye fuera de espacios que ya hayan recibido una categoría de conservación, o se encuentren identificados como objetos de conservación futura. En cuanto al régimen de propiedad, el 25,51% de la superficie de *P. tarapacana* se encuentra en terrenos públicos mientras que el 74,49% de los polígonos están distribuidas en seis comunidades campesinas: Maure, Coracorani, Talabaya, Chiluyo Grande, Ancomarca y Alto Perú.

DISCUSIÓN

Nuestra clasificación de cobertura vegetal, desarrollada en base a una imagen Landsat del año 2018, su

posterior validación en campo y el ajuste con imágenes de alta resolución (2,4 metros) permitió una digitalización precisa de los bosques de *Polylepis tarapacana* en la región Tacna. Comparada con trabajos previos desarrollados con una resolución menor, se ha logrado identificar extensiones sustancialmente mayores a las registradas con anterioridad. Los bosques de *Polylepis* altoandinos del Mapa Nacional de Cobertura Vegetal (escala de 1:100000, MINAM, 2015), consideran la existencia de un parche único ubicado en la vertiente occidental del departamento (cuenca del Pacífico), el cual agruparía a las tres especies reportadas para Tacna por Mendoza y Cano (2011) (*Polylepis subtusalbida*, *P. rugulosa* y *P. tarapacana*), pero que no coincide en ningún punto con lo obtenido en este trabajo. Con una mayor resolución, el Mapa Nacional de Ecosistemas del Perú (MINAM, 2018) elaborado a una escala de 1:25000, se intercepta con el polígono de bosques identificado en este trabajo en un 56,66%. Considerando los dos estudios previos, se ha delimitado una nueva superficie de bosques de *Polylepis tarapacana* de 55,88 km². La información obtenida permite extender el área de distribución de *P. tarapacana* en el extremo sur del Perú, para donde –por

FIGURA 6. EXTENSIÓN DEL BOSQUE DE *POLYLEPIS* EN TACNA SEGÚN DIFERENTES ESTUDIOS (MINAM, 2015, 2018 Y ESTE TRABAJO), Y UBICACIÓN DE ÁREAS DE CONSERVACIÓN EXISTENTES (ACR VILACOTA – MAURE) Y FUTURAS (SPC ALTO PERÚ – TRIPARTITO)



lo general– solo se citan pequeñas poblaciones relictuales con una baja densidad (Cuyckens *et al.*, 2016; Mendoza y Cano, 2011; Zutta y Rundel, 2017).

Brako y Zarucchi (1993) indican que los bosques de *P. tarapacana* en el Perú se distribuyen entre los 4200 a 4800 metros de altitud, mientras que Ríos (1998) señala que, en el norte de Chile, estos bosques se distribuyen de forma preferencial en cerros y lomas de exposición oeste y noroeste, en un rango altitudinal que oscila entre 4100 y 4700 metros. Los parches de bosque delimitado en Tacna presentan una distribución altitudinal entre los 4225 y 5175 metros, notablemente superior a lo sugerido por Brako y Zarucchi (1993), con registros muy similares a los de Fjeldså y Kessler (1996) en Sajama (Bolivia), donde la especie ha sido reportada hasta los 5200 metros de altitud. Por otro lado, a diferencia de lo sugerido por Ríos (1998), los bosques de *P. tarapacana* en Tacna crecen con una marcada orientación N-NE-E, esto es coincidente con su rango de distribución conocido (Cuyckens *et al.*, 2016; Gareca *et al.*, 2013; Zutta & Rundel, 2017) el cual se asocia con las laderas orientales de la cadena occidental que delimita el Altiplano (Morales *et al.*, 2012). Azócar, Rada y García (2007) señalan que una de las adaptaciones más notables de *P. tarapacana* es la alta tolerancia al congelamiento, documentándose resistencias en terreno a temperaturas cercanas a -13°C para la época seca y fría y de -6°C para la estación húmeda y cálida. La distribución obtenida en el departamento de Tacna confirma que estos habitan zonas con temperaturas máximas de $14,8^{\circ}\text{C}$ y mínima de $-11,4^{\circ}\text{C}$.

Kessler (2006) señala que las condiciones ecológicas de los bosques del género *Polylepis*, se pueden caracterizar principalmente en relación con la temperatura, humedad relativa y suelos y que, debido a su localización a grandes elevaciones en los Andes, estos están sujetos a amplias fluctuaciones de temperatura (comúnmente de 20 a 30°C entre el día y la noche). Nuestros resultados muestran un rango potencial de amplitud térmica de $26,2^{\circ}\text{C}$, coincidente con lo señalado en la literatura. Asimismo, la mayor superficie de los bosques (98%) se encuentran en zonas con precipitaciones mayores a 600 mm, la que ocurre principalmente entre diciembre y abril. Las zonas con mayor precipitación se encuentran en sectores con presencia de montañas, tal como señalan Garreaud *et al.* (2003) y Moya y Lara (2011) que las precipitaciones en el Altiplano occidental comienzan a ser significativas a medida que se asciende en altitud a causa del mayor aporte de humedad desde el noreste.

Moya y Lara (2011) señalan también que los suelos del Altiplano de Arica y Parinacota, en Chile, en donde se distribuyen los bosques de *P. tarapacana*, están modelados por las condiciones del clima frío y de características xeromórficas del ambiente, tratándose de suelos poco profundos, relativamente jóvenes, compuestos por material particulado como arena y grava gruesa, formados a partir de la descomposición criogénica de la roca madre. Solo en las partes llanas, o en las depresiones intermedias, se encuentran suelos formados a partir de materia orgánica en distintas fases de descomposición, donde generalmente la especie no se desarrolla. Esto es muy similar a los resultados obtenidos para los bosques de *P. tarapacana* en Tacna, los que se ubican principalmente en montañas (96%) alejados de histosoles (suelos orgánicos) que se suelen desarrollar en planicies u hondonadas.

Las comunidades que habitan el Altiplano son fundamentalmente grupos de origen Aymara cuya actividad económica principal es el pastoreo de camélidos sudamericanos (Yager *et al.*, 2019). Para estas comunidades, los ecosistemas más valorados de los altos Andes son los humedales (bofedales), puesto que les proveen del recurso pastoril durante todo el año (Cochi Machaca *et al.*, 2018). En este entorno de propiedad comunal con bajos ingresos económicos y requerimientos básicos insatisfechos, agudizados por el cambio climático (Martínez-Cruz, Juárez-Torres, y Guerrero, 2017) los bosques constituyen un ecosistema proveedor de combustible (leña) lo que implica una presión importante sobre ellos. La conservación efectiva y el manejo sostenible del territorio pueden ser posibles únicamente desde una perspectiva mixta, en la que intervengan en conjunto la sociedad local y el estado. El estado debe asegurar la formalización del territorio, mediante planes de zonificación y definición de usos potenciales, y la comunidad implementando dichos usos y obteniendo beneficios de ello (Himley, 2009). Las modalidades de conservación que se propongan para los bosques de *P. tarapacana* en Tacna deben considerar la generación de beneficios en la comunidad mediante actividades como el turismo vivencial, el aprovechamiento sostenible de la lana de Vicuña o la observación de aves (SIAR-Tacna, 2009).

En base al análisis desarrollado, se plantea una propuesta de modalidad de conservación, que permita preservar los bosques de *Polylepis tarapacana* en la cuenca del río Maure, asegurando la provisión de una serie de servicios ecosistémicos. Al revisar el Plan Maestro 2017-2021 del ACR Vilacota – Maure (Ordenanza Regional N° 010-2018-CR/GOB.REG.TAC-

NA, 2019), este indica que los bosques de *Polylepis* (*P. rugulosa*, *P. subtusalbida* y *P. tarapacana*) al interior del ANP ocupan una superficie de 52,51 km². Sin embargo, el 66,98% de la superficie de estos bosques (90,10 km²), se encuentran en zonas donde no se ha establecido alguna modalidad de conservación, es posible que sobre ellas exista una mayor presión antropogénica y resulta necesario conocer oportunidades de gestión y manejo. Revisando la Ley de Áreas Naturales Protegidas (Ley N° 26834, 1997), la Ley Forestal y de Fauna Silvestre (Ley N° 29763, 2011) y sus reglamentos, encontramos diferentes modalidades de conservación. Las normas legales vigentes admiten la ampliación del ACR Vilacota – Maure, y la forma más simple de lograr dicha ampliación sería considerando la anexión del SPC Alto Perú – Tripartito. De realizarse el trámite requerido, se garantizaría la protección de casi la totalidad de los bosques de *P. tarapacana* del departamento de Tacna. Esta modalidad de conservación resulta óptima, no solo por la preservación del bosque y, consecuentemente, de la especie, sino que asegura la provisión de una serie de servicios ecosistémicos y contribuye a la conservación de otros ecosistemas asociados (praderas, turberas, humedales, arbustales). Un beneficio asociado de la extensión del ACR Vilacota – Maure resulta en la facilitación de los esfuerzos de conservación privados, como el realizado por la Comunidad Campesina de Alto Perú, la cual cuenta con un área privada de Aprovechamiento de Vicuña (*Vicugna vicugna*), la cual es compatible con la categoría de Área de Conservación Regional.

Otra alternativa, pero que no consolidaría el 100% de la superficie, es que las seis comunidades campesinas vecinas del ACR Vilacota – Maure, propongan (por separado, debido a la legislación sobre propiedad privada) la creación de Áreas de Conservación Privada (ACP) en sus terrenos comunales y las gestionen de acuerdo a Ley. Esta categoría es legalmente compatible con actividades de aprovechamiento bajo Planes de Manejo como: concesiones forestales, de conservación, ecoturismo o bosque local en terrenos del estado, a nombre de terceros interesados en la conservación de la especie. Esta alternativa representaría hasta un 25,51% de la superficie de los bosques de *P. tarapacana* identificados en este trabajo.

CONCLUSIONES

Mediante el uso de técnicas de sensoramiento remoto, se ha logrado delimitar la superficie de los bosques de *P. tarapacana* del departamento de Tacna, en el extremo sur del Perú. Esto contribuye a definir de manera

más precisa a lo hasta ahora conocido, el área de distribución de la especie en el territorio peruano, donde es normalmente reportada como escasa (Cuyckens et al., 2016; Mendoza & Cano, 2011). Aunque su densidad, abundancia y extensión no son tan importantes como en otros países del continente (Bolivia en particular), los bosques de *P. tarapacana* en Tacna, muestran una extensión mayor a la reportada, y constituyen una formación vegetal en el Altiplano. Esta información contribuye a mejorar la gestión para su conservación, aclarando datos de superficie y distribución altitudinal, anteriormente algo confusos y contradictorios. Asimismo, se ha identificado las principales características ambientales de la especie que son insumos fundamentales para los proyectos de manejo, incluyendo iniciativas futuras de propagación y reforestación que permitirían optimizar estrategias de restauración haciéndolas viables en cuanto a costo-efectividad. Un detalle particular en lo que respecta a las características ambientales de la especie son las asociadas a factores topográficos y su influencia en el desarrollo de la formación forestal. Estos son –en gran medida– opuestos a los característicos de otras especies del mismo género, que tienden a seleccionar condiciones más típicas de protección ante factores climáticos (orientación oeste, uso de zonas abrigadas y con mayor probabilidad de presencia de fuentes de agua). Las adaptaciones fisiológicas de *P. tarapacana* la llevan a aprovechar eficientemente estos espacios, donde la aridez combinada con temperaturas extremadamente bajas, limitarían el desarrollo de otras especies arbóreas.

En base a un análisis preliminar del estatus actual de conservación y propiedad de la superficie, se sugiere que la alternativa más viable para la conservación efectiva de los bosques de *P. tarapacana* es la ampliación del Área de Conservación Regional Vilacota – Maure hacia el Sitio Prioritario para la Conservación Alto Perú – Tripartito. Esto permitiría incluir dentro de un Área Natural Protegida casi la totalidad de los bosques identificados. Otra alternativa consiste en proponer la creación de Áreas de Conservación Privadas, por parte de algunas Comunidades Campesinas que cuentan con porciones importantes del bosque en sus territorios.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecemos a David Cooper de la Universidad Estatal de Colorado (Estados Unidos) y Adrián Vera de CORBIDI (Perú) por la revisión de una versión preliminar de este manuscrito y sus sugerencias. A Alex Yaja de la Universidad Nacional Jorge Basadre Groh-

mann (Perú), por su asistencia en la programación en R para el cálculo de los índices topográficos. También deseamos extender nuestro agradecimiento a los revisores anónimos cuyos comentarios contribuyeron a mejorar la versión final del documento. Este manuscrito forma parte del proyecto de investigación “Estado de conservación de los Bosques de Queñoa (*Polylepis tarapacana*) para el desarrollo de mecanismos de gestión y aprovechamiento sostenible frente a los efectos del cambio climático en la zona altoandina en la Región Tacna”, ganador del Concurso de Investigación científica y tecnológica de la Universidad Jorge Basadre Grohmann, fondos del canon, sobre canon y regalías mineras – 2017 (RESOLUCIÓN RECTORAL N° 3723-2018-UN/JBG). El desarrollo de los trabajos de campo y la recolección de datos fue posible gracias a la Autorización de Investigación emitida por el Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (Resolución de Dirección General N° 242-2019-MINAGRI-SERFOR-DGGSPFFS).

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

PF, CC y CJ diseñaron el proyecto, que estuvo bajo la dirección de PF. CC, MN y EO realizaron los análisis de sensoramiento remoto, la delimitación del bosque y su validación. MN y CJ estuvieron a cargo de los análisis de la relación bosque – variables ambientales y de la revisión de las alternativas de conservación. JI y EO desarrollaron los índices topográficos. PF, MN y EO redactaron el manuscrito, que fue revisado y recibió aportes de todos los co-autores.

BIBLIOGRAFÍA

- Aybar, C., Lavado-Casimiro, W., Huerta, A., Fernández, C., Vega, F., Sabino, E., & Felipe-Obando, O. (2017). Uso del Producto Grillado “PISCO” de precipitación en Estudios, Investigaciones y Sistemas Operacionales de Monitoreo y Pronóstico Hidrometeorológico. Lima, Perú.
- Azócar, A., Rada, F., y García-Núñez, C. (2007). Functional characteristics of the arborescent genus *Polylepis* along a latitudinal gradient in the high Andes. *Interciencia*, 32, 663-668.
- Belgiu, M., y Drăguț, L. (2016). Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 114, 24–31. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.011>
- Brako, L., y Zarucchi, J. (1993). *Catalogue of the Flowering Plants and Gymnosperms of Peru*. St. Louis, Mo.: Jardín Botánico de Missouri. 1286p.
- Breiman, L. (2001). Random Forests. *Machine Learning*, 45(1), 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Camel, V., Quispe-Melgar, H., Ames-Martínez, F., Navarro, W., Segovia-Salcedo, C., y Kessler, M. (2019). Forest structure of three endemic species of the genus *Polylepis* (Rosaceae) in central Peru. *Ecología Austral*, 30, 1–16.
- Canedo Rosso, C., Hochrainer-Stigler, S., Pflug, G., Condori, B., y Berndtsson, R. (2018). Early warning and drought risk assessment for the Bolivian Altiplano agriculture using high resolution satellite imagery data. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, (May), 1–23. <https://doi.org/10.5194/nhess-2018-133>
- Cochi Machaca, N., Condori, B., Rojas Pardo, A., Anthelme, F., Meneses, R. I., Weeda, C. E., & Perotto-Baldivieso, H. L. (2018). Effects of grazing pressure on plant species composition and water presence on bofedales in the Andes mountain range of Bolivia. *Mires and Peat*, 21, 1–15. <https://doi.org/10.19189/MaP.2017.OMB.303>
- Cuyckens, G. A. E., Christie, D. A., Domic, A. I., Malizia, L. R., y 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(July 2018), 79–87. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.12.010>
- Decreto Supremo N°043-2006-AG. (2006). Aprueban categorización de especies amenazadas de flora silvestre. *Diario Oficial El Peruano*, Lima, Perú, 13 de julio del 2006.
- Dourojeanni, P. (2008). Distribución y conectividad de bosques altoandinos (*Polylepis*) en la cuenca alta del río Pativilca. Tesis de Maestría, Pontificia Universidad Católica del Perú, Escuela de Geografía. Recuperado de: <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/628>
- Espurt, N., Baby, P., Brusset, S., Roddaz, M., Hermoza, W., y Barbarand, J. (2009). The Nazca Ridge and Uplift of the Fitzcarrald Arch: Implications for Regional Geology in Northern South America. In *Amazonia: Landscape and Species Evolution* (pp. 89–100). Wiley-Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781444306408.ch6>
- Etter, A., y Villa, L. A. (2000). *Andean Forests and Farming Systems in part of the Eastern Cordillera (Columbia)*. Mountain Research and Development,

- 20(3), 236–245. [https://doi.org/10.1659/0276-4741\(2000\)020\[0236:afafsi\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1659/0276-4741(2000)020[0236:afafsi]2.0.co;2)
- Fjeldså, J., y Kessler, M. (1996). Conserving the biological diversity of *Polylepis* forests of the highlands of Peru and Bolivia: a contribution to sustainable natural resource management in the Andes. Copenhagen: Nordic Foundation for Development and Ecology (NORDECO).
- Fletcher, C. J. N., Hawkins, M. P., y Tejada, R. (1989). Structural control and genesis of polymetallic deposits in the Altiplano and Western Cordillera of southern Peru. *Journal of South American Earth Sciences*, 2(1), 61–71. [https://doi.org/10.1016/0895-9811\(89\)90027-8](https://doi.org/10.1016/0895-9811(89)90027-8)
- Gareca, E. E., Breyne, P., Vandepitte, K., Cahill, J. R. A., Fernandez, M., y Honnay, O. (2013). Genetic diversity of Andean *Polylepis* (Rosaceae) woodlands and inferences regarding their fragmentation history. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 172(4), 544–554. <https://doi.org/10.1111/boj.12055>
- Gareca, E. E., Hermy, M., Fjeldså, J., y Honnay, O. (2010). *Polylepis* woodland remnants as biodiversity islands in the Bolivian high Andes. *Biodiversity and Conservation*, 19(12), 3327–3346. <https://doi.org/10.1007/s10531-010-9895-9>
- Garreaud, R., Vuille, M., y Clement, A. C. (2003). The climate of the Altiplano: observed current conditions and mechanisms of past changes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 194(1), 5–22. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(03\)00269-4](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(03)00269-4)
- Gobierno Regional de Tacna. (2014). Plan de Desarrollo Regional Concertado hacia el 2021. Tacna: Gobierno Regional de Tacna. 120p.
- Griffiths, R., Madritch, M., y Swanson, A. K. (2009). The effects of topography on forest soil characteristics in the Oregon Cascade Mountains (USA): Implications for the effects of climate change on soil properties. *Forest Ecology and Management*, 257, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.08.010>
- Hijmans, R. J. (2019). raster: Geographic Data Analysis and Modeling. Retrieved from <https://cran.r-project.org/package=raster>
- Himley, M. (2009). Nature conservation, rural livelihoods, and territorial control in Andean Ecuador. *Geoforum*, 40(5), 832–842. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2009.06.001>
- Kessler, M. (2006). Bosques de *Polylepis*. En: Moraes M., B. Øllgaard, L.P. Kvist, F. Borchsenius and H. Balslev (Eds.) *Botánica Económica de los Andes Centrales*. Universidad Mayor de San Andrés, La Paz. pp: 110-120.
- Martínez-Cruz, A. L., Juárez-Torres, M., & Guerrero, S. (2017). Assessing Impacts From Climate Change on Local Social-ecological Systems in Contexts Where Information is Lacking: An Expert Elicitation in the Bolivian Altiplano. *Ecological Economics*, 137, 70–82. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.03.003>
- Mendoza, W., y Cano, A. (2011). Diversidad del género *Polylepis* (Rosaceae, Sanguisorbeae) en los Andes peruanos. *Revista Peruana de Biología*, 18(2), 197–200.
- MINAM. (2015). Mapa nacional de cobertura vegetal: Memoria descriptiva/ Ministerio del Ambiente, Dirección general evaluación, valoración y financiamiento del patrimonio natural. Lima-Perú.
- MINAM. (2018). Mapa nacional de ecosistemas del Perú: Memoria descriptiva/ Ministerio del Ambiente, Dirección de monitoreo y de Evaluación de los recursos naturales del territorio. Lima-Perú.
- Morales, M. S., Christie, D. A., Villalba, R., Argollo, J., Pacajes, J., Silva, J. S., Soliz Gamboa, C. C. (2012). Precipitation changes in the South American Altiplano since 1300 AD reconstructed by tree-rings. *Climate of the Past*, 8(2), 653–666. <https://doi.org/10.5194/cp-8-653-2012>
- Moya, J., y Lara, A. (2011). Cronologías de ancho de anillos de queñoa (*Polylepis tarapacana*) para los últimos 500 años en el Altiplano de la región de Arica y Parinacota, Chile. *Bosque*, 32(2), 165-173.
- Olaya, V. (2009). Chapter 6 Basic Land-Surface Parameters. In T. Hengl y H. I. Reuter (Eds.), *Geomorphometry* (Vol. 33, pp. 141–169). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)00006-8](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)00006-8)
- Olaya, V., y Conrad, O. (2009). Chapter 12 Geomorphometry in SAGA. In T. Hengl y H. I. Reuter (Eds.), *Geomorphometry* (Vol. 33, pp. 293–308). Elsevier. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)00012-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)00012-3)
- Ordenanza Regional N° 016-2012-CR/GOB.REG.TACNA. (2013). Aprueban la Zonificación Ecológica y Económica de Tacna. Diario Oficial El Peruano, Lima, Perú, 18 de enero del 2013.
- R Core Team. (2019). R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna, Austria. Retrieved from <https://www.r-project.org/>

- Rau, P., Bourrel, L., Labat, D., Melo, P., Dewitte, B., Frappart, F., Felipe, O. (2017). Regionalization of rainfall over the Peruvian Pacific slope and coast. *International Journal of Climatology*, 37(1), 143–158. <https://doi.org/10.1002/joc.4693>
- Ríos, S. (1998) Estudio de la distribución y caracterización ecológica de las poblaciones locales de queñoa de altura (*Polylepis tarapacana* Phil.) en el sector de la provincia de Iquique. Tarapacá. Chile. Memoria Ing. Forestal. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. 61 pp.
- Ritter, B., Wennrich, V., Medialdea, A., Brill, D., King, G., Schneiderwind, S., ... Dunai, T. J. (2019). "Climatic fluctuations in the hyperarid core of the Atacama Desert during the past 215 ka." *Scientific Reports*, 9(1), 5270. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-41743-8>
- Sarricolea, P., Herrera-Ossandon, M., y Meseguer-Ruiz, Ó. (2017). Climatic regionalisation of continental Chile. *Journal of Maps*, 13(2), 66–73. <https://doi.org/10.1080/17445647.2016.1259592>
- Servat, G. P., Mendoza, W., y Ochoa, J. A. (2002). Flora y fauna de cuatro bosques de *Polylepis* (Rosaceae) en la cordillera de Vilcanota (Cusco, Peru). *Ecología Aplicada*, 1(1), 25–35.
- SIAR-Tacna. (2009). Elaboración de estudios técnicos para la definición de sitios prioritarios, análisis de conectividad y definición de indicadores de representatividad y conectividad – componente biodiversidad (I Informe). Sistema de Información Ambiental Regional (SIAR), Gobierno Regional de Tacna. Tacna-Perú
- Toivonen, J. M., Gonzales-Inca, C. A., Bader, M. Y., Ruokolainen, K., y Kessler, M. (2017). Elevational shifts in the topographic position of *Polylepis* forest stands in the Andes of Southern Peru. *Forests*, 9(1), 1–10. <https://doi.org/10.3390/f9010007>
- Tuía, D., Pasolli, E., y Emery, W. J. (2011). Using active learning to adapt remote sensing image classifiers. *Remote Sensing of Environment*, 115(9), 2232–2242. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.04.022>
- USGS. (2019). Earth Explorer, United States Geological Service. Recuperado de <https://earthexplorer.usgs.gov>
- Valdivia, C., Thibeault, J., Gilles, J. L., García, M., y Seth, A. (2013). Climate trends and projections for the Andean Altiplano and strategies for adaptation. *Advances in Geosciences*, 33, 69–77. <https://doi.org/10.5194/adgeo-33-69-2013>
- Valencia, B. G., Gosling, W. D., Bush, M. B., Coe, A. L., y Orren, E. (2018). *Polylepis* woodland dynamics during the last 20000 years, 1019–1030. <https://doi.org/10.1111/jbi.13209>
- Vicente-Serrano, S. M., Chura, O., López-Moreno, J. I., Azorin-Molina, C., Sanchez-Lorenzo, A., Aguilar, E., ... Nieto, J. J. (2015). Spatio-temporal variability of droughts in Bolivia: 1955–2012. *International Journal of Climatology*, 35(10), 3024–3040. <https://doi.org/10.1002/joc.4190>
- Yager, K., Valdivia, C., Slayback, D., Jimenez, E., Menezes, R., Palabral-Aguilera, A., ... Romero, A. (2019). Socio-ecological dimensions of Andean pastoral landscape change: bridging traditional ecological knowledge and satellite image analysis in Sajama National Park, Bolivia. *Regional Environmental Change*, 19, 1353–1369. <https://doi.org/10.1007/s10113-019-01466-y>
- Zutta, B. R., y Rundel, P. W. (2017). Modeled shifts in *Polylepis* species ranges in the Andes from the last glacial maximum to the present. *Forests*, 8(7), 1–16. <https://doi.org/10.3390/f8070232>
- Zutta, B. R., Rundel, P. W., Saatchi, S., Casana, J. D., Gauthier, P., Soto, A., ... Buermann, W. (2012). Prediciendo la distribución de *Polylepis*: bosques Andinos vulnerables y cada vez más importantes. *Revista Peruana de Biología*, 19(2), 205–212.