



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica

Escuela Profesional de Ingeniería Geográfica

**Determinación de zonas prioritarias para restauración
de bosques altoandinos en la Concesión para
Conservación Alto Huayabamba - CCAH, región San
Martín**

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Geógrafo

AUTOR

Marysol Yaneth MENDOZA QUIRÓZ

ASESOR

Walter Aparicio ARÉVALO GÓMEZ

Lima, Perú

2017



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Mendoza, M. (2017). *Determinación de zonas prioritarias para restauración de bosques altoandinos en la Concesión para Conservación Alto Huayabamba - CCAH, región San Martín*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Escuela Profesional de Ingeniería Geográfica]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA ✓

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO GEÓGRAFO

En el salón de Grados de la Escuela Profesional de Ingeniería Geográfica de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, el jueves 27 de abril del 2017, siendo las 17:30 horas, en presencia de los Señores Docentes designados como Jurado Calificador.

Dr. Cabrera Carranza, Carlos
Ing. Garnica Gonzáles, Luis
Ing. Quispe Vilchez, José Luis

Presidente
Miembro
Miembro

Reunidos en Acto Académico Público de Sustentación de la TESIS titulada: **"DETERMINACIÓN DE ZONAS PRIORITARIAS PARA RESTAURACIÓN DE BOSQUES ALTOANDINOS EN LA CONCESIÓN PARA CONSERVACIÓN ALTO HUAYABAMBA - CCAH, REGIÓN SAN MARTÍN"** presentada por la Bachiller MARYSOL YANETH MENDOZA QUIRÓZ, para optar el Título Profesional de Ingeniero Geógrafo. ✓

Expuesta la Tesis; los miembros del Jurado plantearon a la Bachiller las preguntas pertinentes, que fueron absueltas a: SATISFACCIÓN

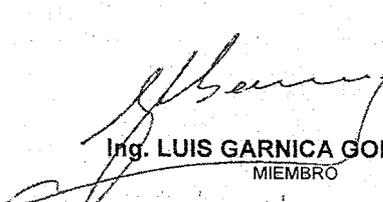
Concluida la sustentación de Tesis, el Jurado procedió a evaluar y calificar la calidad y sustentación en secreto, cuyo calificativo fue: SOBRESALIENTE (10)

Habiendo sido aprobada la Sustentación de la Tesis por el Jurado Calificador, el Presidente del Jurado recomienda que la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, otorgue el TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO GEÓGRAFO, a Doña MARYSOL YANETH MENDOZA QUIRÓZ.

Siendo las 6:00, se dio por concluido el acto académico, expidiéndose cinco (05) Actas Originales de la Sustentación de Tesis, firmadas por el Jurado Calificador.

Ciudad Universitaria, 27 de abril del 2017


Dr. CARLOS CABRERA CARRANZA
PRESIDENTE


Ing. LUIS GARNICA GONZÁLES
MIEMBRO


Ing. JOSÉ LUIS QUISPE VILCHEZ
MIEMBRO


Mg. WALTER ARÉVALO GÓMEZ
ASESOR DE TESIS

528
13
118
2

DEDICATORIA

A mis queridos padres, Vicente y Ana
por su apoyo incondicional en cada etapa de mi vida.

A mis inquietas hermanas Luz Maria, Alondra y Yamili
que me motivaron a seguir adelante siempre.

AGRADECIMIENTO

A los docentes de la EAP Ingeniería Geográfica que se esforzaron por entregarme sus conocimientos y experiencias. Especialmente a mi asesor, el Mg. Walter Arévalo Gómez por su consejos académicos que me permitieron concluir con esta investigación.

Al Directorio ejecutivo de la Asociación Amazónicas por la Amazonía – AMPA, Karina Pinasco y Miguel Tang por su motivación a iniciar esta investigación y especialmente al profesional en SIG, Hebert Castillo por impulsarme a esta aventura y permitirme aprender con él. A Marco Gutiérrez, Jefe de la CCAH, por alentarme durante el desarrollo de la investigación y a Arturo Cornejo, por brindarme su amistad en este largo camino. Al personal de AMPA que me acompañó durante las salidas de campo: Ramiro Valle, Jeremías Garro, Horacio Chiguaman, Sergio Rojas y Evert; por su valiosa compañía en rutas que nos ponen a prueba y a la vez nos llenan de alegría con solo contemplarlas. Gracias a ustedes que me permitieron descubrir unos cuantos secretos de la CCAH.

A mis brillantes colegas y amigos, Erick Rosales, Brian Velarde, Jorge Madge, Juan Miguel Huamán, Jorge Julca, Cesar Aybar y Jasson Fernández, por sus importantes apreciaciones y la oportunidad de descubrir juntos nuestra carrera profesional. A mis generosos amigos, Andres Madge y Jofe Lam por su colaboración en los últimos detalles de mi investigación.

A mis entusiastas amigas Katy Calderón y Cintia Huaracaya, futuras abogadas, ejemplares y correctas que me acompañaron en una de las etapas más bonitas de la vida: ser universitaria.

A la Oficina General de Bienestar Universitario por la beca de Residencia que me permitió conocer personas maravillosas, luchadoras y con ansias de conocimiento. Finalmente, a la Familia Huamán Yopla, especialmente a Erika y Walter, por su apoyo incalculable durante mi vida universitaria, por sus consejos y por haber sido un ejemplo de superación para mi.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|----|
| CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1 Situación Problemática | 1 |
| 1.2 Formulación del problema..... | 2 |
| 1.3 Justificación teórica..... | 3 |
| 1.4 Justificación práctica | 3 |
| 1.5 Objetivos..... | 3 |
| 1.5.1. Objetivo general | 3 |
| 1.5.2. Objetivos específicos | 4 |
| CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO | 5 |
| 2.1 Marco filosófico o epistemológico de la investigación | 5 |
| 2.2 Antecedentes | 6 |
| 2.3 Bases teóricas | 16 |
| 2.3.1 Concesión para Conservación Alto Huayabamba | 16 |
| 2.3.2 Bosques altoandinos | 22 |
| 2.3.3 Restauración ecológica | 27 |
| 2.3.4 Biogeografía | 30 |
| 2.3.5 Ecología del paisaje | 30 |
| 2.3.6 Teledetección espacial..... | 38 |
| 2.3.7 Satélite RapidEye. | 44 |
| 2.3.8 Modelo Digital de Elevación – MDE | 46 |
| 2.3.9 Datos climáticos (WorldClim) | 51 |
| 2.3.10 Sistemas de información geográfica. | 52 |
| 2.3.11 Modelos de distribución | 53 |
| 2.3.12 Evaluación Multicriterio | 55 |
| 2.3.13 MaxEnt..... | 59 |
| 2.4 Bases Conceptuales | 65 |

| | |
|--|-----|
| CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA | 66 |
| Etapa 1: Recopilación de antecedentes y visitas de campo. | 68 |
| Etapa 2: Procesamiento de la información digital..... | 69 |
| Variables topográficas (MDE) | 69 |
| Variables bioclimáticas (Worldclim)..... | 70 |
| Imágenes satelitales RapidEye | 71 |
| Etapa 3. Construcción de modelos y validación. | 71 |
| CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 74 |
| 4.1 Análisis, interpretación y discusión de resultados | 74 |
| 4.3 Presentación de resultados..... | 76 |
| Etapa 1: Intervención humana en la distribución actual. | 76 |
| Etapa 2: Información digital utilizada..... | 81 |
| Etapa 3: Evaluación de modelos y validación. | 84 |
| CONCLUSIONES..... | 93 |
| RECOMENDACIONES..... | 94 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 95 |
| ANEXOS | 104 |

LISTA DE CUADROS

| | |
|--|----|
| Cuadro 1. Especies de Polylepis halladas en la CCAH..... | 8 |
| Cuadro 2. Características generales de la ubicación de las parcelas. | 11 |
| Cuadro 3. Composición florística de los bosques altoandinos de la CCAH según el IVI..... | 12 |
| Cuadro 4. Sistemas ecológicos terrestres de la CCAH. | 18 |
| Cuadro 5. Unidades fisiográficas de la CCAH..... | 19 |
| Cuadro 6. Unidades climáticas de la CCAH..... | 20 |
| Cuadro 7. Zonas de Vida en la CCAH. | 20 |
| Cuadro 8. Grado de acuerdo de Landis y Koch. | 44 |
| Cuadro 9. Rango espectral del sensor RapidEye. | 44 |
| Cuadro 10. Características principales del instrumento PALSAR. | 49 |
| Cuadro 11. Descripción de las 19 variables bioclimáticas descritas por Busby en 1991. | 52 |
| Cuadro 12. Misión ALOS PALSAR. Adquisiciones ALOS PALSAR producto Hi-Res Terrain Corrected. | 69 |
| Cuadro 13. Variables ambientales consideradas en la presente investigación. | 73 |
| Cuadro 14. Puntos levantados en la Cuenca del río Chunchoyacu. | 77 |
| Cuadro 15. Pisos altitudinales | 81 |
| Cuadro 16. Rangos de pendiente. | 81 |
| Cuadro 17. Dirección de la pendiente. | 82 |
| Cuadro 18. Zonas de Vida en la CCAH. | 83 |
| Cuadro 19. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada en la CCAH... | 83 |
| Cuadro 20. Valor ecológico en la CCAH. | 84 |
| Cuadro 21. Porcentaje de contribución de las variables. | 88 |
| Cuadro 22. Umbrales logísticos y las correspondientes tasas de omisión. .. | 90 |
| Cuadro 23. Distribución potencial en la CCAH..... | 91 |
| Cuadro 24. Criterios utilizados para la determinación de las zonas prioritarias para restauración..... | 91 |
| Cuadro 25. Nivel de prioridad de las zonas potenciales..... | 92 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Ubicación de <i>Polylepis</i> spp. en la CCAH. <i>Fuente.</i> Flores y otros (2009). | 9 |
| Figura 2. Imágenes de <i>P. multijuga</i> . <i>Fuente.</i> Flores, C. y otros. 2009. | 13 |
| Figura 3. Distribución de <i>P. multijuga</i> Pilger. <i>Fuente.</i> Mendoza, W. y Asunción C. 2012. | 15 |
| Figura 4. Ubicación geográfica de la CCAH. <i>Fuente.</i> Elaboración propia. ... | 17 |
| Figura 5. Modelo que representa los posibles estados de restablecimiento de un ecosistema degradado. <i>Fuente.</i> González, M. (2014). Modificado de Bradshaw (1987) | 29 |
| Figura 6. La compleja diversidad de disciplinas que ayudan a configurar la ecología del paisaje y su vocación holística. <i>Fuente.</i> Vila, J.; Varga, D.; Llausàs, A. y Ribas, A. (2006). | 32 |
| Figura 7. Componentes del paisaje. <i>Fuente.</i> Moreno, A. 2014. | 35 |
| Figura 8. Proceso de fragmentación. <i>Fuente:</i> Moreno, A. 2014. | 36 |
| Figura 9. Sensibilidad de reflectancia en la banda red - edge según la vegetación. <i>Fuente.</i> Weichelt H. y otros. 2014. | 45 |
| Figura 10. Satélite "Advanced Land Observing Satellite - ALOS". <i>Fuente.</i> (Mayorga, T. 2011). | 48 |
| Figura 11. Elementos necesarios para definir un modelo de distribución de especies. <i>Fuente.</i> Reguerin J. 2012. | 55 |
| Figura 12. Modelo espacial de integración. <i>Fuente.</i> Elaboración propia, adaptado de Faúndez, M. (2014). | 58 |
| Figura 13. Combinación de valores para selección de áreas potenciales. <i>Fuente.</i> Elaboración propia, adaptado de Faúndez (2014). | 59 |
| Figura 14. Interfaz gráfica del software MaxEnt 3.3.3k. | 61 |
| Figura 15. Curva ROC - Característica Operativa del Receptor. <i>Fuente.</i> Reguerin, J. 2012. | 63 |
| Figura 16. Estructura Metodológica. <i>Fuente.</i> Elaboración propia. | 67 |
| Figura 17. Datos de presencia. | 78 |
| Figura 18. Imagen de Google Earth mostrando el impacto antrópico en la Cuenca del río Chunchoyacu. | 79 |
| Figura 19. Focos de calor en la CCAH para el período 2001 – 2015. <i>Fuente.</i> Elaboración propia. | 80 |
| Figura 20. Variación anual de Focos de calor en la CCAH para el período 2001 – 2015. <i>Fuente.</i> Elaboración propia. | 80 |
| Figura 21. Análisis del Área por Debajo de la Curva – AUC. <i>Fuente.</i> Resultados del Software MaxEnt. | 85 |
| Figura 22. Curvas de respuesta de las variables ambientales utilizadas para generar el modelo de distribución potencial de Bosques Altoandinos (<i>P. multijuga</i>). La columna de izquierda tiene en cuenta el efecto de todas las variables y la columna de la derecha tiene en cuenta solo el valor de la variable correspondiente. | 87 |
| Figura 23. Resultados de la prueba de jackknife para variables de importancia de <i>P. multijuga</i> (MaxEnt). | 89 |
| Figura 24. Mapa de probabilidad de distribución para bosques altoandinos (<i>P. multijuga</i>) obtenido a través del programa MaxEnt. | 89 |

LISTA DE ANEXOS

| | |
|---|-----|
| Anexo 1. Fotografías de la visita de campo. | 104 |
| Anexo 2. Mapas temáticos..... | 112 |
| Anexo 3. Mapa de las 19 Variables bioclimáticas. | 114 |
| Anexo 4. Mapa de distribución potencial de bosques altoandinos. | 119 |
| Anexo 5. Mapa de zonas prioritarias para restauración de bosques altoandinos. | 120 |

RESUMEN

Los bosques altoandinos, caracterizados por la predominancia de especies del género *Polylepis*, son un ecosistema de vital importancia para la conservación y regulación del recurso hídrico; tienen la capacidad de capturar carbono; y son el hábitat de una amplia variedad de especies endémicas de flora y fauna. Según algunas hipótesis, la distribución natural de estos bosques cubría la mayor parte de las montañas andinas. Sin embargo, en la actualidad son un ecosistema disperso y fragmentados a consecuencia de la intervención antrópica, acentuándose durante el último siglo por la tala de árboles para uso como leña, construcción de cercos y viviendas; la creación de parcelas agrícolas y el pastoreo extensivo, actividades que muchas veces viene acompañado de quemas sin control.

En la Concesión para Conservación Alto Huayabamba – CCAH, administrada por la Asociación Amazónicas por la Amazonía – AMPA, se han encontrado presencia de bosques altoandinos con predominancia de *P. multijuga*, especie primitiva y endémica de los andes del norte, que está en situación Vulnerable (VU) según la Lista Roja de Especies de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza - UICN y En Peligro (EN) según la lista de especies amenazadas del Perú. En este sentido, se consideró necesario restaurar el ecosistema, identificando las áreas prioritarias para restauración del ecosistema, que serán consideradas como zonas piloto para hacer experimentos en campo de plantaciones con *P. multijuga* y la vegetación asociada a los bosques altoandinos; permitiendo recuperar los beneficios ambientales que brindan.

Para el desarrollo del primer objetivo se analizaron los focos de calor que muestran una tendencia a disminuir en el período 2011-2015, lo cual denota la voluntad de las personas a disminuir las quemas y por ende, realizar actividades económicas más sostenibles. El segundo objetivo requirió de las variables topográficas (altitud, pendiente y orientación) provenientes del Modelo Digital de Elevación “ALOS PALSAR”, el mapa de zonas de vidas de Holdridge, y las variables bioclimáticas descargadas del repositorio Worldclim; sumado a los 37 puntos de presencia de la especie *P. multijuga*.

Las cuales fueron procesados en el software MaxEnt, a fin de determinar las zonas con características topográficas y bioclimáticas similares que pueden ser interpretadas como zonas potenciales para restauración de dicho ecosistema. Logrando identificar las siguientes variables ambientales que restringen en mayor medida la distribución de esta especie: la Precipitación del trimestre más caliente (bio18); las zonas de vida de Holdridge y la altitud. Para el tercer objetivo, evaluamos la confiabilidad del modelo con el estadístico AUC (Área bajo la curva) que es igual a 0.948 lo cual indica una excelente capacidad predictiva. El resultado es un mapa digital de probabilidad de distribución de bosques altoandinos en el que utilizamos el umbral 10 percentile training presence, y obtenemos que el 18% (26,483 ha) de la superficie de la CCAH presenta características adecuadas para el desarrollo del ecosistema. Ahora, es importante diferenciar que dentro del 18% existen zonas cubiertas por bosque actualmente, definidas como zonas con distribución potencial actual equivalente al 8% (11,881 ha), y el restante 10% (14,602 ha) viene a ser la distribución con potencial para restauración, pues es área que en la actualidad carece de cobertura boscosa.

A partir del segundo porcentaje hallado, utilizamos las capas de Índice de Vegetación NDVI y la de Valor Ecológico para obtener zonas que según criterios de importancia, son más beneficiosos al ser restaurados. Obteniendo que la superficie total de Alta prioridad equivale al 1.5% (1,810 ha) de la CCAH; un 9% (12,228 ha) tiene prioridad Media y un 0.5% (608 ha) prioridad Baja. En cuanto a la distribución de estas zonas, observamos que tiende a disminuir de norte a sur. Los resultados nos permiten recomendar el software MaxEnt para futuras investigaciones de distribución espacial de flora y fauna en situación de amenaza; así como la elaboración de una base de datos con puntos de ubicación de las especies a estudiar. Finalmente, se recomienda iniciar ensayos de técnicas de restauración adecuadas en campo, comenzando en las zonas con Alto nivel de prioridad.

Palabras clave: Bosque altoandino. Distribución potencial. Restauración de ecosistemas.

ABSTRACT

High Andean forests, characterized by the predominance of species of *Polylepis* genus, are an ecosystem of vital importance for conservation and regulation of the hydric resource; they have the ability to capture carbon, and are the habitat of a wide variety of endemic species of flora and fauna. According to some hypothesis, the natural distribution of this forests covered most part of the Andean mountains. Nevertheless, they are now fragmented ecosystem as a result of anthropic intervention, accentuating during the last century by the felling of trees for use as firewood, construction of fences and houses, the creation of agricultural plots and extensive grazing, activities that are often accompanied by uncontrolled burning.

In the Alto Huayabamba Conservation Concession - AHCC, administered by Amazónicos por la Amazonia – AMPA Association, have been found presence of High Andean forests with predominance *P. multijuga*, primitive and endemic specie of the northern Andes, which is in Vulnerable Situation (VU) according to the Red List of Species of the International Union for the Conservation of the Nature - IUCN and In Peril (EN) according to Peru. In this sense, it was considered necessary to identify the priority areas for restoration of the ecosystem, which will be considered as pilot zones for experiments in field of plantations with *P. multijuga* and vegetation associated with High Andean forests, allowing the recovery of the environmental benefits provided by.

For the development of the first objective were analyzed heat sources that show a tendency to decrease in the period 2011-2015, which denotes the will of the people to reduce the burning and therefore, to carry out more sustainable economic activities. The second objective required the topographic variables (altitude, slope and orientation) from the Digital Elevation Model “ALOS PALSAR”, the life map of Holridge and bioclimatic variants downloaded from the Worldclim repository, added to the 37 points of presence of *P. multijuga* specie, which were processed in the MaxEnt

software, in order to determine the zones with similar topographic and bioclimatic characteristics that can be interpreted as potential zones for restoration of this ecosystem. Achieving to identify the following environmental variables that more restricts the distribution of this species: the precipitation of the hottest quarter (bio18), the Holridge life zones and altitude. For the third objective, we evaluate reliability of the model with the AUC (Area Under Curve) statistic that is equal to 0.948 which indicates an excellent predictive capacity. The result is a digital probability distribution map of High Andean forests in which we use the threshold 10 percentile training presence and we obtain that the 18% (26,483 ha) of the area of the Alto Huayabamba Conservation Concession presents characteristics suitable for development of the ecosystem. Now, it is important to differentiate that within 18% (11,881 ha), and the remaining 10% (14,602 ha) is the distribution with potential for restoration, because it is an area that currently lacks forest cover.

From the second percentage found, we used the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Ecological Value layers to obtain zones that, according to importance criteria, are more beneficial to be restored. Using a geographic information system, we quantify the results and obtain that the total surface of high priority corresponds to 1.5% (1,810 ha) of the Alto Huayabamba Conservation Concession; 9% (12,228 ha) has a medium priority level and a 0.5% (608 ha) a low priority level. As the location or spatial distribution of these areas, we observe that it tends to decrease from north to south. The results allow us to recommend MaxEnt software for future research on spatial distribution of threatened flora and fauna. As well, the elaboration of a database with points of location of the species to be studied. Finally, it is recommended to start trials of suitable restoration techniques in the field, beginning in areas with high priority level.

Keywords: High Andean forests. Potential distribution. Restoration of ecosystems.

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Situación Problemática

En los últimos años, la distribución natural de los bosques andinos, especialmente los bosques de *Polylepis*, se ha visto alterada como consecuencia de la actividad humana. Algunas hipótesis indican que estos bosques, originalmente cubrían la mayor parte de las montañas andinas, pero la tala de árboles, para uso energético; ampliación de la frontera agrícola y por el pastoreo extensivo (Huerta, 2005) han generado la fragmentación de los bosques y ahora encontramos entre ellos un mosaico de parcelas agrícolas y ganaderas (MINAM, 2015).

Si bien la extensión forestal en la región andina es reducida (en comparación con la amazónica), no lo son las características de diversidad biológica ni el grado de endemismo (Kómetter, 2011). Agregando a ello que, la conservación de los bosques altoandinos es fundamental en la provisión de servicios ecosistémicos principalmente vinculados con el ciclo del agua y la regulación climática regional (Gálmez V. y Kómetter R., 2009) principalmente por encontrarse en zonas de cabecera de cuenca.

En la Concesión para Conservación Alto Huayabamba, cabecera de cuenca del río Huayabamba, encontramos las comunidades arbóreas dominadas por

especies del género *Polylepis* spp. (*P. multijuga*, *P. reticulata* y *P. racemosa*), representativas de los altos Andes. Siendo la especie predominante, *P. multijuga* considerada también como especie primitiva y endémica de los andes del norte, que está en situación Vulnerable (VU) según la Lista Roja de Especies de la UICN y En Peligro (EN) según la lista de especies amenazadas del Perú. En este sentido, se consideró necesario restaurar el ecosistema por los servicios ambientales que brinda y por ser de utilidad para la población de la zona.

1.2 Formulación del problema

En vista de la situación problemática, es necesario identificar las áreas donde potencialmente se distribuye la especie *P. multijuga* utilizando el principio de máxima entropía del software MaxEnt, y a partir de ello, las zonas prioritarias de restauración que sirvan para hacer experimentos en campo de plantaciones con *P. multijuga* y la vegetación asociada a los bosques altoandinos; por lo que la pregunta de investigación es ¿Qué porcentaje de la superficie en la Concesión para Conservación Alto Huayabamba – CCAH, región San Martín, son zonas prioritarias de restauración de bosques altoandinos?

A partir del cual se establecen las siguientes preguntas específicas de investigación:

1. ¿Cuáles son las variables sociales que se relacionan espacialmente al ecosistema de bosques altoandinos (*P. multijuga*) de la CCAH, región San Martín?
2. ¿Cuáles son las variables topográficas y bioclimáticas más importantes para el desarrollo de los bosques altoandinos (*P. multijuga*) de la CCAH, región San Martín?
3. ¿Cómo se delimitará la distribución potencial de bosques altoandinos (*P. multijuga*) en la CCAH, región San Martín?

1.3 Justificación teórica

El presente trabajo de investigación puede ser considerado *sui generis* debido a que es la primera vez que se establece la línea de base para restauración ecológica de bosques altoandinos (*P. multijuga*) en la CCAH mediante el uso del software MaxEnt, debido principalmente al desconocimiento de los beneficios ambientales que genera este ecosistema.

1.4 Justificación práctica

La importancia de determinar las zonas prioritarias de restauración de bosques altoandinos en la Concesión para Conservación Alto Huayabamba, radica principalmente en:

- Evaluar la confiabilidad del software MaxEnt en la determinación de las características ambientales más importantes de ecosistemas amenazados en procesos de restauración.
- Profundizar en la caracterización y funcionamiento de los bosques altoandinos (*P. multijuga*) en la Concesión para Conservación Alto Huayabamba – CCAH de la región San Martín.
- Conocer la superficie y distribución de este ecosistema que en la actualidad ha cobrado importancia por incluirse dentro de los mecanismos de financiamiento REDD+ (Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación).

1.5 Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Determinar el porcentaje de zonas prioritarias para restauración del ecosistema de bosques altoandinos (*P. multijuga*) en la Concesión para Conservación Alto Huayabamba – CCAH, región San Martín.

1.5.2. Objetivos específicos

1. Describir las variables sociales que se relacionan espacialmente a los bosques altoandinos (*P. multijuga*) en la CCAH, región San Martín.
2. Identificar las características topográficas y bioclimáticas más importantes para el desarrollo de los bosques altoandinos (*P. multijuga*) en la CCAH, región San Martín.
3. Delimitar la distribución potencial de bosques altoandinos (*P. multijuga*) en la CCAH, región San Martín mediante el uso del software MaxEnt.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1 Marco filosófico o epistemológico de la investigación

El medio ambiente es un sistema complejo y dinámico de interrelación ecológica, socioeconómica y cultural en la cual se ha insertado el hombre a través del proceso de evolución histórica de la sociedad. Es en este proceso de inserción, en la que el hombre ha modificado su espacio natural y ha llevado a degradar áreas, extinguir especies o colocarlas en alguna situación de amenaza (Mateo, 2000).

Como una forma de contrarrestar los impactos negativos se propuso el desarrollo sostenible, como una nueva ética global, promoviendo una serie de valores comunes como son la paz, solidaridad, equidad, tolerancia, respeto por los derechos humanos; sin embargo, el gran desafío actual es como poner en práctica la ética y los valores y adaptarlas al cambio generando una conciencia crucial a nuestras relaciones como seres humanos frente a la naturaleza (Chamie, 2004).

El mundo en que vivimos es sistémico. Se caracteriza por la existencia de formaciones interrelacionadas, en las que los diferentes elementos relacionados entre sí forman un todo único e íntegro, que se distingue de su medio, y se relaciona con él. Por ello, buscar el bien común para la humanidad significa proteger los derechos inalienables de todas las personas, promover el bienestar y la prosperidad de la sociedad,

asegurando la paz y la convivencia entre los hombres y entre estos y la naturaleza. Estudiando esta relación hombre – naturaleza, a través de la ecología del paisaje, se busca explicar los cambios antropogénicos del medio natural y de las reacciones de respuesta del medio en su conjunto y de sus componentes a los impactos antropogénicos (Mateo, 2000).

Es así que una de las estrategias de conservación del medio ambiente, es la necesidad de priorizar áreas para conservación o restauración de ecosistemas degradados. Logrando realizarse a través del enfoque de modelación de nicho ecológico, que nos permite localizar sitios donde la especie en cuestión se puede distribuir potencialmente.

2.2 Antecedentes

Hace más de dos siglos se empezó con la descripción del género *Polylepis*, especie característica de los bosques altoandinos, por Ruiz y Pavon (1794) quienes caracterizaron la especie racemosa (Dourojeanni, 2008), presente en la provincia de Tarma (Huerta, 2005). Mientras que en el Perú recién en el año 2005 se sistematizó la información de bosques andinos que incluye a los bosques altoandinos, referentes a su distribución en el territorio nacional. Definiendo que los bosques andinos se encuentran en un rango altitudinal de 1000 msnm para la vertiente occidental y 2000 msnm para la vertiente oriental, lo que abarca una superficie aproximada de 44 millones de hectáreas (Huerta, 2005).

Sin embargo, el mapa final elaborado por Huerta (2005) sólo muestra la distribución espacial (representada en puntos), pero no el área que ocupan. Esta información proviene de estudios realizados por la que fue la Oficina Nacional de Recursos Naturales - ONERN, desde la década de los años 70 en la que realizó los inventarios y evaluación de los recursos naturales de la costa y los andes del Perú (Huerta, 2005), además se consideró estudios de tesis de pre y postgrado en temas de distribución de bosques de *Polylepis*, en los departamentos de Lima, Ancash, Cusco, Cajamarca y para todo el

país a diferentes escalas.

El reciente conocimiento de la importancia de los bosques altoandinos ha llevado a considerarlos como elementos naturales importantes de ser identificados con mayor detalle a nivel nacional, siendo mapeados en unidades mínimas de 5 Ha, en el informe final del proyecto dinámicas de los cambios de la tierra – Comunidad Andina realizado por el MINAM (2014a), asignándole un código provisional en la Leyenda CORINE Land Cover del Perú, hasta que ésta se desarrolle y lo incorpore de forma expresa en niveles de mayor detalle. Es importante considerar que a esta escala, se pierde información de los parches menores a 5 Ha.

La investigación se desarrolló en el ámbito de la Concesión para Conservación “Alto Huayabamba” (CCAH), que cuenta con una superficie de 143,928.09 ha y se encuentra ubicada en el departamento de San Martín, provincia Mariscal Cáceres y distrito Huicungo. Abarca 04 microcuencas que representan el 12% de la superficie total de la sub cuenca del río Huayabamba en su parte alta o cabecera, representando a uno de los principales tributarios del río Huallaga, sobre todo en época de estiaje. Asimismo, la CCAH abarca las Eco Regiones de Páramos de la Cordillera Central y Bosques Montanos - Yungas Peruanas ubicadas en la Vertiente Oriental de los Andes - Amazonía Peruana (AMPA, 2008).

Siendo estos dos ecosistemas los que permiten la existencia de una zona transicional entre el bosque (yungas) y el páramo. En la cual se mezclan algunos elementos arbustivos, pero se diferencian en que los bosques altoandinos pueden aparecer como parches aislados más o menos distantes del límite forestal continuo, cuya composición leñosa es menos diversa y están asociados a “refugios post-glaciales” (Llambí, 2015) en zonas más altas y secas. Esta Zona de Transición Bosque – Páramo es altamente dinámica; sin embargo, se ha identificado que los patrones de transición están fuertemente influenciados por las variables climáticas y topográficas, la radiación, el relieve y la exposición de la pendiente, entre otros (Sarmiento y

León, 2015).

Durante los primeros estudios realizados desde junio del 2008 hasta abril del 2009 sobre la presencia y estado de individuos y bosques de *Polylepis* en la CCAH se determinó la presencia de dos especies de *Polylepis*: *P. multijuga* y *P. reticulata* formando rodales naturales dentro de la CCAH, mientras que una tercera especie (*P. racemosa*) se encontró en forma arbustiva creciendo al lado de un refugio de pastores y parece haber sido plantada en dicho lugar (3320 msnm) (ver Cuadro 1). *P. multijuga* es una especie que crece en rodales mixtos asociado a los bosques ribereños y sobre laderas en sitios húmedos arriba de los 3000 metros de altitud (Flores y otros, 2009). Además, se elaboró un mapa con la ubicación de los individuos y rodales encontrados durante dicha evaluación (Figura 1).

Cuadro 1. Especies de *Polylepis* halladas en la CCAH.

| N° | Especie. Breve Descripción |
|-----------|--|
| 1 | <i>P. multijuga</i> Pilg. Hoja imparimpinada con 12 - 16 foliolos (en adición al foliolo terminal); borde aserrado semejante a diente de sierra circular. Inflorescencia 15 – 25 cm de longitud, conspicuamente pendular. En rodales mixtos, común a lo largo del llano aluvial de ríos y quebradas, frecuente creciendo a sus orillas; también sobre sitios húmedos de laderas, alejada de cursos de agua. Esta especie es considerada En Peligro (EN) en el Perú y según la Lista Roja de Especies de la UICN está categorizada como Vulnerable (VU). |
| 2 | <i>P. reticulata</i> H.B.K. Hoja imparipinada, mayormente 5 foliolos; borde entero. Inflorescencia 10 – 15 cm de longitud, pendular. Se la ha ubicado en un rodal monodominantes a los 3800 m de altitud en una ladera muy húmeda al borde de una laguna. Esta especie no está categorizada en el Perú, pero según la Lista Roja de Especies de la UICN está categorizada como Vulnerable (VU). |
| 3 | <i>P. racemosa</i> Ruiz & Pav. Hoja trifoliada; borde suavemente dentado, ondulado a primera vista. Los individuos de esta especie se han encontrados en una sola localidad, todos ellos tienen porte arbustivo con varias ramas que nacen desde la base y porte no mayor a 1.3 metros. No hay signos de floración; las matas son continuamente ramoneadas por ganado vacuno que pasta en el área. Esta especie es considerada en En Peligro (EN) en el Perú y según la Lista Roja de Especies de la UICN está categorizada como Vulnerable (VU). |

Fuente. Datos tomados de Flores, C. y otros 2009.

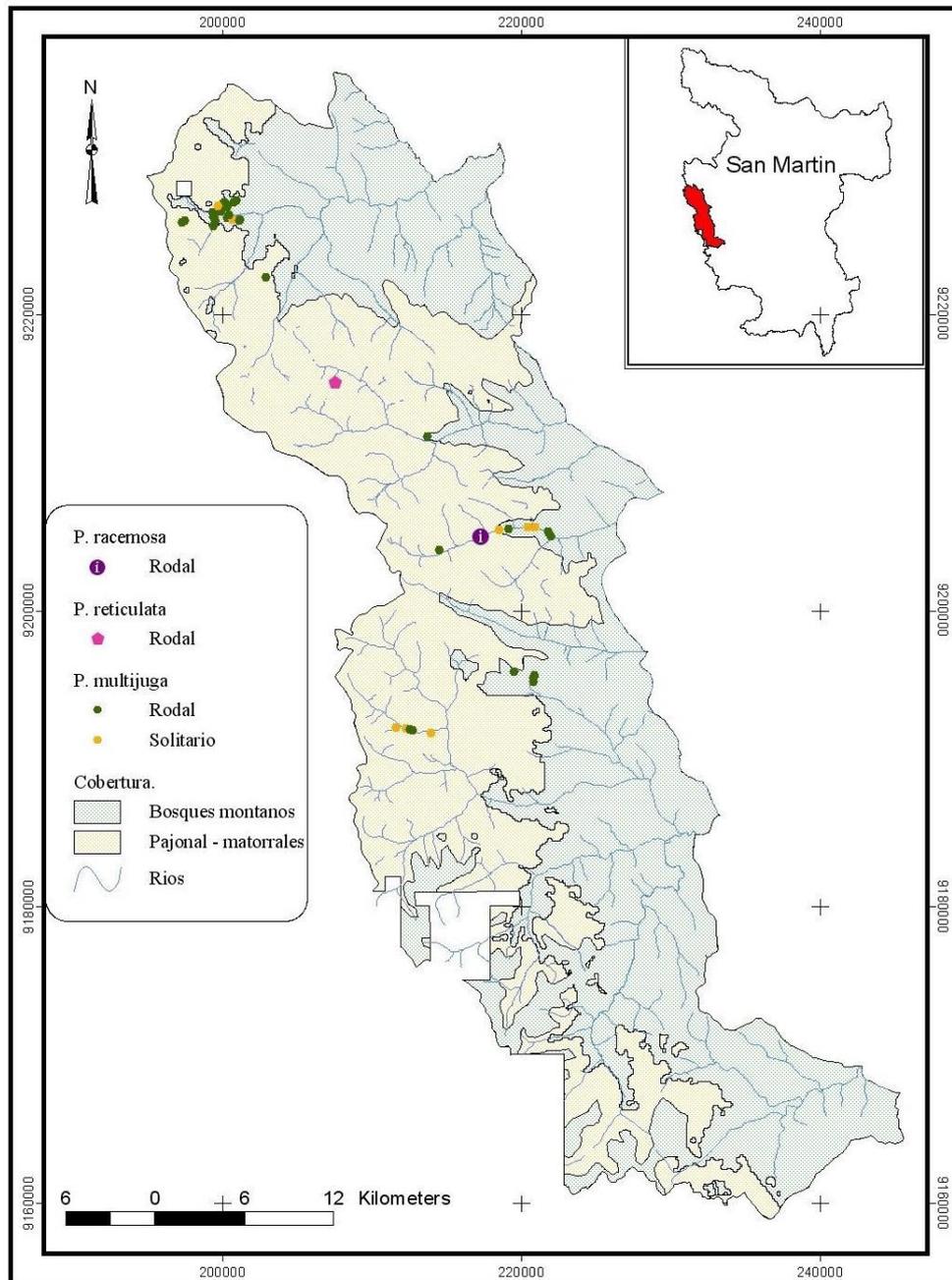


Figura 1. Ubicación de *Polylepis* spp. en la CCAH. Fuente. Flores y otros (2009).

Para estudios detallados de la composición florística de los bosques altoandinos, se delimitaron parcelas rectangulares con áreas de 0.1 a 0.5 ha; identificando las especies predominantes (Flores y otros, 2009; Cruzado, 2010). La ubicación de cada parcela fue determinada con un receptor GPS.

Se utilizó el modelo Garmin Etrex Legend, que suele tener un error (según las especificaciones del fabricante) de 15 metros en sentido horizontal y 50 metros en la vertical (altitud). Consecuente a ello, se buscó fijar posiciones cuando el error indicado por el receptor era menor a 17 metros; por lo general la mayoría de los puntos se grabaron con errores menores a 12 metros y una recepción con más de 6 satélites (Cruzado, 2010).

Las parcelas I, II, III, IV han sido estudiadas por Flores y otros (2009) y las parcelas Encañada, Nochapio y Tragadero por Cruzado (2010). En dichas parcelas se determinó que los bosques altoandinos se desarrollan a lo largo de las riveras de los ríos, lagunas y sitios húmedos, donde se da inicio a la ceja de selva (Cruzado, 2010). Encontrándose evidencia de que la floración, dispersión y germinación siguen siendo procesos que ocurren de manera espontánea, debido a que se observaron plántulas de *P. multijuga* a lo largo de caminos y ríos (Flores y otros, 2009). En un rango altitudinal que puede ir desde los 3073 hasta los 3479 msnm y otros datos de composición florística general que se detalla en el Cuadro 2.

A partir del estudio en cada parcela se profundizó en la determinación de la composición florística de los bosques altoandinos de la CCAH (Cruzado, 2010), según el IVI (Índice de Valor de Importancia simplificado), el cual se calcula en base a la abundancia relativa (porcentaje de individuos de una especie en la parcela) y dominancia relativa (porcentaje del área basal de una especie en la parcela) de las especies, según la siguiente fórmula:

$$\text{IVI} = \text{AR} + \text{DR}$$

Donde:

AR: Abundancia relativa (%)

DR: Dominancia relativa (%)

Cuadro 2. Características generales de la ubicación de las parcelas.

| Parcela | Datum WGS 84, UTM Z 18 | Altitud (msnm) | Forma del terreno | Composición Florística General |
|-----------|------------------------|----------------|-------------------------------------|--|
| I | E 221630 N 9205495 | 3073 | Terraza aluvial – pie de ladera. | Bosque Mixto de <i>Polylepis</i> ; distinguible por la mayor presencia de queñuas. |
| II | E 221025 N 9205524 | 3100 | Terraza aluvial. | Bosque Mixto de <i>Polylepis</i> ; distinguible por la mayor presencia de queñuas. |
| III | E 220957 N 9205522 | 3100 | Terraza aluvial. | Bosque Mixto de <i>Polylepis</i> ; la mayoría de otras especies han sido eliminadas en el raleo. |
| IV | E 214606 N 9204019 | 3479 | Depresión en ladera media de valle. | Bosque Mixto de <i>Polylepis</i> . |
| Encañada | E 199493 N 9225952 | 3210 | Pendientes abiertas. | Bosque Mixto de <i>Polylepis</i> ; distinguible por la mayor presencia de queñuas. |
| Nochapio | E 201690 N 9224304 | 3335 | Pendientes abiertas. | Bosque Mixto mayor presencia de Lollove, especie de la familia Melastomatácea. |
| Tragadero | E 221399 N 9194052 | 3251 | Colina de pendiente moderada. | Bosque Mixto mayor presencia de Llamanche y Chachacomo. |

Fuente. Modificado de Flores, C. y otros. 2009; y Cruzado, L. 2010.

Determinando con ello que, los bosques altoandinos de la CCAH muestran una vegetación bastante diversificada (ver Cuadro 3), siendo la especie predominante y más importante en el área, *P. multijuga* (37%); le sigue una población importante de helechos arbóreos del género *Cyathea* (35%), el cual presenta varias especies endémicas en los bosques húmedos montanos y premontanos del centro y sur del Perú; además, otra especie importante y característica de los bosques altoandinos es la del género *Escallonia sp.* (20%), conocido por los pobladores como Chachacomo;

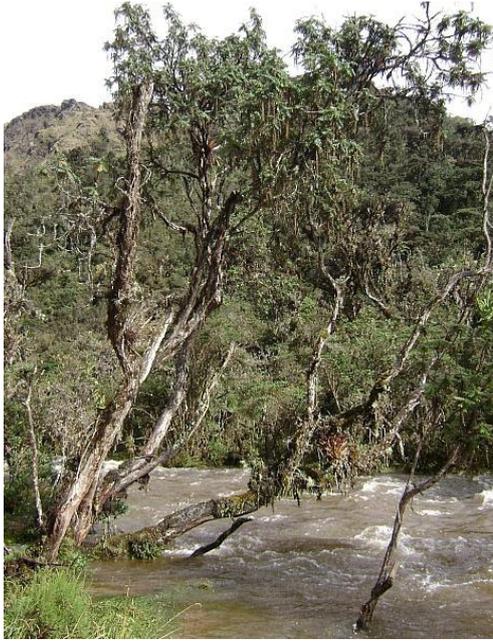
también encontramos una población importante de *Gynoxys sp.* (17%), cuyo nombre común es Llamanche.

Cuadro 3. Composición florística de los bosques altoandinos de la CCAH según el IVI.

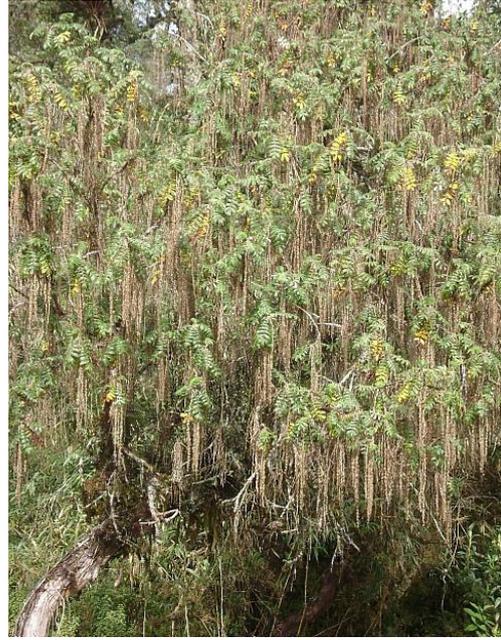
| Familia | Nombre Científico | Nombre Común | N° Ind | AB (m ²) | A (%) | D (%) | IVI (%) |
|------------------|-----------------------|-----------------|--------|----------------------|-------|-------|---------|
| Rosaceae | <i>P. multijuga</i> | Quinua | 228 | 16.1 | 13.3 | 23.8 | 37.0 |
| Cyatheaceae | <i>Cyathea sp.</i> | Helecho arbóreo | 373 | 8.8 | 21.7 | 13.0 | 34.8 |
| Rosaceae | <i>Escallonia sp.</i> | Chachacomo | 110 | 9.3 | 6.4 | 13.8 | 20.2 |
| Asteraceae | <i>Gynoxys sp.</i> | Llamanche | 157 | 5.6 | 9.1 | 8.2 | 17.4 |
| Meslastomataceae | Sp1 | - | 132 | 2.8 | 7.7 | 4.1 | 11.8 |
| Cunoniaceae | <i>Weinmannia sp.</i> | Perejil | 80 | 4.0 | 4.7 | 5.9 | 10.6 |

Fuente. Modificado de Cruzado, L. 2010.

Es así que en esta investigación nos centraremos principalmente en la especie *P. multijuga* (Figura 2) por ser endémico del Perú (León y Mendoza, 2006) y característico de las zonas de transición o línea superior de bosques de neblina, encontrándose ambos tipos de bosque alrededor de los 3500 msnm, con una zona intermedia de 100-200 m. de diferencia (Kessler, 2006). Estando además considerada como especie Vulnerable (V) según la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (<http://www.iucnredlist.org/>) y según la clasificación peruana vigente está En Peligro (EN). Siendo la quema descuidada en los pajonales, que genera incendios no deseados en los bosques remanentes y la tala para transformación en potreros de ganado vacuno; las principales actividades a las que están sometidos los rodales encontrados en la CCAH (Flores y otros, 2009).



a) Hábito de crecimiento



b) Copa en floración



c) Inflorescencia



d) Hojas

Figura 2. Imágenes de *P. multijuga*. Fuente. Flores, C. y otros. 2009.

Al centrarnos en una especie endémica, se tiene que considerar un mayor riesgo de extinción debido a la endogamia y la reducción de su capacidad de

adaptación a nuevas condiciones creadas por el cambio climático. Debido principalmente a que las especies endémicas tienen baja diversidad genética, poca población y distribución limitada (Quinteros, 2010). Sin embargo, en cuanto al estado actual de distribución, Quinteros (2010) resalta que no se conoce en qué medida la fragmentación pudo haber sido causada por los seres humanos en el pasado distante o si otros factores, como los requisitos de microhábitats del árbol podrían estar contribuyendo a su distribución fragmentada. Mientras que para Flores y otros (2009) la fragmentación es debida principalmente a la actividad humana, descartando que esta distribución sea resultado de la adaptación a micrositios favorables para el desarrollo de estas especies.

Otros estudios refieren que la distribución de *P. multijuga* Pilger se restringe al norte del Perú (Figura 3), principalmente en los departamentos de Amazonas, Cajamarca y Lambayeque, es decir tanto en la vertiente occidental (Lambayeque) como en la oriental (Cajamarca) (Mendoza y León, 2006). Así mismo, se considera que el rango altitudinal de la especie *P. multijuga* está entre los 2200 – 3600 msnm (Mendoza y Cano, 2012); entre los 2500 – 3600 (Mendoza y León, 2006).

Por otra parte, las poblaciones que emplean con mayor intensidad los recursos de la CCAH pertenecen al Centro Poblado La Morada, ubicado en el límite norte de la CCAH, cuya población es atendida por el distrito de Chuquibamba, provincia Chachapoyas, departamento Amazonas; y a los Caseríos Nuevo Bolívar y El Progreso, ubicados al sur oeste de la Concesión, dentro del Sector III, cercanos al límite de la Concesión para Conservación Montecristo; cuya población proviene principalmente de cuatro distritos de la provincia de Bolívar (Bolívar, Uchumarca, Bambamarca y Condormarca), departamento de la Libertad.

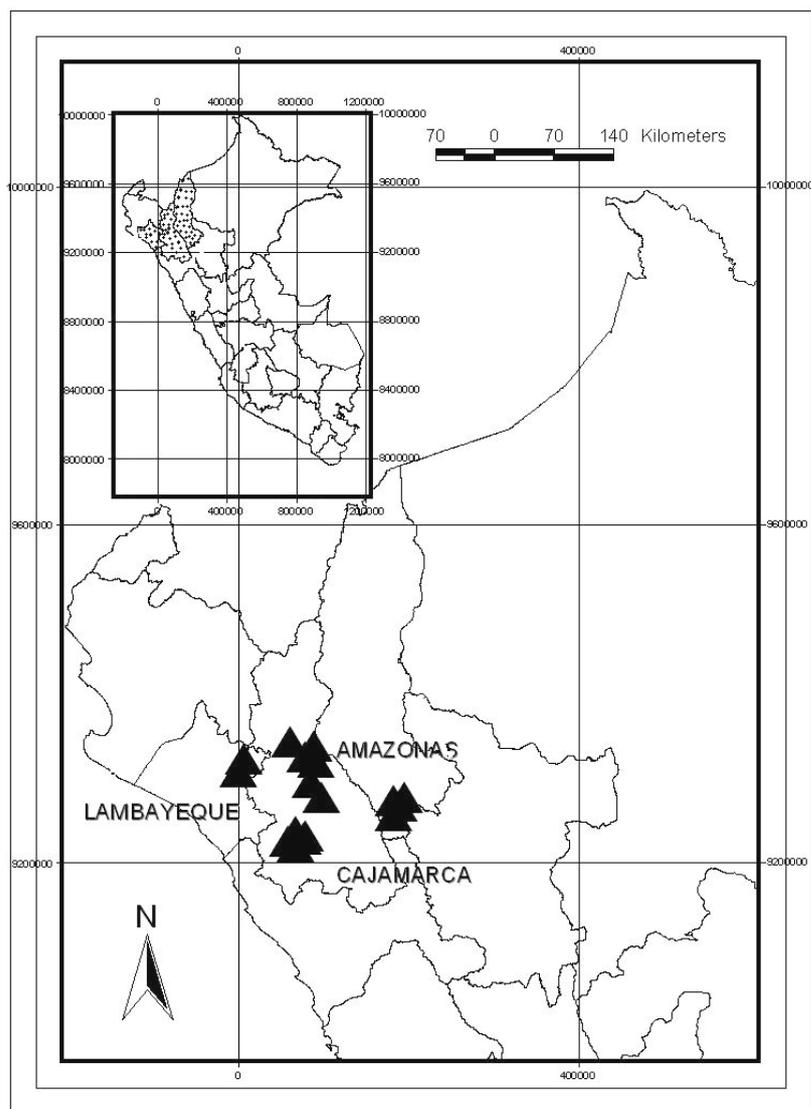


Figura 3. Distribución de *P. multijuga* Pilger. Fuente. Mendoza, W. y Asunción C. 2012.

Sin embargo, a nivel legal no existe ningún asentamiento ni comunidad dentro del área de la Concesión. Es más, ni si quiera hay ocupación desde el lado de San Martín debido a que la accesibilidad desde la misma resulta casi imposible por lo accidentado de su relieve. Los Caseríos Nuevo Bolívar y El Progreso, no son reconocidos por el departamento de San Martín, a pesar de ocupar el área de manera permanente. Por lo que son atendidos por autoridades del departamento La Libertad en algunos servicios básicos como la educación, que es a través de la UGEL de Bolívar y Huamachuco.

En la actualidad, los límites políticos administrativos de la región San Martín están definidos por la divisoria de aguas que separa la cuenca del Marañón con la del Huayabamba; a pesar de ello, las poblaciones de las provincias de Bolívar y Chachapoyas consideran que esa linderación no está clara, y creen que un sector de la CCAH debe pertenecer a los ámbitos administrativos de sus provincias, ya que dicho sector, que legalmente pertenece a las provincias de Huallaga y Mariscal Cáceres, no cuenta con centros poblados de origen sanmartinense. Es así que, la población de la provincia Bolívar y de La Morada, ha venido cruzando el límite departamental para posesionarse de potreros para la crianza de ganado vacuno, siendo ésta la actividad económica más remunerada para la población.

2.3 Bases teóricas

2.3.1 Concesión para Conservación Alto Huayabamba

La “Concesión para Conservación Alto Huayabamba” – CCAH, está ubicada en el departamento de San Martín, provincia Mariscal Cáceres y distrito Huicungo (Figura 4), cuenta con una superficie de 143.928,09 ha. La concesión, está inscrita legalmente en los Registros Públicos del Departamento de San Martín, a nombre de la Asociación Amazónicas por la Amazonía (AMPA), con Partida Registral N° 11014195 y Título de propiedad N° 2008 – 00001629. El 15 de Agosto del 2007 se ha firmado Contrato de Concesión (N° 22-SAM / C-CON-RI-001-06) con fines de Conservación con el Estado, Instituto Nacional de Recursos Naturales (INRENA), por un periodo de 40 años renovables. El 22 de diciembre del 2008 se aprobó el Plan de Manejo (RI N°331- 2008-INRENA-IFFS) de la CCAH para los primeros 5 años (2008 - 2013).

En la CCAH, se encuentran dos unidades de paisaje: a) Jalca y b) La Yunga. La Jalca (3,000 a 3,200 – 4,600 m de altitud), también conocida como Ecorregión Páramos de la Cordillera Central, es una zona con una presencia dominante de pastizales altoandinos. Sin embargo a lo largo de los ríos,

lagunas y sitios húmedos se encuentran fragmentos de bosques altoandinos. La Yunga o Ecorregión Yungas Peruanas (1,800 – 3,500 msnm), es eminentemente una región boscosa, también se conoce como bosques montanos los cuales incluyen a los bosques de nubes (AMPA, 2008)

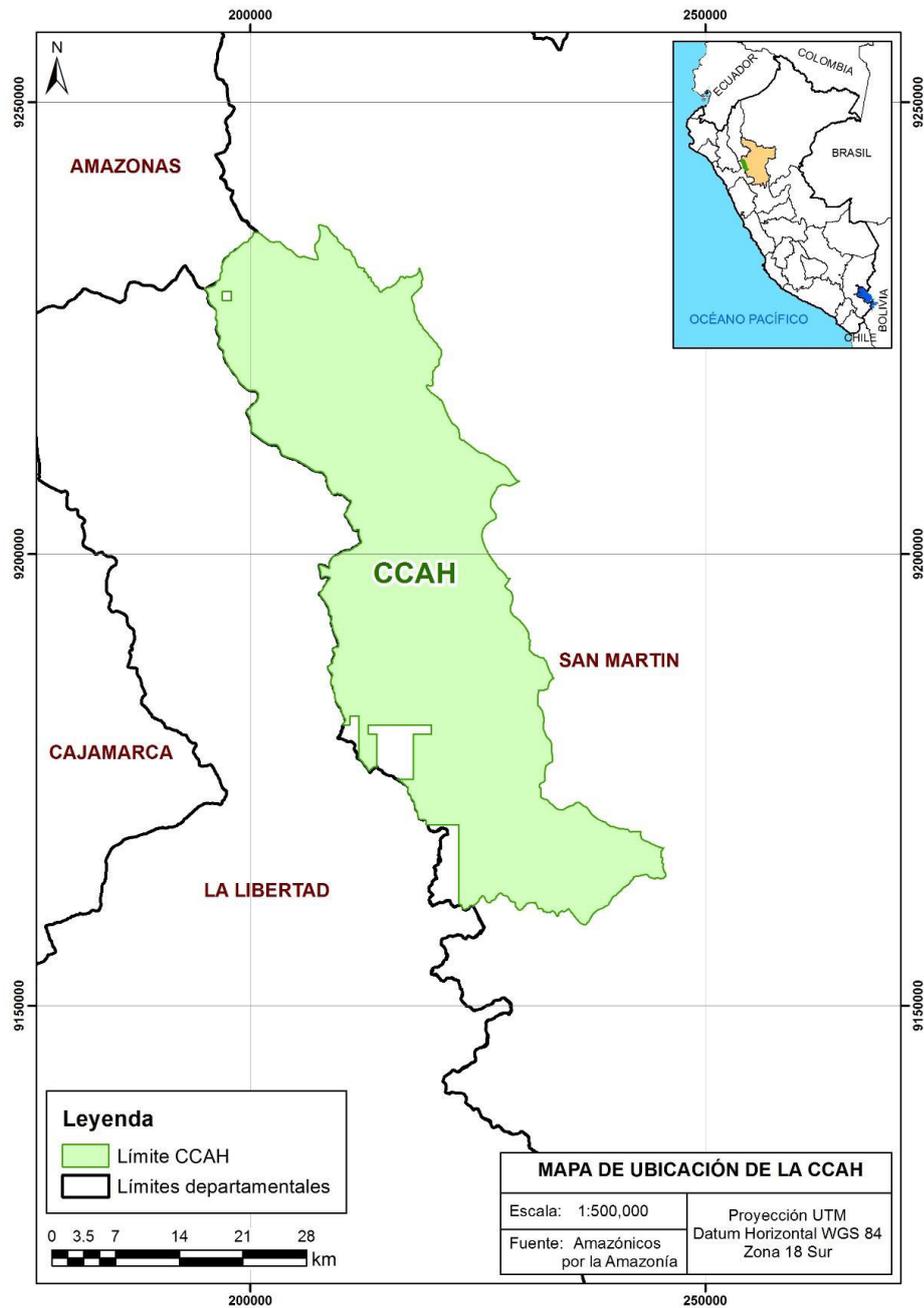


Figura 4. Ubicación geográfica de la CCAH. Fuente. Elaboración propia.

Los Sistemas Ecológicos Terrestres (SET), suponen que dichas áreas conservan la mayoría de las especies dentro de dichos sistemas, por lo que son áreas de vital importancia al proveer diversos hábitats para el desarrollo de numerosas especies de plantas y animales. En la CCAH se han identificado tres SET (Cuadro 4).

Cuadro 4. Sistemas ecológicos terrestres de la CCAH.

| SISTEMA ECOLÓGICO TERRESTRE | DESCRIPCIÓN |
|--|---|
| Bosques altimontanos pluviales de las Yungas. | Bosque siempre verde, de 10 a 15 metros de altura, típicamente con hojas lustrosas y esclerófitas. Presencia de abundantes epifitas. Constituye el nivel altitudinal superior de los bosques yungueños continuos, desarrollándose en áreas pluviales hiperhúmedas entre 3100 – 3200 a 3700 msnm. |
| Bosques altimontanos pluviestacionales de las Yungas. | Bosque siempre verde estacional, con dosel de 10 a 15 m de altura promedio, dominado por especies de hojas lustrosas, cactáceas y esclerófitas. Se desarrolla entre los 2900 – 4200 msnm. |
| Bosques de <i>Polylepis</i> altimontanos pluviales de las Yungas. | Bosque siempre verde con dosel de 12 a 15 m de altura dominado por diferentes especies de <i>Polylepis</i> , según la zona geográfica, asociadas a varias especies de árboles y arbustos, en general de amplia distribución en las Yungas pluviales altimontanos. Altitud potencial 3100 a 4800 msnm. |

Fuente. Plan de manejo CCAH. AMPA, 2008.

Se identifican también, dos unidades fisiográficas en la CCAH (Cuadro 5), que se describen a continuación:

Cuadro 5. Unidades fisiográficas de la CCAH

| UNIDAD FISIAGRÁFICA | DESCRIPCIÓN |
|---|---|
| Laderas Empinadas | De relieve disectado con pendientes que varían de 25 a 50 %, con suelos superficiales a medianamente profundos; en las áreas húmedas depresionadas predominan suelos de naturaleza orgánica, con temperaturas que varían de 3° C a 6° C, con precipitación media anual de 1750 a 1800 mm y altitudes de 2500 a 4500 msnm. Abarca una superficie cercana a las 51 478 ha equivalente al 36% de la concesión. |
| Laderas muy empinadas | Corresponde a un relieve fuertemente disectado con pendientes que varían de 50 a 75 %; los suelos son superficiales a muy superficiales y presentan temperaturas que varían de 3 °C a 6 °C, con precipitación media anual de 1750 a 1800 mm y altitudes que varían entre los 2500 a 4500 msnm. Abarca una superficie de 34 387 ha equivalente al 24% de la concesión. |
| Laderas Extremadamente Empinadas | De relieve fuertemente disectado con pendientes mayores del 75 %; presentan suelos muy superficiales por la presencia del contacto lítico. Las temperaturas varían de 14,5 °C a 25 °C, con precipitación media anual de 500 a 4000 mm y altitudes de 500 a 3500 msnm. Abarca una superficie aproximada de 57 145 ha equivalente al 40% de la Concesión. |

Fuente. Plan de manejo CCAH. AMPA, 2008.

Además, podemos identificar tres zonas climáticas para la CCAH (Cuadro 6), a una escala de análisis e interpretación a nivel macro (1:350,000):

Cuadro 6. Unidades climáticas de la CCAH.

| UNIDAD CLIMÁTICA | DESCRIPCIÓN |
|---|---|
| Muy húmedo y templado frío (B4B'2) | Corresponde a la ceja de selva, que se localiza por encima de los 3,000 m.s.n.m., sobre todo en las laderas montañosas ubicadas al occidente del área de la CCAH. Se estima que en todos los meses se presentan excedentes de humedad. Abarca una superficie aproximada de 76 800 ha, ocupando el 53% de la CCAH. |
| Muy húmedo y templado cálido (B4B'3) | Sin ningún déficit de agua (r) y con baja eficiencia térmica en el verano (a`´). Se localiza en el sector este de la CCAH en niveles altitudinales que oscilan entre 1800 y 2800 msnm. Se estima que en todos los meses se presentan excedentes de humedad. Abarca una superficie aproximada de 57 378 ha, lo que representa el 40% de la CCAH. |
| Húmedo y frío acentuado (B3C'1) | Corresponde a áreas sub-andinas que superan los 3000 msnm. y que también se encuentran coronando las vertientes occidentales de la CCAH. Se estima que en algunos meses se presentan excedentes de humedad. Abarca una superficie aproximada de 9 750 ha que representa el 7% del área total evaluada. |

Fuente. Plan de manejo CCAH. AMPA, 2008.

Otra información relevante al estudiar la vegetación son las Zonas de Vida, representadas en el Mapa Ecológico del Perú (1995), realizado por el Instituto Nacional de Recursos Naturales - INRENA, en la que se identifican principalmente zonas de vida para la CCAH (Cuadro 7), a una escala de análisis nacional (1:1'000,000):

Cuadro 7. Zonas de Vida en la CCAH.

| ZONA DE VIDA | DESCRIPCIÓN |
|--|---|
| Bosque Húmedo – Premontano Tropical (bh – PT) | La vegetación climática es un bosque siempre verde, alto y tupido, que contiene volúmenes apreciables de madera para usos diversos. |

| | |
|---|---|
| <p>Bosque Húmedo – Montano Bajo Tropical (bh – MBT)</p> | <p>La vegetación natural clímax prácticamente no existe en la mayor parte de esta Zona de Vida, a consecuencia de la sobreutilización por el uso agrícola y ganadero, como se aprecia en forma significativa en Chota, Cutervo y Sandia, entre otros lugares.</p> |
| <p>Bosque Muy Húmedo – Premontano Tropical (bmh – PT)</p> | <p>La vegetación es siempre verde con lianas y bejucos y muchos de ellos cubiertos por epífitas de la familia de las Bromeliáceas. Sociológicamente, los árboles están distribuidos en cuatro estratos: dominantes, suprimidos y oprimidos, sobresaliendo, arriba del estrato superior y en forma poco dispersa, los grandes árboles emergentes que alcanzan hasta 45 metros de altura.</p> |
| <p>Bosque Muy Húmedo – Montano Bajo Tropical (bmh – MBT)</p> | <p>La vegetación es densa, alta y siempre verde y distribuida es tres estratos. Los árboles alcanzan alturas sobre 25 metros. El epifitismo es predominante a base de orquídeas Bromeliáceas, muchas trepadoras, helechos terrestres y arbóreos, musgos y abundantes líquenes que tapizan los tallos de las plantas.</p> |
| <p>Bosque Muy Húmedo – Montano Tropical (bmh – MT)</p> | <p>En las vertientes de la cordillera oriental, esta zona de vida es más húmeda. En la faja superior de esta zona de vida, que se ubica en las cordilleras oriental y occidental de los andes, el tamaño de la vegetación es reducido, alcanzando escasamente de 3 a 5 metros, entre las que se encuentran especies de los géneros Cynoxys, Polylepis, Escallonia, Oreopanax, asociadas con gramíneas altas, constituyendo praderas de pastos naturales.</p> |
| <p>Páramo Muy Húmedo Subandino Tropical (pmh – SaT)</p> | <p>La vegetación está constituida por una abundante mezcla de gramíneas y otras hierbas de hábitat perenne. Entre las especies forestales más comunes que se observa en forma aislada formando bosques residuales tenemos el “quinual” (Polylepis sp.), el “culli” y “usuch” (Buddleia sp.), el “chachacomo” (Escallonia sp.) y la “intimpa”.</p> |
| <p>Bosque Pluvial – Montano Bajo Tropical (bp – MBT)</p> | <p>El paisaje vegetacional está constituido por bosques naturales que alcanzan alturas entre 20 y 25 metros y diámetros (DAP) entre 0.30 y 1.20 metros. Son árboles mayormente bajos, delgados y de mala conformación, con tallos torcidos y copas pequeñas parcialmente muertas.</p> |
| <p>Bosque Pluvial – Montano Tropical (bp – MT)</p> | <p>La composición florística es muy similar a la del bosque muy húmedo Montano, con la diferencia de que en estas Zonas de Vida son algo más "achaparradas", compuesta por árboles que alcanzan hasta 15 metros de altura y diámetros variables entre 0.30 y 1.0 metro con fustes defectuosos. Hay especies de la familia Melastomaceae, arbolillos de los géneros Polylepis, Oreopanax, Podocarrus, Weinmannia Clusia y helechos arbóreos de los géneros Cvathea, Dicksonia, y Alsophilla.</p> |

| | |
|---|---|
| Páramo Pluvial – Subandino Tropical (pp – SaT) | El escenario vegetal está conformado por el "carrizo enano" (<i>Chusquea</i> sp.), que se distribuye en espesas matas, el "chinchango" (<i>Hypericum laricifolium</i>) y bosquetes de pequeños árboles de los géneros <i>Polylepis</i> , <i>Gynoxys</i> , <i>Escallonia</i> , <i>Buddleia</i> y <i>Baccharis</i> y arbustos de los géneros <i>Brachyotum</i> , <i>Ribes</i> , <i>Berberis</i> y <i>Chuquiragua</i> . |
|---|---|

Fuente. Elaboración propia, adaptado de la Guía Explicativa del Mapa Ecológico del Perú (INRENA ,1995).

2.3.2 Bosques altoandinos

El ecosistema de bosques andinos se encuentra en la cordillera de los Andes que surge de la actividad tectónica y de la deriva continental en Sudamérica; fenómeno originado por el choque de la placa de Nazca con la placa Sudamericana. Ubicándose entre los 1,000 msnm y el límite inferior de los páramos y las punas (Tobón, 2009). Ahora, la definición de Bosques Nativos Andinos más aceptada es la siguiente: “Son aquellos bosques que se caracterizan por estar conformados de manera predominante por especies nativas, con una extensión mínima de 0.5 ha y con un porcentaje mínimo de cobertura de copa de 10 % de manera continua; se ubican geográficamente en el sector montañoso del Perú sobre los 2,000 msnm en la vertiente occidental en promedio y sobre los 1,800 msnm en promedio en la vertiente oriental (incluye ceja de selva)” (Huerta, 2005). A pesar de las diferencias de la altitud en la que se encuentran, se coincide en que los bosques altoandinos están bajo el límite del páramo o puna (Tobón, 2009).

El ecosistema, objeto de estudio de la ecología es definida por Tansley (1935) como un conjunto interactuante de seres vivos y su ambiente inerte. Ello implica considerar el ecosistema como un sistema abierto, cuyos límites están establecidos por los seres vivos objeto de estudio (Irastorza, 2006), en este caso los bosques altoandinos caracterizados principalmente por la especie *Polylepis*. Este ecosistema es un recurso vital para la conservación de la biodiversidad y las funciones hidrológicas (Zutta y otros, 2012). Sin embargo, se caracterizan por estar muy fragmentados o muy dispersos, y

presentar tendencia a la disminución de su superficie en la mayor parte de los casos (Huerta, 2005).

El género *Polylepis* pertenece a la tribu Sanguisorbeae de la familia Rosaceae con aproximadamente 28 especies, se caracteriza por una polinización anemófila y por sus frutos secos; además según Braun (1997) se ha observado que los bosques altoandinos se desarrollan en espacios determinados por su altitud, pendiente, exposición al sol y latitud, como factores naturales primordiales y por el grado de uso/acceso (mayor o menor) de poblaciones (Dourojeanni, 2008). Por otra parte, el género tiene importancia conocida para las zonas altas de los Andes, siendo protector de cuencas hidrográficas y refugio para la vida silvestre.

a. Criterio Geográfico. Se distribuyen a lo largo de casi toda la cordillera de los Andes, desde Mérida en Venezuela hasta las sierras de Córdoba en Argentina; mientras que en el Perú los encontramos en mayor extensión en el departamento de Ancash, contando con aproximadamente el 25% del total nacional por encima de los 3500 msnm (Dourojeanni, 2008). Además, es importante señalar que el centro de origen del género *Polylepis* son los Andes del norte del Perú, pues se han registrado a dos especies más primitivas, *P. multijuga* Pilger y *P. pauta* Hieron (la primera restringida solo a ese sector de los Andes) y el centro de diversificación del género *Polylepis* serían los Andes del sur del Perú, debido a que se han registrado 15 especies de las 27 reportadas para todos los Andes (Mendoza y Cano, 2011).

b. Criterio altitudinal. Éstos representan la vegetación natural de una gran parte de los Andes centrales entre los 3.500 y 4.400 msnm (Kessler, 2006). Según Dourojeanni (2008), dominan no por su gran extensión, que más bien es limitado y fragmentado, sino por la mayor presencia sobre otros géneros que se encuentran encima de los 3500 metros sobre el nivel del mar.

c. Criterio climático. Kessler (2006) divide tres regiones en las que se puede desarrollar el género *Polylepis*: En regiones húmedas arriba de los bosques de neblina, a una altitud de 3.500 msnm se han identificado especies como *P. pauta* (Ecuador-Bolivia), *P. sericea* (Venezuela-Bolivia), *P. lanuginosa* (Ecuador), *P. multijuga* (Perú), *P. triacontandra* (Bolivia), *P. lanata* (Bolivia), y a una altitud de 3.800-4.200 m en el sur de Perú y Bolivia se encuentra la especie parcialmente arbustiva *P. pepeii*. En regiones también húmedas pero con menores lluvias de las vertientes andinas, se han encontrado bosques de *P. reticulata* (Ecuador), *P. weberbaueri* (Ecuador-Perú), *P. racemosa* (Perú) y *P. incana* (Ecuador-Perú). En zonas áridas se encuentran, *P. flavipila* y *P. rugulosa* en la vertiente andina occidental de Perú y en Bolivia los valles secos están habitados por *P. tomentella*. Por otra parte, la especie más estrictamente adaptada a condiciones climáticas desfavorables mencionada por Jordan (1980, 1983) es *P. tarapacana*, que habita la cordillera volcánica occidental altiplánica a altitudes de 3.900-5.200 m desde el sur del Perú hasta el sur de Bolivia en regiones con tan solo 100-500 mm de precipitación media anual (Kessler, 2006).

d. Suelos. Los bosques de *Polylepis* son de importancia capital para la formación del suelo, ya que tienen la capacidad de desarrollarse en áreas de substrato rocoso flojo y son capaces de retener nutrientes y depositar sedimentos. Es decir, hacen posible la vida en las áreas más elevadas de los Andes (Dourojeanni, 2008).

e. Hidrología. Es importante considerar que regulan el drenaje de las cuencas, permiten tasas de flujo más consistentes de los ríos de montaña debido a su posición como cabeceras de cuenca (Recharte, 2002) y controlan la erosión en las laderas pronunciadas tan características de los Andes. La reducción de los bosques de *Polylepis* no sólo merma la biodiversidad sino incide en gran medida en la hidrología, ya que es una de las pocas especies de árboles que existen en esta zona de vida (Dourojeanni, 2008). Por ello, su función en el sistema de regulación hídrica es fundamental.

f. Paleo-biología: límite de bosque. Evidencias paleontológicas y otros estudios sugieren que Perú alguna vez tuvo 55,000 Km² de bosques de *Polylepis* (Fjeldsa 2002 citado en Dourojeanni, 2008). Es muy probable que la evolución del género *Polylepis* haya sido dominada por las marcadas fluctuaciones climáticas durante el período pleistocénico, forzando a las especies a migrar repetidamente a localidad con condiciones ecológicas favorables, así como fragmentando las distribuciones de especies (Kessler, 2006).

g. Fauna de los bosques *Polylepis*. Estos bosques poseen una importante diversidad de aves, algunas endémicas, representando incluso el 57% de las aves endémicas de los Andes. Del mismo modo, la diversa vegetación que crece dentro de estos bosques de altura conserva incluso especies silvestres de los cultivos andinos domesticados como la papa, la oca y el olluco (Recharte, 2002).

h. Vegetación asociada a los bosques *Polylepis*. Además hay un gran número de especies arbóreas y arbustivas asociadas con ellas, disminuyendo desde las zonas más bajas y húmedas hacia aquellas más altas y secas. Es así que en los bosques de neblina los árboles de *Polylepis* se encuentran entremezclados con individuos de *Weinmannia*, *Clethra*, *Escallonia*, *Vallea stipularis*, *Citharexylum*, *Clusia* y *Oreopanax* con un sotobosque con numerosas especies de *Miconia*, *Brachyotum*, *Hesperomeles*, *Solanum*, *Saracha*, *Monnina*, *Berberis*, *Escallonia*, *Verbesina*, *Gynoxys*, *Barnadesia* y varias otras Asteraceae (Kessler, 2006).

i. La población y el bosque altoandino (Socio-ecosistema). La mayoría de estos bosques se encuentran sobre tierras comunales sujetas a fuerte presión de uso por una población con grandes necesidades, de modo que la búsqueda de un valor económico – social, mayor al que ahora tiene para los pobladores altoandinos, es indispensable para su conservación (Recharte, 2002). Estos bosques representan uno de los ecosistemas más amenazados del mundo, pero al mismo tiempo cumplen un rol central en la ecología

altoandina, como hábitat de muchas especies de plantas y animales y como importante fuente de recursos para los habitantes locales (Kessler, 2006).

j. Impacto de actividades humanas en el bosque altoandino. Se estima que en el pasado la zona alto andina estaba extensamente cubierta por bosque y que a la llegada del hombre a América el paisaje empezó a cambiar aceleradamente principalmente debido al fuego que encendían con fines de cacería. Luego con la domesticación de los camélidos se inicia la demanda por mayores extensiones de pastizales y paralelamente empiezan los procesos de erosión, es decir la degradación del ecosistema andino (Recharte, 2002). Todo ello ha generado la fragmentación del bosque y una distribución de tipo relictos, estimada según Recharte (2002) a menos del 2% potencial a lo largo de los Andes peruanos, mientras que para Kessler (2006) las actividades humanas en los Andes han destruido a más del 95% de estos bosques durante milenios, restringiéndolos a hábitats especiales y modificando su composición florística y faunística.

El monitoreo espacial y temporal de incendios se realiza mediante el análisis de *Focos de Calor*, definidos como sitios con presencia de fuego, detectados por satélites que giran alrededor de la tierra y registran el calor intenso emitido por alguna quema o incendio, el cual debe alcanzar un rango determinado de altitud para ser distinguido por los sensores del satélite (AMPA, 2015). Esta información proviene del Centro de Previsión del Tiempo y Estudios Climáticos (CPTEC) del Instituto Nacional de Investigación Espacial (INPE) del Ministerio de Ciencia y Tecnología de Brasil (<http://www.dpi.inpe.br/proarco/bdqueimadas/focos2proj.html>)

Actualmente, la mayoría de estudios se han desarrollado de forma casi exclusiva en temas ecológicos y pocas son las experiencias que tratan los aspectos sociales, económicos y culturales que explican la situación actual y los cambios en la dinámica de los paisajes (Vila y otros, 2006). Además, como consecuencia de la destrucción de la gran mayoría de los bosques de *Polylepis*, es difícil identificar los factores ecológicos que los determinan y

por lo tanto, establecer su distribución natural potencial (Kessler, 2006). No obstante, en las últimas investigaciones de Kessler (2006) se logró identificar un aumento de la concientización de la población, tanto de habitantes rurales como de actores políticos a nivel nacional; sumado al reconocimiento de la necesidad de proteger y restaurar los ecosistemas de bosques de *Polylepis*.

2.3.3 Restauración ecológica

A partir de que la sociedad reconoce las consecuencias del deterioro de los sistemas naturales surge el concepto de restauración ecológica. Definiéndose como “el proceso de ayudar al restablecimiento de un ecosistema que se ha degradado, dañado o destruido por causa de los diferentes disturbios naturales y antrópicos” según el SER – Society for Ecological Restoration International, siendo ésta la definición más aceptada y difundida. Sin embargo, al ser un tema controversial, existen varias definiciones (González, 2014).

La restauración ecológica tiene como propósito lograr la sostenibilidad de los ecosistemas que fueron deteriorados por actividades humanas o naturales. Considerando que una de las metas principales es tratar de revertir, reducir, o eliminar en lo posible, en forma significativa, los procesos de deterioro y factores de perturbación de origen no natural. Para ello, la restauración ecológica cuenta con niveles o etapas (González, 2014) según el estado del área que se va a intervenir, el objetivo y el resultado final del proyecto, descritas de la siguiente manera:

Restauración pasiva: No requiere ayuda del hombre y consiste en dejar que el ecosistema se recupere por sí mismo. Debe aplicarse cuando la perturbación no es muy grave, o el ecosistema tiene alto grado de resiliencia. Por lo que es considerada la manera más eficaz y rentable de restaurar un ecosistema.

Rehabilitación: Se considera la recuperación parcial del ecosistema que busca el restablecimiento de algunos de los elementos funcionales o

estructurales del lugar, pero sin llegar a recuperar los atributos originales. El objetivo principal es el restablecimiento de procesos ecológicos esenciales que permitan que el ecosistema sea autosostenible; es decir, se reemplaza el ecosistema degradado por otro que presta otros servicios diferentes al de la conservación de las especies y del sistema en general, tales como: la oferta de madera, regulación hídrica, regulación de la erosión y almacenamiento de la materia orgánica.

Recuperación: Restablece las áreas degradadas o dañadas ecológicamente para que presten servicios diferentes al de la conservación, tales como: recreación activa y pasiva, uso agrícola y pecuario, oferta de materias primas y otros. Se diferencia de la rehabilitación en que el sistema final recuperado no es autosostenible, designando la conversión de tierras percibidas como inútiles a una condición productiva.

Reemplazamiento vegetal: Cuando se induce a la formación de un ecosistema diferente al original, aunque éste pueda encontrarse fuera de su ámbito histórico de distribución y en condiciones distintas a las presentadas en forma natural. Sin embargo, se debe tener cuidado con los efectos que este proceso pueda tener sobre los remanentes de vegetación nativa.

Recubrimiento vegetal o revegetación: Se considera un componente de la recuperación y consiste en el establecimiento de sólo una o unas pocas especies, implica sólo el reforzamiento de algunos procesos como la sucesión vegetal, la productividad, la ecología del suelo, entre otros. Buscando que el sistema regrese por sí solo a su estado original utilizando especies nativas para el recubrimiento.

Restauración completa: Consiste en llevar al ecosistema degradado a una condición semejante a la de predisturbio, con su composición de especies, estructura y funciones originales, la regulación hídrica, la regulación de la erosión y el almacenamiento de la materia orgánica, mediante un programa activo de modificación del sitio y de reintroducción de las especies, hasta

lograr que el ecosistema sea autosostenible. En la Figura 5 se muestra de manera esquemática los tres principales procesos de restauración, respecto a la función y estructura del ecosistema.

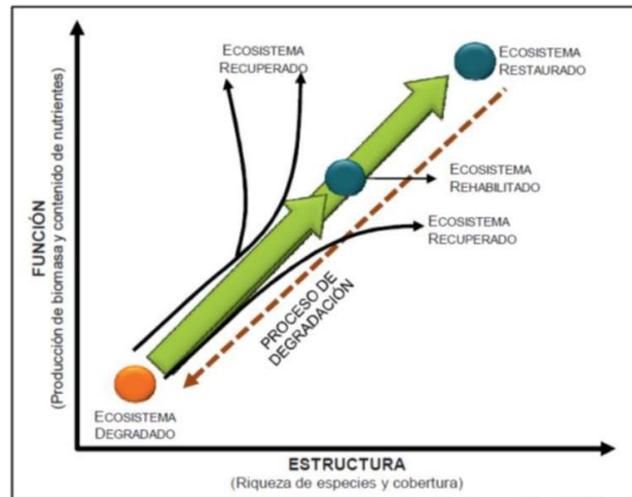


Figura 5. Modelo que representa los posibles estados de restablecimiento de un ecosistema degradado. Fuente. González, M. (2014). Modificado de Bradshaw (1987)

Debido a los escasos recursos que se destinan a proyectos de restauración, es conveniente determinar los ecosistemas que necesitan ser restaurados de manera prioritaria, así como los sitios en los que estos se encuentran. Solo se requiere restaurar un ecosistema cuando, el nivel de alteración va más allá de su resiliencia máxima y en escenarios donde las perturbaciones naturales o humanas han generado un cambio drástico en la cobertura del suelo de tal forma que se inhiba el proceso de regeneración (González, 2014).

Los ecosistemas restaurados no tienen que ser réplicas estáticas del pasado, como si fueran pinturas, estos responden a las condiciones en el entorno externo siempre cambiante y a sus procesos internos propios. Por ello, cuando un ecosistema contiene suficientes recursos bióticos y abióticos para continuar su desarrollo sin ayuda, se considera restaurado y/o recuperado (González, 2014).

2.3.4 Biogeografía

La biogeografía estudia los patrones de distribución espacial de la biota en contacto con los factores y caracteres ecológicos imprescindibles en su desarrollo (Quispe, 2015). Además, es importante considerar que los cambios observados en la estructura del paisaje actúan como una causa de las variaciones en los patrones de distribución y riqueza de especies en el espacio y tiempo (Gurrutxaga y Lozano, 2008). Por lo tanto, se considera a la ecología del paisaje como soporte teórico de la biogeografía.

La especialidad que dentro de la biogeografía, determina las áreas de distribución de especies es la Corología, para ello, utiliza los sitios donde se ha recolectado la especie y un método particular de extrapolación o generalización. Sin embargo, se advierten algunos errores en el proceso, uno de ellos es que el área de las especies cambia constantemente; aunque en el caso de los árboles la velocidad del proceso de cambio puede ser de cien años (Reguerin, 2012).

Los criterios para determinar el área de distribución de una especie son dos: por métodos manuales y por métodos computarizados. El primero es según el criterio de un biogeógrafo o especialista de la especie en estudio; sin embargo, siempre se obtendrán diferencias pues no habrá dos biogeógrafos que coincidan en sus figuras, porque difieren en experiencia, conocimiento y criterio. El segundo se desarrolla con potentes técnicas estadísticas y los sistemas de información geográfica (SIG), destacando los modelos de distribución de especies o de distribución potencial, ya que no son subjetivos y predicen lo adecuada que es un área para el potencial desarrollo de una determinada especie en relación con las condiciones ambientales (Reguerín, 2012).

2.3.5 Ecología del paisaje

El origen de dicho término data desde las investigaciones naturalistas de Humboldt, Docuchaev, Passarge y Berg en el siglo XIX. Estas

personalidades sientan las bases teóricas del paisaje, concepto que fue desarrollado principalmente por las escuelas de Geografía europeas y se privilegia el análisis dialéctico de las totalidades y de las interacciones de los fenómenos, por tanto, el paisaje era considerado como una formación sistémica, compuesta por cinco atributos: estructura, funcionalidad, dinámica, evolución e información (Ramírez, 2013).

En este marco de acontecimientos es que el geógrafo alemán Carl Troll en el año 1939, utilizó por primera vez la expresión *landscape ecology*, que definió como el *estudio de toda la complejidad de relaciones causa-efecto que existen entre las comunidades de seres vivos y sus condiciones ambientales en una sección específica de paisaje* (Vila y otros, 2006), y con ello estableció los fundamentos para la ecología del paisaje (Dourojeanni, 2008). Más adelante, en 1950, Troll propone la creación de la Geoecología del paisaje como disciplina científica (Mateo, 2000) centrada en el estudio de los conocimientos geográficos y biológicos (espacio - funcionales), analizando funcionalmente el paisaje, en donde no solo habría que estudiar las propiedades de los geosistemas naturales, sino procurar las interacciones y puentes de relación con los sistemas sociales y culturales, articulando el paisaje natural con el social (Mateo, 2002) y proporcionándole además un enfoque espacial.

En otras palabras, la geoecología es fruto de la integración del enfoque ecológico (típicamente más funcional) y del enfoque paisajístico (típicamente más estructural) en una perspectiva holística, según Hasse (1986 citado en Ramírez, 2013). Luego de algunos años, en el Congreso de la Asociación Internacional de Ecología del Paisaje celebrado en 1998, se adoptó la siguiente definición: "*Definimos la ecología del paisaje como el estudio de las interacciones entre los aspectos temporales y espaciales del paisaje y su flora, fauna y componentes culturales*". Considerándose con ello, como sinónimo de la geoecología del paisaje

Por otra parte, hay que resaltar que la ecología del paisaje debe entenderse

como una ciencia interdisciplinaria (Figura 6); en este sentido, Wiens en Koplatak, (1999) apunta que es “la más interdisciplinaria de las ciencias”, puesto que en ella se dan cita el estudio del medio, de sus habitantes, de las relaciones entre ambos, de las estructuras que esas relaciones originan, de cómo esas mismas estructuras condicionan las interrelaciones y todo sin olvidar al hombre como principal agente de cambio en el paisaje (Irastorza, 2006). En este concepto, se desarrolla la heterogeneidad horizontal de la geografía que atribuye su estudio a los paisajes del territorio y la heterogeneidad vertical de la ecología, que busca entender e interpretar la relación entre los componentes bióticos y abióticos en un territorio definido (Faúndez, 2014). Es así que, en la actualidad se considera a los paisajes como la escala más apropiada para desarrollar investigaciones y programas de conservación de la biodiversidad (Useche, 2006).

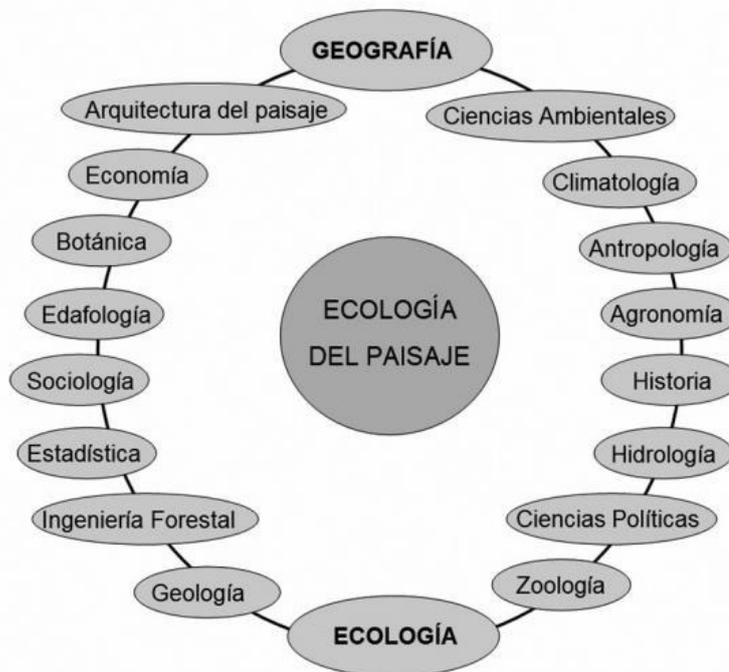


Figura 6. La compleja diversidad de disciplinas que ayudan a configurar la ecología del paisaje y su vocación holística. Fuente. Vila, J.; Varga, D.; Llausàs, A. y Ribas, A. (2006).

Desde la visión de Irastorza (2008), la ecología del paisaje estudia: (i) La distribución espacial de los sistemas ecológicos y cómo gradientes naturales tales como la topografía, la temperatura, la humedad, los tipos de suelo, influyen en esa distribución. (ii) El efecto que las perturbaciones naturales, las interacciones biológicas y el hombre producen en el paisaje. (iii) La interacción entre el patrón espacial y los procesos ecológicos, es decir las causas y las consecuencias de la heterogeneidad espacial a lo largo de una serie de escalas, dando lugar a un conjunto de principios diferentes de aquellos que gobiernan las poblaciones y comunidades a escalas espaciales y temporales normalmente más reducidas. Similar a esta visión está el planteamiento de Forman (1995b), quien estudia el paisaje con tres objetivos:

1. Establecer las pautas de distribución de los elementos que lo componen o lo que es igual, su *estructura* espacial.
2. El *funcionamiento* de esa estructura, describiendo las interacciones, los flujos de energía, nutrientes y especies, entre los elementos espaciales que lo componen.
3. El *cambio* de la estructura y del funcionamiento de la misma, es decir la evolución del paisaje en el tiempo.

Ahora bien, es evidente que un análisis integrador, totalizador y holístico del paisaje, exige de articular en un espacio físico las diversas categorías de paisajes: la natural, la antropo - natural, la social y la cultural. Así el análisis del paisaje natural o del antropo - natural, es sólo el punto de partida para tener un entendimiento global de la interrelación entre la Naturaleza y la Sociedad. Sólo una amplia y abarcadora interpretación del paisaje como sistema de conceptos permite aprehender de manera clara toda esa complejidad (Mateo, 2000).

Otra división de estudio del paisaje consiste en sus tres *componentes principales* (Figura 7) la matriz, el fragmento o “parche” y los corredores (Moreno, 2014). Estos son definidos como “*las unidades relativamente*

homogéneas, o elementos espaciales reconocibles a una escala de paisaje”
según Forman (1995a):

- Matriz: Es el componente que domina en el paisaje, el más extenso y conectado; además, tiene el rol dominante en la funcionalidad del paisaje.
- Fragmento, “parche”: Áreas superficiales no lineares que difieren del paisaje que los rodea. Son unidades del terreno o hábitats que son heterogéneos cuando se comparan con el total. Se incluye cuatro tipos diferentes:

De disturbio: los cuales pueden ser naturales o artificiales y son el resultado de varias actividades incluyendo agricultura, forestería, urbanización, y clima. Si se les deja solos eventualmente cambian hasta que se combinan con la matriz.

Remanentes: que son fragmentos de los hábitats originales, resultado de la alteración del paisaje por parte de los seres humanos. Estos son más ecológicamente estables y persistentes que los “parches” de disturbio.

De recursos ambientales: los cuales ocurren por acción de una condición ambiental como los humedales o pantanos, vegetaciones edáficas, crestas, etc.

Introducidos: aquellos resultados de la introducción por parte de los humanos, de especies exóticas, o por la reorganización de especies nativas

- Corredores: Son tiras, franjas o cinturones de hábitat que conectan fragmentos mayores. Sirven como caminos o conductos por los que los organismos se desplazan de un fragmento a otro. Se pueden catalogar de la misma forma que los parches como: de disturbio, remanentes, de recursos naturales e introducidos.

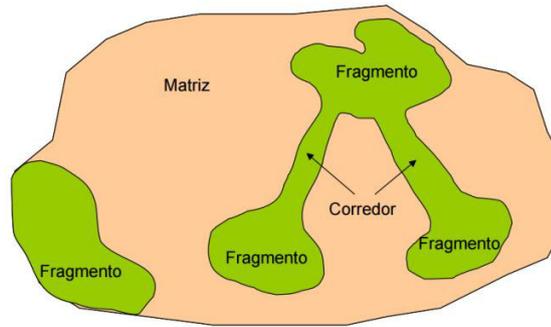


Figura 7. Componentes del paisaje. Fuente. Moreno, A. 2014.

Este conjunto de fragmentos de un paisaje forma lo que denominamos mosaico y la estructura de corredores, la red; siendo el mosaico el elemento base de interpretación de un paisaje (Mejía, 2013). Debido a ello, la disposición espacial de mosaicos y redes pueden seguir un patrón de distribución que nos permitirá caracterizar paisajes y compararlos con todas las consecuencias que esa comparación tiene en ecología del paisaje; podremos explicar las diversas relaciones ecológicas que se dan en unos u otros paisajes extrapolando los resultados de las investigaciones que se lleven a cabo en aquellos que respondan a una configuración similar (Irastorza (2008). Esta propiedad del paisaje en su conjunto, derivada de la distribución de sus elementos en el espacio es lo que definimos como configuración espacial.

Conceptos básicos de ecología del paisaje.

La ecología del paisaje tiene una terminología propia que se ha ido formando a partir de conceptos propios o que provienen de la ecología, la planificación física, de la ordenación territorial, y del estudio del paisaje (Irastorza (2008).

Un concepto básico es la *conectividad* entre fragmentos que se define como la facilidad que tienen las poblaciones a moverse entre ellas; destacando en este concepto el papel fundamental de los corredores, que permiten la interconexión entre los distintos fragmentos y reducen su aislamiento (Wilson, 1992). Mientras que la *fragmentación del paisaje* es definida por

Forman (1995a) como “la ruptura de un hábitat o de un tipo de tierra en parcelas más pequeñas”.

Es así que el grado de heterogeneidad espacial lo dictamina el grado de transformación que ha sufrido el paisaje (Useche, 2006) (Figura 8). Para medir tanto la conectividad como la fragmentación de un hábitat se aplican modelos e índices específicos para cada tipo de ecosistema en cuestión, en el caso de bosques se puede aplicar el modelo de Riitters (2000) para la fragmentación y el índice de Hurd (2002) para la conectividad de un bosque (Dourojeanni, 2008).

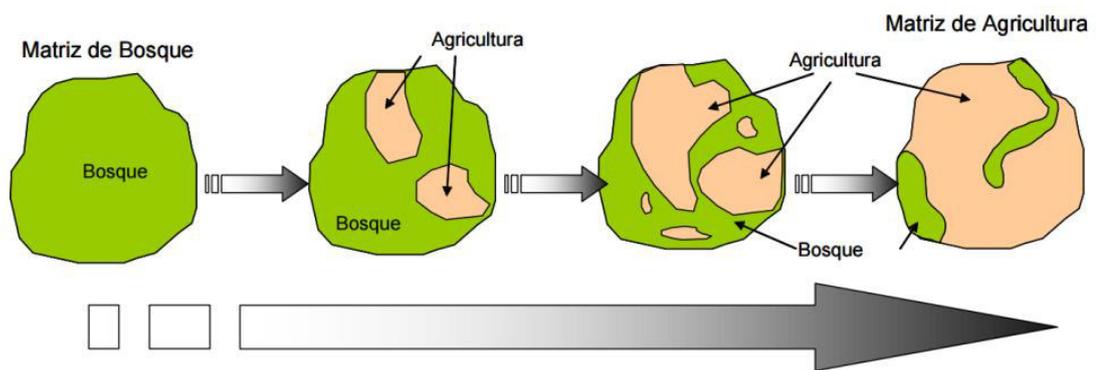


Figura 8. Proceso de fragmentación. Fuente: Moreno, A. 2014.

El proceso de fragmentación puede tener efectos positivos y negativos sobre las especies. Los efectos positivos son el incremento en la diversidad de hábitats, creando una benéfica yuxtaposición de hábitats, incrementando el borde. Entre los efectos negativos tenemos la pérdida del hábitat, los fragmentos pequeños favorecen la extinción local o el aislamiento de especies, los fragmentos dejan de estar conectados, impidiendo el traslado de las especies de un lugar a otro, el aumento del borde reduce el hábitat núcleo para especies no generalistas (Moreno, 2014).

Otros conceptos relacionados son las **fronteras** que se definen como aquellas zonas donde dos elementos (ecosistemas o comunidades vegetales) diferentes se encuentran, pueden ser difusos o definidos y los

bordes, pues son la porción de un ecosistema que se encuentra al perímetro del mismo y que las influencias del parche colindante serán más marcadas que al interior, mayormente formado cuando se dan procesos de fragmentación (Dourojeanni, 2008).

Mientras que el **ecotono** se refiere a un cambio abrupto o bien diferenciado entre formaciones vegetales y la **ecoclina** a variaciones graduales y continuas. Por lo tanto podemos concluir que el uso de estos conceptos depende del objetivo de estudio, llegando a definir este límite, como una zona de transición, contacto o separación entre dos ecosistemas o elementos de un mosaico dentro del paisaje (Sarmiento y Leon, 2015).

Según Rougerie y Beroutchtchvili (1991), desde la década del 90' el paisaje se centra en una dimensión socio-geoecológica (Mateo, 2000), es decir en la articulación entre las tres categorías de paisajes (paisaje natural – paisaje social – paisaje cultural).

Por ende, definimos el paisaje natural como la *“superficie o porción de terreno heterogénea compuesta por una agrupación de ecosistemas (interrelacionados o interactivos entre sí) que se repite de igual forma a través de dicha superficie (siguiendo un patrón) y que comparte: un mismo tipo de interacciones o flujos entre los ecosistemas de la agrupación, los mismos clima y geomorfología, y un mismo régimen de perturbaciones”* (Forman y Godron, 1986).

El paisaje como sistema económico – social, es el área o espacio donde vive la sociedad humana, que se caracteriza por un determinado patrón de relaciones espaciales, que tiene importancia existencial para la sociedad. Mientras que el paisaje cultural es el resultado de la acción de la cultura a lo largo del tiempo, siendo modelado por un grupo cultural a partir de un paisaje natural, constituyendo un binomio inseparable entre los sistemas o geosistemas naturales y sociales (Mateo, 2000).

Por ende, estudiar el paisaje cultural, implica en relación al paisaje natural,

realizar los siguientes análisis según Veras (1995 citado en Mateo, 2000):

- Conocer cómo, y en qué grado las sociedades transforman la naturaleza, de acuerdo a los diferentes tipos de utilización.
- Determinar cómo una sociedad evoca su relación con la naturaleza, y cómo es percibido un paisaje.
- Esclarecer como una sociedad concibe la naturaleza, lo natural, y como ese cuadro mental se traduce en las proyecciones de uso y gestión de su espacio y de su territorio.

Como consecuencia, la estructura del paisaje sufre modificaciones en relación a la alteración antrópica (formas rectilíneas y regulares) y por procesos naturales (unidades curvilíneas e irregulares), produciendo diferencias en la forma y en el tamaño de los fragmentos. Así, una intervención humana moderada favorece la heterogeneidad de las formas, y a medida que se intensifica provoca la homogeneidad del paisaje (Faúndez, 2014).

2.3.6 Teledetección espacial.

Con el advenimiento de las imágenes de satélite y los Sistemas de Información Geográficos se expandieron las posibilidades de estudios del medio ambiente en escalas antes no imaginadas, abarcando espacios cada vez mayores, analizando de forma aunque sea menos detallada, territorios y fenómenos muchos más extenso (Dourojeanni, 2008). La técnica usada para capturar imágenes satelitales de la superficie terrestre o marina e incluso de la atmósfera, es la teledetección espacial (Pérez, 2012).

La percepción remota se define como las técnicas de obtención de información acerca de un objeto o fenómeno, sin entrar en contacto físico con él, especialmente relacionados con el estudio cartográfico y el uso de aparatos que obtienen imágenes en diversas longitudes de onda del espectro electromagnético como fotografía aérea, imágenes de satélite,

imágenes de radar, etc. (Chuvienco,1990). Todos los cuerpos u objetos emiten radiación electromagnética, y ésta depende básicamente de su temperatura. En el sistema solar el mayor emisor de esta radiación es el sol. Sin embargo, otro tipo de emisión puede provenir del mismo sensor, que tiene incorporado un rayo emisor de radiación (Pérez, 2012).

Una imagen de satélite en formato digital está conformada por las diferentes bandas espectrales, la unión de estas bandas en una sola imagen, permitirá juntar las características de cada una de ellas, facilitando de este modo la interpretación de los componentes del paisaje. Una vez realizada la unión, se procede con la visualización bajo ciertos parámetros. El tamaño de la superficie que puede ser representada (es decir, el tamaño del pixel), varía dependiendo del satélite y de los sensores que tomen la imagen. Cada pixel contiene un valor numérico, que representa en promedio la cantidad de energía solar que esa superficie refleja (Pérez, 2012). El despliegue preliminar de la imagen permite determinar si requiere algún ajuste o tratamiento posterior que facilite el análisis y comprensión de los componentes del paisaje (Chuvienco, 2008).

La vegetación es un medio complejo que varía con el tiempo y por lo cual las propiedades espectrales cambian según la época del año y las fases de crecimiento. Se han realizado numerosos estudios sobre el comportamiento espectral de la vegetación según distintas escalas que, por orden de complejidad, son hoja, planta y cobertura vegetal. En este caso nos interesa conocer a nivel de la planta o de una cobertura vegetal, que es mucho más compleja porque implica otros elementos tales como tronco, tallos y el sustrato. Esto se complica más cuando se consideran variaciones en tamaño, orientación y forma de las hojas, porcentaje de recubrimiento del suelo y reflectividad del mismo, además del estado de madurez, fenología, enfermedad o estrés de las plantas (Pérez, 2012). La suma de cada uno de estos componentes es la energía detectada por el sensor remoto y esto modifica la firma espectral, dificultando la interpretación.

El procesamiento digital de imágenes satelitales es el manejo inicial en la que se realizan operaciones de pre procesamiento correspondientes a correcciones previas a la extracción de la información.

La corrección geométrica consiste en realizar cambios en la posición que ocupan los pixeles de la imagen, en relación a la ubicación geográfica real, es decir, se le asigna a la imagen un sistema de proyección (Mejia, 2013), siendo esta ubicación derivada de su propia localización planimétrica (Castillo, 2012). Cuando buscamos eliminar las distorsiones causadas por el terreno, nos referimos a la ortorrectificación de la imagen (BlackBridge, 2015).

La corrección radiométrica consiste en realizar la conversión de niveles digitales a radiancia; así que, para convertir el nivel digital (ND) de un píxel a radiancia, es necesario multiplicar el ND por el factor de escala radiométrica para cada i-ésima banda como sigue:

$$\mathbf{RAD(i) = ND(i) * Factor\ radiométrico(i)}$$

El factor de conversión entre ND para algún píxel dado y la radiancia absoluta en $\text{Watt/m}^2 \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ es ajustable, y es mostrado en el campo "radiometricScaleFactor" de cada banda en el archivo auxiliar de metadatos XML que está asociado a la imagen (BlackBridge, 2015). Para entender el proceso de corrección radiométrica es importante definir que la radiancia (L_λ) es la intensidad radiante por unidad de área fuente proyectada en una dirección específica. El flujo radiante (Φ_λ) deja el área fuente proyectada A en una dirección específica ($\cos \theta$) y ángulo sólido (Ω) hacia el sensor remoto en ciertas longitudes de onda. El valor resultante es la radiancia de un píxel determinado en la parte superior de la atmósfera en watts por metro cuadrado por estereorradián ($\text{W/m}^2 \text{ sr } \mu\text{m}$) y se calcula según la siguiente fórmula (Milman, 1999):

$$L_{\lambda} = \frac{\Phi_{\lambda}}{A \cos \theta}$$

La corrección atmosférica trata de evaluar y eliminar las distorsiones que se generan por la atmósfera en los valores de radiancia que llegan al sensor desde la información adquirida en la superficie terrestre (Álvarez, 2014), siendo necesaria para generar las firmas espectrales (González, 2014). Estos efectos atmosféricos que atenúan la energía solar reflejada desde la tierra son dependientes de la longitud de onda, variables en tiempo, espacio y superficie (Mejía, 2013).

Cuando el área de interés supera el área cubierta por una sola imagen se realiza un **mosaico**, que es el conjunto de dos o más imágenes enlazadas en forma contigua. Si existe presencia de nubes, sombras de nubes o sombras topográficas, se deben eliminar mediante el proceso de **enmascaramiento** de dichas cubiertas, ya que no son parte del análisis.

La clasificación de imágenes satelitales es la fase culminante del tratamiento digital de imágenes por ello el uso de un tipo de clasificador está relacionado con los objetivos que se pretenden alcanzar (Esparza, 2014). Tradicionalmente se han dividido los métodos de clasificación en dos grupos: supervisado y no supervisado, dependiendo de la forma en que son obtenidas las estadísticas de entrenamiento (Chuvieco, 1990). Sin embargo, está demostrado que las clasificaciones basadas únicamente en la reflectancia de los píxeles no son suficientes para la extracción de información rigurosa de las imágenes, debido a la complejidad de los mismos y sus interacciones radiativas con otros objetos adyacentes (Sebem et al., 2005).

Clasificación supervisada o método supervisado implica cierto conocimiento de la zona de estudio, adquirido principalmente por trabajo de campo o documentos auxiliares, que permita delimitar sobre la imagen unas áreas piloto suficientemente representativas de las categorías que se estudiarán

(Chuvieco, 1990). Estas áreas se denominan “campo de entrenamiento” y sirven para “entrenar” al ordenador en el reconocimiento de las distintas categorías.

Se debe tener en cuenta que la extracción de información útil de las imágenes de satélite, es decir, la que se obtiene por clasificación, puede ser de difícil utilización debido a (Wilkinson et al. 1991 citado en Sebem et al., 2005): (1) La información espectral contenida en los píxeles no es suficiente en la mayoría de los casos, como para identificar especies de vegetación o tipos de cubiertas de la superficie; (2) Normalmente los píxeles incluyen una mezcla radiométrica de sus vecinos y por lo tanto pocas zonas tienen homogeneidad total.

La exactitud de la clasificación es el nivel de concordancia entre el valor real y el resultado de las observaciones o estimaciones de una característica. La exactitud temática determina el grado de fidelidad de los valores de los atributos asignados a los elementos en la base de datos, con respecto a su verdadera característica representadas en el mundo real y la clasificación correcta de los objetivos. Otro concepto relacionado es la precisión, que viene a ser el nivel de concordancia entre medidas repetidas de la misma característica. Además, la precisión es inversamente proporcional al error (MINAM, 2014b).

La matriz de confusión recoge los conflictos que se presentan entre las categorías y permite evaluar la calidad del proceso de clasificación de la imagen (González, 2014). En la matriz las columnas indican las clases de verdad terreno, y en las filas las clases derivadas por la clasificación. La diagonal de la matriz expresa el número de puntos clasificados correctamente, es decir donde se produce un total acuerdo entre la imagen y la realidad, mientras que los marginales suponen errores de asignación. La relación entre el número de puntos correctamente asignados y el total expresa la fiabilidad global de la imagen clasificada (Chuvieco, 2008):

$$\hat{F} = \frac{\sum_{i=1,n} x_{ii}}{\sum_{i=1,n} \sum_{j=1,n} x_{ij}}$$

En la ecuación de la fiabilidad global de la clasificación, el valor de X_{ij} es el marginal de cada categoría i y X_{ij} es el Total.

El coeficiente Kappa (k) es otra medida de la exactitud de la clasificación. Se utiliza para evaluar si la clasificación ha discriminado las categorías de interés con precisión significativamente mayor a la que se hubiera obtenido con una asignación aleatoria (Chuvieco, 2008). El valor de K , permite valorar la clasificación de la imagen en base a la fuerza de concordancia de aciertos, su rango de valoración es de un mínimo de 0 para “Sin Acuerdo” hasta 1.0 como “Muy Buena” (Mejia, 2013).

$$\hat{K} = \frac{n \sum_{i=1,n} x_{ii} - \sum_{i=i,n} x_{i+} x_{+i}}{n^2 - \sum_{i=i,n} x_{i+} x_{+i}}$$

En donde n es el tamaño de la muestra, X_{ii} el acuerdo observado, y el producto de los marginales (X_{i+} , X_{+i}) el acuerdo esperado en cada categoría i . El valor de coeficiente varía de 0 a 1, entre más cercano a 1, quiere decir que la concordancia de los dos métodos es muy alta.

Landis y Koch propusieron unos márgenes para valorar el grado de acuerdo en función del índice Kappa (Cuadro 8). Según Jensen (2005 citado en Castillo, 2012) la diferencia entre estas dos medidas, la exactitud temática global y k , está en que la primera solo tiene en cuenta la diagonal principal de la matriz de confusión, excluyendo los errores de exceso y omisión. Mientras que, el coeficiente kappa incorpora los elementos fuera de la diagonal principal como un producto de filas y columnas marginales.

Cuadro 8. Grado de acuerdo de Landis y Koch.

| Índice Kappa | Grado de acuerdo |
|---------------------|-------------------------|
| < 0 | Sin acuerdo |
| 0 – 0.2 | Insignificante |
| 0.2 – 0.4 | Bajo |
| 0.4 – 0.6 | Moderado |
| 0.6 – 0.8 | Bueno |
| 0.8 – 1.0 | Muy bueno |

Fuente. Pérez D. 2012.

2.3.7 Satélite RapidEye.

La constelación RapidEye está conformada por cinco satélites idénticos, los sensores capturan imágenes de alta resolución con grandes extensiones de área sobre una base periódica diaria (Resolución temporal) fuera del nadir y 5,5 días en el nadir, con una resolución espacial o tamaño de píxel de 5 metros, lo que corresponde a una precisión en términos de escala hasta de 1:25.000 (Castillo, 2012). Todas las imágenes son tomadas en 12 bits, durante el procesamiento en tierra se realizan correcciones radiométricas y ampliaciones de hasta 16 bits de rango dinámico, lo cual implica un amplio desempeño de contraste, tanto para visualización como para análisis y clasificación de coberturas, además cuenta con 5 bandas espectrales (Cuadro 9) (BlackBridge, 2015).

Cuadro 9. Rango espectral del sensor RapidEye.

| Bandas Espectrales | Rango espectral (nm) |
|------------------------------|-----------------------------|
| 1 – Azul | 440 – 510 |
| 2 – Verde | 520 – 590 |
| 3 – Rojo | 630 – 685 |
| 4 – Red-Edge | 690 – 730 |
| 5 – Infrarrojo cercano - NIR | 760 – 850 |

Fuente. BlackBridge. 2015. Imágenes Satelitales Especificaciones Técnicas.

La imagen utilizada en la presente investigación pertenece al Ministerio del

Ambiente del Perú, y forma parte de la Asistencia Financiera No Reembolsable del Gobierno de Japón – Donación Hatoyama (MINAM, 2014c).

La banda de borde rojo (Red-Edge) es una característica única que distingue a los satélites RapidEye de la mayoría de otros satélites multispectrales. La relevancia de la región espectral Red-Edge para la caracterización de la vegetación ha sido reconocida durante muchos años (Weichelt y otros, 2014).

La banda Red-Edge es una banda centrada estratégicamente en el inicio de la porción donde la reflectividad presenta valores altos debido a la respuesta de la vegetación, radicando su interés en el hecho que se encuentra en la zona de transición entre la reflectancia mínima y máxima, pudiendo ser útil en la medición del estado de la vegetación. Recientes estudios llegan a sugerir el Red-Edge como alternativa al canal rojo, en base a que este podría ser más sensible a cambios en el estado de la salud de la planta. A continuación se muestra la Figura 9, donde se detallan las principales características de las bandas de RapidEye. (Martín, 2011).

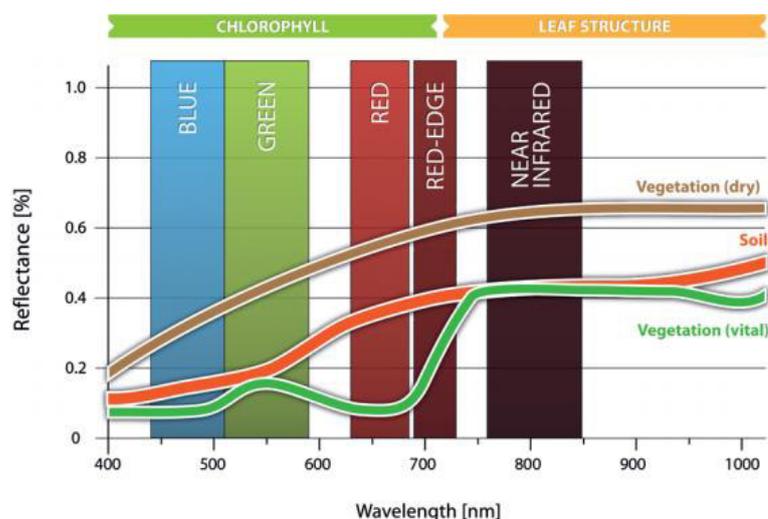


Figura 9. Sensibilidad de reflectancia en la banda red - edge según la vegetación. Fuente. Weichelt H. y otros. 2014.

El Índice de vegetación con la banda Red-Edge es propuesto por Martín (2011) como una modificación del índice NDVI; donde, a la máxima absorción producida en el canal rojo debido a los pigmentos de la clorofila y a la máxima reflectividad producida en el infrarrojo debido a la estructura celular de las hojas, se le incluye la banda red-edge. Así pues, la propuesta está combinando los beneficios del NDVI clásico con los beneficios fruto de la información aportada por la banda red-edge (mayor detección del nitrógeno y su relación con el contenido clorofílico). 5 – 3+4

$$EdgeNDVI = \frac{NIR - (+Edge)}{NIR + (+Edge)}$$

2.3.8 Modelo Digital de Elevación – MDE

Un modelo digital de elevación es un modelo simbólico, de estructura numérica y digital que pretende representar la distribución espacial de la elevación del terreno, siendo la altura una variable escalar (sobre un nivel de referencia) que se distribuye en un espacio bidimensional. Otro concepto es dado por Miller y Laflamme en 1958 que lo define como la "representación estadística del terreno, en forma de números digitales, por medio de un conjunto de puntos con coordenadas x,y,z respecto a un sistema de georreferenciación conocido".

Un MDE está basado en una muestra de datos puntuales repartidos sobre el plano que sirven para la representación de la información, éstos pueden representarse mediante dos modelos de datos: la matriz de alturas (raster) y la estructura TIN (Red de triángulos irregulares). Los modelos TIN son utilizados ampliamente por permitir la visualización tridimensional del relieve; sin embargo, cuando el objetivo es el análisis de la superficie terrestre es recomendable la utilización del modelo raster (García, 2006). Por ello, en la presente investigación se trabajará con datos obtenidos del procesamiento de imágenes satelitales de radar.

La plataforma satelital "Advanced Land Observing Satellite, ALOS" es el

sucesor del satélite “Japanese Earth Resources Satellite-1, JERS-1” (banda L, polarización HH, 35° ángulo off-nadir) en operación durante 1992-1998. ALOS fue exitosamente lanzado desde el Centro Espacial de Tanegashima-Japón en Enero del 2006. En Mayo del 2011, JAXA anunció la terminación de la vida útil del satélite ALOS y el 24 de Mayo del 2014 fue lanzado el ALOS-2 “DAICHI-2” con el mejoramiento de sus modos de adquisición, mejor resolución, más ángulos de incidencia, etc (http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/top/about_top.htm).

ALOS utiliza técnicas avanzadas de observación del suelo con los siguientes objetivos:

- Cartografiar y así proveer mapas para Japón y países contenidos en la región Asia-Pacífico.
- Realizar observaciones regionales para fomentar el equilibrio entre el planeta y el desarrollo.
- Monitorear desastres alrededor del mundo.
- Investigar recursos naturales.
- Desarrollar tecnología para futuros satélites de observación de la Tierra.

ALOS (Figura 10) está compuesto por tres sistemas independientes para la observación de la Tierra, que adquieren simultáneamente imágenes ópticas e imágenes de radar con diversas resoluciones y coberturas. A continuación se indican los sensores ópticos PRISM y AVNIR-2, y el sensor radar PALSAR:

Panchromatic Remote-sensing Instrument Stereo Mapping (PRISM): por estereoscopia este instrumento mide la elevación precisa del suelo. El sensor tiene una cámara pancromática, la longitud de onda comprende 0.52~0.77 μm , la resolución espacial es 2.5m.

Advanced Visible and Near Infrared Radiometer type 2 (AVNIR-2): permite

observar lo que cubre la superficie del suelo. El sensor es multiespectral de cuatro bandas, cuyas longitudes de ondas corresponden a los rangos 0.42~0.5 μm (banda 1), 0.52~0.60 μm (banda 2), 0.61~0.69 μm (banda 3) y 0.76~0.89 μm (banda 4). La resolución espacial corresponde a 10 m.

Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar (PALSAR): permite observar el suelo durante el día-noche y en todos los climas.

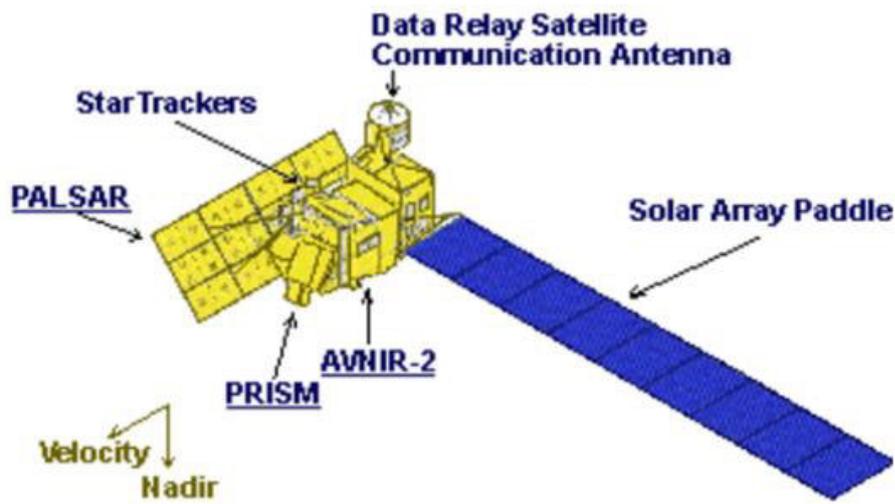


Figura 10. Satélite “Advanced Land Observing Satellite - ALOS”.
Fuente. (Mayorga, T. 2011).

Sensor Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar – PALSAR es un Radar de Síntesis de Apertura (SAR) que usa la frecuencia de la banda L para observar el suelo durante el día-noche sin la interrupción de las nubes, capaz de adquirir datos de hasta 10 m de resolución con ángulos de incidencia entre 20° y 55°. El desarrollo del sensor es un proyecto conjunto entre la Agencia de Exploración Aeroespacial Japonesa “Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA” y la Organización de Observación de Recursos Japoneses “Japan Resources Observation System Organization, JAROS”.

Las ventajas del Radar de Síntesis de Apertura “Synthetic Aperture Radar - SAR” sobre sensores ópticos es que son independientes de la iluminación

solar, penetra nubes, y en cierta medida pocos centímetros de superficies como suelo, vegetación, nieve, dependiendo de la frecuencia a la que operan. No obstante, en imágenes de radar se debe considerar la complejidad en el procesamiento de los datos y las dificultades en su interpretación (Mayorga, 2011).

PALSAR es un instrumento full polarimétrico que opera en los siguientes modos (Cuadro 10): Modo fino con una sola polarización (FBS), Modo fino en doble polarización (FBD), Modo Scan SAR (SL Scan SAR) y Modo fino de Polarimetría (P Fine Polarimetría).

Cuadro 10. Características principales del instrumento PALSAR.

| Características | Modo de observación | | | |
|-------------------------------------|--|---------------|--------------------|---------------|
| | Modo fino | Modo ScanSAR | Modo Polarimétrico | |
| Frecuencia | 1270 MHz, banda L (23.6 cm) | | | |
| Ancho de banda Chirp | 28MHz | 14MHz | 14MHz, 28MHz | 14MHz |
| Polarización | HH o VV | HH+HV o VV+VH | HH o VV | HH+HV + VV+VH |
| Angulo incidencia | 8-60° | 8-60° | 18-43° | 8-30° |
| Resolución en Rango | 7-44 m | 14-88 m | 100 m (multilook) | 24-89 m |
| Ancho de observación (Swath) | 40-70 Km | 40-70 Km | 250-350 Km | 20-65 Km |
| Longitud de Bit | 5 bits | 5 bits | 5 bits | 3 o 5 bits |
| Velocidad de datos | 240 Mbps | 240 Mbps | 120 Mbps, 240 Mbps | 240 Mbps |
| NE (Noise Equivalent) sigma zero *2 | < -23 dB (Swath 70 km) < -25 dB (Swath 60 km) | | < -25 dB | < -29 dB |
| Precisión radiométrica | Precisión relativa dentro de imagen: 1 dB Precisión relativa dentro de órbita: 1.5 dB | | | |
| PRF | 1500 – 2500 Hz | | | |

Fuente. www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/about/about_index.htm (Mayorga, T. 2011).

El nivel de procesamiento de las imágenes se encuentra en los metadatos (Pérez, 2012), que definimos como datos sobre los datos o información sobre la información misma, pues intentan responder a las preguntas quién, qué, cuándo, cómo, dónde y porqué, sobre cada una de las características relativas a los datos que se documentan. Los metadatos geográficos permiten entender las presunciones y limitaciones de los datos y evaluar la aplicabilidad en un uso específico.

Los niveles de correcciones que cuentan las imágenes ALOS PALSAR (<https://www.asf.alaska.edu/sar-data/palsar/terrain-corrected-rtc/>), son las siguientes:

- Radiometric Correction, implica la eliminación de la influencia engañosa de la topografía en los valores de retrodispersión. Por ejemplo, la corrección elimina la retrodispersión brillante causado por la reflexión del radar desde pendientes empinadas, dejando sólo la retrodispersión que revela las características superficiales tales como la vegetación y la humedad del suelo.
- Terrain Correction, es el proceso de corregir las distorsiones geométricas que conducen a errores de geolocalización, es decir, mueve píxeles de la imagen en la relación espacial apropiada entre sí. Montañas que se ven como si hubieran caído hacia el sensor se corrigen en su forma y geolocalización.
- Radiometric Terrain Correction (RTC), combina ambas correcciones para producir un producto superior para aplicaciones de la ciencia. La corrección de la distorsión geométrica es a veces llamado ortorectificación, especialmente para el procesamiento de imágenes ópticas.

Un modelo digital de elevación permite conocer el relieve de la tierra a través de modelos como los de pendiente y orientación, además de brindar los rangos de altitud de una zona. La importancia de esta característica del paisaje radica en que define montañas, cordilleras, serranías, llanuras, entre otras; las cuales proporcionan hábitats variados para las plantas. Además, se tiene en cuenta que a escalas continentales, regionales e incluso de paisaje, las formaciones geológicas también influyen en los factores ambientales como la precipitación, temperatura, humedad y otros que afectan fuertemente en el tipo de organismos que pueden establecerse en una zona dada (Pérez, 2012).

La estimación de un modelo de pendiente es sencilla a partir del MDE y

consiste ajustar a un plano los valores de z en ventanas de 3x3 calculando el valor de la pendiente para la celda central y de esta manera para todo el modelo raster; en otras palabras expresa el cambio en elevación sobre la distancia. Además, en un punto del terreno se define como el ángulo existente entre el vector normal a la superficie en ese punto y la vertical, mayormente calculada como porcentaje pero también puede expresarse en grados (García, 2006).

Así mismo, la orientación (modelo de orientación) en un punto se define como el ángulo existente entre el vector que señala el Norte y la proyección sobre el plano horizontal del vector normal a la superficie en ese punto. El aspecto está expresado en grados a partir del norte, en dirección horaria, de 0 a 360 grados. El norte es 0 grados, un valor de 90 grados es este, 180 grados es sur y 270 grados es oeste; cualquier valor fuera de este rango como 361 o -1, son utilizados por algunos algoritmos para asignar superficies planas como cuerpos de agua (García, 2006).

2.3.9 Datos climáticos (WorldClim)

La ciencia que estudia la o las relaciones existentes entre los factores climáticos y la distribución de los seres vivos en la Tierra es la Bioclimatología. Esta disciplina comenzó a estructurarse en base a relacionar los valores numéricos del clima, con los areales de las plantas y de sus formaciones vegetales (Pérez, 2012). Siendo, cada vez más importante, el conocimiento detallado de la distribución de la vegetación sobre la tierra; así como las modificaciones en el aspecto y composición de la vegetación potencial natural y de sus etapas de cambio, causadas por factores climáticos, edáficos, geográficos y antrópicos.

Worldclim es un repositorio con variables climáticas, abierto y libre, que ha permitido un desarrollo exponencial de los trabajos sobre biogeografía, macroecología y cambio climático en los últimos 10 años (Varela y otros, 2015). Los datos WorldClim fueron generados a través de la interpolación de

la media de los datos climáticos mensuales de estaciones meteorológicas entre 1960 - 1990 y el modelo digital de elevaciones (MDE) de 90 metros de resolución espacial derivado de la misión SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). Su resolución es de 30 segundos de arco (aproximadamente “1km” de resolución en el ecuador) (Hijmans et al, 2005) y son un total de 19 variables bioclimáticas (Cuadro 11) disponibles para descarga en formato raster (una matriz de datos georeferenciada).

Cuadro 11. Descripción de las 19 variables bioclimáticas descritas por Busby en 1991.

| Variables | Descripción |
|------------------|---|
| Bio 1 | Temperatura media anual |
| Bio 2 | Rango de temperatura diurno medio (Temp. Max. – Temp. Min.) |
| Bio 3 | Isotermalidad (Bio2 / Bio7) (* 100) |
| Bio 4 | Estacionalidad de temperatura (desviación estándar * 100) |
| Bio 5 | Temperatura máxima del mes más caliente |
| Bio 6 | Temperatura mínima del mes más frío |
| Bio 7 | Rango de temperatura anual (Bio5 – Bio6) |
| Bio 8 | Temperatura media del trimestre más húmedo |
| Bio 9 | Temperatura media del trimestre más seco |
| Bio 10 | Temperatura media del trimestre más caliente |
| Bio 11 | Temperatura media del trimestre más frío |
| Bio 12 | Precipitación total anual |
| Bio 13 | Precipitación del mes más húmedo |
| Bio 14 | Precipitación del mes más seco |
| Bio 15 | Estacionalidad de la precipitación (coeficiente de variación) |
| Bio 16 | Precipitación del trimestre más húmedo |
| Bio 17 | Precipitación del trimestre más seco |
| Bio 18 | Precipitación del trimestre más caliente |
| Bio 19 | Precipitación del trimestre más frío |

Fuente. Varela S. y otros. 2015.

2.3.10 Sistemas de información geográfica.

Los Sistemas de Información Geográfica se consideran como una tecnología que permite el manejo de la información espacial y es aplicada en muchos campos desde la escala local a la global. Según Teixeira et al (1995 citado en Mejía, 2013), es el *Conjunto de programas, equipamientos, metodologías,*

datos y personas, perfectamente integrados, de forma que hace posible la recolección, almacenamiento, procesamiento y el análisis de datos georreferenciados, así como la producción de información derivada de su aplicación. Destacando que el propósito de la información geográfica está en conocer la ubicación de un elemento en la superficie de la Tierra (Pérez, 2012).

El análisis espacial, es el núcleo de los Sistemas de Información Geográfica, ya que constituye una serie de técnicas estadísticas y matemáticas aplicadas al estudio de los datos distribuidos sobre el espacio geográfico, posibilitando el trabajo con las relaciones espaciales de las entidades contenidas en cada capa temática de la base de datos geográfica (Mejía, 2013). Por ello cada vez más, los SIG se utilizan como una ayuda importante en la toma de decisiones espaciales (González, 2014).

2.3.11 Modelos de distribución

Los modelos de distribución de especies son construcciones numéricas que definen en el espacio ecológico la relación existente entre la presencia de una especie y los valores de variables ambientales con influencia en su distribución. Teniendo como resultado la representación en el espacio geográfico, a través de un mapa digital que representa la idoneidad del hábitat o la probabilidad de presencia de la especie (Benito, 2009). Estos modelos se han convertido en una herramienta muy potente, cada vez más usado, y en su mayoría aplican el concepto de nicho ecológico (Reguerin, 2012).

Los Modelos de Nicho Ecológico – ENM (Ecological Niche Models) son modelos ecológicos que relacionan la distribución geográfica de una especie con sus requerimientos climáticos, pudiendo ser usado para predecir la distribución potencial de la especie tanto en el pasado como en el futuro (Peterson et al. 2011 citado en Varela, 2015), permitiendo su comparación temporal. Sin embargo, la proyección hacia el pasado o futuro de un ENM

requiere trabajar con datos climáticos de dichos escenarios temporales. Para este tipo de investigaciones se ha desarrollado un modelo climático con diferentes intervalos temporales, pero con una resolución grosera de 0.5°x0.5° (www.ecoclimate.org).

Estos modelos de distribución potencial, aportan valiosa información que describe el grado de idoneidad del ambiente físico para el desarrollo de un tipo de vegetación determinado. Así, en Sarmiento y León (2015) se recomienda que los modelos se generen empleando información de ubicación de bosques, obtenido de imágenes satelitales. Además de variables climáticas y topográficas, si son aspectos ecológicos relevantes a escala de paisaje o posibles patrones de mayor peso. Un modelo de distribución también permite conocer la estructura, el funcionamiento, la dinámica de los paisajes, las relaciones y procesos que ocurren en ellos y en conexión con otros fenómenos del mundo real (Mateo, 2000).

Según las definiciones anteriores, podemos destacar cinco elementos en cualquier Modelo de Distribución de Especies (Figura 11): registros de presencia de la especie, variables ambientales almacenadas como mapas digitales, un algoritmo que analiza la relación entre ambas entradas, un modelo definido en el espacio ecológico y la representación geográfica del resultado en forma de mapa (Reguerin, 2012). Para manipular dichos modelos y datos reales, los SIG se han convertido en una herramienta fundamental cuando es usado como una plataforma transfiriendo información desde el análisis implícito al explícito, ayudando a identificar potenciales zonas a conserva y/o restaurar (Morales, 2012).

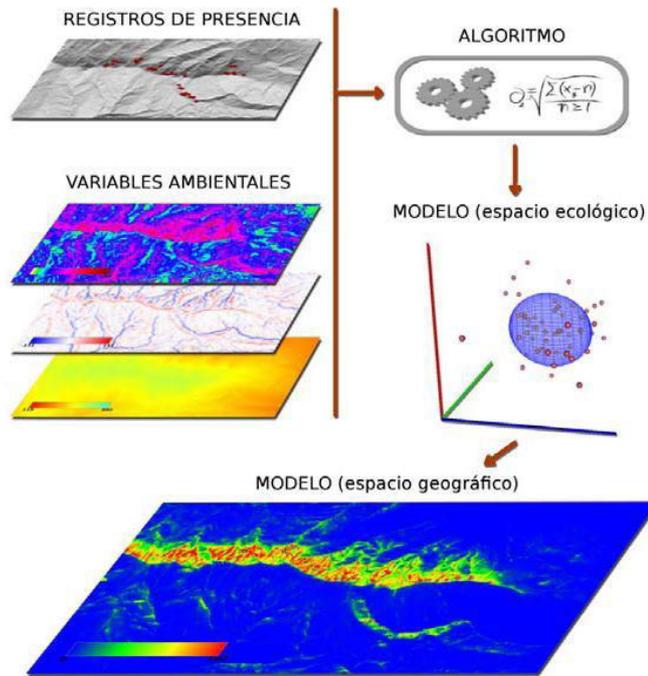


Figura 11. Elementos necesarios para definir un modelo de distribución de especies. Fuente. Reguerin J. 2012.

2.3.12 Evaluación Multicriterio

La evaluación multicriterio se define como un conjunto de técnicas orientadas a asistir los procesos de toma de decisiones. El modelo de decisión multicriterio se realiza en una plataforma SIG, una vez definidos los criterios o variables para la selección de las zonas potenciales de restauración ecológica. Las coberturas espaciales resultantes de los criterios son insumos de la *regla de decisión* (procedimiento a través del cual se obtiene una evaluación particular), las cuales posteriormente se integran en un solo conjunto de datos, evaluándolas de modo que se genera una capa final (modelo de decisión), donde cada dato o alternativa ha recibido un valor de acuerdo a la *capacidad de acogida* (capacidad que tiene el espacio territorial de albergar o soportar una actividad en específica) de la actividad evaluada (Faúndez, 2014).

Los procesos que se realizan son estructurados a partir de la función a

desarrollar y del objetivo a lograr; que viene a ser la base de la estructura para la toma de decisiones, éstos son planteados sobre todas las áreas del territorio susceptibles a ser evaluadas y sobre las que se realizará una selección final (Gómez y Barredo, 2005). La caracterización del territorio, que se plantea según distintos criterios y que intervienen en la evaluación, es representada en coberturas espaciales en un SIG. Con el fin de encontrar todas las zonas que cuenten con ciertas características y elementos bióticos y abióticos que permitan el cumplimiento del objetivo trazado.

El Modelo de decisión que se realiza en un SIG, permite integrar las variables espacialmente, ya sea como celdas en el modelo raster o polígonos, puntos y líneas en el modelo vectorial, constituyendo así capas temáticas de objetos espaciales, que sumadas a la jerarquización de criterios son evaluadas para detectar las mejores alternativas de localización (Faúndez, 2014). Estos criterios o variables espaciales, son la base para la toma de una decisión, los cuales pueden ser medidos y evaluados. Además de ser la evidencia sobre la cual se basa la decisión. Faúndez (2014), destaca la importancia de definir correctamente los objetivos en la toma de decisiones, ya que en base a ellos, se estructura un modelo lógico que incluye la selección de criterios (factores positivos y negativos) y la regla de decisión que permitirá generar un modelo que integre la valoración de las distintas alternativas.

Faúndez (2014), sintetiza esta metodología en el siguiente proceso:

1. Definición del objetivo.
2. Selección de criterios (factores positivos y negativos) que estén relacionados con el objetivo.
3. Estructuración del modelo de decisión (árbol de problemas para alcanzar el objetivo, incluyendo su valoración y jerarquización de criterios).
4. Integración de capas de alternativas a través de una sumatoria lineal ponderada y selección de áreas potenciales (áreas con mayor aptitud en

relación al objetivo de restauración).

La unidad de análisis es el área en la que se realizará la evaluación, por lo tanto debe comprender una unidad territorial homogénea de múltiples interacciones entre componentes bióticos y abióticos, donde pueden diferenciarse hábitats y procesos que originan condiciones únicas y particulares. Mayormente se utilizan microcuencas hidrográficas como unidad de análisis, pues tiene relación con la naturaleza y presentación de los datos que integran la evaluación multicriterio (polígonos) (Faúndez, 2014). Además de ser una unidad territorial conocida, delimitada naturalmente por sus divisorias de agua.

Es importante resaltar que la información de los criterios elegidos debe ser estandarizada mediante la asignación de rangos; es decir, una valoración continua. Por ejemplo: desde 0 a 3, donde el 3 se entiende como lo óptimo dentro del rango establecido; mientras que aquellas características menos interesantes en la unidad de análisis adquiere el rango menos óptimo que sería en este caso el 0. Cuando se tratan los factores negativos o limitantes, se evalúan como excluyentes y no excluyentes, adquiriendo valores de 1 y 0, formando una capa binaria en la que el 0 representa al excluyente y el 1 al no excluyente (Faúndez, 2014).

Así mismo, Faúndez (2014) considera que el análisis integrado de criterios se realice con una selección heurística, en la que se obtiene una selección de alternativas en un conjunto de posibilidades de localización. Consecutivo a ello, se determinan los pesos, es decir, se expresan en términos cuantitativos la importancia de los criterios en el modelo de integración de los datos. La asignación de pesos se realiza mediante asignación directa o tasación simple, la cual se construye a partir de un valor de 100%, asignando valores a cada criterio hasta alcanzar el total (*Peso normalizado: valor asignado/Σ de los valores*), estos valores deben fijarse en relación a lo estudiado y evaluado en terreno.

Una vez diseñado el modelo de decisión y las coberturas de información, éstas fueron integradas a través de la técnica de Sumatoria Lineal Ponderada, que es una de las más utilizadas en modelos desarrollados en SIG que trabajan con formato raster (Faúndez, 2014). Utilizando esta técnica el valor obtenido para cada alternativa es el producto del *peso del criterio* y los *valores otorgados al criterio* (0 a 3) (Gómez y Barredo, 2005), la alternativa de valor más alto será la más óptima para la ubicación de la actividad que se quiere realizar. Esta se obtiene sumando el resultado de multiplicar cada criterio por su peso, expresado en la siguiente ecuación:

$$r_i = \sum_{j=1}^n (W_j * e_{ij})$$

Donde, r_i es la capacidad del terreno para la localización de las áreas potenciales, W_j es el peso del criterio j , e_{ij} es el valor de la alternativa i en el criterio j y n es el número de criterios involucrados en la investigación. Aclarando que el procesamiento de las variables espaciales se realiza en primera instancia en el modelo vectorial, y una vez asignados los valores por criterio, se transforman a formato raster para ser sumados y multiplicados a nivel de celda (Figura 12).

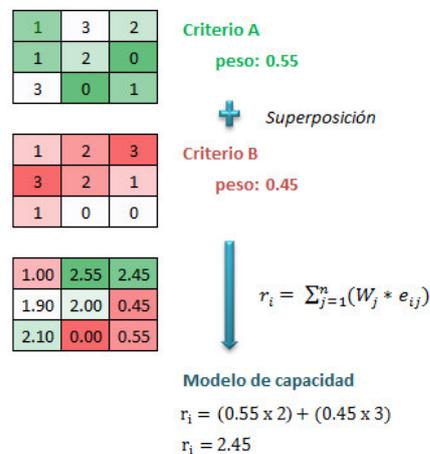


Figura 12. Modelo espacial de integración. Fuente. Elaboración propia, adaptado de Faúndez, M. (2014).

Finalmente, los valores más altos (r_i) indican las áreas con mayor potencial para restauración en diversos escenarios. Una vez identificados se aplica la limitante (representada por una capa binaria) a través de un proceso de álgebra de mapas, en donde cada restricción a nivel de celda, es multiplicada con la cobertura espacial que contiene los valores de acogida (r_i), de esta manera se extraen todas las alternativas limitantes o restrictivas, obteniendo como resultado la zonificación final. Es así que, con este cruce de valores se determinan las siguientes combinaciones, de las cuales se extrae el potencial de restauración (Figura 13).

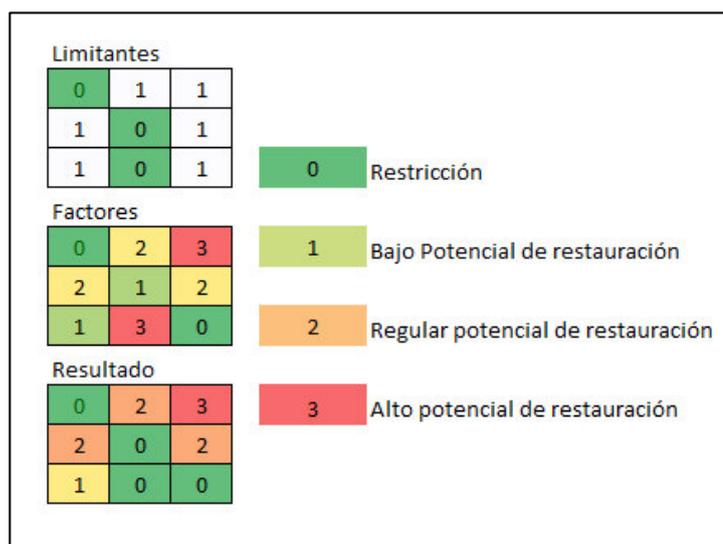


Figura 13. Combinación de valores para selección de áreas potenciales.
Fuente. Elaboración propia, adaptado de Faúndez (2014).

2.3.13 MaxEnt

El software MaxEnt (<http://www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent/>) es un software gratuito de código cerrado basado en una aproximación estadística llamada máxima entropía que permite hacer predicciones utilizando información incompleta, en este caso datos de presencia u ocurrencia de la distribución potencial de una especie, permite además crear modelos de distribución de especies por lo tanto, puede ser utilizado en diversas áreas dentro de una amplia gama de problemáticas. Dentro de las diversas

aplicaciones de MaxEnt que se pueden nombrar se encuentran la priorización de zonas para iniciativas de conservación biológica y restauración ecológica, modelaciones de efectos del cambio climático sobre los ecosistemas, y la evaluación de patrones de propagación de especies invasivas.

MaxEnt posee tres ventajas por sobre los demás modelos similares: Primero, se requiere solo datos de presencia, versus otros modelos que requieren datos de presencia y ausencia; segundo, su consistente buen desempeño en comparación con otros 16 métodos similares, especialmente con un número pequeño de muestras, recalcando que utiliza un algoritmo que combina el aprendizaje automático (inteligencia artificial) con el principio de máxima entropía (Benito, 2009).; y tercero, su disponibilidad gratuita (Morales, 2012). Además se recalca su importancia en temas de conservación, ya que permite determinar el comportamiento de las especies frente a alteraciones exógenas.

En cuanto a la configuración del software, es necesario identificar el método de evaluación de los datos, siendo uno de los más usados para datos menores a 15 registros de presencia, el procedimiento Jackknife. Este método consiste en sacar un punto y entrenar el modelo con los restantes, determinando si este modela el punto faltante (Reguerin, 2012). Con este procedimiento también se determina la importancia de cada variable en el modelo. Otro método es el procedimiento de bootstrap, que realiza el entrenamiento del modelo con un 75% de los registros y el 25% restante, lo utiliza para su evaluación. Además, para el despliegue de datos (mapas y gráficas temáticas) se deben seleccionar las casillas de activación denominadas **Create response curve**, **Make picture of prediction** y **Do jackknife to measure variable importance**; mientras que el formato de salida "logistic" permite obtener probabilidades entre 0 y 1; y el análisis de datos "Auto features" que automatiza la elección del algoritmo empírico basado en el tamaño de muestra (Figura 14).

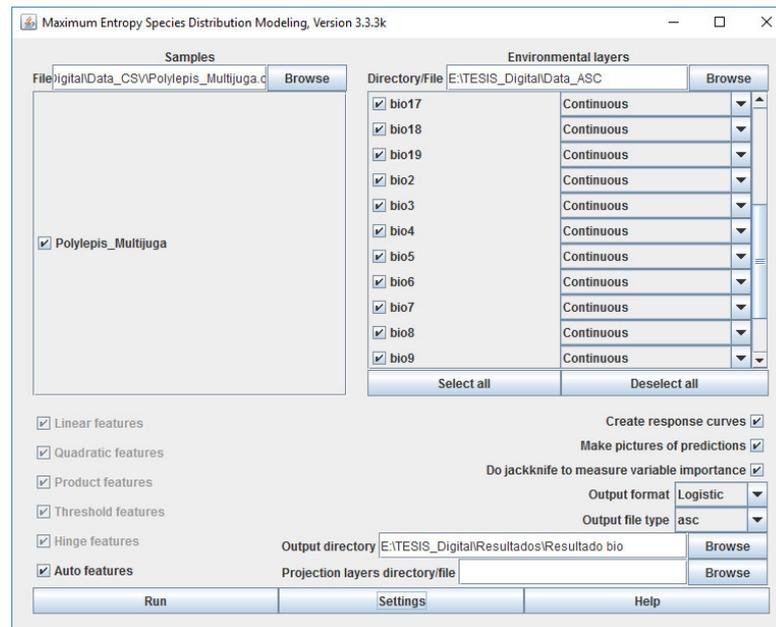


Figura 14. Interfaz gráfica del software MaxEnt 3.3.3k.

La opción **Setting** nos permite modificar las condiciones en las que MaxEnt genera el modelo de distribución potencial. Un parámetro relevante para este análisis es la opción **Remove duplicate presence records**, que se encuentra en la pestaña **Basic** (Phillips, 2006). Los otros parámetros están establecidos por defecto.

Una vez ejecutado el programa se obtiene que en la carpeta donde se han guardado los resultados del análisis, definido previamente en el **Output directory** de la aplicación, contiene varios archivos en diferentes formatos. El archivo principal que ofrece la información técnica del análisis está en un formato HTML nombrado con el mismo nombre de la especie que analizamos, en este caso: *P. multijuga*. Ejecutando este archivo encontramos gráficas descriptivas, pesos de variables, éxitos del modelo y mapas de distribución (Phillips, 2006).

Evaluación de Modelos de distribución de especies

El desempeño del MDE se evalúa tomando en cuenta dos posibles tipos de errores: 1) El error de omisión, que predice la no presencia de la especie

donde realmente está (falso negativo); 2) El error de comisión, que predice la presencia de la especie donde no está (falso positivo). El peor error de ellos es el error de omisión, desde el punto de vista científico, ya que no predice lugares de presencia que pueden ser de importancia crucial para la supervivencia de la población, o contener genotipos únicos. Por el contrario, el error de comisión puede ser real o aparente, ya que un falso positivo puede significar o una sobre predicción del modelo o una predicción de nicho potencial de la especie (Naoki et al. 2006; Reguerin, 2012).

La Tasa de omisión es una estadística que indica el rendimiento del modelo. La matriz *Omission and Predicted Area* consta de tres líneas (Scheldeman y van Zonneveld, 2011):

- Omission on training samples (línea azul) muestra las fracciones de los puntos de presencia ubicados por fuera del área potencial con base en el modelo de MaxEnt (Fraction value) por los valores del umbral de probabilidad (de bajo a alto) que limita el área predicha (Cumulative threshold). Training samples (muestras de entrenamiento) se usa como sinónimo de “puntos de presencia”.
- Fraction of background predicted (línea roja) muestra las fracciones de los puntos de fondo (aleatorios) del área de estudio incluidos en el área predicha, usando diferentes umbrales acumulativos (Cumulative thresholds).
- Predicted omission (línea negra) es una línea de referencia, que muestra lo que esperaríamos si el modelo no fuese mejor que el azar.

Decimos que es posible que el modelo ha sido sobreajustado (overfitting) por dependencia entre los puntos, cuando la línea azul (Omission on training samples) aparece bien abajo de la línea de referencia (Predicted omission).

El Área Bajo la Curva (AUC por sus siglas en ingles), requiere que primero se deba conocer los siguientes dos índices: la sensibilidad, que es la proporción de presencias correctamente predichas y su valor alto indica un

bajo error de omisión; y la especificidad, viene a ser la proporción de ausencias correctamente predichas y su valor alto indica un bajo error de comisión (Naoki et al. 2006).

$$\text{Sensitividad} = a / (a + c)$$

$$\text{Especificidad} = d / (b + d)$$

Donde:

a = número de registros presentes correctamente predichos como presentes.

b = número de registros ausentes incorrectamente predichos como presentes.

c = número de registros presentes incorrectamente predichos como ausentes.

d = número de registros ausentes correctamente predichos como ausentes.

El estadístico AUC (Area Under Curve), es el área bajo la curva ROC (Receiver Operating Characteristic por sus siglas en inglés) o Característica Operativa del Receptor, en esta curva el eje de las abscisas representa la tasa de presencias incorrectamente clasificadas (1- especificidad) y el de las ordenadas la tasa de presencias correctamente clasificadas, o sensibilidad (Figura 15). Se define como el equivalente a la probabilidad de que un punto de presencia seleccionado al azar esté ubicado en una celda raster con un valor de probabilidad mayor para la ocurrencia de la especie, que un punto de ausencia seleccionado al azar. Por lo tanto, el AUC es la integral definida por esta curva al variar los umbrales de corte (Reguerin, 2012).

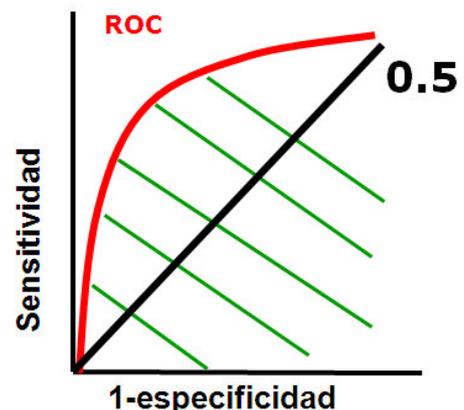


Figura 15. Curva ROC - Característica Operativa del Receptor. Fuente. Reguerin, J. 2012.

El estadístico AUC, toma valores entre 0 y 1, donde los valores menores a 0,7 indica que la calidad del modelo es pobre, 0,7–0,8 la calidad del modelo es bueno, 0,8–0,9 la calidad del modelo es muy bueno y valores mayores a 0.9 indican una calidad de modelo excelente según Araújo y otros (2005); además, en ningún caso será inferior a 0,5 pues representa modelos que no son mejores que el azar (Phillips, 2006).

Otro punto importante para la investigación es elegir el umbral adecuado, ya que este valor representa la mínima probabilidad de que una especie pueda ocurrir en un ambiente de celda específica, suponiendo que los valores de probabilidad superior tienen condiciones climáticas apropiadas para la ocurrencia de la especie; por lo tanto, mientras más alto sea el umbral, más restringido serán las áreas de distribución potencial. Uno de los umbrales más usados es el **10 percentile training presence**, pues representa el valor de probabilidad de que el 90% de los puntos de presencia estarán dentro del área potencial, mientras que el 10% restante de los puntos que caen fuera del área potencial están en un ambiente atípico, no incluido dentro de los límites del nicho realizado ((Scheldeman y van Zonneveld, 2011)

Las curvas de respuesta permiten visualizar cómo es que las variables ambientales con mayor aporte influyen sobre la predicción del modelo. Estas curvas muestran cómo afecta cada variable ambiental a la predicción de MaxEnt, teniendo en cuenta la probabilidad predicha de condiciones idóneas frente a los valores de cada variable ambiental. Si las variables ambientales fueran independientes unas de otras, se genera una sola curva en la que se toma una variable ambiental y se va variando su valor mientras las demás se mantienen constantes. Si dos variables altamente correlacionadas tienen curvas de respuesta aproximadamente opuestas la una de la otra, entonces el efecto combinado de ambas variables será bajo para muchos píxeles. Por ende, MaxEnt genera un segundo conjunto de curvas donde el modelo se construye solamente con la variable correspondiente. (Phillips et al. 2006).

2.4 Bases Conceptuales

Bosques altoandinos con predominancia de *P. multijuga*. Estos bosques se encuentran en regiones húmedas arriba de los bosques de neblina y presentan gran número de especies asociadas del género *Cyathea* sp. (Helecho arbóreo), *Escallonia* sp. (Chachacomo), *Gynoxys* sp. -(Llamanche), entre otros.

Restauración. Se define la restauración ecológica como el proceso para llevar al ecosistema degradado a una condición óptima, en la que se restablezcan las especies nativas y se recupere las funciones ecológicas, hasta lograr que el ecosistema sea autosostenible.

Variables ambientales. Son las condiciones que caracterizan al espacio geográfico y que para ser trabajadas en un sistema de información geográfico, requieren estar en valores cuantitativos y en formato raster. Estas condiciones pueden clasificarse en variables bioclimáticas y topográficas.

Distribución potencial actual. Derivan de los modelos de distribución potencial que permiten inferir la distribución actual al compararse la distribución potencial con una capa espacial de presencia de bosque excluyendo aquellas zonas deforestadas y alteradas.

Distribución potencial para restauración. Son aquellas zonas que tienen las condiciones ambientales que permiten sobrevivir a una especie y que al estar sin vegetación actual, es necesario desarrollar procesos de restauración.

Zonas prioritarias para restauración. Conocidas las áreas potenciales para restauración, es necesario identificar aquellas áreas que presenten mayores beneficios y por lo tanto, requieran ser restaurados en primer lugar.

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

En el presente capítulo se expone la metodología y los instrumentos que se utilizaron para la investigación. Comenzando con la descripción de las tres etapas principales; que abarcan desde la recopilación de antecedentes, tanto de información espacial como no espacial; el procesamiento de la información digital; la construcción de los modelos potenciales y su validación; hasta la selección de las zonas prioritarias para restauración, para finalmente realizar un análisis de los resultados obtenidos (Figura 14). La idea principal de esta metodología radica en identificar, describir espacialmente e integrar criterios que permitan generar modelos de distribución de especies apoyados en un sistema de información geográfico.

Se utiliza el enfoque biogeográfico orientado a la identificación de zonas potenciales de distribución de especies en peligro de extinción, considerándose aquellas zonas como potenciales de distribución histórica, por ende, con fines de restauración (Figueroa y otros, 2016). La estrategia empleada es de tipo cuantitativo, donde se hizo recolección y procesamiento de datos para la construcción de modelos de distribución en SIG; y también cualitativa, referente al análisis de imágenes satelitales, involucrando la descripción científica e interpretación de los acontecimientos, con la finalidad de lograr mayor profundidad en la investigación (Quispe, 2015).

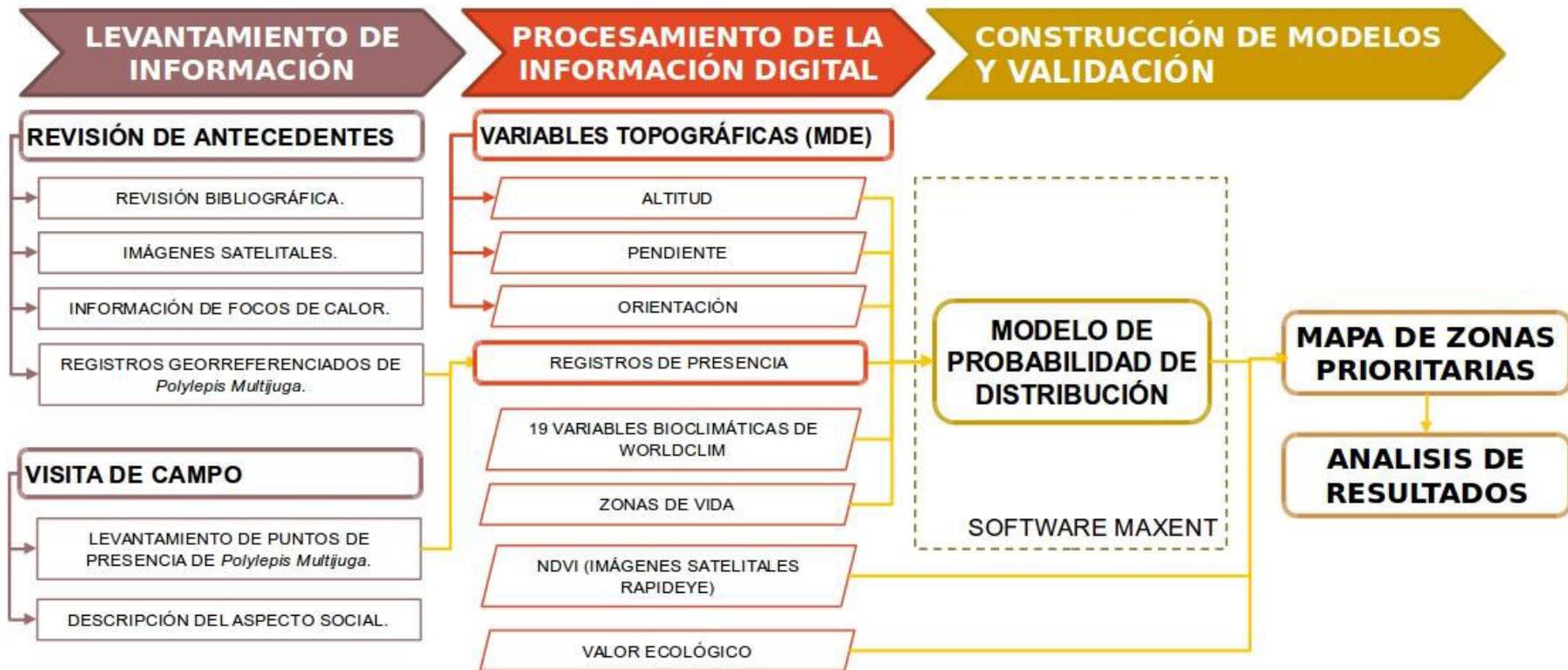


Figura 16. Estructura Metodológica. Fuente. Elaboración propia.

Etapa 1: Recopilación de antecedentes y visitas de campo.

En esta investigación, el paisaje puede ser descrito como un mosaico que está conformado por los bosques altoandinos, representado en los parches de tipo remanente o de disturbio, pues no se sabe si la fragmentación pudo haber sido causada por los seres humanos en el pasado distante o si los requisitos de microhábitats podrían estar contribuyendo a su distribución fragmentada (Quinteros, 2010); siendo otro componente, la matriz que se identifica en el pajonal andino y la zona transicional hacia las yungas, mientras que los corredores son la vegetación ribereña y áreas con arbustos medianos.

La recopilación de antecedentes proviene principalmente de la evaluación y monitoreo de los bosques *Polylepis* realizado por la ONG Amazónicas por la Amazonía – AMPA, que comenzó con trabajos de campo desde Julio del 2008, cuyo fin fue identificar y mapear dichos bosques presentes en la CCAH a una escala de 1:50 000. Logrando recolectar información georreferenciada de 7 parcelas, considerando el aspecto biológico, topográfico, bioclimático y social, y a partir de ello caracterizar el estado de los relictos de bosques altoandinos. Además, se consideraron 26 puntos de presencia de *P. multijuga* que se muestran en la Figura 1.

Para complementar la información recopilada, se realizaron tres visitas de campo a tres diferentes sectores de la CCAH (I, II, III) por caminos ya establecidos, pues la ubicación de los árboles de la especie *P. multijuga* eran conocidos por los guías. Siendo la tercera visita al Sector II, cuenca del río Chunchoyacu, donde se georreferenció una parcela con predominancia de *P. multijuga*. Incluyendo además, la identificación de individuos característicos de los bosques altoandinos a lo largo del camino (Cuadro 14), haciendo un total de 37 puntos de presencia.

Las dos primeras visitas de campo se realizaron para el análisis socioeconómico de la población presente en la CCAH. La primera visita de campo fue al sector III, en donde se encuentran dos centros poblados (Nuevo Bolívar y El Progreso). En la segunda salida, se visitó el sector I,

hacia el centro poblado La Morada, que a pesar de encontrarse dentro de la jurisdicción de la región Amazonas, la comunidad tiene potreros que se extienden hasta lo que vendría a ser la región San Martín según el mapa político del Perú, sobreentendiendo que dichos potreros también están dentro de la CCAH.

Las visitas de campo tuvieron por objetivo determinar si las actividades económicas ya descritas por la ONG AMPA siguen afectando el equilibrio ecológico en la CCAH, o si por el contrario, han disminuido. Esta información será sustentada con la revisión de los focos de calor en el período 2000-2016. Esta información espacial es descargada de la página oficial del INPE () y está en formato vectorial (punto), listo para ser interpretado. Además, es importante identificar qué tan dispuesta está la población en buscar soluciones sostenibles a los impactos que generan y en este caso si es viable o no proponer técnicas de restauración activa de bosques altoandinos.

Etapa 2: Procesamiento de la información digital.

Variables topográficas (MDE)

Se utilizaron las imágenes satelitales ALOS PALSAR, descritas en el Cuadro 13, del producto Hi-Res Terrain Corrected, que corresponden a las últimas imágenes capturadas (año 2011) por el Satélite ALOS 1, descargadas a través del sitio web de la ASF (Alaska Satellite Facility).

Cuadro 12. Misión ALOS PALSAR. Adquisiciones ALOS PALSAR producto Hi-Res Terrain Corrected.

| Orbita absoluta | Path | Frame | D | M | Año | Sensor | Ángulo incidencia off-nadir | Orbita |
|------------------------|-------------|--------------|----------|----------|------------|---------------|------------------------------------|---------------|
| 27249 | 111 | 7030 | 07 | 03 | 2011 | FBS | 34.3° | Ascendente |
| 27001 | 110 | 7040 | 18 | 02 | 2011 | FBS | 34.3° | Ascendente |
| 27001 | 110 | 7030 | 18 | 02 | 2011 | FBS | 34.3° | Ascendente |

Fuente. <https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>

El primer paso fue realizar el mosaico de las imágenes ALOS PALSAR, para después cortarlo según los límites de la CCAH, proyectándolo al datum

WGS84 Zona 18 Sur. A partir de ello, se calcularon los modelos derivados del MDE en ArcGis 10.3 con las herramientas de Spatial Analyst Tools < Surface < Slope para pendiente, y Spatial Analyst Tools < Surface < Aspect para el modelo de orientación. Obteniendo así, las tres variables topográficas (altitud, pendiente y orientación), las cuales fueron convertidas al formato ASCCI, para que pueda ser identificado por el software MaxEnt (Phillips, 2006).

Independientemente, cada modelo se analizó para los límites de la CCAH, generando el mapa de Pisos altitudinales, los cuales están delimitados por líneas de biotemperatura media anual que coinciden con determinadas alturas sobre el nivel del mar, sólo válidas localmente; este concepto es utilizado para la elaboración del Mapa Ecológico del Perú (INRENA, 1995). La clasificación de las pendientes se realizó en cuatro rangos, tomando como referencia el Anexo IV: Guía de Clasificación de los Parámetros Edáficos, del Reglamento de Clasificación de Tierras por su Capacidad de Uso Mayor, aprobado por D.S. N° 017-2009/AG. La orientación puede entenderse como la dirección de la pendiente; en la que los valores de cada celda del raster de salida indican la dirección de brújula a la que apunta la superficie en esa ubicación. Se mide en sentido horario en grados de 0 (hacia el norte) a 360 (hacia el norte, nuevamente), formando un círculo completo.

Variables bioclimáticas (Worldclim)

Se trabajó con las 19 variables bioclimáticas de worldclim, las cuales están listas para el análisis, sin embargo, para la investigación necesitamos que todas las capas tengan la misma proyección y el mismo tamaño de pixel. Por ello, se siguió el siguiente procedimiento: primero cortamos cada variable bioclimática con un buffer de 2 km de los límites de la CCAH, para luego proyectarlas al datum WGS84 Zona 18 Sur y remuestrear el tamaño de pixel (con la herramienta *Resample*) al mismo valor que las variables topográficas. Finalmente, ajustamos las capas bioclimáticas a los límites de la CCAH que estaban en formato TIF y lo convertimos al formato ASCCI, necesario para trabajar con el software MaxEnt.

El mapa de Zonas de Vida usado en la investigación, corresponde al que elaboró el INRENA (1995), el cual fue digitalizado como shapefile y posteriormente convertido a formato raster (ASCCI), para que pueda ser trabajado en el software mencionado anteriormente.

Imágenes satelitales RapidEye

Estas imágenes pertenecen al Ministerio del Ambiente del Perú, y forman parte de la Asistencia Financiera No Reembolsable del Gobierno de Japón – Donación Hatoyama (MINAM, 2014c). Se seleccionaron siete imágenes RapidEye tomadas durante la época seca en los meses de Mayo, Junio y Julio, que cubren la mayor superficie de la zona de estudio, las cuales están identificadas con los siguientes códigos:

1835603_2011-06-08_RE4_3A_160924

1835604_2011-06-08_RE4_3A_160924

1835702_2011-05-30_RE5_3A_160924

1835703_2011-06-08_RE4_3A_160924

1835802_2012-07-22_RE4_3A_160918

1835803_2011-06-08_RE4_3A_160917

1835902_2012-07-22_RE4_3A_160954

Estas imágenes tienen un nivel de procesamiento 3A, es decir están corregidos radiométricamente a nivel de sensor, geoméricamente y referenciados a una proyección cartográfica (MINAM, 2014c). Por ello, se procedió a mejorar la visualización de la imagen satelital, para luego formar el mosaico con las siete imágenes RapidEye, según los límites de la CCAH. Esta imagen servirá para definir las zonas prioritarias para restauración de bosques altoandinos, usando la clasificación de ecorregiones (Páramo - Yungas) mediante el cálculo de NDVI.

Etapas 3. Construcción de modelos y validación.

Se trabajó con el software MaxEnt, el cual requiere puntos de presencia y variables ambientales. Como primer requisito se consideró a los treinta y

siete (37) puntos de presencia descritos en la primera etapa de la metodología, los cuales fueron guardados en un archivo “.csv” conteniendo las coordenadas de ubicación con datum WGS84, proyección UTM Zona 18 sur. Las variables ambientales consideradas son las 19 variables bioclimáticas, 3 variables topográficas y las Zonas de Vida (Cuadro 13), procesadas previamente. Estas capas de datos ambientales provenientes de Worldclim, MDE ALOS PALSAR y el Mapa Ecológico del Perú, se armonizaron para que tengan el mismo valor de grilla (100 metros), que después de varias pruebas a diferentes tamaño de pixel es el que permita aproximarse más a la realidad topográfica; la misma ubicación geográfica (datum WGS84, proyección UTM Zona 18 sur) y sean transformados a la extensión “.asc”, mediante el programa Arcgis 10.3.

Después de correr el modelo con los treinta y siete (37) puntos de presencia y las veintitrés variables ambientales, analizamos el aporte de cada una al modelo y descartamos aquellas que aportan con 0%. Una vez descartadas estas variables se hace correr nuevamente el programa para hallar la distribución potencial según el modelo topográfico y bioclimático.

Como parte de la evaluación del modelo, analizamos el estadístico AUC que indicará la precisión de dicho modelo en una escala entre 0 y 1; describimos los valores de las curvas de respuesta de las variables ambientales utilizadas para generar el modelo; comparamos las contribuciones de las variables ambientales al modelo y su importancia según el modelo Jackknife. Hasta este punto obtenemos el mapa de probabilidad de distribución y el análisis de las variables más importantes que contribuyeron al modelo. Esta información es validada con las fotografías de la cuenca del río Chunchoyacu, que demuestran la relación de las zonas con mayor probabilidad de distribución y los ambientes adecuados para restauración que se observaron en la visita de campo.

Cuadro 13. Variables ambientales consideradas en la presente investigación.

| Variable | Descripción |
|-----------------|---|
| Bio 1 | Temperatura media anual |
| Bio 2 | Rango de temperatura diurno medio (Temp. Max. – Temp. Mín.) |
| Bio 3 | Isotermalidad (Bio2 / Bio7) (* 100) |
| Bio 4 | Estacionalidad de temperatura (desviación estándar * 100) |
| Bio 5 | Temperatura máxima del mes más caliente |
| Bio 6 | Temperatura mínima del mes más frío |
| Bio 7 | Rango de temperatura anual (Bio5 – Bio6) |
| Bio 8 | Temperatura media del trimestre más húmedo |
| Bio 9 | Temperatura media del trimestre más seco |
| Bio 10 | Temperatura media del trimestre más caliente |
| Bio 11 | Temperatura media del trimestre más frío |
| Bio 12 | Precipitación total anual |
| Bio 13 | Precipitación del mes más húmedo |
| Bio 14 | Precipitación del mes más seco |
| Bio 15 | Estacionalidad de la precipitación (coeficiente de variación) |
| Bio 16 | Precipitación del trimestre más húmedo |
| Bio 17 | Precipitación del trimestre más seco |
| Bio 18 | Precipitación del trimestre más caliente |
| Bio 19 | Precipitación del trimestre más frío |
| Zonas de vida | Zonas de vida extraído del Mapa Ecológico del Perú (1995) |
| Altitud | Altitud en metros |
| Pendiente | Pendiente en porcentaje |
| Orientación | Orientación de laderas en grados |

Fuente. Elaboración propia.

Por otra parte, utilizamos los resultados obtenidos del mapa de probabilidad de distribución, para inferir las zonas potenciales de distribución actual, sobreponiendo la capa de zonas de cobertura boscosa en la que se excluyen aquellas con deforestación o algún grado de alteración (Mapa de NDVI). Finalmente, para la determinación de zonas prioritarias para restauración, utilizamos el mapa de zonas potenciales, NDVI y Valor ecológico, en formato raster, para los cuales determinamos una tabla de criterios a fin de obtener como producto el mapa de zonas prioritarias de restauración en la escala cualitativa: Alto, Medio y Bajo.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Análisis, interpretación y discusión de resultados

1. Los bosques altoandinos de la CCAH muestran una vegetación bastante diversificada, y aunque por teoría son las especies del género *Polylepis* las que dominan, hay un gran número de especies arbóreas y arbustivas asociadas con ellas. Las cuales disminuyen desde las zonas más bajas y húmedas hacia aquellas más altas y secas (Kessler, 2006) entre los 3000 y 3500 msnm. Tal es el caso de la especie *P. multijuga* que tiene solo un 37% de presencia; seguido por una población importante de helechos arbóreos del género *Cyathea* (35%), y otras especies del género *Escallonia sp.* (20%), *Gynoxys sp.* (17%); hasta encontrarse en rodales. Sin embargo, la actividad humana en la CCAH ha deforestado para conversión a pastizales y generado quemas que según los datos obtenidos del Instituto Nacional de Investigación Espacial – INPE se desarrollan mayormente sobre el Páramo. Aunque evidencian una disminución en la cantidad de focos de calor durante el período 2011 - 2015, pudiendo inferir que la población está disminuyendo la actividad ganadera y desarrollando otras actividades económicas sostenibles. Por lo antes mencionado, se entiende que la distribución de los bosques altoandinos *no es un patrón natural, causado solo por condiciones microclimáticas* (Hensen, I. “Los bosques de *Polylepis*: el pasado, el presente y el futuro”). Sin embargo, si se quiere conocer en qué medida esta distribución ha sido afectada por la actividad humana

- se requiere información paleoecológica, por ejemplo: fósiles de polen, o restos de carbón vegetal para interpretar las historias de incendios.
2. Las variables ambientales que restringen en mayor medida la distribución de los bosques altoandinos (*P. multijuga*), según el software MaxEnt son aquellas dominadas por la Precipitación del trimestre más caliente (bio18), la Temperatura mínima del mes más frío (bio6), condiciones de humedad denotadas en las zonas de vida (bosque muy húmedo – Montano Tropical y bosque húmedo – Montano Bajo Tropical) y la altitud; coincidiendo con Kessler M. (2006) en que los bosques de *Polylepis* se caracterizan principalmente en relación a las condiciones de temperatura, humedad y suelos. Otra variable a consideración es el Rango de temperatura diurno medio (bio2) pues debido a su ubicación altitudinal están sujetos a amplias fluctuaciones diurnas de temperatura, comúnmente con diferencias de 20 – 30°C entre las temperaturas máximas del día y las heladas nocturnas (Kessler, 2006); en el caso de *P. multijuga* este valor se encuentra mayormente entre 14 – 14.5°C.
 3. El mapa de probabilidad de distribución para restauración de bosques altoandinos muestra mayor superficie en la zona norte disminuyendo conforme se avanza al sur, coincidiendo con los estudios de Mendoza W. y Cano A. (2012) en los que restringen su distribución a la zona norte del Perú, principalmente en los departamentos de Amazonas, Cajamarca y Lambayeque. Agregando ahora el departamento de San Martín. El resultado es un mapa digital de probabilidad de distribución de bosques altoandinos en el que se diferencian zonas cubiertas por bosque, definidas como zonas con distribución potencial actual equivalente al 8% (11,881 ha), y otro 10% (14,602 ha) viene a ser la distribución con potencial para restauración, pues es área que en la actualidad carece de cobertura boscosa.
 4. Las áreas prioritarias para restauración de bosques altoandinos con predominancia de *P. multijuga* y la vegetación asociada determinada previamente se ha identificado en una escala cualitativa de Alto, Medio y Bajo; de las cuales existe mayor superficie de Mediana

prioridad (12,228 ha) distribuido de manera uniforme en la CCAH, seguido por áreas con Alta prioridad (1,810 ha) que se ubican mayormente en la zona norte de la CCAH y zonas de Baja prioridad (608 ha) que se ubican cercanas a las zonas de mediana prioridad.

4.3 Presentación de resultados

Etapa 1: Intervención humana en la distribución actual.

Se realizó una visita de campo al Sector II, cuenca del río Chunchoyacu, debido a que se tenía conocimiento de la presencia de un parche con predominancia de *P. multijuga* de aproximadamente 25 x 40 metros, ubicada en una terraza aluvial cerca al río Chunchoyacu, por dicha parcela pasa un camino de herradura poco transitable, por lo que el bosque se encuentra en moderado estado de conservación. Además, se han georreferenciado individuos jóvenes de especies características de los bosques altoandinos a lo largo del camino, descritos en el Cuadro 14, con sus respectivas fotografías.

El total de 37 puntos georreferenciado (puntos de presencia) de *P. multijuga*, son acomodados en un formato como el de la Figura 17 y guardados como archivo .CSV para trabajarlo en el software MaxEnt. Estos puntos están en el sistema de coordenadas UTM Zona 18 Sur y datum WGS84. Se distribuyen entre los 3,000 y 3,500 msnm mayormente en las laderas que descienden hacia el Este.

Cuadro 14. Puntos levantados en la Cuenca del río Chunchoyacu.

| Ubicación WGS 84, UTM Z 18 | Altitud msnm | Foto | Descripción |
|---|-------------------------|------------------|---|
| E 208319 N 9209253 | 3881 | Fotografía 1 | Páramo en zonas con pendiente empinada. |
| E 209494 N 9209094 | 3760 | Fotografía 2 | Páramo en zonas con pendiente muy empinada. |
| E 211357 N 9208829 | 3562 | Fotografía 3 | Páramo en zonas con pendiente empinada. |
| E 212669 N 9209336 | 3461 | Fotografía 4 | Ganadería en zonas de Páramo con pendiente muy empinada. |
| E 213905 N 9210787 | 3372 | Fotografía 5 | Presencia de quemas en zonas con pendiente extremadamente empinada. |
| E 214183 N 9210864 | 3372 | Fotografía 6 | Presencia de neblina. |
| E 214217 N 9211138 | 3297 | Fotografía 7 | Presencia del género <i>Escallonia</i> sp. en pendiente moderadamente empinada. |
| E 214362 N 9211307 | 3233 | Fotografía 8 | Presencia del género <i>Weinmannia</i> sp. pendiente moderadamente empinada. |
| E 214425 N 9211374 | 3222 | Fotografía 9 | Individuo joven de <i>P. multijuga</i> en la ribera del río. |
| E 215534 N 9212016 | 3155 | Fotografía 10 | Individuo del género <i>Escallonia</i> sp. (Chachacomo). |
| E 215637 N 9212050 | 3115 | Fotografía 11 | Individuo de <i>P. multijuga</i> al lado de una parcela de pasto. |
| E 215948 N 9212145 | 3115 | Fotografía 12 | Individuo adulto de <i>P. multijuga</i> al borde de un río. |
| E 216026 N 9212197 | 3115 | Fotografía 13 | Bosque mixto con predominancia de <i>P. multijuga</i> . |
| E 216809 N 9212544 | 3079 | Fotografía 14 | Deforestación en zona con pendiente extremadamente empinada. |
| E 217024 N 9212404 | 3055 | Fotografía 15 | Ganadería extensiva en zonas de Yunga con pendiente muy empinada. |

Fuente. Elaboración propia.

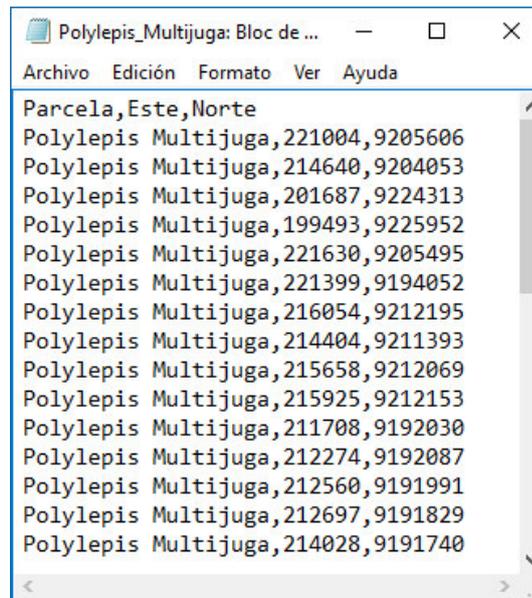


Figura 17. Datos de presencia.

Aspecto Socioeconómico

En el aspecto socioeconómico podemos destacar que la actividad humana si genera un alto impacto en la CCAH, pues a diferencia del moderado estado de conservación del parche de *Polylepis*, georreferenciado en la Cuenca del río Chunchoyacu, se encontró que a una hora aproximadamente de distancia, se encuentran dos viviendas, las cuales han utilizado especies arbóreas (*P. multijuga* y otras), para la construcción de cercos para ganado, como postes para las viviendas y actualmente las usan como leña; deforestando un total de 20.33 Ha aproximadamente hasta el año 2011 según la información extraída de Google Earth (Figura 18). Mientras que la extracción de leña en la Jalca es principalmente para autoconsumo cuando los usuarios van a inspeccionar su ganado. Por lo general, se trata de una o dos personas que no permanecen por mucho tiempo (2 a 3 días cada dos a cuatro semanas). En las dos primeras visitas de campo identificamos que la principal actividad económica sigue siendo la ganadería, la cual trae como consecuencia la deforestación e incendios en los bosques remanentes provocados por la quema descuidada de los pajonales para promover el rebrote de forraje más palatable.



Figura 18. Imagen de Google Earth mostrando el impacto antrópico en la Cuenca del río Chunchoyacu.

El análisis espacial de los focos de calor en el período 2001-2015 (Figura 19) muestra que el ecosistema más vulnerable sigue siendo el páramo, pues ahí es donde mayormente se encuentra el ganado. Según los datos obtenidos del Instituto Nacional de Investigación Espacial - INPE, hay un total de 399 focos de calor en la CCAH para el período 2001 – 2015, de los cuales 190 (94%) están sobre el Páramo y 11 (6%) se han dado en las Yungas. En cuanto a la variación anual (Figura 20), existe una disminución progresiva de incendios entre los años 2011 – 2015.

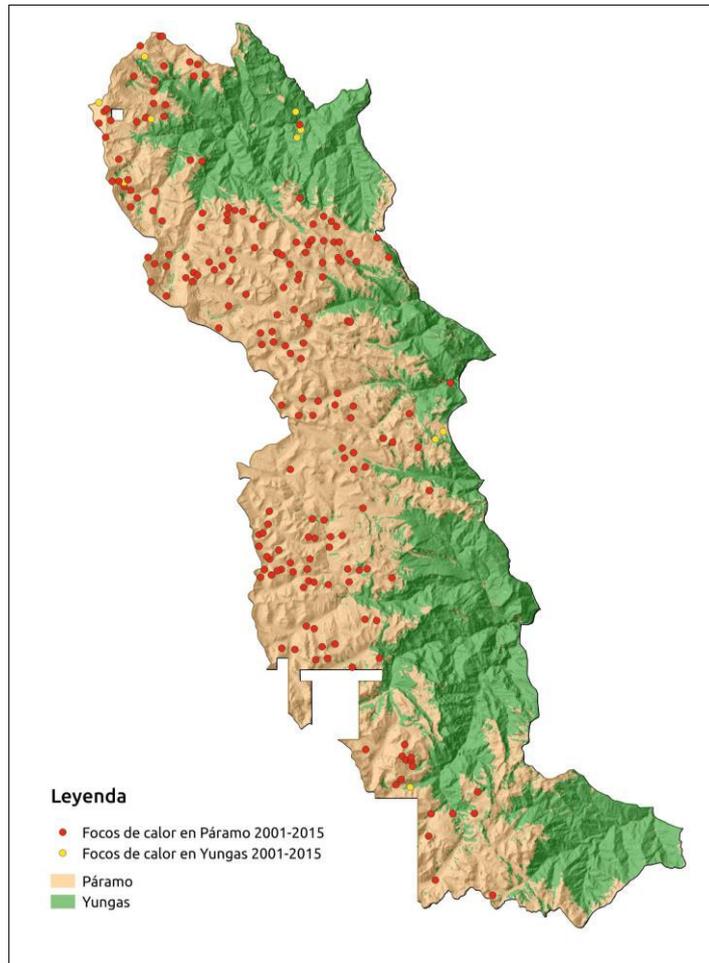


Figura 19. Focos de calor en la CCAH para el período 2001 – 2015.
Fuente. Elaboración propia.

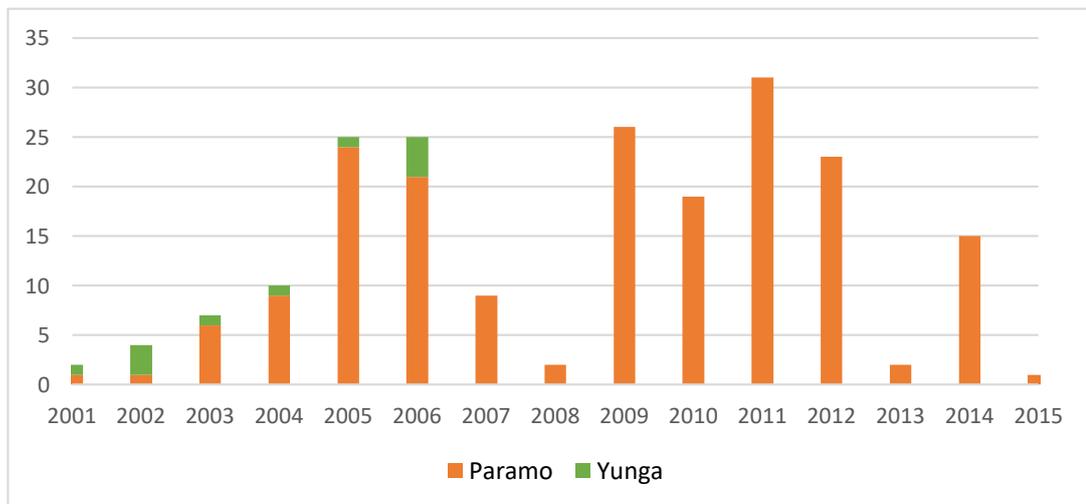


Figura 20. Variación anual de Focos de calor en la CCAH para el período 2001 – 2015.
Fuente. Elaboración propia.

Etapa 2: Información digital utilizada.

Pisos altitudinales.

Los pisos altitudinales que caracterizan la CCAH son: Montano (74%) y Montano bajo (22.9%); también encontramos el piso altitudinal Subandino con 2%, en menor superficie el Premontano (1%) y Andino (0.1%) que se restringe a la ubicación del nevado Cajamarquilla (Cuadro 15) (Ver anexo 2).

Cuadro 15. Pisos altitudinales

| Rango de elevación (msnm) | Pisos altitudinales | Área en la CCAH | Porcentaje en la CCAH |
|----------------------------------|----------------------------|------------------------|------------------------------|
| 1,000 – 2,000 | Premontano | 1,578 ha | 1 % |
| 2,000 – 3,000 | Montano bajo | 32,980 ha | 22.9 % |
| 3,000 – 4,000 | Montano | 106,752 ha | 74 % |
| 4,000 – 4,500 | Subandino | 2,254 ha | 2 % |
| 4,500 – 4,750 | Andino | 34,125 ha | 0.1% |

Fuente. Elaboración propia.

Pendiente.

La CCAH se caracteriza por tener mayormente pendientes Empinadas (34%), seguido por pendientes Muy empinadas (29%) y Extremadamente empinada (22%), propio de las zonas montañosas. Mientras que, en las riberas de ríos se encuentran pendientes Moderadamente empinadas (15%) (Cuadro 16). (Ver anexo 2).

Cuadro 16. Rangos de pendiente.

| Rangos de pendiente (%) | Descripción | Área en la CCAH | Porcentaje en la CCAH |
|--------------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------------|
| 15 - 25 | Moderadamente empinada | 21,884 ha | 15 % |
| 25 - 50 | Empinada | 48,385 ha | 34 % |
| 50 – 75 | Muy empinada | 42,108 ha | 29 % |
| >75 | Extremadamente empinada | 30,855 ha | 22 % |

Fuente. Elaboración propia.

Orientación.

La exposición al sol de las laderas en la CCAH muestra una distribución uniforme (Cuadro 17), con un 28% de dirección al Este, 27% al norte, 24% al sur y 21% al Oeste (Ver anexo 2). Sin embargo, aunque no sido un objetivo de investigación profundizar en esta variable, un análisis a mayor detalle podría permitir identificar aquellas zonas que reciben mayor cantidad de energía en forma de radiación solar.

Cuadro 17. Dirección de la pendiente.

| Rango del ángulo de la pendiente (°) | Dirección de la pendiente | Área en la CCAH | Porcentaje en la CCAH |
|--------------------------------------|---------------------------|-----------------|-----------------------|
| 315 – 360, 0 – 45 | Norte | 39,389 ha | 27 % |
| 45 - 135 | Este | 40,003 ha | 28 % |
| 135 – 225 | Sur | 34,159 ha | 24 % |
| 225 – 315 | Oeste | 29,971 ha | 21 % |

Fuente. Elaboración propia.

Zonas de Vida

Según el Mapa Ecológico del Perú con el Sistema Holdridge para la CCAH (Ver anexo 2), esta se caracteriza por ocupar principalmente las siguientes zonas de vida: bosque pluvial – Montano Tropical (41.9%), seguido por el bosque muy húmedo – Montano Bajo Tropical (19.3 %), el bosque muy húmedo – Montano Tropical (13.4%), el bosque húmedo – Montano Bajo Tropical (12.1%); y el páramo pluvial – Subandino Tropical (8.2%) (Cuadro 18).

Índice de vegetación de diferencia normalizada – NDVI.

Se utilizó la información de NDVI con imágenes satelitales RapidEye para diferenciar la zona ya cubierta por vegetación boscosa y las zonas de páramos o sin presencia de bosques. Existiendo un total de 62,562 ha cubiertas por bosques y 81,359 ha sin cobertura boscosa (Cuadro 19) (Anexo 2).

Cuadro 18. Zonas de Vida en la CCAH.

| Abreviatura | Descripción | Área en la CCAH | Porcentaje en la CCAH |
|--------------------|---|------------------------|------------------------------|
| bh – PT | bosque húmedo – Premontano Tropical | 3,206 ha | 2.3 % |
| bh – MBT | bosque húmedo – Montano Bajo Tropical | 16,706 ha | 12.1 % |
| bmh – PT | bosque muy húmedo – Premontano Tropical | 2,943 ha | 2.1 % |
| bmh – MBT | bosque muy húmedo – Montano Bajo Tropical | 26,726 ha | 19.3 % |
| bmh – MT | bosque muy húmedo – Montano Tropical | 18,583 ha | 13.4 % |
| bp – MBT | bosque pluvial – Montano Bajo Tropical | 6,154 ha | 0.4 % |
| bp – MT | bosque pluvial – Montano Tropical | 57,865 ha | 41.9 % |
| pp – SaT | páramo pluvial – Subandino Tropical | 11,372 ha | 8.2 % |
| pmh – SaT | páramo muy húmedo – Subandino Tropical | 44 ha | 0.3 % |

Fuente. Elaboración propia.

Cuadro 19. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada en la CCAH.

| Descripción | Área en la CCAH | Porcentaje en la CCAH |
|------------------------|------------------------|------------------------------|
| Zona boscosa | 62,562 | 43 % |
| Sin vegetación boscosa | 81,359 | 57 % |

Fuente. Elaboración propia.

Valor Ecológico.

EL mapa de Valor Ecológico para la Región San Martín se extrajo de la Propuesta de Zonificación Ecológica y Económica como base para el Ordenamiento Territorial (2006). Estando caracterizada la CCAH por tener mayor superficie con Alto Valor Ecológico (73%), y Muy Alto Valor Ecológico (24%). Sin embargo, también existen zonas con Bajo Valor Ecológico (3%) restringidas a la ubicación de los centros poblados Nuevo Bolívar y El Progreso, por el sur y por el norte, el camino de herradura hacia La Morada. (Cuadro 20) (Anexo 2).

Cuadro 20. Valor ecológico en la CCAH.

| Descripción | Área en la CCAH | Porcentaje en la CCAH |
|-------------|-----------------|-----------------------|
| Muy Alto | 34,499 ha | 24 % |
| Alto | 106,315 ha | 73% |
| Bajo | 2,493 ha | 3% |

Fuente. Elaboración propia.

Variables bioclimáticas.

La caracterización de la CCAH según las principales variables bioclimáticas de Worldclim (Anexo 3) es la siguiente: la Temperatura media anual (Bio 1) está en un rango mínimo de 4.5°C hasta un máximo de 20°C; mientras que la temperatura máxima del mes más caliente (Bio 5) puede llegar hasta los 27°C en promedio y la temperatura mínima del mes más frío (Bio 6) puede llegar hasta -4.8°C. Además la temperatura media del trimestre más húmedo (Bio 8), del trimestre más seco (Bio 9), del trimestre más caliente (Bio 10) y del trimestre más frío (Bio 11) no presenta mucha variación en sus valores.

La precipitación total anual (Bio 12) está en un rango de 1,000 mm hasta 1,450 mm; mientras que, la precipitación del mes más húmedo (Bio 13) llega hasta los 220 mm, y la precipitación del mes más seco (Bio 14) varía entre los 20 y 40 mm presentando una distribución espacial que aumenta de sur a norte. Este cambio lo observamos mejor en la estacionalidad de la precipitación (Bio 15), presentando mayor coeficiente de variación en la zona sur de la CCAH. Por último, la precipitación del trimestre más húmedo (Bio 16) y del trimestre más caliente (Bio 18) puede variar desde 350mm hasta 500mm; en cambio la precipitación del trimestre más seco (Bio 17) y del trimestre más frío (Bio 19) está en un rango entre 70 y 130 mm.

Etapa 3: Evaluación de modelos y validación.

Después de correr el modelo por segunda vez con las variables más importantes, analizamos el AUC obtenido (Figura 21), el cual tiene un valor de AUC = 0.948 que indica una excelente capacidad predictiva (AUC > 0.9) según Araújo y otros (2005).

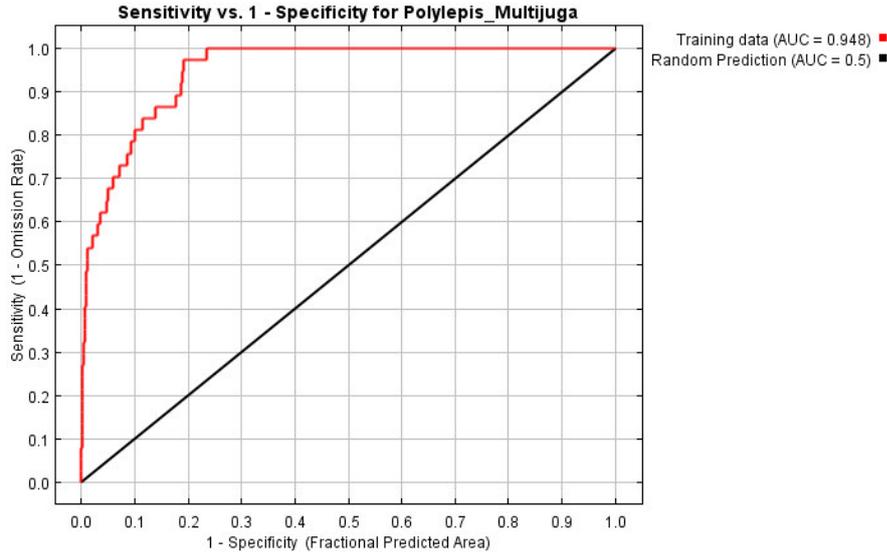
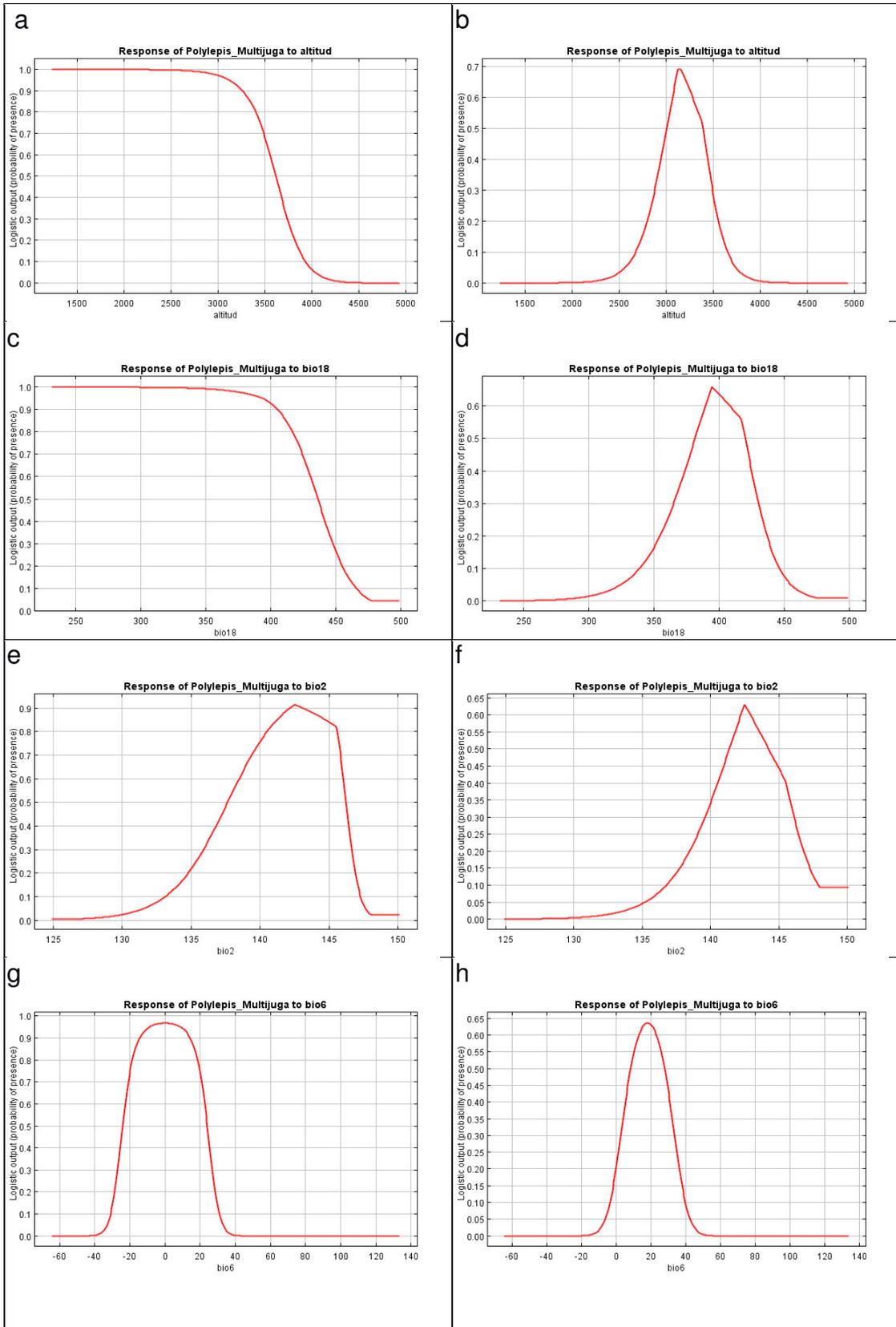


Figura 21. Análisis del Área por Debajo de la Curva – AUC. Fuente. Resultados del Software MaxEnt.

Seguido, analizamos los dos tipos de curvas de respuesta (Figura 22) que tienen similitud en la distribución de datos, lo cual indica que se logró independencia en las variables seleccionadas. Las curvas corresponden a las variables altitud, pendiente, orientación, Bio6 – Temperatura mínima del mes más frío, Bio2 – Rango de temperatura diurno medio (Temp. Máxima – Temp. Mínima, Bio 18 – Precipitación del trimestre más caliente y Zonas de vida.

La curva de respuesta para la altitud logra su máxima influencia cerca de los 3200 msnm, dentro de un rango entre los 3000 msnm hasta los 3500 msnm aproximadamente, abarcando principalmente el piso altitudinal Montano (3,000-4000 msnm); la pendiente presenta mayor influencia para valores menores a 40%, indicando pendientes Moderadamente empinadas y Empinadas; la orientación tiene máxima influencia en las laderas con orientación hacia el Sur (100°-240°); la Precipitación del trimestre más caliente (bio18) tiene una máxima influencia en un rango de 350 mm – 450 mm; el Rango de temperatura diurno medio (Temp. Máxima – Temp. Mínima) (bio2) tiene su máxima influencia a los 14.3°C; la Temperatura mínima del mes más frío (bio6) muestra mayor probabilidad de encontrar a la especie entre los 0°C – 4°C; Por último, encontramos que la especie en

estudio presenta mayor predisposición para desarrollarse en las zonas de vida: bosque muy húmedo – Montano Tropical (número 9) y bosque húmedo – Montano Bajo Tropical (número 2).



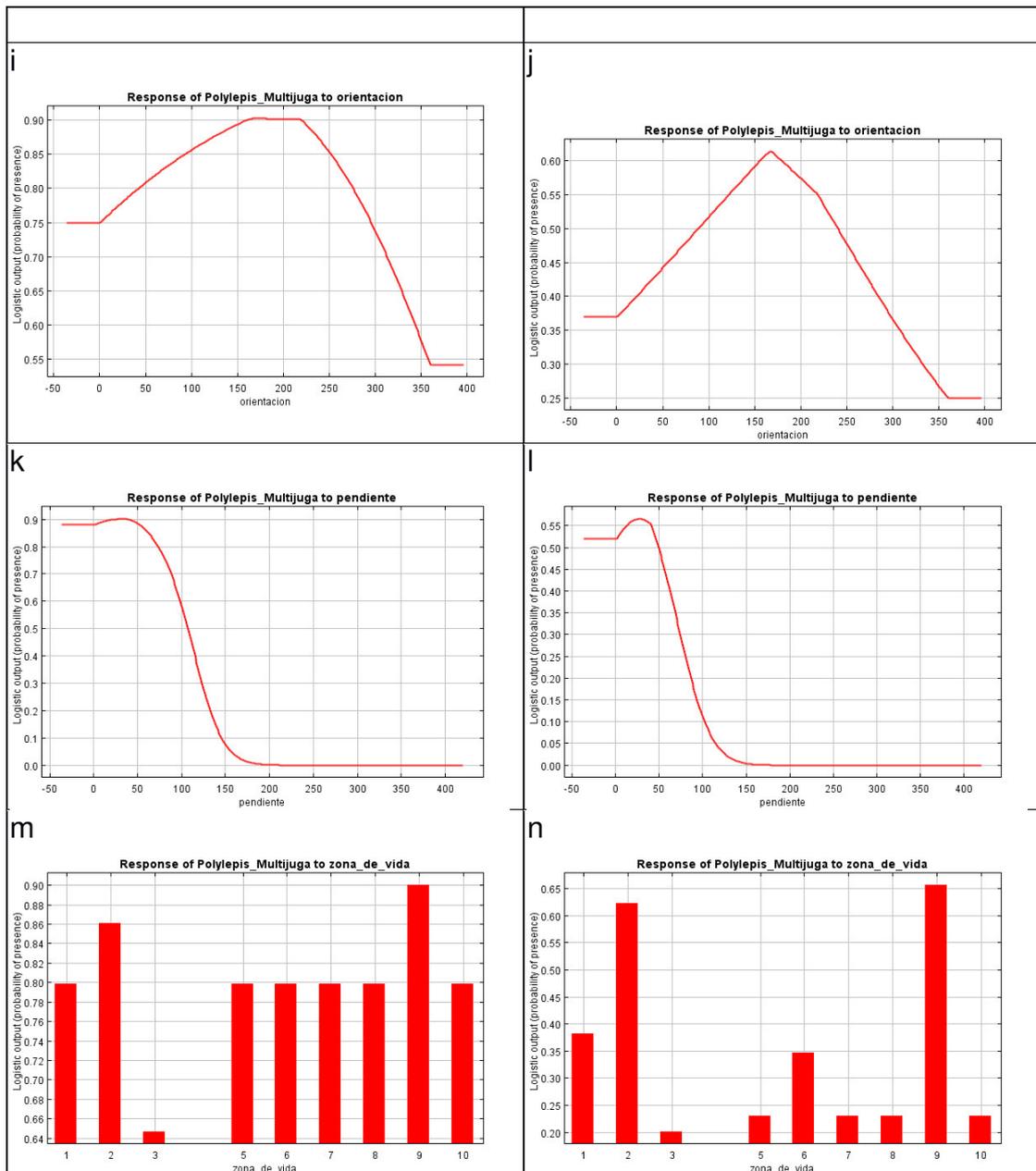


Figura 22. Curvas de respuesta de las variables ambientales utilizadas para generar el modelo de distribución potencial de Bosques Altoandinos (*P. multijuga*). La columna de izquierda tiene en cuenta el efecto de todas las variables y la columna de la derecha tiene en cuenta solo el valor de la variable correspondiente.

Contribución de las variables

El Cuadro 21 muestra las estimaciones de las contribuciones relativas de las variables ambientales en el modelo de MaxEnt. Siendo las variables con más importancia: la Precipitación del trimestre más caliente (bio18) con 39.3% de entre las variables bioclimáticas; le sigue las zonas de vida con 16.8% y la altitud con 13%, siendo la más importante entre las variables topográficas.

Cuadro 21. Porcentaje de contribución de las variables.

| Variable | Porcentaje de contribución | Rango |
|--|----------------------------|-----------------------|
| Precipitación del trimestre más caliente (bio18) | 39.3 | 350 - 450 mm |
| Zona_de_vida | 16.8 | bmh – MT, bh – MBT |
| Altitud | 13 | 3000 - 3500 msnm |
| Rango de temperatura diurno medio (bio2) | 11.7 | 14 - 14.5°C |
| Pendiente | 7.4 | Pendiente Empinada |
| Temperatura mínima del mes más frío (bio6) | 6.9 | 0 - 4°C |
| Orientación | 4.9 | Sur – oeste |

Fuente. Adaptación propia del resultado del software MaxEnt.

Modelo Jackknife

En la Figura 21, se observa que La variable ambiental más importante utilizada en el modelo es la **Altitud**, que predice de forma más efectiva cuando se utiliza de forma aislada; es decir, es la que tiene la información más útil. A su vez, es la variable ambiental que más disminuye el desempeño del modelo cuando se omite, pues tiene la mayoría de la información que no está presente en las demás variables.

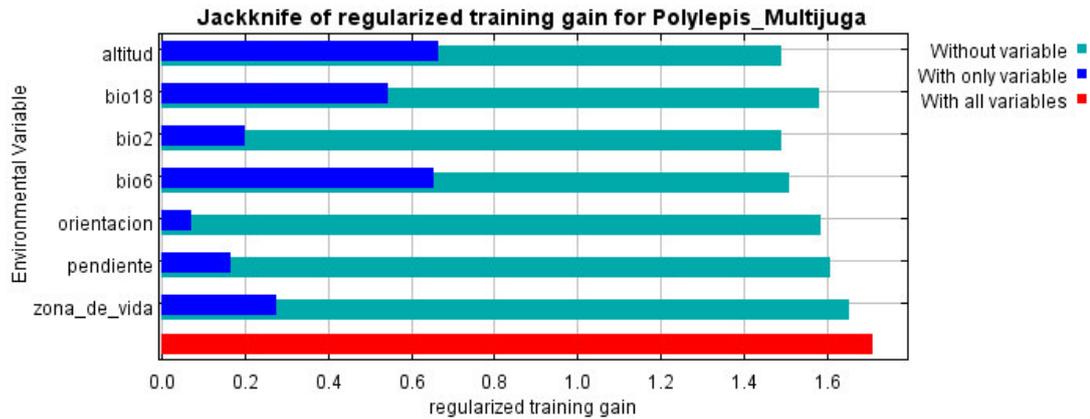


Figura 23. Resultados de la prueba de jackknife para variables de importancia de *P. multijuga* (MaxEnt).

Finalmente, se obtiene el mapa de probabilidad de distribución potencial (Figura 24) para bosques altoandinos (*P. multijuga*), en el cual los tonos más cálidos muestran las áreas con mayor probabilidad de ocurrencia de la especie y los puntos blancos muestran los registros de la especie (puntos de presencia).

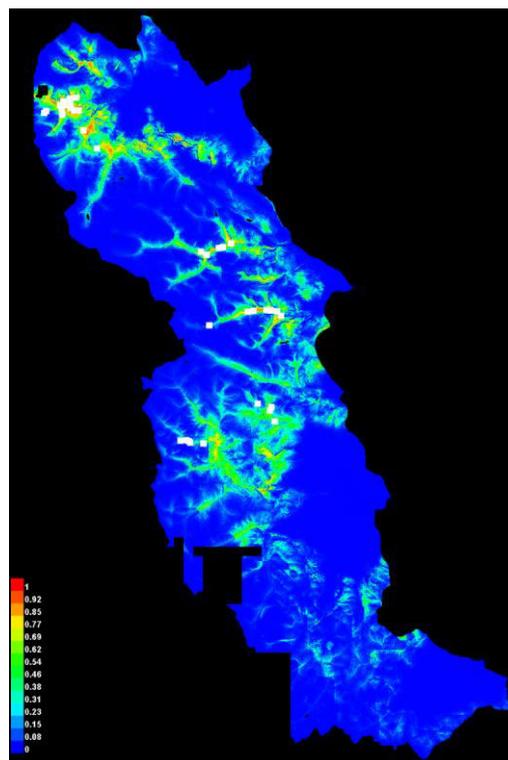


Figura 24. Mapa de probabilidad de distribución para bosques altoandinos (*P. multijuga*) obtenido a través del programa MaxEnt.

Una vez obtenido el mapa de probabilidad de distribución (Figura 30), lo clasificamos utilizando los tres umbrales (Cuadro 22) con valores más altos, pues ajustan más las áreas potenciales; con estos valores generamos tres clases: la primera que va desde 0.144 hasta 0.152 (Probabilidad baja); la segunda desde 0.152 hasta 0.211 (Probabilidad media) y la tercera para valores mayores de 0.211 (Probabilidad alta). Además se incluye una cuarta clase para los píxeles con valores menores al del umbral menos exigente (0.144) que se consideran como zonas sin las condiciones climáticas apropiadas para la ocurrencia de la especie.

Cuadro 22. Umbrales logísticos y las correspondientes tasas de omisión.

| Cumulative threshold | Logistic threshold | Description | Fractional predicted area | Training omission rate |
|-----------------------------|---------------------------|---|----------------------------------|-------------------------------|
| 1.000 | 0.017 | Fixed cumulative value 1 | 0.495 | 0.000 |
| 5.000 | 0.065 | Fixed cumulative value 5 | 0.302 | 0.000 |
| 10.000 | 0.122 | Fixed cumulative value 10 | 0.212 | 0.027 |
| 8.417 | 0.106 | Minimum training presence | 0.234 | 0.000 |
| 12.071 | 0.144 | 10 percentile training presence | 0.188 | 0.081 |
| 17.770 | 0.211 | Equal training sensitivity and specificity | 0.139 | 0.135 |
| 11.615 | 0.140 | Maximum training sensitivity plus specificity | 0.192 | 0.027 |
| 5.193 | 0.068 | Balance training omission, predicted area and threshold value | 0.297 | 0.000 |
| 12.657 | 0.152 | Equate entropy of thresholded and original distributions | 0.182 | 0.108 |

Fuente. Resultados del Software MaxEnt.

A partir de los resultados obtenidos del mapa de probabilidad de distribución,

podemos inferir que al evaluar esta capa, las zonas de cobertura boscosa, excluyendo aquellas con deforestación o algún grado de alteración, son potenciales de distribución actual. Determinando que existe en la CCAH, un total de 11,881 ha de bosques altoandinos con predominancia del género *Polylepis* (Cuadro 23) (Anexo 4).

Cuadro 23. Distribución potencial en la CCAH.

| Distribución potencial | Área en la CCAH | Porcentaje en la CCAH |
|--|----------------------|-----------------------|
| Distribución potencial actual | 11,881 ha | 8% |
| Distribución potencial para restauración | 14,602 ha | 10% |
| Sin potencial | 117,445.09 ha | 82% |
| Total | 143,928.09 ha | 100% |

Fuente. Elaboración propia.

La determinación de zonas prioritarias de restauración, se realizó mediante la siguiente selección de criterios, otorgándole valores del 0 al 3, en la que 0 significa prioridad nula; el valor 3 significa Alta prioridad; el valor 2, Mediana prioridad y el valor 1, Baja prioridad (Cuadro 24).

Cuadro 24. Criterios utilizados para la determinación de las zonas prioritarias para restauración.

| Criterio | Escala de medida | Estandarización |
|-------------------------------------|-----------------------------|-----------------|
| Probabilidad de distribución | >0.211 | 3 |
| | 0.152>;<0.211 | 2 |
| | 0.144>;<0.152 | 1 |
| | <0.144 | 0 |
| NDVI | Área sin vegetación actual. | 3 |
| | Área boscosa. | 0 |
| Valor Ecológico | Alto | 3 |
| | Medio | 2 |
| | Bajo | 1 |

Fuente. Elaboración propia.

La superficie total de zonas potenciales para restauración equivale a un 10% del área de la CCAH, y después de la evaluación multicriterio que se realizó

agregando las capas de NDVI y Valor ecológico, obtuvimos las zonas prioritarias para restauración según la escala cualitativa: Alto, Medio y Bajo (Anexo 5). Del total de zonas potenciales para restauración existe un 1.5% con alta prioridad que se distribuye mayormente en la zona norte de la CCAH (Cuadro 25).

Cuadro 25. Nivel de prioridad de las zonas potenciales.

| Nivel de prioridad | Área ocupada | Porcentaje de prioridad |
|---------------------------|---------------------|--------------------------------|
| Alto | 1,810 ha | 1.5 % |
| Medio | 12,228 ha | 8 % |
| Bajo | 608 ha | 0.5 % |

Fuente. Elaboración propia.

CONCLUSIONES.

1. Variables sociales en la distribución actual.

La distribución actual muestra que la mayor parte del ecosistema ha sido intervenido por la población, por lo cual es necesaria su restauración para recuperar los servicios ambientales que brindan. Identificando que los focos de calor permite el análisis temporal y espacial del estado de conservación de los bosques altoandinos por tener una relación inversa.

2. Modelo de probabilidad de distribución: Variables topográficas y bioclimáticas según el software MaxEnt.

El software MaxEnt permite proyectar de manera eficiente la probabilidad de distribución de la especie *P. multijuga* característica de los bosques altoandinos según las variables topográficas y climáticas. Siendo la variable más importante la altitud, por ser la variable que tiene la información más útil en la predicción del modelo de distribución.

3. Distribución potencial de bosques altoandinos según el software MaxEnt.

Existe un 18% de la superficie total de la CCAH que tiene condiciones ambientales en las que se puede desarrollar el ecosistema de bosques altoandinos, el cual se clasifica en una distribución potencial actual igual al 8% (11,881 ha) del área total de la CCAH y un 10% (14,602 ha) con potencial para restauración de bosques altoandinos.

4. Zonas prioritarias para restauración de bosques altoandinos.

Las zonas prioritarias se dividieron en una escala de tres valores cualitativos: un área de 1,810 ha de Alta prioridad; 12,228 ha de prioridad Media y 608 ha de prioridad Baja.

RECOMENDACIONES.

1. Continuar con las investigaciones y propuestas de actividades económicas sostenibles que mejoren la calidad de vida de las personas que hacen uso de los recursos naturales en la Concesión para Conservación Alto Huayabamba.
2. Generar una base de datos espacial con presencias georreferenciadas de flora y fauna amenazada o de importancia en la Concesión para Conservación Alto Huayabamba, que permitan aumentar el conocimiento de su distribución espacial.
3. Realizar visitas a campo que permitan ensayar técnicas de restauración adecuadas para cada área, considerando las especies nativas descritas en la investigación.
4. Comenzar con las actividades de restauración de bosques altoandinos en zonas con Alta Prioridad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amazónicos por la Amazonía – AMPA. 2016. Observatorio de fuego - 2015. Documento de trabajo sobre Incendios Forestales en la Región San Martín. Disponible <<http://ampaperu.info/document/observatorio-de-fuego/>> (Consultado el 23 de Agosto del 2016)
- AMPA. 2008. Plan de Manejo de la Concesión para Conservación Alto Huayabamba. 2008 - 2013.
- AMPA. 2006. Propuesta Técnica que sustenta la creación de la Concesión para Conservación “Alto Huayabamba”.
- Arauco, Sembremos futuro. 2012. Plan de restauración del bosque nativo Arauco. Versión 02, 69pp + 10 Anexos. Chile.
- Araújo, M.; Pearson, R.; Thuiller W. and Erhard, M. 2005. Validation of species–climate impact models under climate change. *Global Change Biology* 11: 1504–1513. Disponible <https://www.researchgate.net/publication/227691158_Validation_of_species-climate_impact_models_under_climate_change> (Consultado el 01 de enero del 2017).
- Benito de Pando, B. 2009. Ecoinformática Aplicada a conservación: simulación de efectos del cambio global en la distribución de la flora de Andalucía. Tesis Doctoral. Univ. De la Granada. España.
- BlackBridge. 2015. Imágenes Satelitales Especificaciones Técnicas. Disponible <http://www.blackbridge.com/rapideye/upload/REProduct_Specifications_SPA.pdf> (Consultado el 02 de junio del 2016).
- Braun, G., 1997. The use of digital methods in assessing forest patterns in an andean environment: The polylepis example. *Mountain Research and Development*, vol. 17, No. 3, pp. 253-262.
- Burel, F. y J. Baudry. 2002. Ecología del Paisaje. Conceptos, métodos y aplicaciones. Ed. Mundi-Prensa. España. 353 pp.
- Castillo, O. 2012. Aplicación espectral y topológica en el procesamiento de imágenes satelitales. Tesis para optar al título de Magister en Matemática Aplicada. Universidad Nacional de Colombia. Colombia.
- Chamie, A. 2004. El medio ambiente y su protección a través de las acciones populares. Tesis para optar el título de Abogado. Pontificia

- Universidad Javeriana. Bogotá – Colombia.
- Chuvienco, E. 1990. Fundamentos de Teledetección Espacial. Ed. RIALP S.A. Madrid. España. Pp. 450.
- Chuvienco, E. 2008. Teledetección Ambiental. La Observación de la Tierra desde el Espacio. 3ra edición actualizada, Editorial Ariel Ciencia. Barcelona. 595 p.
- Correal C. y García J. 2012. Aspectos físicos a considerar en la calibración radiométrica de imágenes satelitales. Colombia. Disponible <<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/UDGeo/article/view/4406/7007>> (Consultado el 02 de junio del 2016).
- Cruzado, L. 2010. Determinación de las reservas de carbono en la biomasa aérea de los bosques altoandinos de la Concesión para Conservación Alto Huayabamba – San Martín. Tesis para optar el título de Ingeniero en recursos naturales renovables. Universidad Nacional Agraria de la Selva. Tingo María, Perú.
- Dourojeanni, P. 2008 Distribución y conectividad de bosques alto andinos (*Polylepis*) en la cuenca alta del río Pativilca. Investigación presentada para optar el título profesional en Geografía. Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Perú.
- Esparza, S. 2014. Desarrollo de un algoritmo para clasificación de objetos en imágenes RapidEye. Tesis para optar el grado de master en Ciencias. Institución de enseñanza e investigación en ciencias agrícolas. México.
- Faúndez, M. 2014. Análisis geográfico de áreas prioritarias para restauración ecológica en la Isla Robinson Crusoe. Memoria para optar el título de Geógrafa. Universidad de Chile. Chile.
- Figueroa J.; Stucchi M.; Rojas-VeraPinto, R. 2016. Modelación de la distribución del oso andino *Tremarctos ornatus* en el bosque seco del Marañón (Perú). Revista Mexicana de Biodiversidad. Volume 87, Issue 1, March 2016, Pages 230–238.
- Fjeldsa, J., 2002. "Polylepis Forest – vestiges of vanishing ecosystem in the Andes", *Ecotropica* 8: 93-95, 2002, pp: 111-125.
- Flores Negrón, C.; Cruzado Blanco, L.; Panduro Cometivos, J.; Valdez Domínguez, M.; Peche Balcazar, F.; Cusquipoma Echeverría, A.; Valle R., E. R.; Valle Valdivia, V.; Egoavil Flores, M. 2009. Queñuales

- (*Polylepis* spp.) en la Concesión para Conservación Alto Huayabamba, San Martín: Primera aproximación. Documento de Trabajo (Manuscrito). Amazónicos por la Amazonía – AMPA, Moyobamba.
- Forman, T. T. 1995a. Landscape and Regional Ecology. Cambridge, MA: Cambridge University Press.
- Forman, T. T. 1995b. Land mosaics, Cambridge University Press. Cambridge.
- Forman, R.; Godron M. 1986. Landscape ecology. Wiley & Sons, New York. Pp. 640.
- Gálmez V. y Kómetter R. 2009. Perspectivas y posibilidades de REDD+ en Bosques Andinos. Serie Investigación y Sistematización # 11. Programa Regional ECOBONA - INTERCOOPERATION. Lima, Perú.
- García, E. 2006. Corrección del sombreado topográfico en imágenes landsat etm+, aplicado al inventario de cuerpos de agua. Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Geógrafo. Universidad Nacional Mayor de San Marcos – Lima.
- Gómez M., Barredo J. 2005. Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio. 2da Edición. 279 pp.
- Gonzáles, M. 2014. Identificación de áreas prioritarias para restauración ecológica, en la región Chingnahuapan-Zacatlán, Puebla. Tesis para optar el grado de Master en Ciencias. Instituto de enseñanza e investigación en ciencias agrícolas. México.
- Gurrutxaga, M. y Lozano P. 2008. Ecología del Paisaje. Un marco para el estudio integrado de la dinámica territorial y su incidencia en la vida silvestre. Estudios Geográficos, LXIX (265), 519-543.
- Hasse, G. 1986. Theoretical and methodological foundations of landscape ecology. In: Landscape Ecology. Abstract of Lecture. International Training Course. Institute of Geography and Geoecology, GDR Academy of Science, Leipzig, pp: 4-7.
- Hensen I. Los bosques de *Polylepis*: el pasado, el presente y el futuro. Universität Halle, Alemania. Conferencia Magistral en el IV Congreso Internacional de Ecología y Conservación de Bosques de *Polylepis*. 5 al 9 de septiembre de 2016. Disponible <

- http://media.wix.com/ugd/dc197f_39fcaade504446639d8a62a341267a4.pdf> (Consultado el 24 de enero del 2017).
- Huerta, P. 2005. Mapa de localización de los bosques nativos Andinos del Perú, primera aproximación – Memoria Descriptiva. Consejo Nacional del Ambiente. Convenio CONAM/IC-PROBONA.
- Hijmans R.J., Cameron S.E., Parra J.L., Jones P.G. & Jarvis A. 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *Global Change Biology. International Journal of Climatology*. 25: 1965-1978.
- Hijmans R.J. & Graham C.H. 2006. The ability of climate envelope models to predict the effect of climate change on species distributions. *Global Change Biology*. 12:2272-2281.
- Instituto Nacional de Recursos Naturales – INRENA. 1995. Mapa Ecológico del Perú. Guía Explicativa.
- Irastorza, P. 2006. Integración de la ecología del paisaje en la planificación territorial. Aplicación a la Comunidad de Madrid. Tesis doctoral. Disponible <> (Consultado el 28 de junio de 2016).
- Jensen, J. R. 2005. *Introductory digital image processing: a remote sensing perspective*. Prentice Hall, New Jersey.
- Keenleyside, K.A., N. Dudley, S. Cairns, C.M. Hall y S. Stolton. 2014. *Restauración Ecológica para Áreas Protegidas: Principios, directrices y buenas prácticas*. Gland, Suiza: UICN. x + 118pp.
- Kessler, M. 2006. Bosques de Polylepis. *Botánica Económica de los Andes Centrales*. Pp. 110-120. Universidad Mayor de San Andrés. La Paz (Bolivia). Disponible <
<http://www.beisa.dk/Publications/BEISA%20Book%20pdfer/Capitulo%2007.pdf>> (Consultado el 11 de julio de 2016).
- Kómetter, R. 2011. Ecosistemas forestales andinos en el Perú: visión de las experiencias y perspectivas del manejo forestal. Serie investigación y sistematización, número 24. Programa Regional ECOBONA-COSUDE. Lima.
- Llambí, L. 2015. Estructura, diversidad y dinámica de la vegetación en el ecotono bosque-páramo: revisión de la evidencia en la Cordillera de Mérida. *Acta biol. Colomb.* 20 (3):5-19. Disponible

- <<http://dx.doi.org/10.15446/abc.v20n3.46721>> (Consultado el 28 de junio del 2016).
- Lopez, A. y Delgado K. 2009. Modelación Hidrológica de la Subcuenca Lempa Alto, en cooperación con la Comisión Trinacional del Plan Trifinio (El Salvador, Honduras, Guatemala). Tesis para optar el título de Ingeniero Civil. Universidad de El Salvador - El Salvador.
- Martín, F., Corbera, J., Marchan, J. F., González, A. 2011. RapidEye and the Rededge band for modelling the vegetation and the recovery of the soil moisture. *Mapping*, núm. 50, pág. 10-20.
- Mateo, J. 2000. Geografía de los paisajes. Primera parte. Paisajes Naturales. Universidad de la Habana. Cuba.
- Mateo, J. 2002. Geoecología de los paisajes: Bases para la Planificación y Gestión Ambiental. Universidad de la Habana. Cuba.
- Mayorga, T. 2011. Uso de Interferometría SAR (Synthetic Aperture Radar) en la ladera occidental del Cerro Iguazo, comunidad Tumba, parroquia Quimiag, cantón Riobamba, provincia de Chimborazo – Ecuador, para determinar la deformación de la ladera por los movimientos en masa. Tesis para acceder al título de Magíster en Aplicaciones Espaciales de Alerta y Respuesta Temprana a Emergencias. Universidad Nacional de Córdoba – Ecuador.
- Mejía, T. 2013. Ecología de paisaje en el corredor biológico Caribe del departamento de Atlantida, Honduras: Buscando la conectividad. Tesis para optar el grado de Máster en Ordenamiento y Gestión del territorio. Universidad Nacional Autónoma de Honduras. Honduras.
- Mendoza, W. y León, B. 2006. Rosaceae endémica del Perú. *Revista Peruana de Biología* 13 (2): 583 – 585. Número especial. Facultad de Ciencias Biológicas UNMSM. Disponible <<http://sisbib.unmsm.edu.pe/BVrevistas/biologia/v13n2/pdf/a102.pdf>> (Consultado el 18 de julio del 2016).
- Mendoza, W. y Cano A. 2011. Diversidad del género *Polylepis* (Rosaceae, Sanguisorbeae) en los Andes peruanos. *Rev. peru. Boil.* 18(2): 197-200.
Disponible <<http://sisbib.unmsm.edu.pe/BVRevistas/biologia/v18n2/pdf/a11v18n2.pdf>> Consultado el 16 de agosto del 2016.

- Mendoza, W. y Cano A. 2012. El género *Polylepis* en el Perú. Taxonomía, Morfología y Distribución. Editorial Académica Española.
- Milman, A. S. 1999. *Mathematical Principles of Remote Sensing: Making Inferences from Noisy Data*. Ann Arbor Press, Ann Arbor, MI.
- Ministerio del Ambiente – MINAM. 2015. Propuesta de Estrategia Nacional sobre Bosques y Cambio Climático – ENBCC. Hacia una estrategia nacional sobre bosques y cambio climático. Documento preliminar. Lima. Perú.
- MINAM. 2014a. Protocolo: Análisis de las Dinámicas de Cambio de Cobertura de la tierra en la Comunidad Andina. Dirección General de Ordenamiento Territorial – Lima. 72 p.: il.
- MINAM. 2014b. Protocolo: Evaluación de la Exactitud Temática del Mapa de Deforestación. Dirección General de Ordenamiento Territorial – Lima. 32 p.: il.
- MINAM. 2014c. Guía Técnica para el uso de las imágenes RapidEye. Dirección General de Ordenamiento Territorial. Lima.
- MINAM, 2015. Mapa nacional de cobertura vegetal: memoria descriptiva / Ministerio del Ambiente, Dirección General de Evaluación, Valoración y Financiamiento del Patrimonio Natural. -- Lima: 100: il col., maps., tbls.
- Ministerio de Medio Ambiente y Agua - MMAYA. 2012. Plan Nacional para la Conservación y Manejo Sostenible de los Bosques de *Polylepis* (Kewiña, Keñua y/o Lampaya) y su Biodiversidad Asociada (Programas y Lineamientos Generales). EDOBOL. La Paz. 43 p.
- Morales, N. 2012. Modelos de distribución de especies: Software Maxent y sus aplicaciones en Conservación. *Revista Conservación Ambiental*. Volumen 2/Número 1/Notas y Comentarios/Páginas 1-5. Disponible <<http://www.ecomabi.cl/biblioteca/category/45-volumen-2-numero-1?download=300:notas-y-comentarios-modelos-de-distribucion-de-especies-software-maxent-y-sus-aplicaciones-en-conservacion>> (Consultado el 08 de diciembre del 2016).
- Moreno, A. 2014. Ecología del paisaje y cambio del uso del suelo y vegetación en la Sierra San Antonio Peña Nevada, Zaragoza, Nuevo León. Tesis para optar el grado de Doctor en Ciencias con especialidad en Ecología. Universidad Autónoma de Nuevo León.

México.

- Naoki K., M. I. Gómez, R. P. López, R. I. Meneses & J. Vargas 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.
- Pérez, D. 2012. Identificación de ecosistemas en la Provincia de Napo –
Ecuador mediante análisis digital de imágenes satelitales. Tesis de
grado presentada como requisito para la obtención del título de
Magister en Sistemas de Información Geográfica. Universidad San
Francisco de Quito - Ecuador.
- Phillips, S., 2006. Una Breve Guía Didáctica sobre MaxEnt. AT&T Research.
Disponible
<<https://www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent/tutorial/tutorial-in-spanish.doc>> (Consultado el 20 de setiembre del 2016).
- Quinteros, N. 2010. Genetic structure of fragmented *P. multijuga* plige
(Rosaceae) Forests. Master's thesis for the degree of master of
Science.
- Quispe, T. 2015. Biogeografía y cambio climático en el Perú: análisis de
escenarios climáticos y endemismo de *Phyllodactylus interandinus*,
Bachia intermedia y *Stenocercus huancabambae*, entre Amazonas y
Cajamarca, distritos de El Milagro y Bellavista. Tesis para optar el título
de Licenciado en Geografía y Medio Ambiente. Pontificia Universidad
Católica del Perú. Lima – Perú. Disponible
<<http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/123456789/6503>>
(Consultado el 22 de Diciembre del 2016).
- Ramírez, L. 2013. Evaluación de la Heterogeneidad de los paisajes físico-
geográficos de Michoacán. Tesis para optar el grado de Doctor en
Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- Recharte, J., Albán L., Arévalo R., Flores E., Huerta L., Orellana M.,
Oscanoa L. y Sánchez P. 2002. El Grupo Páramos/Jalcas y Punas del
Perú: Instituciones a acciones en beneficio de comunidades y
ecosistemas altoandinos. Instituto de Montaña - Huaraz, Perú.
- Reguerin, J. 2012. Distribución potencial de especies de la familia Araliaceae
de la región Madidi. Tesis de grado. Universidad Mayor de San

- Andrés. La Paz - Bolivia. Disponible <
http://www.mobot.org/PDFs/research/madidi/Itla_2010_Thesis.pdf>
 (Consultado el 22 de Diciembre del 2016).
- Reninson, D.; Cingolani, A. y Suarez, R. 2002. Efectos del fuego sobre un bosquecillo de *Polylepis australis* (Rosaceae) en las montañas de Córdoba, Argentina. *Revista Chilena de Historia Natural* 75: 719-727. Disponible <
http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0716-078X2002000400007> (Consultado el 24 de enero del 2017)
- Sarmiento, C., y León, O. (eds.). 2015. Transición bosque-páramo. Bases conceptuales y métodos para su identificación en los Andes colombianos. Bogotá: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. 156 págs.
- Scheldeman, Xavier y Maarten van Zonneveld. 2011. Manual de Capacitación en Análisis Espacial de Diversidad y Distribución de Plantas. Bioersivity International, Roma, Italia. 186 pp.
- Sebem, E., González C., Garcia R., De la Vega R. y Valverde A. 2005. Aportación del NDVI y los sistemas expertos en la mejora de la clasificación temática de imágenes multiespectrales. *Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoramento Remoto*, Goiania, Brasil, 16-21 abril 2005, INPE, p 2763-2771. Disponible <
<http://marte.sid.inpe.br/col/Itid.inpe.br/sbsr/2004/11.18.11.42/doc/2763.pdf>> (Consultado el 13 de octubre del 2016).
- Tobón, C. 2009. Los bosques andinos y el agua. Serie investigación y sistematización #4. Programa Regional ECOBONA – INTERCOOPERATION, CONDESAN. Quito.
- Useche, D. 2006. Diseño de redes ecológicas de conectividad para la conservación y restauración del paisaje en Nicaragua, Centroamérica. Tesis sometida a consideración de la Escuela de Posgrado, Programa de Educación para el Desarrollo y la Conservación del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza – CATIE, como requisito para optar por el grado de: Magister Scientiae en Manejo y Conservación de Bosques Tropicales y Biodiversidad. Costa Rica.

- Varela, S.; Terribile, L.C.; de Oliveira, G.; Diniz-Filho, J.A.F.; González-Hernández, J.; Lima-Ribeiro, M.S. 2015. ecoClimate vs. Worldclim: variables climáticas SIG para trabajar en biogeografía Ecosistemas, vol. 24, núm. 3, diciembre, 2015, pp. 88-92. Asociación Española de Ecología Terrestre. Alicante, España. Disponible <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=54043399011>> (Consultado el 17 de octubre del 2016).
- Vargas, O. 2007. Guía metodológica para la RESTAURACIÓN ECOLÓGICA del bosque altoandino. Primera edición. Grupo de restauración ecológica. Departamento de Biología. Universidad Nacional de Colombia.
- Veras, L. 1995. Do espaço a paisagem, da paisagem ao lugar: a filosofia, as ciencias e as artes, como instrumentos de reflexao na conceituacao sobre lugares urbanos. Revista de Geografía. UFPE/ DGD, 1995, pp-103-145.
- Vila, J.; Varga, D.; Llausàs, A. y Ribas, A. 2006. Conceptos y métodos fundamentales en ecología del paisaje (landscape ecology). Una interpretación desde la geografía. Universitat de Girona. Unitat de Geografia i Institut de Medi Ambient. Francia. Disponible <http://web2.udg.edu/aigua/material/Conceptos%20y%20m%C3%A9todos%20fundamentales%20en%20ecolog%C3%ADa%20del%20paisaje_DAG_48_2006.pdf> (Consultado el 02 de julio del 2016).
- Weichelt, H.; Rosso, P.; Marx, A.; Reigber, S.; Douglass, K. y Heynen, M. 2014. The White Paper: The RapidEye Red Edge Band. Disponible <https://resa.blackbridge.com/files/2014-06/Red_Edge_White_Paper.pdf> (Consultado el 17 de julio del 2016).
- Wilson, E. 1992. The diversity of life. Cambridge: Harvard Univesity Press.
- Zutta, B.; Rundel, P.; Saatchi, S.; Casana, J.; Gauthier, P.; Soto, A.; Velazco, Y. y Buermann, W. 2012. Prediciendo la distribución de Polylepis: bosques Andinos vulnerables y cada vez más importantes. Revista Peruana de Biología, vol. 19, núm. 2, pp. 205-212. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima, Perú.

ANEXOS

Anexo 1. Fotografías de la visita de campo.



Fotografía 25. Páramo en zonas con pendiente empinada.



Fotografía 26. Páramo en zonas con pendiente muy empinada.



Fotografía 27. Páramo en zonas con pendiente empinada.



Fotografía 28. Ganadería en zonas con pendiente muy empinada.



Fotografía 29. Presencia de quemas en zonas con pendiente extremadamente empinada.



Fotografía 30. Presencia de neblina.



Fotografía 31. Presencia del género *Escallonia* sp. (Chachacomo) en zona con pendiente moderadamente empinada.



Fotografía 32. Zona con predominancia del género *Weinmannia* sp. (Perejil) con pendiente moderadamente empinada.



Fotografía 33. Individuo joven de *Polylepis multijuga* al lado del río.



Fotografía 34. Individuo del género *Escallonia* sp. (Chachacomo) en zona con pendiente muy empinada.



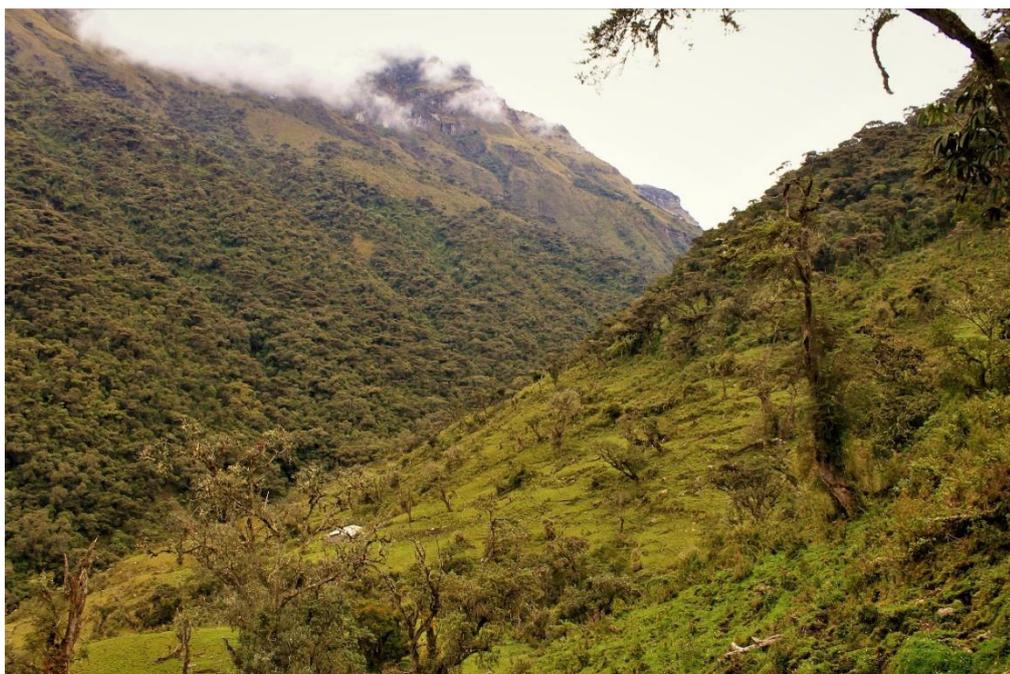
Fotografía 35. Individuo de *Polylepis multijuga* en zona moderadamente empinada.



Fotografía 36. Individuo adulto de *Polylepis multijuga* al borde de un río.



Fotografía 37. Bosque mixto con predominancia de *Polylepis multijuga* en zona con pendiente empinada.

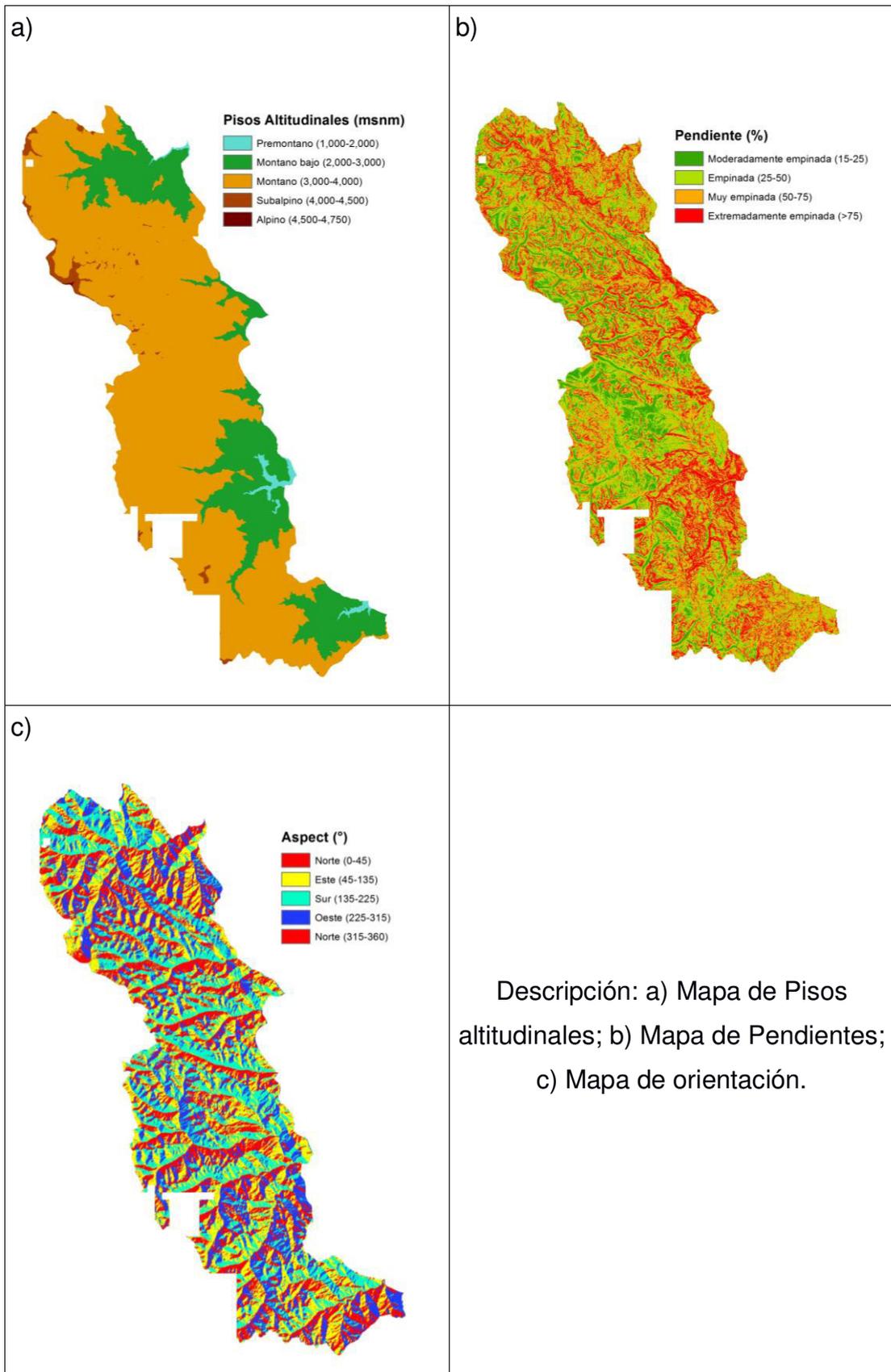


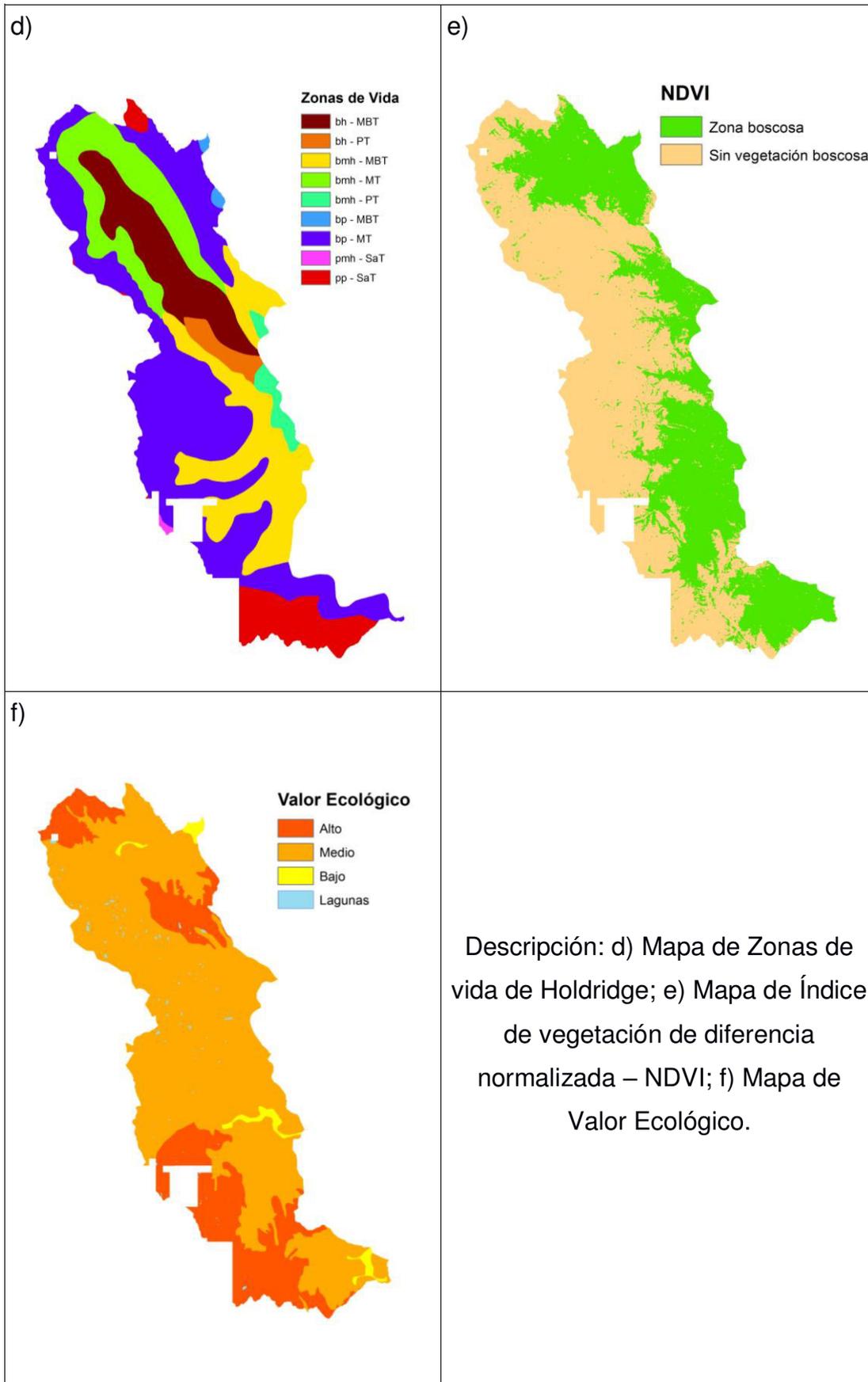
Fotografía 38. Deforestación en zona con pendiente extremadamente empinada.



Fotografía 39. Ganadería extensiva en Yungas con pendiente muy empinada.

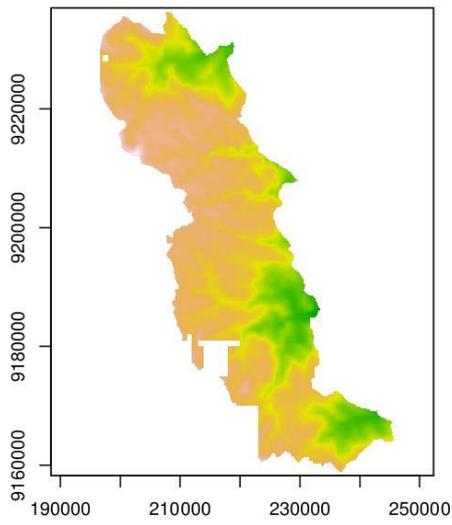
Anexo 2. Mapas temáticos.



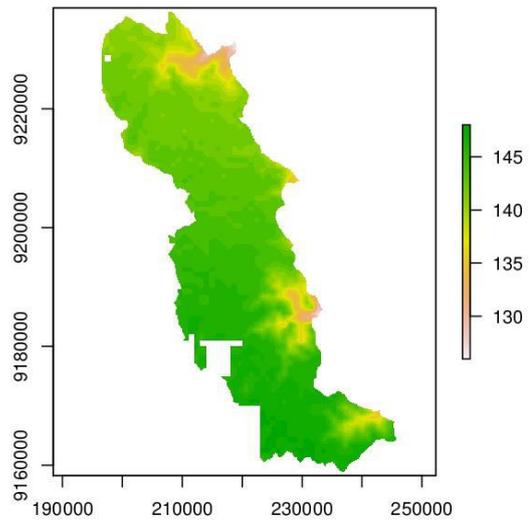


Anexo 3. Mapa de las 19 Variables bioclimáticas.

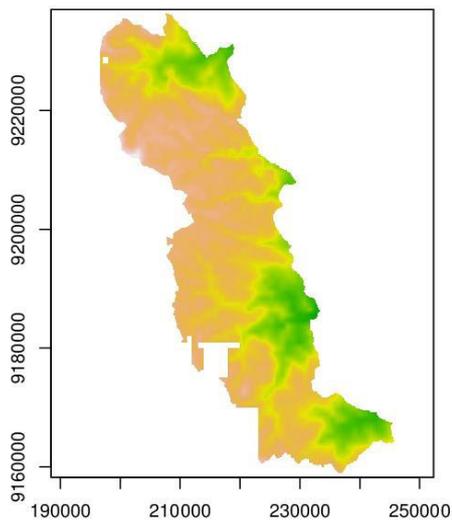
Bio 1



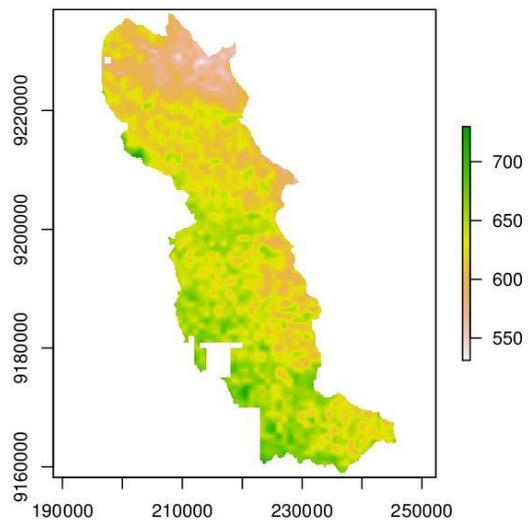
Bio 2



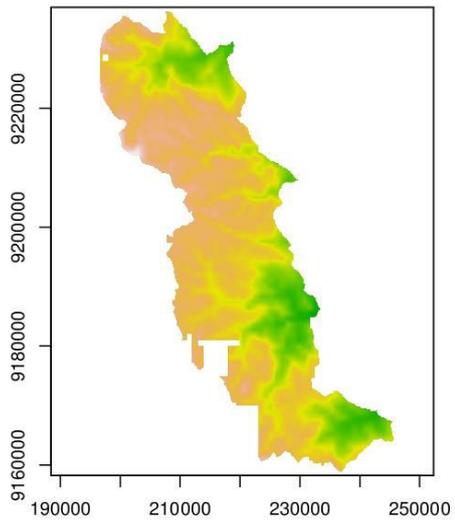
Bio 3



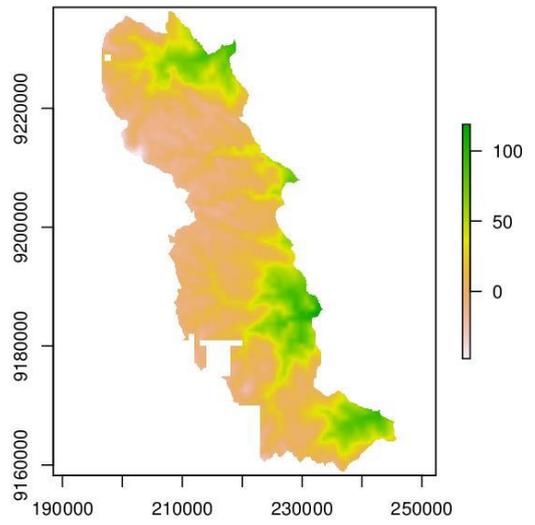
Bio 4



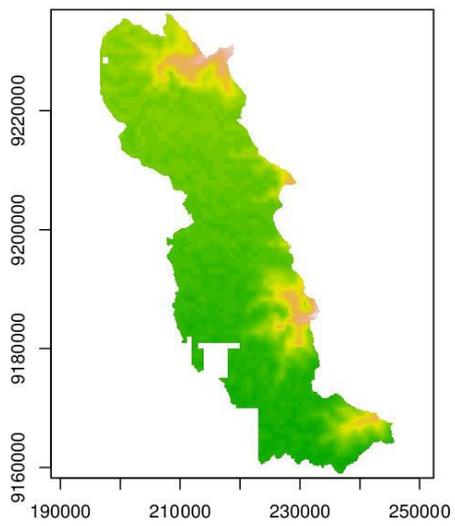
Bio 5



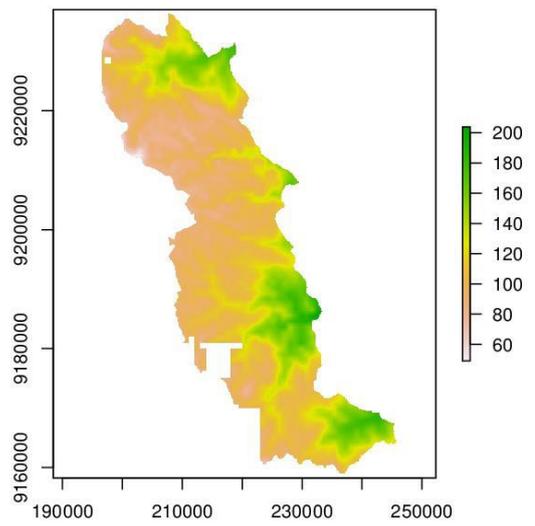
Bio 6



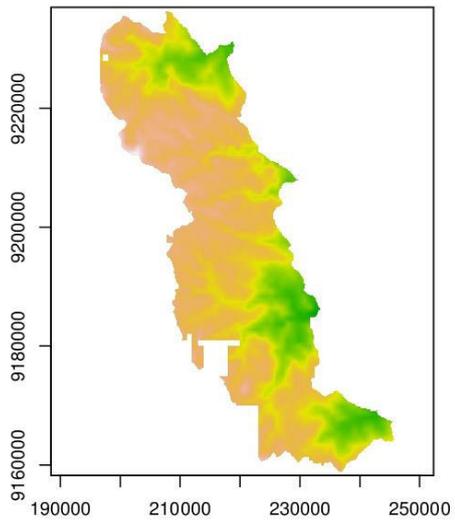
Bio 7



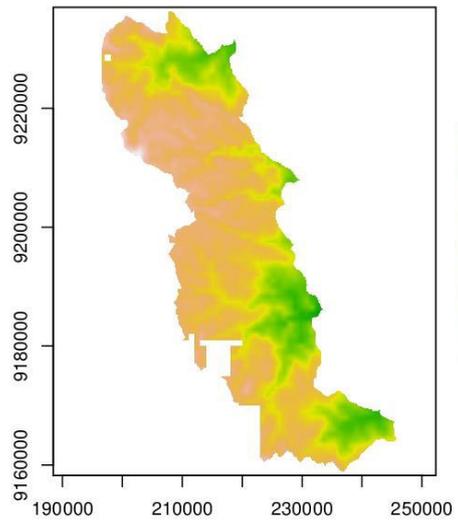
Bio 8



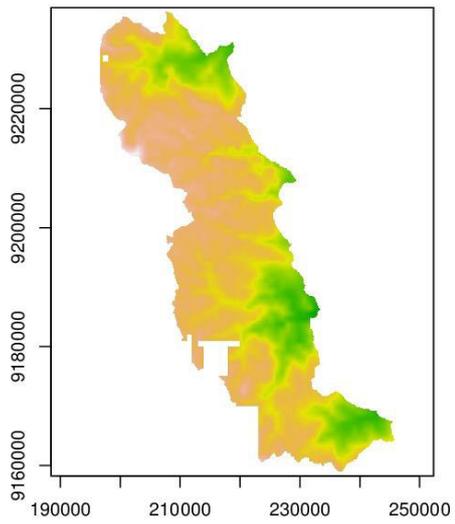
Bio 9



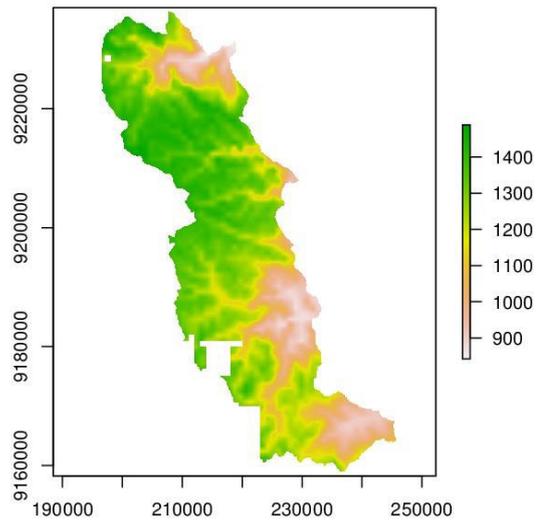
Bio 10



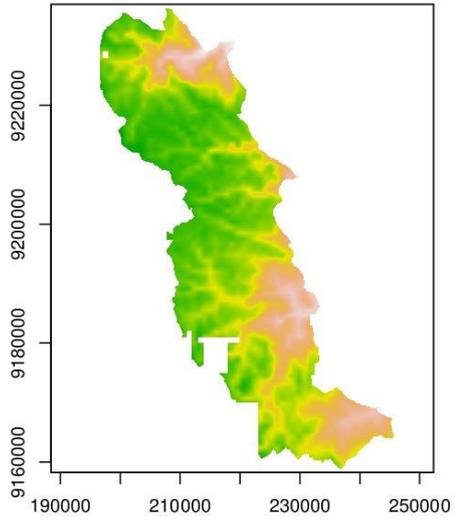
Bio 11



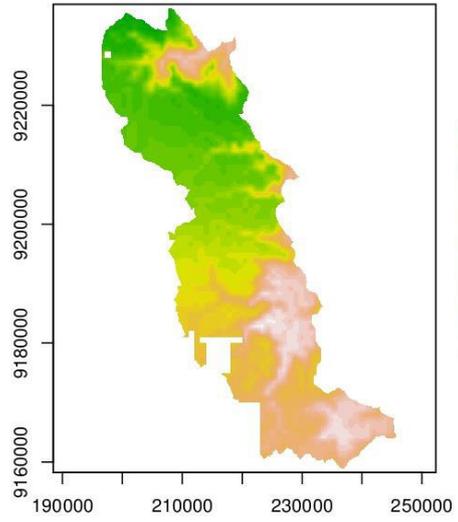
Bio 12



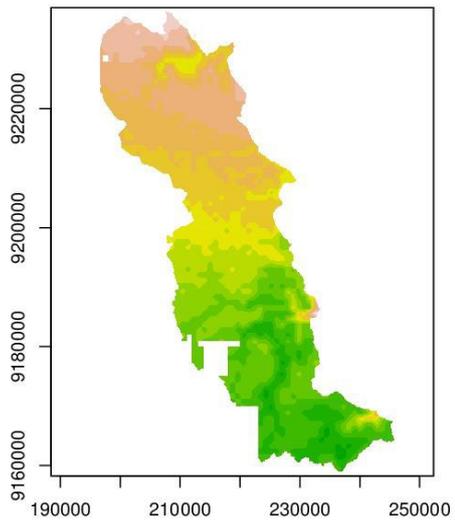
Bio 13



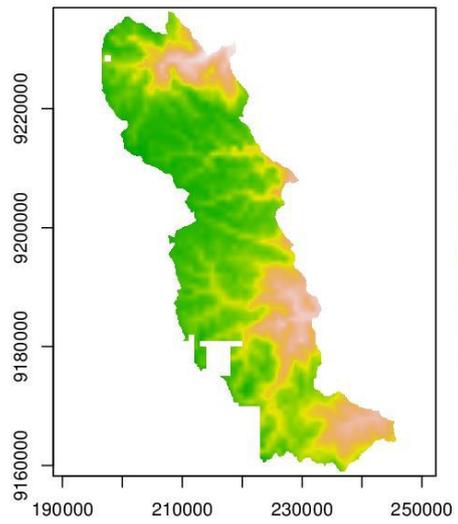
Bio 14



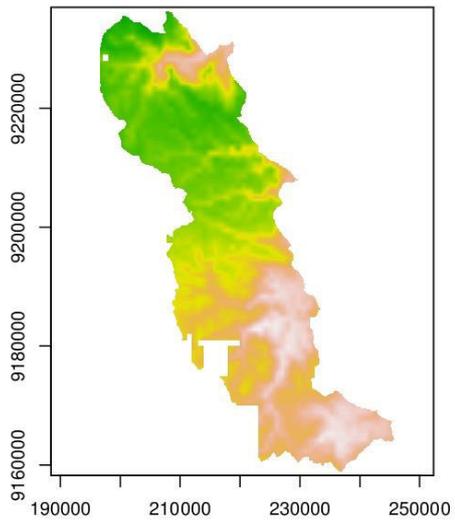
Bio 15



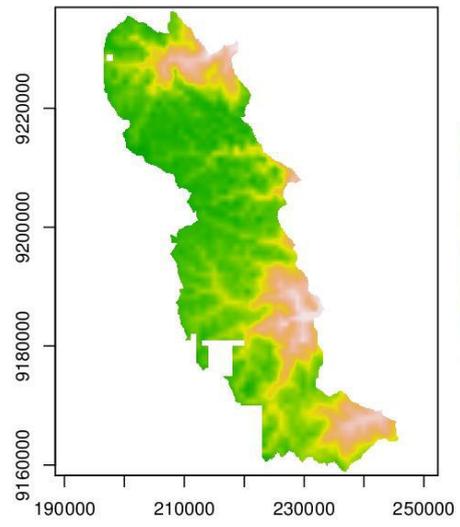
Bio 16



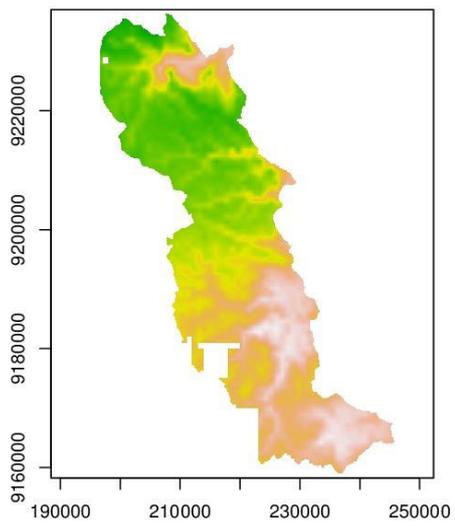
Bio 17



Bio 18



Bio 19

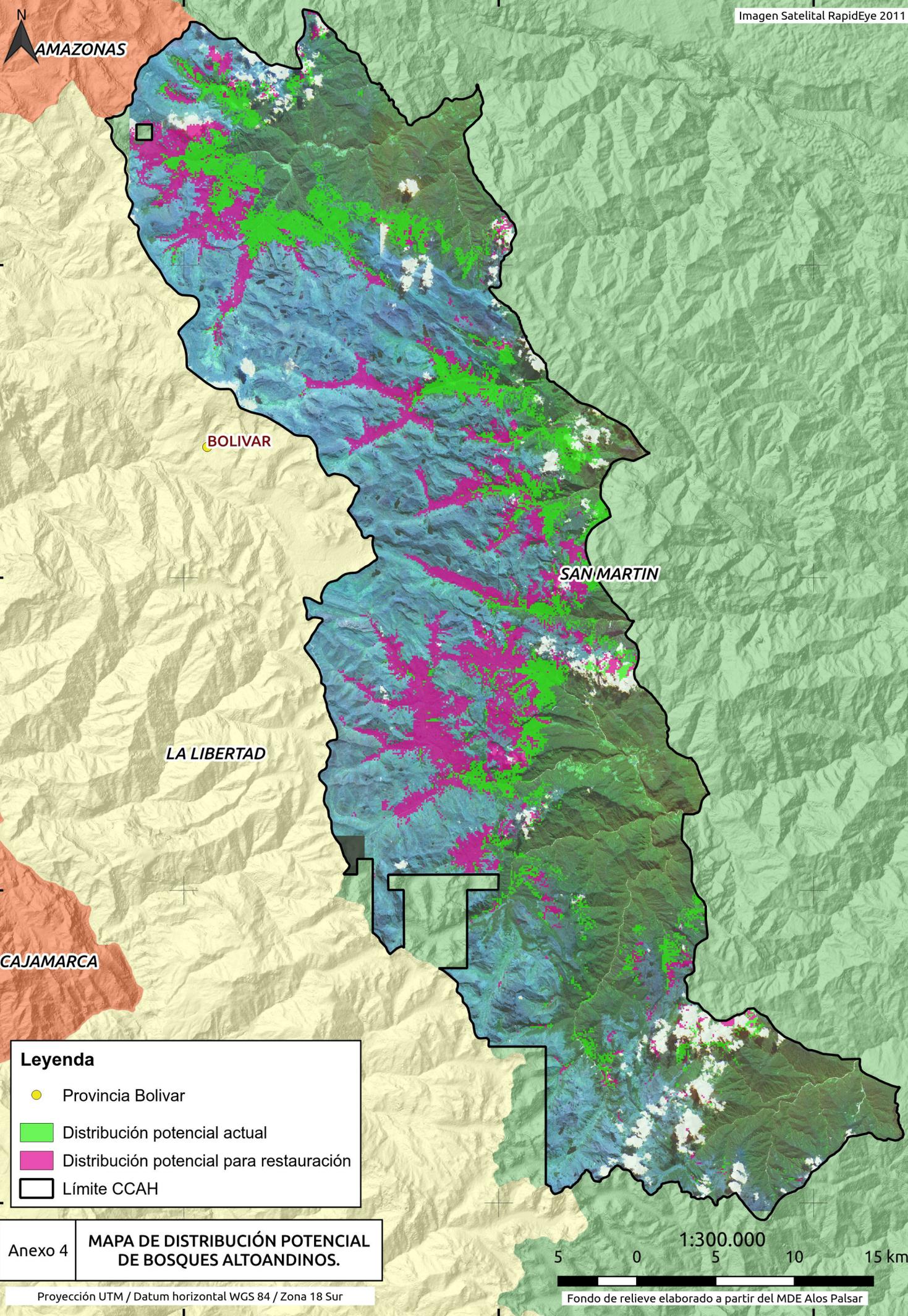


200000

220000

240000

Imagen Satelital RapidEye 2011



Leyenda

- Provincia Bolivar
- Distribución potencial actual
- Distribución potencial para restauración
- Límite CCAH

Anexo 4 **MAPA DE DISTRIBUCIÓN POTENCIAL DE BOSQUES ALTOANDINOS.**

Proyección UTM / Datum horizontal WGS 84 / Zona 18 Sur

1:300.000
5 0 5 10 15 km

Fondo de relieve elaborado a partir del MDE Alos Palsar

200000

220000

240000

9220000

9200000

9180000

9160000

9220000

9200000

9180000

9160000

200000

220000

240000

Imagen Satelital RapidEye 2011



9220000

9220000

9200000

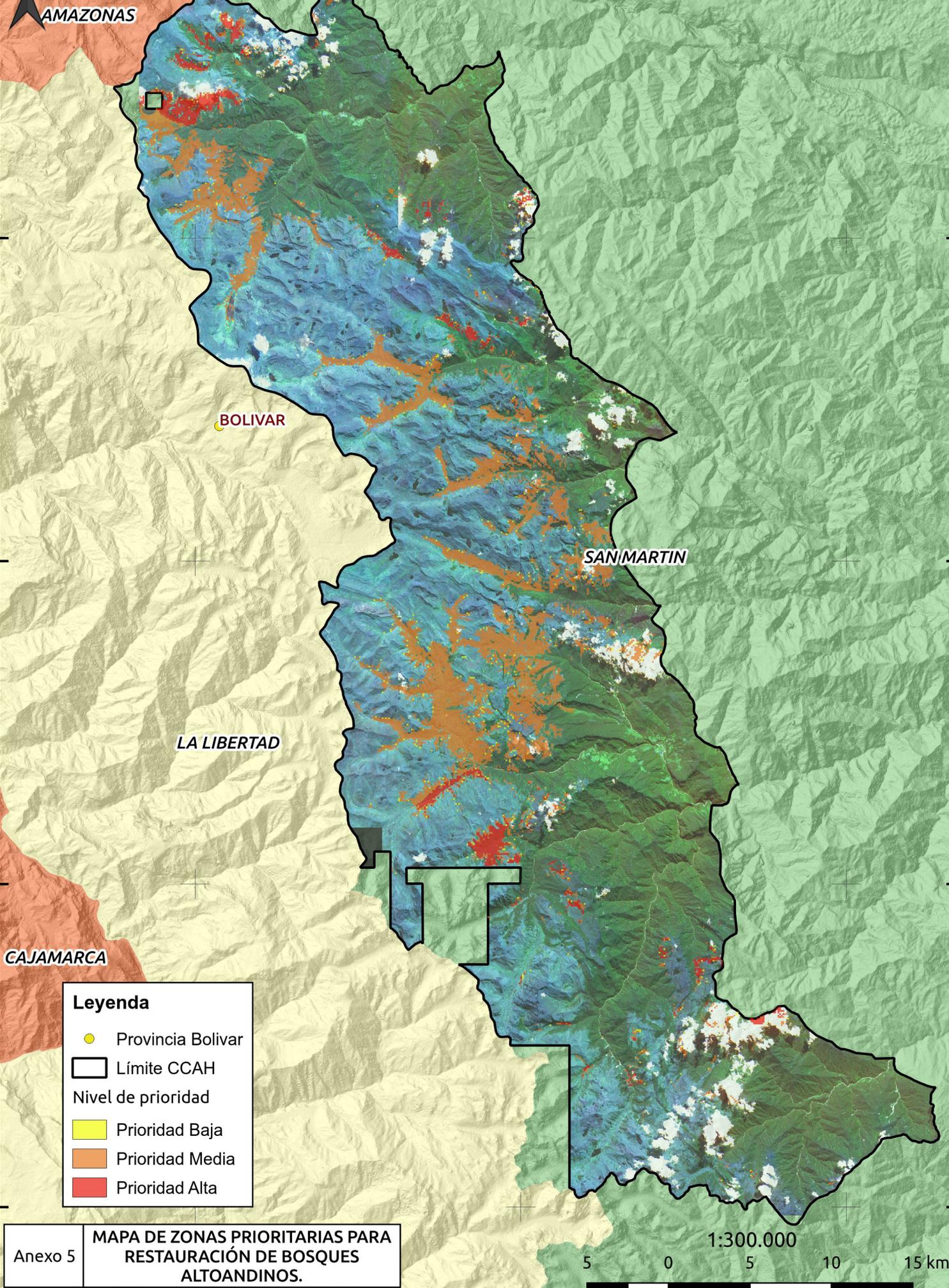
9200000

9180000

9180000

9160000

9160000



Leyenda

- Provincia Bolivar
- Límite CCAH

Nivel de prioridad

- Prioridad Baja
- Prioridad Media
- Prioridad Alta

Anexo 5 **MAPA DE ZONAS PRIORITARIAS PARA RESTAURACIÓN DE BOSQUES ALTOANDINOS.**

Proyección UTM / Datum horizontal WGS 84 / Zona 18 Sur



Fondo de relieve elaborado a partir del MDE Alos Palsar

200000

220000

240000