

EFFECTOS DE LOS CAMBIOS CLIMÁTICOS SOBRE LOS BOSQUES DE ALTURA EN EL ALTIPLANO* CLIMATE CHANGE EFFECTS ON HIGH-ALTITUDE WOODS IN THE ALTIPLANO

VANESA SERRUDO[†] [1], HEIDY MONTECINOS[†] [2], MARÍA ELENA ANGULO[†] [3], PETER ZABALA-MEDINA[†] [4], & EDUARDO R. PALENQUE[†] [5]

[†] Instituto de Investigaciones Físicas (IIF), Universidad Mayor de San Andrés (UMSA), La Paz, Bolivia.
<https://doi.org/10.53287/pnbo2770ae45h>

RESUMEN

Se midió el coeficiente de conducción térmica de trozos de corteza de keñua (*Polylepis tarapacana*), provenientes de distintos lugares de la Cordillera de Los Andes, para poder comparar con datos climáticos y meteorológicos, buscando correlaciones entre los estímulos ambientales y algún mecanismo de defensa. Se encontró un método alternativo para clasificar las muestras por su lugar de origen.

Descriptor: Cambio climático — *Polylepis tarapacana* — Andes bolivianos — Conductividad térmica.

Código(s) PACS: 44.10+i

ABSTRACT

The keñua tree (*Polylepis tarapacana*), found at 5200 m a.s.l. in the Andes Mountains, grows at the highest treeline in the world. We measured the thermal conduction coefficient of keñua bark samples taken from different locations within the Andes Mountains. These measurements were used to find a correlation between environmental inputs and high altitude plant defence mechanisms. We found a new classification method to identify the origin of plant samples.

Subject headings: Climate change — *Polylepis tarapacana* — Bolivian Andes — Heat conduction.

1. INTRODUCCIÓN

La Cordillera de Los Andes es el mayor accidente geográfico en parte occidental de Sud América, ya que cruza el continente desde el norte (en Venezuela) hasta el extremo sur (llegando al oceano Antártico). La Cordillera es conocida por sus grandes reservas de minerales, muy bien registrados, y también por tener los picos más altos en el hemisferio occidental, etc. Además, entre sus propiedades notables, está el tener una gran cantidad de “hotspots” de biodiversidad, debido a los enormes cambios en altura (y del clima asociado) dentro de distancias relativamente cortas. Por ejemplo, el valle de Zongo, en Bolivia, varía 5 km en altura, en menos de 100 km lineales sobre el mapa. A partir de estas alturas muy cambiantes, y los climas asociados a cada altura, la Cordillera de Los Andes presenta colinas tropicales

en su base, subiendo hasta las cumbres heladas con clima polar. Siguiendo esas variaciones en altura, también se presentan cambios en la vegetación, con un gradiente de disminución continua: desde la selva húmeda densa, con árboles por encima de los 30 m de alto; cambiando al bosque nuboso, cubierto de arbustos y helechos; pasando a llanuras de pastizales en el altiplano; para terminar con pendientes cubiertas de rocas, en las cuales existen manchones de musgos y líquenes, hasta la línea de nieve permanente.

En el presente trabajo, se muestran los resultados de las características especiales de las cortezas de la keñua (*Polylepis tarapacana*), que es una de las 26 especies del género *polylepis*, familia de las rosáceas. Este género es endémico de la Cordillera de Los Andes en su totalidad. Se destaca el hecho que solo 5 de las 26 especies provienen de las altas montañas. Las keñuas (*Polylepis tarapacana*) crecen entre las latitudes de 16°S y 23°S, en la base de la zona tropical, pero con la salvedad que solo se desarrollan en zonas muy altas, por encima de los 4000 m s.n.m. (Kessler (1995)) y se reconoce que forman la línea de árboles más alta del mundo; por encima de los 5200 m s.n.m. en el Parque Nacional Sajama, en Bolivia (Argollo et al. (2004)). El nombre común de las *Polylepis tarapacana*, es keñua, y tiene diferentes grafías según las regiones de su dis-

¹<https://orcid.org/0000-0002-9781-2835>

²<https://orcid.org/0009-0003-3577-9691>

³<https://orcid.org/0009-0008-3020-1045>

⁴<https://orcid.org/0009-0001-2130-1713>

⁵<https://orcid.org/0009-0008-8477-9483>

⁵Email: epalenque@fiumsa.edu.bo.

* Este artículo es la versión en idioma español del capítulo 9 del libro: “Naturaleza en los Andes”, K. Mizuno ed., publicado por la Universidad de Kyoto, en idioma japonés (2015).

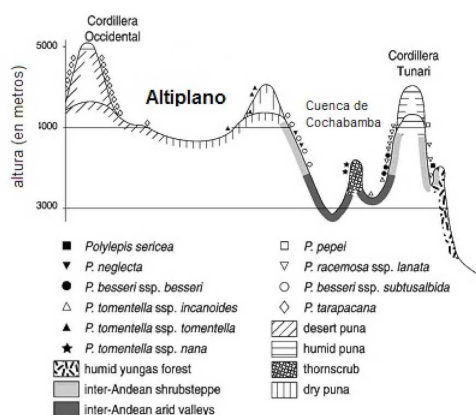


FIG. 1.— Diagrama de un perfil del altiplano mostrando la distribución ecológica de las diferentes especies de *Polylepis* (adaptado de Chepstow-Lusty et al. (2005)). Nótese que en este trabajo, solo se presentan datos para *Polylepis tarapacana*.

tribución geográfica que incluye el sudeste del Perú, el oeste de Bolivia, el noreste de Chile y el noroeste de Argentina. Aquí solo se presentan resultados de muestras recolectadas en Bolivia.

2. EL ÁRBOL DE LA KEÑUA

Los árboles de la keñua crecen en condiciones ambientales extremas, por lo que la especie ha desarrollado varias adaptaciones morfológicas y fisiológicas, las cuales le permiten sobrevivir a temperaturas muy bajas y períodos largos de estío. La especie es notable por su resistencia a temperaturas muy bajas, como las registradas de -20°C durante el invierno (Aceituno (1993)). Esta capacidad se atribuye (entre otras hipótesis) al contenido de carbohidratos de las hojas (González et al. (2001)). Las condiciones duras del clima también afectaron a las condiciones morfológicas de las plantas, como las hojas perennes, un follaje espeso, ramas retorcidas desde la base del tronco, y en especial, un tipo particular de corteza, con muchas hojas delgadas en varias capas (Kessler (1995)). En términos generales, los árboles tienden a formar islas de bosque que tratan de cubrir pendientes extensas en las montañas. Sin embargo, no es extraño encontrar árboles aislados en los valles. Esta especie ha sido utilizada durante siglos, principalmente para leña, y en forma secundaria como material de construcción. Durante el siglo pasado, la explotación tuvo un gran incremento, llevando a la keñua a estar en el libro rojo de las especies en peligro (Moya & Lara (2011)). Los bosques de *polylepis* no solo son sistemas en peligro, sino que también han sido reducidos a enclaves en zonas arbustivas o pastizales secos, las cuales son dominantes en los bordes del altiplano (Navarro et al. (2005)).

Los árboles de keñua a grandes alturas están distribuidos en las pendientes de las montañas de la rama occidental de los Andes, y son más comunes en Bolivia que en los otros tres países que comparten el altiplano. En los valles interandinos existen también especies similares, pero estas crecen allí por las condiciones climáticas más suaves. La keñua es la más resistente a las bajas temperaturas y tiene



FIG. 2.— Un ejemplar típico de *Polylepis tarapacana* en la región de las Machacas en el altiplano boliviano (Fotografía por E.R. Palenque)

el récord mundial de altura para la línea de árboles.

La keñua (*Polylepis tarapacana*) ha sido descrito como un árbol con un tronco ramificado, que no crece recto, con su follaje que se abre desde la base. Los árboles pueden llegar a tener entre 3 a 7 m de altura, con una base formada por un tronco corto de hábito helicoidal, generalmente de 30 a 60 cm de diámetro. Las ramas también crecen retorcidas, con pequeñas ramitas en los extremos. Las hojas son perennes, del tipo compuesto, trifoliadas, de forma oblonga, con 7 a 9 mm de largo, y de 3 a 5 mm de ancho, cubiertas con un pelo muy fino. Las hojas tienen también una distribución helicoidal, con tendencia a agruparse al final de las ramas nuevas. Las flores son bastante pequeñas, cerca de 5 mm de diámetro y no tienen pétalos. El periodo de floración es bastante largo, cerca de cuatro meses, desde el final del invierno hasta el inicio del verano. Los frutos tienen cuatro lados, alrededor de 4 mm de largo y 5 mm de ancho, con una o dos semillas. Es muy frecuente que un fruto se mantenga unido al árbol por más de un año, lo que hace que cualquier colecta contenga frutos nuevos y antiguos (Stern (2001)).

La keñua es un árbol relativamente pequeño, con ramas que crecen desde la base, y con un follaje compacto y denso. Si un conjunto de árboles crecen juntos, generalmente en el fondo de una cañada, tienden a ser más delgados y con un follaje menos denso; pero si un árbol crece solitario, la tendencia es que sea menos alto, pero con follaje denso, para poder protegerse de los fuertes vientos. La baja humedad relativa de esos hábitats se contrarresta por el pequeño tamaño de las hojas y la escasa cantidad de estomas en cada hoja, así como la presencia de pequeños pelos en la cara expuesta al sol (Stern (2001)).

3. EL HÁBITAT

La región de estudio está situada en el altiplano boliviano, que tiene condiciones climáticas extremas. Es una de las regiones en el mundo que recibe mayor cantidad de radiación solar, lo que representa un incremento de casi el 50% en la región ultravioleta del espectro solar. La región de donde fueron colectadas la mayoría de las muestras de corteza, está cerca del Parque Nacional Sajama, y se le puede dar la clasificación de Koppen como microtermal con invierno seco (Dw), con una temperatura media de 3.4°C, y una media de máximos diarios de 17.2°C y de -12.6°C para los mínimos; con un mínimo histórico de -19°C (Libermann-Cruz (1986)). El aspecto principal es la gran variación de temperaturas durante el ciclo diario, que se extiende cerca de 30°C; mientras que la variación entre las estaciones de verano a invierno solo cubre una diferencia de 10°C.

Las keñuas se han utilizado como indicadores de cambio climático, ya que tienen anillos anuales de crecimiento que actúan como indicadores proxy de la temperatura y humedad ambientales; de manera tal que es posible realizar la reconstrucción del pasado climático de regiones y épocas donde no existían instrumentos meteorológicos (Argollo et al. (2004)). En general, el estudio del clima pasado muestra la existencia de sequías severas alrededor del siglo XIV, lo que causó grandes cambios y migraciones de la población hacia sitios de colinas fortificadas en el altiplano boliviano (IAI (2012)). Los bosques de *polylepis* tienen una tasa de crecimiento extremadamente lenta, marcada por la tendencia estacional; la cual se ve incrementada con la altura geográfica, de tal manera que el género *polylepis* forma anillos estacionales muy marcados, pero extremadamente delgados, algunas veces de menos de un milímetro de espesor (Argollo et al. (2009)). Ese es uno de los ejemplos de la utilidad de los bosques de keñua, ya que no solo funcionan como un registro climático, sino que además ofrecen varios servicios ecoambientales. Entre estos últimos se puede citar que los bosques actúan como sistemas de captura de agua, cientos de veces más eficientes que las pasturas (Serrudo & Udaeta (2013)). Esta capacidad podría utilizarse para hacer que el bosque de *polylepis* actúe como un reservorio de agua, además de su contribución a la fertilidad del suelo, o como lugar de anidación para aves locales y migratorias, etc. (Kessler (2006)).

Los bosques de keñua fueron alguna vez el aspecto dominante del paisaje del altiplano, pero ahora están reducidos a unos cuantos puntos aislados. La mayor parte del hábitat perdido fue a causa de la sobreexplotación causada por actividad extractivista para convertir la leña en carbón, para alimentar las calderas de las locomotoras de ferrocarril. Esta práctica se detuvo hace más de 50 años. Actualmente, existen otros riesgos, la mayor parte de estos está asociada a los cambios climáticos, tanto de escala local como global. El calentamiento global no es un fenómeno uniforme, y en la región de estudio presenta diversas tendencias locales, aún

para lugares cercanos, como Patacamaya y Sica Sica en el altiplano central (Palenque (2003)). En el caso del altiplano, se observa una tendencia de disminuir las temperaturas mínimas en las regiones cercanas a las montañas, que son las zonas donde crece la keñua. Por tanto, los cambios en la temperatura representan una doble amenaza para la keñua. Si la temperatura sube por encima de los 23°C, las semillas tienden a infectarse con bacterias, y se tornan inviables; por lo que el bosque no puede regenerarse por sí mismo (Vega-Krstulovic et al. (2007)). Por otro lado, existe el riesgo de escasez de agua de lluvia. Debido a que el derretimiento de los glaciares está causando periodos de estiaje más largos durante el invierno, con cielos extremadamente claros. Durante la noche, el cielo despejado puede causar un congelamiento debido a los procesos de radiación hacia la atmósfera oscura; lo cual es un efecto muy conocido por los habitantes del altiplano. Si existe menor cantidad de agua durante el ciclo diario, la temperatura más baja (generalmente antes del amanecer) sería aún más baja, lo que causaría daños severos a la vegetación. Se ha probado que los árboles de keñua poseen una defensa química de protección de las hojas contra la helada (González et al. (2001)). En este trabajo investigamos si las ramas y el tronco podrían aguantar temperaturas muy bajas durante muchas horas. La mayoría de los árboles de keñua poseen ramas delgadas, con una razón relativamente alta entre la superficie expuesta y el volumen del tejido que debe ser protegido; ya que este último contiene savia y otras sustancias vitales, que son soluciones acuosas. Este asunto se torna más importante al considerar que la keñua no solo es la especie de árbol que tiene el hábitat más alto en el mundo entero (es decir, es una especie única), sino al considerar también que si bien la temperatura media global ha incrementado a un ritmo de 0.1- 0.2°C/década, en los Andes Centrales la tasa es de 0.34, un 70% más que en el resto del planeta. También se sabe que los ecosistemas de montaña son más sensibles al cambio climático; y los nuevos datos sugieren que una alteración del ciclo hidrológico podría llevar a desbalances tan fuertes que los bosques de *polylepis* no llegarían a recuperarse (AGRIFORT (2009)).

4. MÉTODOS DE TRABAJO DE CAMPO Y DE LABORATORIO

Tal como se describió líneas arriba, la corteza de los árboles de keñua está formada por varias capas de hojuelas muy delgadas, que le dan un aspecto de madera laminada. Entre esas capas delgadas existe algo de aire encapsulado, y se supone que el conjunto (capas y aire) actúa en forma similar a las plumas de las aves para aislamiento térmico. Para el presente trabajo, el equipo de investigación recolectó muestras de cortezas provenientes de varios lugares de la Cordillera Occidental de Los Andes, en Bolivia, de otros puntos en el altiplano, y se compararon con dos muestras urbanas, de la ciudad de La Paz. Todas las muestras de lugares rurales provienen de puntos de

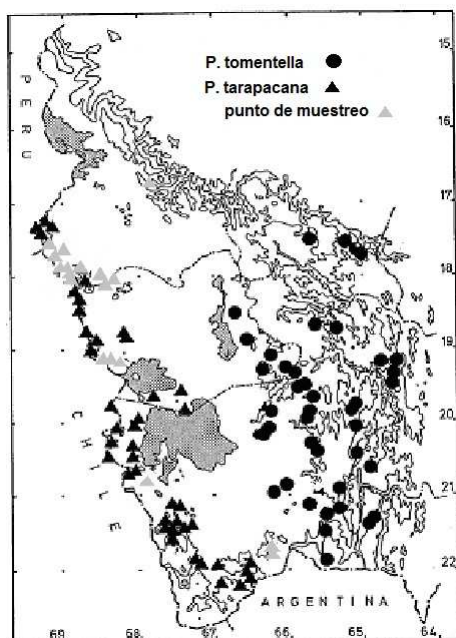


FIG. 3.— Lugares de recolección de muestras (adaptado del mapa de Kessler (1995)). Los triángulos grises muestran los lugares de las muestras analizadas.

bosques cuya altura es superior a los 4200 m sobre el nivel del mar.

Cada muestra de corteza consiste en un grupo de láminas delgadas de alrededor de una decena de árboles, elegidos al azar como representativos de cada rodal o “isla de bosque” de keñua. Las muestras analizadas fueron tomadas de la cara norte del árbol, ya que ese lado recibe la mayor radiación solar a lo largo de todo el año. Cada una de las muestras fue llevada al laboratorio en el Instituto de Investigaciones Físicas de la UMSA en un sobre especial, hecho de papel manila, marcado con el número del árbol, la altura geográfica y la ubicación del mismo, la cual fue determinada a través de un GPS portátil.

Cuando las muestras llegaron al laboratorio, se dejaron secar, durante semanas, e inclusive varios meses. Una vez secas, las muestras fueron separadas en sus láminas delgadas. Se midió el espesor de cada una de láminas como hojas, con un vernier digital, registrando ese dato en una bitácora especial, junto con un código especial de identificación; el cual retiene los datos importantes del lugar de origen de la muestra. Posteriormente, se cortó un trozo pequeño (alrededor de 1 cm²) de cada una de las capas de cada muestra, para poder medir el coeficiente de transmisión térmica de la muestra, que es una característica física del material. El método usado para medir el coeficiente es estándar en los laboratorios de física, pero no se lo emplea mucho en los laboratorios de biología; por lo que a continuación está una descripción breve del mismo (ver, p.ej. White & Manning (1954)).

Durante este estudio se utilizó el método de medición del flujo de calor a través de una muestra cuando esta se coloca entre dos reservorios a diferentes temperaturas. Se sabe que el calor fluye desde el



FIG. 4.— Una rama del árbol de keñua al pie del Monte Sajama, en Bolivia; mostrando el aspecto laminar de la corteza, con varias capas (Fotografía por V. Serrudo).

reservorio a mayor temperatura hacia el de menor temperatura, cumpliendo con la ecuación:

$$\Delta Q = \frac{kA\Delta T\Delta t}{L} \quad (1)$$

donde ΔQ representa el calor perdido por el reservorio más caliente (y que es ganado por el otro), A es la sección transversal por la cual pasa el calor (el área efectiva de contacto de la muestra), L es el grosor de la muestra, ΔT es la diferencia inicial de temperaturas entre los reservorios, Δt es el tiempo durante el cual se mide el flujo de calor, y finalmente k es la cantidad buscada: coeficiente de conducción térmica. Mientras más alto sea el valor de k , más fácilmente el calor podrá atravesar la muestra. Por ejemplo, en un metal como el cobre, k tiene un valor que es miles de veces más alto que el correspondiente a las maderas, como el pino. Cuando un material tiene un valor de k sumamente bajo, como el caso del corcho, se dice que es un aislante térmico. La clave está que mientras más bajo sea el valor de k , más tiempo le tomará al calor poder atravesar desde el interior de las ramas hasta el aire frío durante el invierno. Por tanto, midiendo el valor de k , se tiene un método para predecir si un árbol podrá soportar las temperaturas más bajas que están predichas para las montañas del altiplano occidental en Bolivia.

Para lograr un mejor rendimiento del sistema experimental en el laboratorio, se utilizó un montaje capaz de registrar simultáneamente la temperatura de ambos lados de la muestra, midiendo la temperatura varias veces en cada segundo, y dentro del rango de temperaturas que se consideró adecuado, con valores similares a los que se encontrarían en el campo. Todos los datos se registraron en forma electrónica y fueron procesados con un programa de computadora diseñado en forma específica.

5. RESULTADOS

Se encontró que todas las muestras presentan valores similares del coeficiente de conducción térmica,

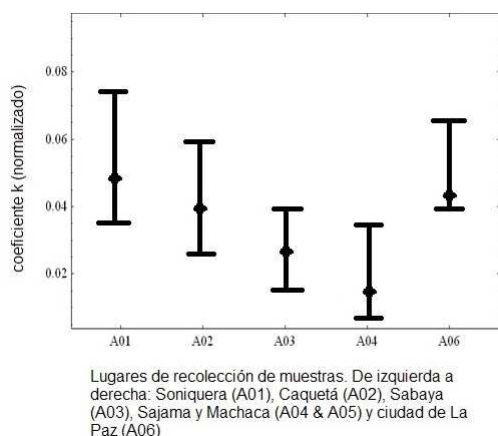


FIG. 5.— Coeficientes de conducción térmica vs. lugares de recolección de las muestras.

k , tal como se esperaba, ya que las muestras son de una misma especie. Sin embargo, las pequeñas variaciones entre valores nos permitieron diferenciar las muestras por sus lugares de origen, tal como se puede apreciar en la figura 5. El eje horizontal corresponde a promedios de muchas muestras de cada lugar de recolección, y están ordenados por su latitud geográfica, desde el sur (Soniquera) hacia el norte (ciudad de La Paz). Estas últimas muestras (de la ciudad de La Paz) se deben considerar como un caso especial, ya que corresponden a muestras cultivadas, y su régimen de riego no es el natural. Todas las otras muestras provienen de la cordillera, recolectadas en zonas rurales. En el caso de las muestras de Sajama y Machaca, se encontró gran similitud, que es estadísticamente imposible separar los dos grupos; lo cual es lógico por la proximidad de ambos lugares. A pesar de estos casos, se encontró una relación marcada entre el lugar geográfico de origen y el valor

relativo del coeficiente de conducción térmica (k) a lo largo de toda la cordillera.

Al comparar los valores absolutos del coeficiente k con los valores calculados para que los árboles no se congelen por completo, se concluye que no existe un riesgo importante para los bosques de *Polylepis*, aún considerando diferentes escenarios climáticos posibles, como los considerados por el IPCC.

El resultado de este estudio es un método indirecto para clasificar las muestras de cortezas de acuerdo a su lugar de origen. El siguiente paso será la expansión de las zonas de colecta, para probar el método con muestras del otro lado de la Cordillera de Los Andes, lo que implica una colaboración internacional, ya que se compararán muestras provenientes de diferentes países.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Prof. Kazuharu Mizuno por el interés y apoyo de nuestra investigación y por darnos la oportunidad de realizar trabajos conjuntos en una buena colaboración interinstitucional.

También se agradece a Alejandra Domic, José Valderrama, Arely Palabral Aguilera, Isabel Gómez Urquiza, al proyecto “Conservación de los Bosques de *Polylepis*” de la UMSA, y a la Asociación Civil “Armonía” por proporcionarnos varias de las muestras de cortezas; y a Leonardo Apaza, Enrique Calvo y Policarpio Valencia su ayuda con las medidas de algunas muestras.

Se agradece a Edson García por su colaboración en el proceso final del texto.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no hay conflicto de intereses respecto a la publicación de este documento.

REFERENCIAS

- Aceituno, P. 1993, *Revista de Geofísica*, **44**, 37
- AGRIFORT 2009, Climate Change in Latin America (AGRIFORT Consult, Les Isnas, Belgium)
- Argollo, J., Angulo, M. E., & Palenque, E. R. 2009, Registro de la variabilidad climática por los bosques de *Polylepis* tarapacana de la serranía de Levita mediante los proxies de dendrocronología, palinología y secuestro de carbono, Memorias del Primer Congreso de Proyectos Concursables UMSA-ASDI La Paz
- Argollo, J., Soliz, C., & Villalba, R. 2004, *Ecología en Bolivia*, **39** (1), 5
- Chepstow-Lusty, A., Bush, M. B., Frogley, M. R., Baker, P. A., Fritz, S. C., & Aronson, J. 2005, *Quaternary Research*, **63**, 90
- González, J. A., Liberman-Cruz, M., Boero, C., Gallardo, M., & Prado, F. E. 2001, *Phyton*, **40**, 41
- IAI. 2012, Tree rings point to drought as the trigger of social conflict, Science Snapshots 11
- Kessler, M. 1995, *Candollea*, **50** (1), 131
- . 2006, Bosques de *Polylepis*. Botánica Económica de los Andes Centrales (UMSA, La Paz), 110–120
- Libermann-Cruz, M. 1986, *Documents Phytosociologiques, N.S.*, **10** (2)
- Moya, J. & Lara, M. 2011, *Bosque*, **32** (2), 165
- Navarro, G., Molina, J. A., & De la Barra, N. 2005, *Plant Ecology*, **176** (1), 113
- Palenque, E. R. 2003, *Revista Boliviana de Geociencias*, **3**, 43
- Serrudo, V. & Udaeta, K. 2013, Conservation Leadership Programme, Report 255311
- Stern, J. 2001, Queñoa, árbol de las alturas (Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi, Santiago de Chile)
- Vega-Krstulovic, C., Bermejo-Franco, J. C., Villegas-Alvarado, G., Quezada-Portugal, J., Aguilar-Llanos, M., & Conde-Velasco, E. 2007, *Ecología en Bolivia*, **42** (2), 102
- White, M. W. & Manning, K. V. 1954, Experimental College Physics - A Laboratory Manual (McGraw Hill, New York)