

ESTIMANDO Y CONTRASTANDO LA EXTENSIÓN DE LAS FORMACIONES
VEGETALES MICROTERMALES DEL PERÚ DE INICIOS DEL SIGLO XX

Humberto Zelada Gárate

<https://orcid.org/0000-0003-1944-4106>

Investigador y consultor independiente
humbertzg07@gmail.com

Carlos Augusto Reynel-Rodríguez

<https://orcid.org/0000-0002-6173-9023>

Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM)
reynel@lamolina.edu.pe

Recibido: 14 de noviembre, 2022

Aceptado: 23 de febrero, 2023

RESUMEN

Augusto Weberbauer publicó en 1922 el primer Mapa de Vegetación del Perú, en el que representó y describió 25 formaciones vegetales, las cuales agrupó en seis categorías, considerando ámbitos altitudinales definidos en función de su temperatura. Dentro de esas categorías están las formaciones microtermales que, generalmente, se encuentran por encima de los 3400 msnm y tienen amplia distribución latitudinal a lo largo de los Andes peruanos. En aras de revalorizar aquel mapa histórico, en primer lugar, se presentan los resultados de la digitalización y estimación de la extensión de las cuatro formaciones vegetales microtermales identificadas por Weberbauer y, en segundo lugar, se exponen los hallazgos del contraste cartográfico realizado entre dichas formaciones microtermales y las coberturas vegetales altoandinas clasificadas en el mapa más actual en el Perú sobre esta temática. En ese sentido, se aprecia que el investigador alemán cartografió una extensión de 183.445,30 km² para el conjunto de las cuatro formaciones vegetales microtermales: formaciones típicas altoandinas (61,67%); estepa herbácea microtérmica (17,93%); tolar microtérmico (17,47%); los glaciares y la nieve perpetua (2,93%). Asimismo, en la comparación cartográfica se observó que el 63,92% del territorio que actualmente ocupan las coberturas vegetales altoandinas del Perú coincide con lo cartografiado e identificado por Weberbauer como formaciones vegetales microtermales. Estos resultados contribuyen a comprender la evolución de este tipo de formaciones vegetales, las cuales están sufriendo una fuerte presión por la sumatoria del cambio climático y los impactos antrópicos.

Palabras clave: Andes peruanos, fitogeografía, historia natural, mapa de vegetación, Sistema de Información Geográfica.



Estimating and contrasting the extent of microthermal plant formations in early 20th century Peru

ABSTRACT

Augusto Weberbauer published, in 1922, the first vegetation map of Peru, where he showed and described twenty-five plant formations, grouped into six categories, considering altitudinal ranges defined according to their temperature. Within these categories are the microthermal formations that are generally found above 3400 masl and have a wide latitudinal distribution throughout the Peruvian Andes. To revalue that historical map, we present, firstly, the results of digitalization and estimation of extension of the four microthermal vegetation formations identified by Weberbauer, and secondly, the findings of cartographic contrasting between these microthermal formations, and the high Andean vegetation covers as classified in the most updated map on this subject. Weberbauer mapped an area of 183.445,30 km² for the four microthermal vegetation formations: typical high Andean formations (61,67%); microthermal herbaceous steppe (17,93%); microthermal tolar (17,47%); glaciers and perpetual snow (2,93%). Likewise, a cartographic comparison showed that 63,92% of the territory currently occupied by high Andean vegetation cover in Peru is coincident with that mapped by Weberbauer as microthermal vegetation formations. These results contribute to the understanding of the evolution of these formations, which are under climate change and anthropogenic pressures.

Keywords: Geographical Information Systems, Natural history, Peruvian Andes, Phytogeography, Vegetation maps.

1. INTRODUCCIÓN

En el último tercio del siglo XIX se empezaban a consolidar los primeros trabajos de cartografía moderna para el Perú. Entre ellos, se cuentan los de Mariano Felipe Paz Soldán (1821-1866), quien publicó el *Atlas Geográfico del Perú* (1865) (Basadre 2014a), y Antonio Raimondi (1826-1890), reconocido como el padre de la moderna geografía peruana (Basadre 2014b). Sin embargo, anteriormente no se tenía una idea clara de la distribución de la cobertura vegetal en el territorio peruano. Además, durante las primeras décadas del siglo XX, el país aún no terminaba de afianzar sus límites fronterizos (Basadre 2014c).

En tal contexto, Augusto Weberbauer (1871-1948), considerado el padre de la fitogeografía peruana (Zelada & Reynel 2023), contribuyó a llenar parte de dicho vacío, y publicó en Alemania, en 1922, el *Mapa Fitogeográfico de los Andes peruanos entre los 5° y 17° S*, en el que representó y describió 25 formaciones vegetales. Considerando ámbitos altitudinales definidos en función de su temperatura agrupó dichas formaciones en seis categorías (de oeste a este): hidrófilas, xerófilas, subxerófilas, microtermales, mesotermas higrófilas, y macrotermales higrófilas (Weberbauer 1922). En el uso que Weberbauer hizo de estos conceptos estuvo inspirado, entre otros, por las ideas

sobre rangos ecológicos de existencia de las plantas de Alphonse De Candolle (1874) y Wladimir Köppen (1900).

Con dicho mapa, elaborado en base a recorridos y observaciones desde el terreno (Palacios & Reynel 2011), Weberbauer sentó las bases del conocimiento ecológico de los Andes peruanos y sus recursos fitogeográficos (Weberbauer 1945). Además, este mapa constituye un testimonio histórico de la distribución geográfica de las plantas y la vegetación representativa en el territorio peruano –principalmente de la zona andina y costera– a inicios del siglo XX.

Posterior a la contribución fitogeográfica de Weberbauer (1922; 1936; 1945), se han realizado diversos esfuerzos por zonificar ecológicamente el territorio peruano, lo cual ha hecho posible que, actualmente, se encuentren disponibles varias estratificaciones o clasificaciones ecológicas representadas por los mapas ecológicos y cartografías de vegetación de diversos autores, tanto individuales, como institucionales. Las metodologías, los objetivos, las escalas y los niveles de resolución de dichos esfuerzos son variables y guardan relación con las limitaciones y el contexto histórico de su elaboración, así como con la evolución de la geomática y los Sistemas de Información Geográfica (SIG).

En ese sentido, según Palacios y Reynel (2011), es oportuno mencionar los siguientes mapas de clasificación de la vegetación: *Mapa de Ecorregiones del Perú* (1988), elaborado por Antonio Brack; *Mapa Ecológico del Perú* (1995), impreso por el Instituto Nacional de Recursos Naturales (INRENA) y cuya primera versión fue elaborada por Tossi y Holdridge en 1960; *Mapa Forestal del Perú* (1995), elaborado por el INRENA; *Mapa de los Sistemas Ecológicos de la Cuenca Amazónica de Perú y Bolivia* (2007), publicado por la organización sin fines de lucro Nature Serve. Además de estas cartografías, se encuentra el *Mapa Nacional de Cobertura Vegetal* (2015) elaborado por el Ministerio del Ambiente del Perú (MINAM), el cual resulta ser hasta hoy el más actual en su temática. Este mapa muestra la distribución geográfica, la superficie y las características biofísicas generales de 60 unidades de cobertura vegetal y de otras 16 unidades consideradas como otro tipo de cobertura (MINAM 2015a).

Ante ello, y considerando que con el desarrollo de los actuales SIG se puede modernizar continuamente el uso y tratamiento de los mapas antiguos e históricos (Cascón-Katchadourian et al. 2018), e incluso revalorizarlos, se presentan, en primer lugar, los resultados sobre la estimación de la extensión de las cuatro formaciones vegetales microtermales identificadas y clasificadas por Weberbauer en su mapa, formaciones que generalmente se encuentran por encima de los 3400 msnm, con temperaturas promedio entre los 8° y los -15° C, y con una distribución latitudinal amplia a lo largo de los Andes peruanos. En segundo lugar, se brinda un análisis de la evolución de tales comunidades, en el que se contrastan sus principales características fitogeográficas con la información geográfica difundida (respecto a unidades semejantes) en el *Mapa Nacional de Cobertura Vegetal* (MINAM 2015a; MINAM 2015b), a fin de contribuir

al conocimiento del estudio en el tiempo de la fitogeografía de los Andes peruanos, comparando dos momentos históricos precisos –con casi exactamente 100 años de diferencia y con escenarios muy contrastantes– en cuanto a la alteración de la vegetación a causa de acciones antrópicas y también por los efectos negativos del cambio climático.

2. MATERIALES Y METODOLOGÍA

2.1. Base cartográfica de los mapas analizados

El mapa de Weberbauer está definido en una escala 1:3.000.000, con coordenadas geográficas, cuya base cartográfica fue el *Mapa del Perú* (1887-1897), elaborado por Antonio Raimondi (Carbonel 2018), el cual Weberbauer redujo a la escala antedicha. Para la representación de las montañas de nieve y, en muchos lugares, los límites de la puna y la jalca, el investigador alemán se basó en el Mapa de vegetación elaborado por Sievers, publicado en *Reise in Peru und Ecuador* (1914), el cual se extiende desde los 2° hasta los -11° S. Cabe mencionar que Weberbauer elaboró su mapa con los datos e información recopilada durante las exploraciones que realizó por el territorio peruano entre los años 1901-1905 y 1910-1916 (Weberbauer 1945).

Con respecto al *Mapa Nacional de Cobertura Vegetal* elaborado por el MINAM, de carácter oficial, este tiene una escala de interpretación de 1:100.000, y está basado en la carta nacional digital elaborada por el Instituto Geográfico Nacional (IGN), en información de la red vial del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2010), en información de los límites departamentales disponibles en el geoservidor del MINAM y, en un Modelo de Elevación Digital del Terreno hecho por la *United States Geological Survey* (USGS). El mapa se elaboró con imágenes satelitales *Landsat* del año 2011, complementadas con imágenes satelitales *RapidEye* (de mejor resolución espacial) de los años 2011 y 2012, y con imágenes de *Google Earth* para esos mismos años. Además, se realizó una verificación de campo, principalmente por vía terrestre, a fin de ajustar el mapa elaborado en gabinete.

2.2. Metodología

En el proceso de revalorización de la cartografía histórica, como el realizado con el mapa de Weberbauer, un primer paso esencial en este estudio consistió en intentar conocer al máximo el contexto histórico-cartográfico de su elaboración. La escala en la que se trabajó, el sistema de referencia empleado y la simbología o leyenda utilizada, son datos muy relevantes para su interpretación (Gantiva & Romero 2015).

Tras ello, se siguió un proceso metodológico (fig. 1) con rutas de análisis muy similares para cada una de las cartografías estudiadas, a fin de contrastar el primer mapa de vegetación del Perú con el más actual en dicha temática, acotando el análisis a las coberturas vegetales altoandinas.

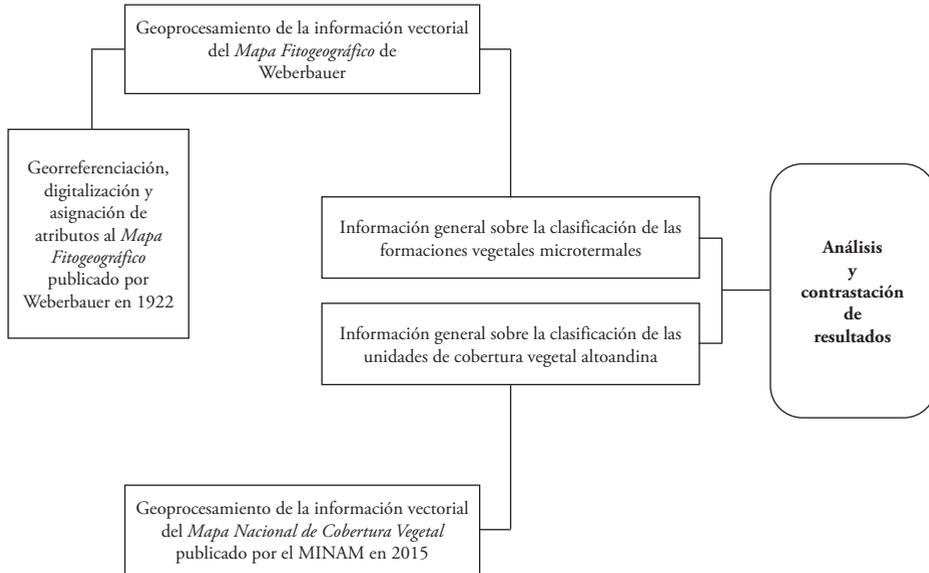


Figura 1. Metodología empleada para el análisis cartográfico comparativo de las formaciones vegetales altoandinas del Perú.

2.2.1. *Georreferenciación, digitalización y asignación de atributos al Mapa de vegetación de los Andes peruanos (1922)*

Luego de descargar la imagen digital del primer mapa de vegetación del Perú, y con el fin de mejorar su nitidez y calidad visual, se remasterizó a una escala x6, utilizando el programa Gigapixel AI, versión 4.2.1 de *Topaz Labs*. Con este programa se pudo seleccionar finalmente un archivo en formato “.PNG”.

En resumen, el trabajo de pasar del mapa en papel al mapa digital descansa en dos procesos básicos: la georreferenciación y la digitalización. A ello se suma luego la elaboración de una tabla de atributos, añadiendo datos e información temática que sirven para poder realizar distintos tipos de análisis e interpretaciones (Olaya 2014). En ese sentido, para la georreferenciación se colocaron trece puntos de control correspondientes al hemisferio sur y al hemisferio occidental (Anexo 1) haciendo uso del programa ArcGIS ver. 10.4 de los actuales métodos de los SIG. Dichos puntos se ubicaron en el cruce de las grillas de las coordenadas geográficas, procurando una distribución homogénea y uniforme en toda la superficie de la imagen digital del mapa (Álvarez-Rogel & Conesa 2018), para lo cual se empleó el tipo de transformación *Adjust*. Posteriormente, se digitalizaron manualmente las entidades vectoriales tipo línea (ríos menores), seguidas por las de tipo polígono (formaciones vegetales, océano pacífico, lagos y ríos mayores) para la totalidad del mapa. Con respecto a las formaciones

vegetales, se obtuvieron 439 registros de tipo polígono, agrupados en un archivo tipo *shapefile* (122 correspondientes a las formaciones vegetales microtermales).

En la tabla de atributos de los registros tipo polígono se crearon los siguientes campos: número de formación vegetal, nombre de formación vegetal, categoría de humedad y temperatura, simbología, área (km²), área (ha). Luego, se completaron tales campos de acuerdo con la información consignada en Weberbauer (1922).

2.2.2. *Geoprocesamiento de la información vectorial de los mapas analizados*

Las coordenadas geográficas resultan de gran utilidad para trabajar en áreas o espacios grandes, pero, como no es un sistema cartesiano, la medición de áreas o distancias se hace tediosa, por lo que se vuelve necesario aplicar las proyecciones cartográficas, forma particular de conversión de coordenadas (Olaya 2014). Por ello, a través de la herramienta *Project* de ArcGIS, versión 10.4, se proyectó el *shapefile* con las entidades vectoriales digitalizadas para las 25 formaciones vegetales del mapa de Weberbauer, desde las coordenadas geográficas hacia la proyección UTM. Luego, se obtuvieron las áreas estimadas (en km² y en ha) para cada formación vegetal y, después, aplicando la herramienta *Dissolve* de ArcGIS, versión 10.4, se seleccionaron y agruparon las cuatro formaciones vegetales microtermales con sus correspondientes atributos en un *shapefile* nuevo. Finalmente, con las herramientas *Clip* e *Intersect* de ArcGIS, versión 10,4 se hicieron geoprocesamientos entre las diversas capas utilizadas a fin de realizar el análisis cartográfico comparativo.

En cuanto al *Mapa Nacional de Cobertura Vegetal*, la información vectorial (*shapefile*) descargada ya tenía consignado atributos de identificación hasta el nivel de unidad de cobertura vegetal y contaba también con el campo de área (ha). Es decir, era información geográfica ya acondicionada como para que el usuario pudiera analizarla según su objetivo de estudio.

2.2.3. *Información general sobre la clasificación de las formaciones vegetales altoandinas analizadas*

Todo indica que, para la identificación y clasificación de las 25 formaciones vegetales, Weberbauer tomó como una referencia importante los estudios desarrollados en África por Adolf Engler llamados *Pflanzenwelt Afrikas*–1910– (Weberbauer 1922). Además, el investigador conocía las ideas sobre rangos ecológicos de existencia de las plantas de Alphonse De Candolle (1874) y Köppen (1900). Weberbauer agrupó tales formaciones vegetales en seis categorías, considerando ámbitos altitudinales definidos en función de su temperatura. Los criterios de su estratificación son los siguientes: el bioclima, la florística, la fisonomía de la vegetación, y la corología de las especies importantes de flora (Palacios & Reynel 2011).

De esa manera, resultan ser cuatro las formaciones vegetales consideradas en la categoría microtermal (tabla 1).

Tabla 1. Distribución altitudinal de las formaciones vegetales microtermales en los Andes peruanos de inicios del siglo XX (elaboración de los autores con base en Weberbauer [1922] y Weberbauer [1945]).

Formación vegetal microtermal	Rango altitudinal
Tolar microtérmico alternando con las típicas formaciones altoandinas, sin arbustos.	Entre los 4000 y 4900 msnm.
Formaciones típicas altoandinas.	Desde los 3800-4000 msnm hasta los 4600 msnm, aproximadamente.
Estepa herbácea (Pajonal) microtérmica, siempre verde o casi siempre verde, sin o casi sin arbustos.	Desde los 3400-3600 msnm hasta los 4000msnm, aproximadamente.
Los glaciares y la nieve perpetua.	Por encima de los 4900 msnm.

En cuanto al *Mapa Nacional de Cobertura Vegetal*, la clasificación de la cobertura vegetal, que estuvo principalmente en función a la escala de mapeo y de la resolución espacial de las imágenes satelitales empleadas, consistió en jerarquizar las unidades de cobertura vegetal identificadas en base a los siguientes criterios (MINAM 2015a):

- a) *Geográficos*: territorio peruano dividido en cuatro grandes regiones: selva baja, selva alta, andina y costa.
- b) *Climáticos*: grandes regiones divididas en provincias de humedad y luego agrupadas en macro-provincias de humedad.
- c) *Fisonómicos*: vegetación clasificada a nivel de formaciones vegetales, es decir, relacionadas con sus formas biológicas predominantes.
- d) *Fisiográficos*: vegetación clasificada según las formas de tierra que ocupan (terrazas, colinas, montañas, etc.).

En total, el MINAM (2015a) identificó 60 unidades de cobertura vegetal y 16 unidades consideradas como “otro tipo de cobertura”. Para la Región Andina, fueron 10 los tipos de cobertura vegetal identificados, los cuales correspondían, a su vez, a dos zonas bien marcadas geográficamente:

- i) La *vertiente occidental andina e interandina*, entre los 1500 y los 3800 msnm (sur) y 3000 y 3200 msnm (norte).
- ii) La *ecorregión Puna*, ubicada por encima de la anterior zona y generalmente sobre de los 3500 msnm, con temperaturas medias entre los 1,5° y los 6° C, y con precipitaciones entre los 500 y los 2000 mm.

Con base en tales criterios, son cinco las unidades cobertura vegetal consideradas como altoandinas en el *Mapa Nacional de Cobertura Vegetal* (tabla 2), las que, a su vez, tienen semejanza con las formaciones vegetales microtermales identificadas por Weberbauer (1922).

Tabla 2. Distribución altitudinal de las unidades de cobertura vegetal altoandinas en el Perú de inicios del siglo XXI (elaboración de los autores con base en MINAM [2015a] y MINAM [2015b]).

Unidad de cobertura vegetal altoandina	Rango altitudinal
Páramo	Entre los 3000 y 3600 msnm (norte).
Jalca	Por encima de los 3000 msnm (norte).
Bosque relicto altoandino	Entre los 3500 y 4900 msnm.
Bofedal	Superior a los 3800 msnm (centro y sur).
Pajonal andino	Entre los 3800 y 4800 msnm.

Es preciso señalar que, dentro las unidades consideradas por el MINAM (2015a) como “otro tipo de cobertura”, se encuentran dos que son de interés para los objetivos de esta investigación, a saber: a) el área altoandina con escasa y sin vegetación (o áreas periglaciares); y b) los glaciares.

3. ANÁLISIS Y CONTRASTACIÓN DE RESULTADOS

Para contrastar el primer mapa de vegetación del Perú con el más actual en dicha temática, se elaboraron cartografías que muestran la extensión, la intersección, el contraste y la distribución latitudinal y longitudinal de las formaciones vegetales altoandinas. Se acompañó el análisis con una síntesis de la visión fitogeográfica de cada una de las fuentes cartográficas estudiadas.

3.1. Análisis de resultados

3.1.1. *Extensión y distribución geográfica de las formaciones vegetales microtermales (1922) y de las coberturas vegetales altoandinas (2015)*

En la figura 2, se observa la distribución geográfica de las formaciones vegetales microtermales que Weberbauer identificó y describió a comienzos del siglo XX.

Producto de la georreferenciación y digitalización del primer mapa de vegetación del Perú, se obtuvo una superficie de 183.445,31 km² para el conjunto de las cuatro formaciones vegetales microtermales (fig. 2 y anexo 2).

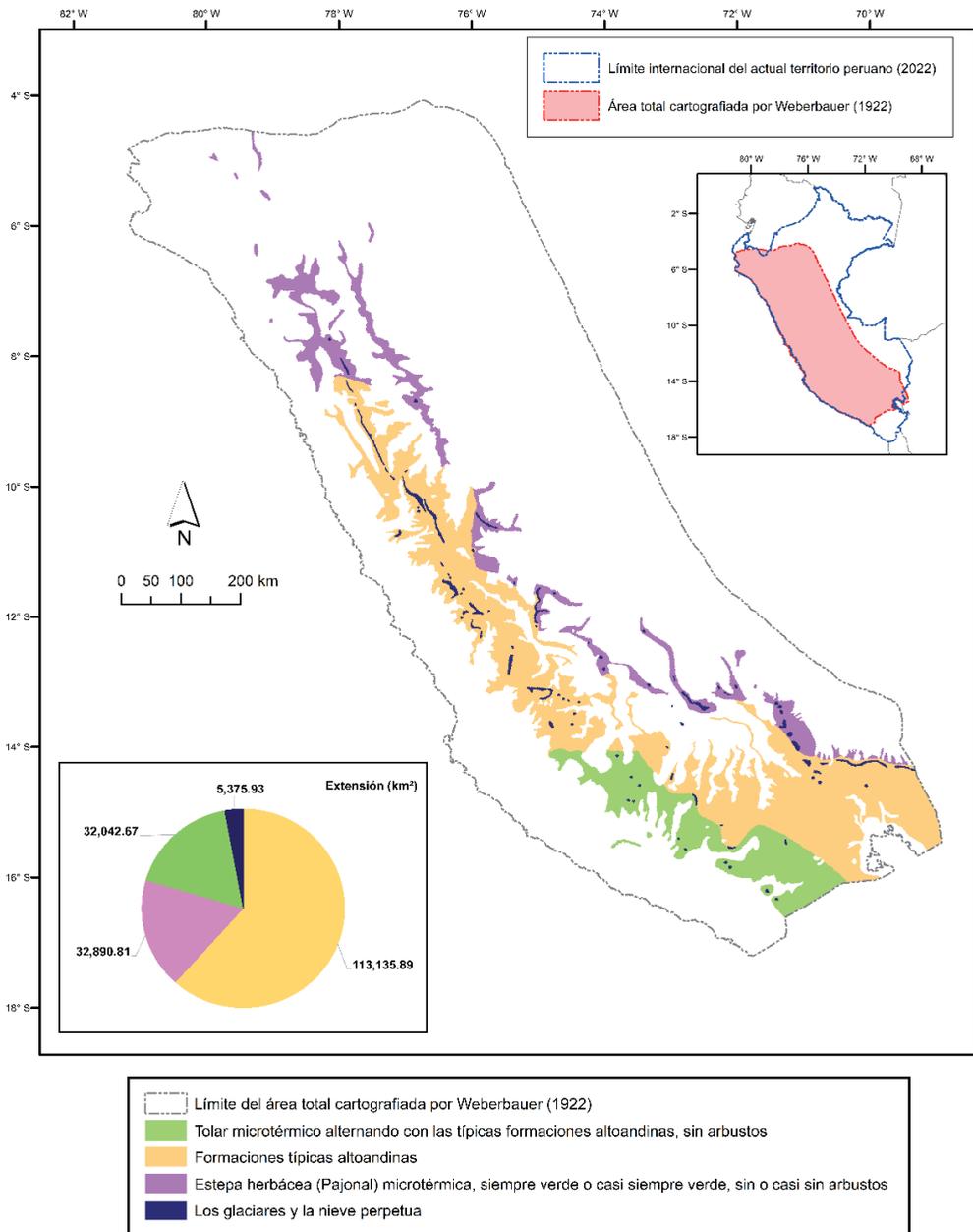


Figura 2. Mapa de las formaciones vegetales microtermales del Perú de inicios del siglo XX (elaboración de los autores con base en Weberbauer [1922]).

- Las cuatro formaciones vegetales microtermales se reparten de la siguiente manera:
- Tolar microtérmino alternando con las típicas formaciones altoandinas, sin arbustos: 32.042,67 km² (17,47%).
 - Formaciones típicas altoandinas: 113.135,89 km² (61,67%).
 - Estepa herbácea (pajonal) microtérmino, siempre verde o casi siempre verde, sin o casi sin arbustos: 32.890,81 km² (17,92%).
 - Los glaciares y la nieve perpetua: 5375,93 km² (2,93%).

Hasta la fecha de publicación de este mapa, Weberbauer aún no había recorrido ni el extremo norte (Tumbes) ni el extremo sur (Moquegua y Tacna) del país, por lo cual, dichas zonas no están representadas (Weberbauer 1945). Asimismo, ya que hacia las primeras décadas del siglo XX el país aún no terminaba de afianzar sus límites fronterizos, se puede apreciar que algunas partes que cartografió el investigador actualmente corresponden a los territorios de Bolivia y Ecuador (fig. 2).

Respecto a la distribución latitudinal, se aprecia (fig. 2 y anexo 2) que las formaciones típicas altoandinas, la estepa herbácea (pajonal) microtérmino, y los glaciares y la nieve perpetua tienen amplia distribución, en comparación con el tolar microtérmino, formación que se restringe al suroeste de los Andes peruanos. En cuanto a la distribución altitudinal, generalmente todas estas formaciones vegetales se encuentran por encima de los 3400 msnm (tabla 1), aunque presentan variaciones, tanto en su límite inferior como superior, de acuerdo a su ubicación latitudinal, disminuyendo su altitud conforme se avanza hacia el norte y hacia el este, especialmente a partir de los 8° S de latitud, donde las montañas andinas tienen menor altitud.

En contraste, de acuerdo con el MINAM (2015a; 2015b), para comienzos de la segunda década del siglo XXI se estima que las coberturas vegetales altoandinas ocupan 192.120,42 km² del actual territorio peruano. De dicha extensión territorial, la mayoría lo ocupa el pajonal andino con 183.205,43 km², seguido por el bofedal con 5483,98 km²; mientras que la jalca, el bosque de relicto altoandino y el páramo ocupan menores extensiones con 1547,56 km², 1022,48 km² y 860,97 km², respectivamente. Por su parte, el área altoandina con escasa y sin vegetación (o áreas periglaciares) ocupa 26.185,22 km², y los glaciares representan 1932,07 km². En suma, todas estas áreas altoandinas abarcan 220.237,71 km² del actual territorio del Perú.

En la figura 3 y en el anexo 3 se puede observar que el páramo y la jalca se encuentran latitudinalmente únicamente en la parte norte de los Andes peruanos, con límite S casi a 8° lat. (el páramo casi hasta los 6° S). El pajonal andino es la cobertura vegetal que presenta la mayor amplitud latitudinal junto con el bofedal y el área altoandina con escasa y sin vegetación; mientras que el bosque relicto altoandino y los glaciares, pese a tener también amplio rango latitudinal, concentran su presencia en determinadas zonas que tienen condiciones geográficas específicas, por ejemplo, el bosque de relicto en las faldas del volcán Pichu Pichu (Suroeste andino) o la extensa cadena de nevados conocida como la Cordillera Blanca (Centro andino).

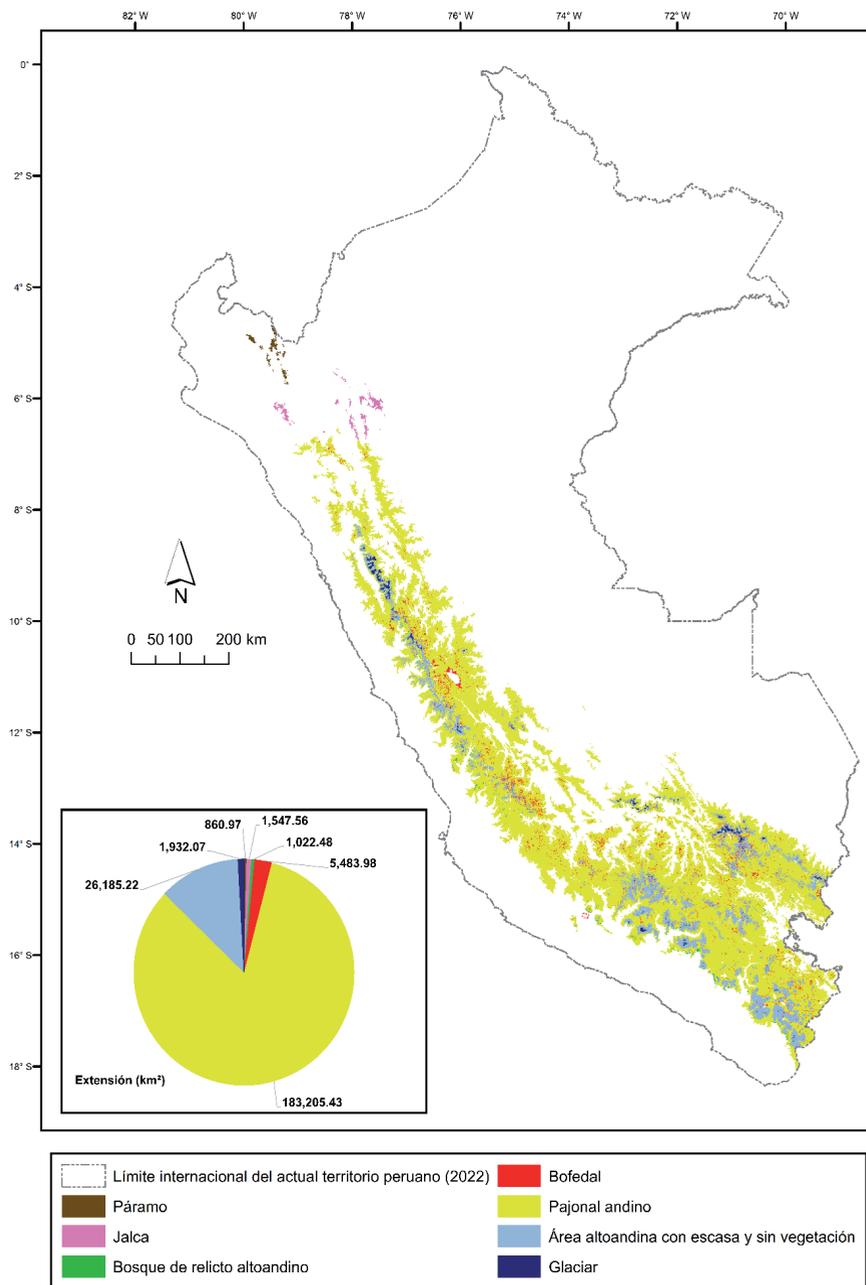


Figura 3. Mapa de las áreas altoandinas del Perú a inicios del siglo XXI (elaboración de los autores con base en MINAM [2015]).

3.1.2. Síntesis fitogeográfica de las formaciones vegetales microtermales (1922) y de coberturas vegetales altoandinas (2015)

La fitogeografía estudia la distribución geográfica de las plantas y sus aspectos asociados, siendo una forma de clasificación fitogeográfica la agrupación por reinos, subreinos y provincias de vegetación (Zelada & Reynel 2023). En ese sentido, considerando lo descrito por Weberbauer (1922) y lo consignado en MINAM (2015a), se presenta una breve reseña descriptiva sobre la fitogeografía de las áreas altoandinas analizadas.

3.1.2.1. Entre los 3000 y los 4000 msnm

Weberbauer describió a la Estepa herbácea (pajonal) microtémica, siempre verde o casi siempre verde, sin o casi sin arbustos –con presencia en casi todo el espectro latitudinal de los Andes peruanos (fig. 2 y anexo 2)–, como una de las formaciones más húmedas del país, ya que habitualmente presentaba una alta nubosidad, que contenía plantas en forma de cojín, las cuales se daban con mucha menos frecuencia allí que en las formaciones típicas altoandinas. También señaló que este pajonal microtémico contenía gramíneas altas estrechamente unidas, lo cual hacía posible distinguirla de las formaciones típicas altoandinas. Resaltó, además, que el matorral se limitaba a las partes rocosas y a los campos pedregosos, así como a las zonas bajas hacia el límite de la Ceja de Selva.

El autor apuntó que el pajonal microtémico en el norte, al que denominó *Jalca*, llegaba, en su límite inferior, hasta los 3400 msnm. Pero, a pesar de que en su mapa la distinguió –descriptivamente– de la puna (formaciones típicas altoandinas), consideraba, desde un punto de vista puramente geográfico, que sería conveniente unir ambas zonas.

Por su parte, el MINAM (2015a), distingue principalmente dos tipos de cobertura vegetal en este rango altitudinal (3000-4000 msnm) ubicadas en el norte de los Andes peruanos: el páramo y la jalca (fig. 3 y anexo 3). Con respecto al primero, se menciona que el límite sudamericano de este tipo de cobertura vegetal es la depresión de Huanca-bamba (Perú), ubicándose en la cima de las vertientes montañosas de los departamentos de Piura y Cajamarca, donde el clima es frío y con mucha neblina, pudiendo clasificar su vegetación en subunidades: subpáramo arbustivo, páramo herbáceo o de pajonal y, superpáramo; a los que se les suma parches de bosques remanentes que ocasionalmente están compuestos de *Polylepis*, *Gynoxys* y *Buddleja*. En cuanto a la jalca, ubicada en la cabecera de cuenca, se destaca como un tipo de cobertura vegetal que marca el límite entre el páramo y el pajonal andino, ubicándose en los departamentos de Cajamarca (parte sur), Amazonas y Lambayeque. Su fisionomía es parecida al pajonal andino, aunque se pueden distinguir, verticalmente, tres estratos: estrato de plantas enraizadas al suelo (líquenes, musgos, hepáticas y *Lysipomia* spp.); estrato de plantas acaules con

hojas en roseta e inflorescencia sésil (junto con arbustos con talles postrados y herbáceas rizomatosas); estrato de gramíneas macollantes altas y herbáceas dicotiledóneas erguidas (estrato con la mayor biomasa de la jalca).

Una precisión importante hace el MINAM (2015) en cuanto a este tipo de coberturas vegetales al señalar que, durante mucho tiempo, se ha confundido a la jalca con el páramo y la puna, destacando que la primera puede ser definida, más bien, como una zona transitoria con fuertes gradientes de humedad y temperatura, lo cual acentúa características de endemismo en su vegetación. Asimismo, Weberbauer (1922) y MINAM (2015) coinciden en mencionar el impacto antrópico sobre las coberturas vegetales de los Andes del norte peruano (sobre todo al páramo), destacando la quema de la cobertura con fines agropecuarios: agricultura y pastoreo, lo cual evidencia el deterioro que ha sufrido la naturaleza de esta zona a lo largo de un siglo prácticamente.

En las partes más altas de este rango altitudinal, principalmente en el Centro y Sur del país, el MINAM (2015a) destaca la presencia de dos tipos de coberturas vegetales: el bosque relicto altoandino y el bofedal. El primer tipo, se encuentra distribuido, en pequeños parches, por la región altoandina, sobre todo en terrenos montañosos con pendientes pronunciadas y muy poco accesibles. Su límite inferior llega a los 3500 msnm y el superior hasta los 4900 msnm en algunas zonas. Este bosque cubre poca superficie del país y está representado por el género *Polylepis* –localmente conocido como *queñoal*, *quenual* o *quinual*– que, en ocasiones, puede estar asociado a los géneros *Gynoxys*, y a las especies *Escallonia resinosa* y *Escallonia myrtilloides*.

Los árboles del bosque relicto altoandino, generalmente son de porte bajo y achaparrado, alcanzando como máximo alturas de hasta 10 m en las zonas más húmedas. En los estratos inferiores, se desarrollan arbustos –como *Lupinus ballianus*, *Baccharis tricuneata*– y plantas herbáceas típicas de la puna –como las de los géneros *Stipa* y *Festuca*–.

En cuanto a los bofedales, cobertura vegetal también conocida como *Oconal* o *Turbera*, MINAM (2015a) la describe como un humedal altoandino que se encuentra, a partir de los 3800 msnm, en los fondos de valles de origen fluvio-glacial, en los conos volcánicos, en las planicies lacustres, piedemonte y en las terrazas fluviales. Se caracteriza por la presencia de una vegetación herbácea hidrófila, siempre verde, compacta y con porte almohadillado o en cojín, representada generalmente por *Distichia muscoides*, *Plantago rigida*, *Werneria caespitosa*, *Luzula peruviana*, entre otras. Cabe precisar que los bofedales tienen variación florística dependiendo del período de humedad, así como de su ubicación altitudinal, latitudinal, y de cuenca hidrográfica: vertiente occidental u oriental, siendo mayor su composición florística en las zonas con mayor humedad.

3.1.2.2 Superior a los 4000 msnm

Weberbauer describió al tolar microtérmino alternando con las típicas formaciones altoandinas, sin arbustos, como una formación caracterizada por arbustos, siempre verdes y ericoides, de *Lepidophyllum quadrangulare* en la parte inferior (entre los 4000 y los 4200 msnm) y por *Lepidophyllum rigidum* en las alturas mayores (entre los 4000 y los 4900 msnm, aproximadamente). El segundo tipo de *Lepidophyllum* se distingue del primero por sus hojas, puntiagudas y salientes, que son escamas cortas ubicadas cerca de las ramas. Weberbauer señala que, debido al aspecto difuso que tienen los crecimientos altoandinos—como los cojines gruesos de *Pycnophyllum*, *Azorella* y *Merope aretioides*—por encima de los 4000 msnm, no tuvo en cuenta otras formaciones en esta zona de su mapa.

En cuanto a las formaciones típicas altoandinas, principalmente entre los 4000 y los 4600 msnm, Weberbauer señaló que abundaban plantas en forma cojín y rosetas (*Pycnophyllum*, *Azorella* y *Merope aretioides*), pudiendo encontrarse, también, algunos arbustos enanos rastreros y, muy raramente, algunos arbustos erectos. En las partes más bajas, el investigador señaló la presencia de algunas manchas dispersas de *Polylepis*, entre los 3800 y 4000 msnm, los cuales constituían las formas arbustivas más vigorosas de la región altoandina y que, de vez en cuando, formaban arbóreas enanas. Esporádicamente, Weberbauer indicó que aparecían arbustos localizados en zonas rocosas y campos pedregosos.

Por su parte, el MINAM (2015a) señala que, entre los 3800 y 4800 msnm, el pajonal andino está formado principalmente por herbazales que ocupan terrenos con distinta fisiografía: desde casi planos hasta empinados o escarpados. Asimismo, integra este tipo de cobertura vegetal en tres subunidades, fisionómica y florísticamente, diferentes:

- a) Pajonal, con alturas de hasta 60 cm, identificándose asociaciones de *Calamagrostis-Stipa*, *Festuca-Stipa* y *Stipa-Margyricarpus*.
- b) Césped de puna, con alturas de hasta 15 cm, dominado por gramíneas y gramíoides, con inclusiones de especies en forma cojín, planos o convexos, como *Aciachne pulvinata*, *Festuca peruviana*, entre otras, y con especies arbustivas como *Werneria nubigena* y *Werneria pygmaea*, entre otras.
- c) Tolar, caracterizado por la presencia de comunidades arbustivas sobre las herbáceas, principalmente en la puna del sur: Puno, Tacna, Moquegua Arequipa, Ayacucho y Apurímac, donde predominan especies resinosas como *Parastrephia lepidophylla* (tola) o arbustivas como *Senecio spinosus* o herbáceas como *Festuca rigescens* o *Stipa ichu*.

Por encima de los 4500 msnm y bajo condiciones extremas del clima, existen áreas desnudas o afloramiento rocosos con presencia de especies compactas como *Azorella* sp. o *Picnophyllum* sp.

En relación con los glaciares y la nieve perpetua, Weberbauer representó estas zonas basándose en las únicas referencias que existían al respecto en ese momento, esto es, los mapas de Sievers y Raimondi y sus propias observaciones. El investigador se cuestionó si las representó bien, ya que, en el mapa de Raimondi, por ejemplo, no se mostraban todos los glaciares como tales, señalando, por ello, que era necesario una investigación más detallada sobre su distribución. Por su parte, el MINAM (2015b), cuantifica y muestra la distribución geográfica de los glaciares y las áreas altoandinas con escasa y sin vegetación (o áreas periglaciares), sin embargo, no da mayor detalle sobre estas zonas, puesto que escapaba de su objeto de estudio: áreas con presencia de cobertura vegetal.

3.2. Comparación cartográfica de los mapas analizados

El análisis de los patrones espaciales, tanto de los factores bióticos como abióticos de la naturaleza, es uno de los principales temas de interés en diversas disciplinas científicas como la ecología, la geografía o la biología evolutiva, sobre todo el análisis de datos espacialmente explícitos, es decir, aquellos que contienen información sobre la localización en el espacio (Maestre 2006).

En ese marco, tras recorrer las tres regiones naturales del Perú a lo largo de 49 líneas de norte a sur, documentando las especies de plantas y formaciones vegetales, Weberbauer contribuyó a sentar las bases para la comprensión de la distribución espacial de las coberturas vegetales del país a través de la publicación de su mapa. La digitalización de esta obra hace posible analizar todos sus detalles, como, en este caso, las áreas de las formaciones vegetales microtermales –y la posición de las líneas de nieve actuales– y, además, permite contrastar dicha información con su situación de existencia y conservación en el momento presente (Zelada & Reynel 2023).

La tecnología ha progresado mucho desde aquella época, sobre todo si consideramos el vertiginoso progreso que la geomática y los SIG han tenido en las últimas décadas. Esto ha permitido grandes avances hacia el mayor conocimiento y entendimiento del espacio geográfico, al emplear, por ejemplo, la percepción remota –a través de la información espectral– en la descripción de la variación en el espacio de la vegetación o del paisaje, lo cual ha ayudado a la comprensión holística de los sistemas ecológicos (Cabello & Paruelo 2008). En ese sentido, con la elaboración del *Mapa Nacional de Cobertura Vegetal* (2015), basado en el uso de imágenes *Landsat* del año 2011, el MINAM realizó un gran aporte al conocimiento actualizado de la cobertura vegetal del territorio peruano permitiendo, entre otros análisis, realizar estudios comparativos sobre la evolución de formaciones vegetales frágiles, a los efectos antrópicos y del cambio climático, como lo son las coberturas vegetales altoandinas (MINAM 2015a).

En la figura 4, se muestran los resultados de la estimación de la extensión de las coberturas altoandinas del territorio peruano, a través de la comparación cartográfica

entre el primer mapa de vegetación y el mapa más actual que hemos señalado. De manera general, se observa que el área de intersección entre las formaciones vegetales microtermales identificadas por Weberbauer y las coberturas vegetales altoandinas clasificadas por el MINAM, es de 140.771,51 km².

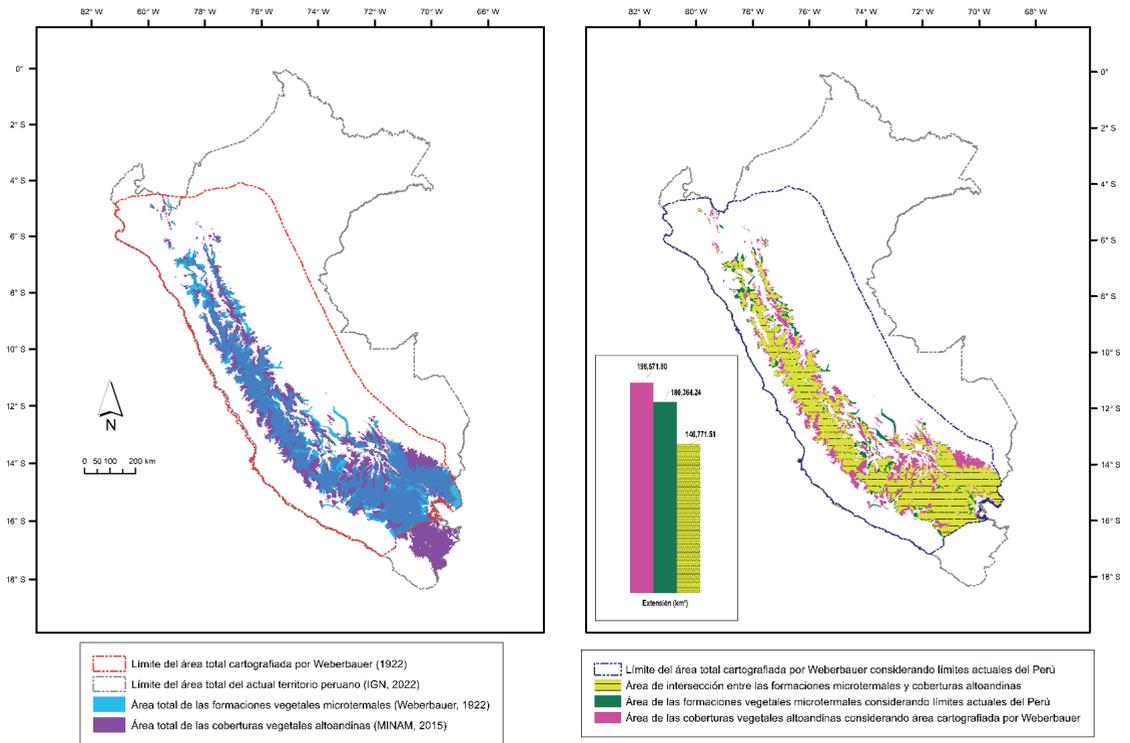


Figura 4. Transposición cartográfica de la extensión y distribución de las coberturas vegetales altoandinas del Perú en dos momentos históricos precisos: 1922 y 2015 (elaboración de los autores con base en información geográfica de Weberbauer [1922], MINAM [2015a, 2015b], IGN [2022]).

Puntualizando lo mostrado en la figura 4 y considerando un área común de análisis entre los límites actuales del territorio peruano y el área cartografiada por Weberbauer, se constató que el 70,89% (140.771,51 km²) de dicha área, que actualmente tiene presencia de cobertura vegetal altoandina, había sido identificada y clasificada hace casi un siglo por Weberbauer (1922) como correspondiente a formaciones microtermales. Sin embargo, si consideramos la extensión total (220.231,71 km²) (fig. 3) que ocupan actualmente las áreas altoandinas en el territorio peruano de acuerdo al mapa elaborado por el MINAM, el porcentaje disminuye, resultando que el 63,92% de dicho territorio

coincide con lo cartografiado (e identificado) por Weberbauer como formaciones vegetales microtermales.

El análisis visual permite apreciar una gran similitud entre la silueta y distribución latitudinal de las coberturas vegetales altoandinas descritas y clasificadas por el MINAM (2015) y las áreas identificadas como formaciones vegetales microtermales por Weberbauer (1922). No obstante, se puede notar también (fig. 5) que la misma área de intersección (140.771,51 km²) es denominada de distinta manera, tanto por Weberbauer como por el MINAM. Con base en ello, la clasificación y descripción fitogeográfica del investigador alemán es más general que la realizada por el MINAM, teniéndose que por cada una de las cuatro formaciones vegetales microtermales (1922) se encuentran contenidas áreas de cada una de las coberturas vegetales altoandinas (2015).

En la tabla 3, se puede observar, por ejemplo, que el área (27.386,74 km²) denominada por Weberbauer como tolar microtérmico, en base al MINAM (2015a) se considera la mayor parte de esa categoría (82,90%) como pajonal andino. De igual forma, el área (91.976,22 km²) de intersección que Weberbauer denominó como “formaciones típicas altoandinas”, el MINAM (2015a) también la categoriza mayormente como pajonal andino (82,41%).

Algo similar ocurre con la extensión de la estepa herbácea microtérmica (16.602,44 km²) y los glaciares y la nieve perpetua (4806,11 km²) identificadas por Weberbauer, las cuales el MINAM (2015a) clasifica mayormente como pajonal andino (85,49% y 69,40%, respectivamente).

Compatibilizando lo descrito sobre la fitogeografía de las formaciones vegetales altoandinas en cada una las cartografías analizadas, junto con visualizar de forma general la similitud que se presentan en los rasgos fitogeográficos y rangos altitudinales establecidos (tablas 1 y 2), se pueden apreciar también diferencias fitogeográficas destacadas, debido principalmente a la metodología diseñada, a la escala empleada, a la especificidad en los criterios utilizados y a los efectos, tanto antrópicos como naturales, que puedan haber sufrido las coberturas vegetales de los Andes peruanos en casi un siglo de diferencia.

En su mapa, Weberbauer no hace una diferenciación gráfica de la jalca, aspecto que la clasificación hecha por el MINAM sí resalta. Dicha clasificación diferencia incluso el páramo. Sin embargo, coinciden de gran manera en la descripción fitogeográfica al señalar, ambos autores, la presencia de plantas herbáceas y plantas en forma de cojín, junto con algunos remanentes de arbustos o parches de bosques también remanentes que se desarrollan en ambientes altamente húmedos. La principal explicación de estos contrastes descriptivos la hace el MINAM (2015a), al señalar que, históricamente, se había confundido a la jalca con el páramo y la puna, señalando que más bien la primera podría ser mejor definida como una zona de transición entre las otras dos.

Tabla 3. Correspondencia del área de intersección entre las formaciones vegetales microtermales (1922) y las coberturas vegetales altoandinas (2015) (elaboración de los autores).

Formación vegetal microtermal (Weberbauer 1922)	Extensión (km ²)	Cobertura vegetal altoandina (MINAM 2015)	Extensión (km ²)
Tolar microtérnico alternando con las típicas formaciones altoandinas, sin arbustos.	27.386,74	Bosque relicto altoandino	256,01
		Bofedal	408,12
		Pajonal andino	22.704,68
		Área altoandina con escasa y sin vegetación	3883,60
		Glaciar	134,33
Formaciones típicas altoandinas.	91.976,22	Bosque relicto altoandino	264,76
		Bofedal	3222,76
		Pajonal andino	75.795,47
		Área altoandina con escasa y sin vegetación	11.726,33
		Glaciar	966,90
Estepa herbácea (pajonal) microtérnica, siempre verde o casi siempre verde, sin o casi sin arbustos.	16.602,44	Páramo	60,78
		Jalca	195,54
		Bosque relicto altoandino	3,05
		Bofedal	322,80
		Pajonal andino	14.194,08
		Área altoandina con escasa y sin vegetación	1439,63
Los glaciares y la nieve perpetua.	4806,11	Bosque relicto altoandino	18,41
		Bofedal	235,78
		Pajonal andino	3335,23
		Área altoandina con escasa y sin vegetación	1035,55
		Glaciar	181,14

Asimismo, en cuanto a la descripción del tolar microtérmino identificado por Weberbauer, el autor es claro al señalar que, debido al aspecto difuso que presentan los crecimientos altoandinos por encima de los 4000 msnm, no consideró la descripción de otras formaciones vegetales en esa zona, basando su descripción en las dos especies de tola que consideró como base de su clasificación. Por su parte, el MINAM señala que en esta zona se pueden encontrar bofedal, bosque de relicto altoandino, pero principalmente pajonal andino. En relación con este tipo de cobertura vegetal, el MINAM (2015a) señala al tolar como una de las subunidades del pajonal andino, destacando su presencia principalmente en los departamentos de Puno, Tacna, Moquegua, Arequipa, Ayacucho y Apurímac, lo que coincide de gran manera con lo cartografiado por Weberbauer. Por lo demás, las formaciones típicas altoandinas –descritas por Weberbauer– y el pajonal andino –descrito por el MINAM– son las zonas que mayor similitud presentan tanto a nivel cartográfico como en su descripción fitogeográfica.

Una mención especial merecen los datos mostrados sobre los glaciares y la nieve perpetua, obtenidos del mapa de Weberbauer. La similitud de estos con lo reportado por el MINAM (2015a) es muy baja (3,77%), lo que podría explicarse por la alta presencia del tipo de cobertura señalado por el MINAM como área altoandina con escasa y sin vegetación o área periglacial, que seguramente, incluye áreas hoy identificadas como “morrenas” y también áreas que presentan vestigios de desglaciación. Pese a ello, estos datos pueden ayudar en los análisis contemporáneos sobre cambio climático y desglaciación. Por ejemplo, considerando los resultados del estudio recientemente publicado por Turpo y colaboradores (2022) donde, en base a imágenes satelitales *Landsat*, se estimó que la extensión de los glaciares peruanos pasó de 1743,45 a 1025,29 km², entre 1990 y 2020, se puede aproximar una referencia temporal de prácticamente un siglo sobre el deterioro de la cobertura glaciar en el Perú: 5375,93 km² en 1922, 1932,07 km² en 2015, y 1025,29 km² en 2022.

3.3. Apuntes sobre la precisión y relevancia de los resultados

Como destaca Maestre (2006), desde la primera mitad del siglo XX se comprendió que no era aleatoria la distribución de los organismos en el espacio (entre ellos, las plantas), sino, más bien, respondía a la presencia de determinadas condiciones ambientales y a la ocurrencia de distintos procesos ecológicos. Por ello, analizar la cartografía histórica –valiosa fuente de datos geográficos– mediante el empleo de los actuales métodos de los SIG, contribuye a resolver diversos tipos de consulta (Ruiz et al. 2014), como la realizada en este caso sobre la extensión de la vegetación altoandina del Perú en dos momentos históricos precisos.

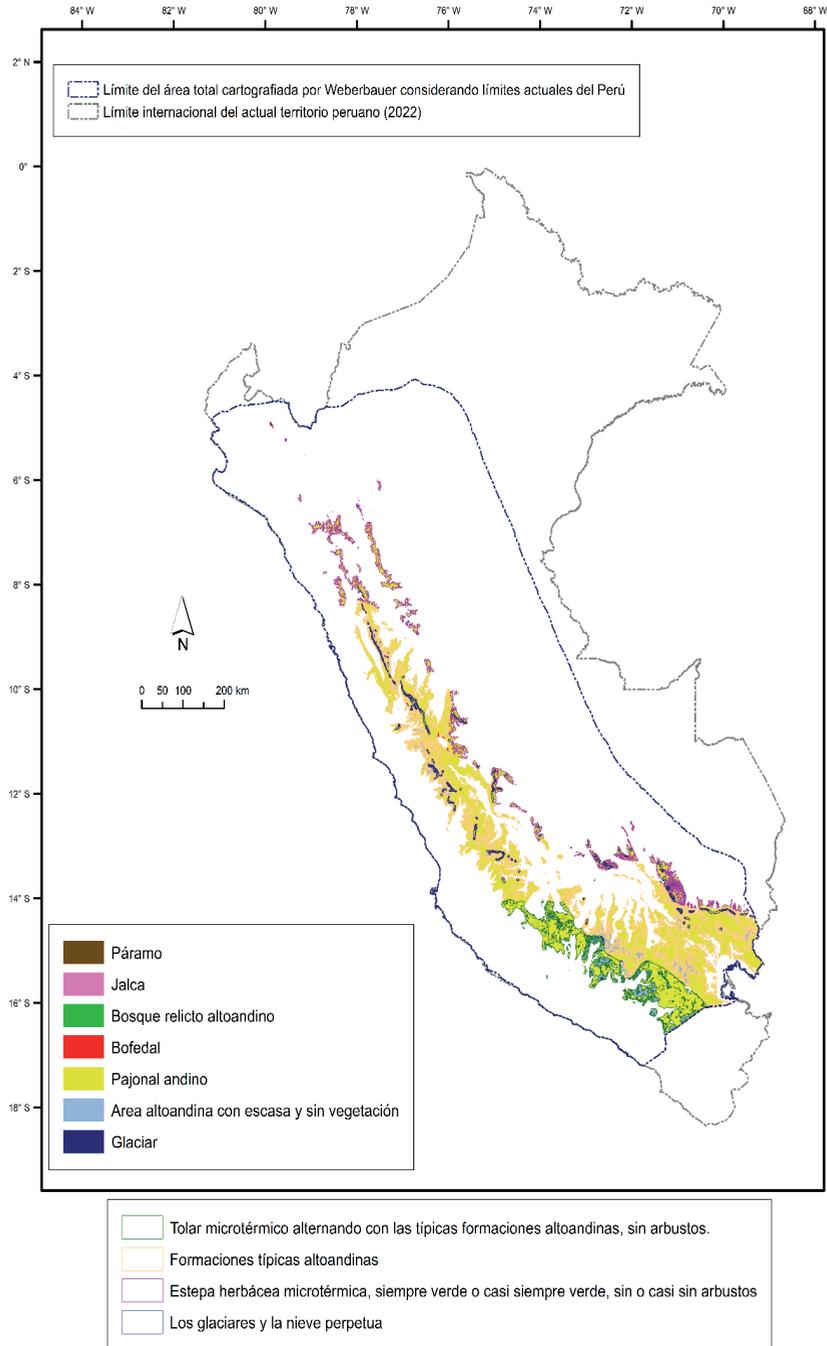


Figura 5. Mapa con la correspondencia del área de intersección entre las formaciones vegetales microtermales (1922) y las coberturas vegetales altoandinas (2015) (elaboración de los autores con base en Weberbauer [1922], MINAM [2015a; 2015b]).

Es importante aclarar que no existe un método único para analizar el contenido de un mapa histórico y antiguo; dependerá de la línea temática, los objetivos planteados y de las capacidades de procesamiento en SIG (Gantiva & Romero 2015). En ese sentido, en la revalorización de ese tipo de mapas, la georreferenciación es un paso muy importante, ya que permite determinar la posición de un elemento en un sistema de referencia espacial a través del establecimiento de una serie de puntos de control (Álvarez-Rogel & Conesa 2018). De igual forma, la digitalización es otro proceso importante, que permite analizar y localizar información histórica y temática organizándola en tablas de atributos, a través de la reproducción de tal cartografía en un archivo digital que contenga información vectorial (Solanas-Jiménez 2018), permitiendo hacer consultas y diversos tipos de análisis espaciales-temporales (Cascón-Katchadourian et al. 2020).

Como regla general, cuanto más antiguo es un mapa, mayor será la distorsión que presenta con respecto a la cartografía actual, y también será mayor su nivel de abstracción en la representación. Con base en lo expuesto, el valor del error cuadrático medio obtenido (0,0067) en la georreferenciación al emplear 13 puntos de control (anexo 1), el tipo de transformación *Adjust*, y el algoritmo de muestreo del vecino más cercano, resulta ser un valor bastante aceptable pese a la antigüedad del mapa fitogeográfico de Weberbauer, ya que se recomienda que el error no sea mayor a la unidad del tamaño de pixel de resolución de la imagen digital analizada (Álvarez-Rogel & Conesa 2018).

Si bien se pueden mejorar los resultados de la georreferenciación a través del aumento de puntos de control, buscando disminuir el error cuadrático medio, se debe evitar al máximo deformar el mapa, ya que eso puede alterar su historia (Crespo 2013). Además, en cada manipulación de datos e información geográfica se va a incorporar algún tipo de error humano y, lo realmente importante, no es reducir a “cero” el error y la distorsión, sino ubicar lo más fidedignamente posible la cartografía antigua e histórica, ya que este tipo de mapas son una imagen de su tiempo y del contexto en que se elaboraron. Así, para la digitalización, proceso cuya precisión está enlazada con la georreferenciación, se pudieron realizar acercamientos para hacer el trazado lo más “céntrico” posible gracias a que la imagen original tenía una buena calidad de resolución. Sin embargo, tal vez el principal obstáculo al digitalizar fue que en el mapa original la simbología de las formaciones vegetales tenía una paleta de colores reducida, que constaba principalmente de amarillo, verde claro, rojo y negro. Por lo tanto, se hizo laborioso reconocer con rapidez el tipo de formación vegetal que se estaba digitalizando.

Sin dudas, fue muy importante que el mapa fitogeográfico de Weberbauer esté basado en el *Mapa del Perú* de A. Raimondi (uno de los mapas mejor elaborados del Perú de fines del siglo XIX), ya que lo convierte en un producto de vanguardia para su tiempo, y hace que todos los análisis espaciales derivados de su información puedan ser consultados y utilizados con alta confiabilidad para estudios comparativos o referenciales en la actualidad. Es el caso del que se ha llevado a cabo en este estudio,

que contrastó las coberturas vegetales altoandinas identificadas en el primer mapa de vegetación del Perú con las clasificadas en la cartografía más actual en la temática. Ambos mapas fueron elaborados con recursos humanos, tecnologías, métodos y en escenarios históricos-cartográficos muy diferentes y distantes (casi 100 años), pero tienen una gran semejanza, tanto en las extensiones estimadas, como en la descripción fitogeográfica realizada.

4. CONCLUSIONES

Teniendo en consideración lo mencionado en el primer mapa fitogeográfico del Perú (1922), se tiene un área estimada para el conjunto de las cuatro formaciones vegetales microtermales (con temperatura promedio entre 15° y 8° C) de los Andes peruanos de inicios del siglo XX de 183.445,31 km², de menor a mayor:

- Los glaciares y la nieve perpetua: 5375,93 km².
- Tolar microtérmino alternando con las típicas formaciones altoandinas, sin arbustos: 32.042,67 km².
- Estepa herbácea (pajonal) microtérmino, siempre verde o casi siempre verde, sin o casi sin arbustos: 32.890,81 km².
- Formaciones típicas altoandinas: 113.135,89 km².

Estos datos pueden ser utilizados con alta confiabilidad, ya que el valor del error cuadrático medio obtenido en la georreferenciación (0,0067) resultó bastante aceptable –menor a la unidad del tamaño del pixel de resolución de la imagen digital analizada–, pese a que el mapa fue elaborado hace casi 100 años.

Revalorizar un trabajo tan importante como dicho mapa histórico demandó un esfuerzo no solo en lo concerniente a los procesos de georreferenciación y digitalización propiamente dichos, sino también en los esfuerzos previos de acopio de toda la información contextual. Esto ha servido para realizar, posteriormente, un análisis de comparación cartográfica completo y científico entre el primer mapa de vegetación del Perú y el mapa más actual en este tema. El resultado general de dicha comparación es que el 63,93% del territorio que actualmente ocupan las coberturas vegetales altoandinas en el Perú coincide con el área cartografiada e identificada por Weberbauer como formaciones vegetales microtermales.

En síntesis, estos hallazgos constituyen una valiosa fuente de información geográfica, pues permiten superponer y realizar de una forma más visual e interactiva, aproximaciones comparativas (con alta confiabilidad) sobre los cambios en el tiempo de las formaciones vegetales altoandinas del Perú, las que actualmente enfrentan una fuerte presión, tanto por los avances antrópicos, como por los efectos del cambio climático.

REFERENCIAS

- Álvarez-Rogel, Y. & C. Conesa 2018. Georreferenciación de documentos cartográficos históricos para el análisis del trazado fluvial del bajo Segura, Vega Media (Murica, España). *Geofocus* 21: 101-118. <https://doi.org/10.21138/GF.536>
- Basadre, J. 2014a. *Historia de la República del Perú [1822-1933]. Segundo período: la falaz prosperidad del guano [1842-1866]*. Lima: Producciones Cantabria S.A.C.
- Basadre, J. 2014b. *Historia de la República del Perú [1822-1933]. Tercer período: la crisis económica y hacendaria anterior a la guerra con Chile [1864-1878]*. Lima: Producciones Cantabria S.A.C.
- Basadre, J. 2014c. *Historia de la República del Perú [1822-1933]. Quinto período: el comienzo de la reconstrucción [1884-1885]*. Lima: Producciones Cantabria S.A.C.
- Cabello, J & J. M. Paruelo 2008. La teledetección en estudios ecológicos. *Ecosistemas* 17 (3): 1-3. <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/77> [consultado: 28-11-2023].
- Carbonel, A. 2018. *El Mapa del Perú de Antonio Raimondi. La resistencia del Paisaje*. Tesis de Magíster en Historia del Arte y Curaduría, Escuela de Posgrado, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima. <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/13297> [consultado: 28-11-2023].
- Cascón-Katchadourian, J. D., A. Ruiz & A. Quesada 2018. Georreferenciación y publicación Web de cartografía antigua en sistemas de información geográficos: requisitos para su evaluación y estudios de caso. *Revista General de Información y Documentación* 28 (1): 193-212. <https://doi.org/10.5209/RGID.60810>
- Cascón-Katchadourian, J. D., J. Alberich-Pascual & A. Quesada-Román 2020. Revisión y sistematización del proceso de digitalización y publicación de cartografía antigua en medios digitales. *Investigación Bibliotecológica* 34 (83): 13-35. <https://doi.org/10.22201/iibi.24488321xe.2020.83.58137>
- Crespo, A. 2013. Herramientas y metodología para el análisis de mapas antiguos. *Tiempos modernos* 26 (1): 1-29. <http://www.tiemposmodernos.org/tm3/index.php/tm/article/view/335/378> [consultado: 28-11-2023].
- Gantiva, S. & S. Romero 2015. *Digitalización y análisis cartográfico de la Carta Corográfica del Municipio de Santander elaborado por el General Agustín Codazzi por orden del Gobierno en el año de 1858*. Tesis para optar al título de Tecnólogo en Topografía, Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá. <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/2345> [consultado: 28-11-2023].
- Maestre, F. 2006. Análisis y modelización de datos espacialmente explícitos en Ecología. *Ecosistemas* 15 (3): 1-6. <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas%20/art%20icle/view/157> [consultado: 30-11-2023].

- Ministerio del Ambiente del Perú 2015a. *Mapa Nacional de Cobertura Vegetal*. Geoservidor. <https://geoservidor.minam.gob.pe/recursos/intercambio-de-datos/> [consultado: 28-11-2023].
- Ministerio del Ambiente del Perú 2015b. *Mapa Nacional de Cobertura Vegetal*. Geoservidor. <https://geoservidor.minam.gob.pe/recursos/intercambio-de-datos/> [consultado: 28-11-2023].
- Olaya, V. 2014. *Sistemas de Información Geográfica*. Github. <https://volaya.github.io/libro-sig/> [consultado: 28-11-2023].
- Palacios, S. & C. Reynel 2011. *Una formación vegetal subxerófila en el valle de Chanchamayo, Dp. de Junín*. Lima: Herbario de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Ruiz, A., F. Dávila, A. Aristegui & J. Sánchez 2014. Digitalización y difusión de cartografía en el Servicio de Documentación del Instituto Geográfico Nacional (IGN). *Revista Catalana de Geografia* 19 (50): 1-7. <http://www.rcg.cat/articles.php?id=323> [consultado: 28-11-2023].
- Solanas-Jiménez, J. 2018. Tratamiento de cartografía histórica para el análisis de la forma urbana en sistemas de información geográfica. *Revista Bibliográfica de Geografía y Ciencias Sociales* 23 (1): 1-16. <http://www.ub.edu/geocrit/b3w-1225.pdf> [consultado: 28-11-2023].
- Turpo, E., M. Borja, R. Espinoza-Villar, N. Moreno, R. Camargo, C. Almeida, K. Hopfgartner, C. Yarleque & C. Souza 2022. Mapping Three Decades of Changes in the Tropical Andean Glaciers Using Landsat Data Processed in the Earth Engine. *Remote Sensing* 14 (9): 1-21. <https://doi.org/10.3390/rs14091974>
- Weberbauer, A. 1922. Die Vegetationskarte der peruanischen Anden zwischen 5° und 17° S. *Petermanns Geographische Mitteilungen*, 68: 89-122. https://zs.thulb.uni-jena.de/receive/jportal_jparticle_00510934 [consultado: 28-11-2023].
- Weberbauer, A. 1936. *Flora of Peru*. Chicago: Field Museum of Natural History. https://openlibrary.org/books/OL13496463M/Flora_of_Peru [consultado: 28-11-2023].
- Weberbauer, A. 1945. *El Mundo Vegetal de los Andes Peruanos. Estudio Fitogeográfico*. Lima: Estación Experimental Agrícola de la Molina. <https://bibdigital.rjb.csic.es/records/item/9502-redirectio> [consultado: 28-11-2023].
- Zelada, H. & C. Reynel 2023. *Augusto Weberbauer Adamczyk, el padre de la Fitogeografía peruana y su Mapa de la vegetación del Perú*. Lima: Herbario de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional Agraria La Molina.

ANEXOS

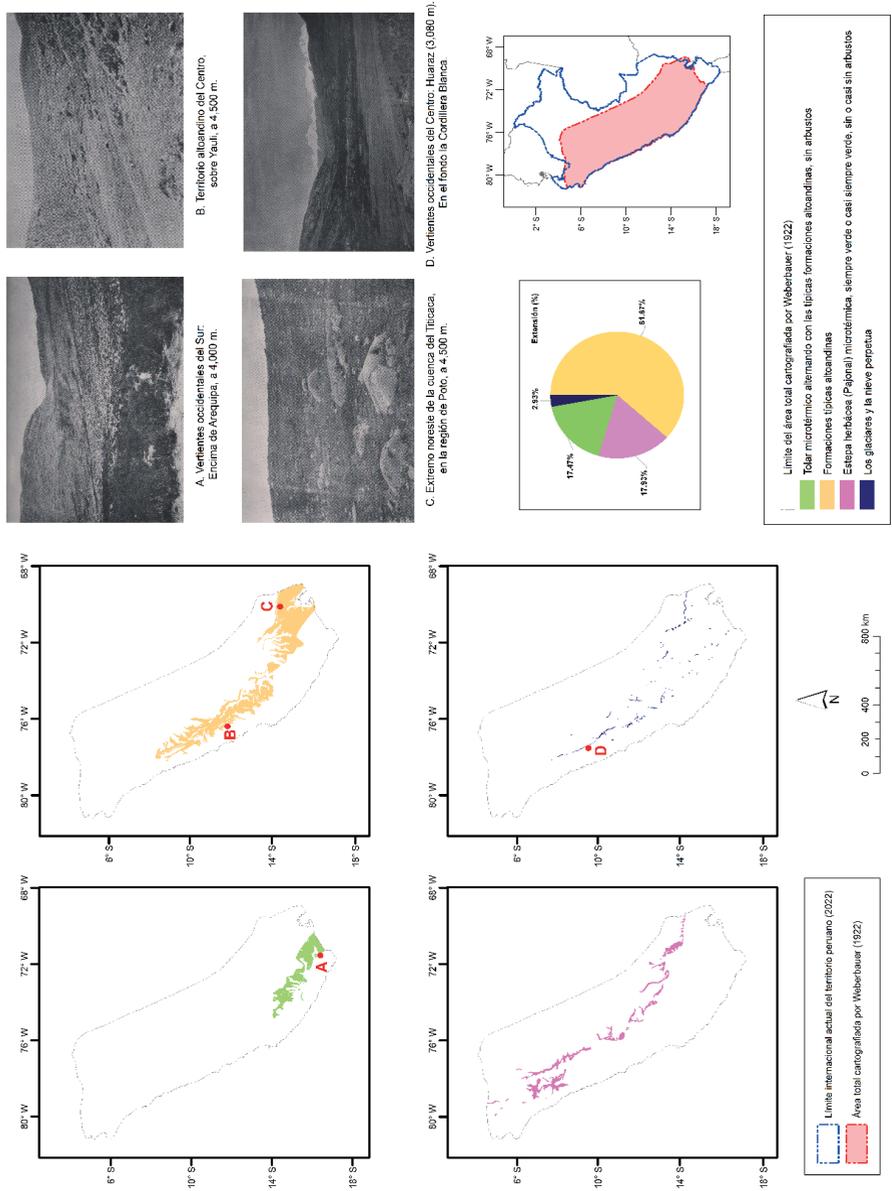
Anexo 1

Puntos de control utilizados para la georreferenciación del mapa fitogeográfico (elaboración de los autores con base en Weberbauer [1922]).

N° Punto de Control	Coordenadas geográficas		N° Punto de Control	Coordenadas geográficas	
	Longitud (°)	Latitud (°)		Longitud (°)	Latitud (°)
PC 1	81	5	PC 8	75	14
PC 2	69	15	PC 9	77	13
PC 3	77	3	PC 10	79	10
PC 4	78	7	PC 11	80	8
PC 5	74	8	PC 12	76	15
PC 6	72	10	PC 13	75	10
PC 7	74	17			

Anexo 2

Extensión y distribución geográfica por cada formación vegetal microtermal de los Andes peruanos de inicios del siglo XX (elaboración de los autores con base en Weberbauer [1922]; fotografías de Weberbauer [1945]).



Anexo 3
 Extensión y distribución geográfica por cada cobertura vegetal altoandina del Perú de inicios del siglo XXI (elaboración de los autores con base en MINAM [2015]); fotografías de los autores)

