

Los bofedales como aliados en la resiliencia y mitigación del cambio climático



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Agencia Suiza para el desarrollo
y la cooperación SDC

Influencia del derretimiento glaciar y la composición florística sobre los patrones de escurrimiento subsuperficial en bofedales y pajonales de dos microcuencas

Informe de medio término

Horacio Lorini Rodriguez
2013

Foto: Horacio Lorini

Los bofedales como aliados en la resiliencia y mitigación del cambio climático

Tabla de contenido

1. Introducción	2
2. Antecedentes.....	4
3. Objetivo.....	5
4. Área de estudio.....	5
5. Métodos	7
5.1. Relevamientos florísticos.....	7
5.2. Caracterización del suelo o sustrato	8
5.3. Relaciones hídricas en bofedales	8
5.4. Relaciones hídricas en pajonales	9
5.5. Diseño experimental	11
6. Resultados y discusiones.....	13
6.1. Composición florística alrededor de piezómetros	13
6.2. Biomasa subterránea y forma de las raíces.....	15
6.3. Caracterización del suelo o sustrato	16
6.4. Relación entre la biomasa subterránea y las variaciones del nivel piezométrico	17
6.5. Fluctuaciones de nivel piezométrico en relación a variaciones en el caudal de los cursos principales de agua que atraviesan los bofedales.....	21
6.6. Esgurrimiento profundo en pajonales.....	22
7. Agradecimientos.....	23
8. Bibliografía.....	24

Los bofedales como aliados en la resiliencia y mitigación del cambio climático

Influencia del derretimiento glaciar y la composición florística sobre los patrones de escurrimiento subsuperficial en bofedales y pajonales de dos microcuencas**Horacio Lorini Rodríguez**

Informe de medio término

3r Producto de consultoría

1. Introducción

Los Andes son conocidos por su aridez, baja cobertura vegetal y severas restricciones climáticas, aspectos que llevan a interpretaciones erradas sobre su ecología (Körner 2003). Lo cierto es que la vida en los Andes se adaptó a las condiciones del medio, forzada por presiones ambientales que continúan moldeando el paisaje Altoandino.

Las fluctuaciones diarias de temperatura constituyen la variable más crítica de estrés ambiental para las plantas, y la frecuencia de heladas es una fuerza selectiva clave en la adaptación a los ambientes tropicales de altura (Cuesta *et al.* 2012). En el área del Parque Nacional Sajama la amplitud térmica diaria alcanza los 19,1°C (García 2012a). Las especies que viven en estos sitios también tienen que soportar un estrés adicional de ciclos de congelamiento y deshielo causados por los movimientos dinámicos del suelo, que actúan como un ambiente hostil para las raíces de las plantas (Smith & Young 1987, Luebert & Gajardo 2005, Cano *et al.* 2010), provocando así diferencias en la fisonomía de la vegetación a lo largo del gradiente altitudinal (Cuesta *et al.* 2012).

Generalmente sobre los 4.500 m de elevación se produce una combinación de mayor radiación, mayor exposición a vientos (desección) y mayor fluctuación térmica diaria (Cuesta *et al.* 2012), que en muchos casos incluye condiciones de congelamiento y descongelamiento en un mismo día (Sklénář 2000), generando alta presión selectiva y forzando el desarrollo de adaptaciones fisiológicas singulares en las plantas (Cuesta *et al.* 2012).

Los bofedales son unidades de vegetación con plantas adaptadas a drásticas condiciones climáticas y a la presencia casi constante de agua en el suelo. Los bofedales se forman en la naturaleza en zonas geoecológicas tales como las del macizo andino, ubicadas sobre los 4.000 m de altitud, en planicies que almacenan agua proveniente de las precipitaciones, deshielo de glaciares y principalmente alumbramientos superficiales de aguas subterráneas, por ello son ecosistemas frágiles que pueden ser fácilmente alterados si no se manejan sosteniblemente (Flores 2002). Los bofedales son un tipo de pradera nativa con vegetación siempre verde, suculenta, de elevado potencial forrajero y producción continua (Prieto *et al.* 2003), categorizados comúnmente como un tipo de humedal. Los humedales son áreas de transición entre ecosistemas terrestres y acuáticos, donde la napa freática aflora en la superficie o donde el agua se acumula sobre suelos de baja permeabilidad (Mitsch & Gosselink 1993, Carafa 2009, Soliz 2011). Los humedales se forman en depresiones y zonas con bajas pendientes topográficas, donde la velocidad de escurrimiento del agua es notoriamente menor a la que rige el escurrimiento superficial sobre las laderas (Cowardin *et al.*, 1979, RAMSAR 2002, Rasmussen 2003).

El calentamiento global configura nuevos escenarios climáticos y obliga a las especies a adaptarse a modificaciones en los regímenes de temperatura y precipitación. Estudios recientes desarrollados en el Parque Nacional Sajama muestran que durante los últimos 26 años se dio una expansión de la vegetación hacia áreas antiguamente despobladas a razón de 450 ha/año, observándose también un ascenso en altitud de vegetación que antiguamente estaba restringida a rangos altitudinales menores (García 2011a). Desplazamientos de especies en gradientes altitudinales también fueron reportados en otras montañas tropicales (Deutsch *et al.* 2008, Chen *et al.* 2011, Pauli *et al.* 2012) y comparaciones multitemporales para ciertos bofedales altoandinos del Parque Nacional Sajama sugieren que la composición florística también se ha modificado en los últimos 30 años, observándose en bofedales de altura la presencia de especies que antes se encontraban restringidas a rangos altitudinales menores (Liberman 1986, Lorini 2012). Tanto la expansión de cobertura como el recambio altitudinal en especies se ven influenciados por la temperatura y la evapotranspiración (García 2011a), variables que se prevé continuarán en ascenso producto del cambio climático.

Las tendencias de cambio observadas en el clima durante los últimos 60 años a partir de datos de temperatura atmosférica colectados a nivel del suelo para 277 estaciones, muestran patrones importantes de cambio para la temperatura entre los paralelos 1°N y 23°S y de 0 a 5.000 metros de elevación (Vuille & Bradley 2000, Vuille *et al.* 2003). A escala regional se registra una tendencia de incremento en la temperatura atmosférica de 0,11 °C por década para el período 1939 – 1998 y de 0,34 °C por década para el período 1974 – 1998. De manera similar, en el Altiplano boliviano se han observado, y se proyectan hasta el fin de siglo, incrementos en la frecuencia de olas de calor, en la temperatura diurna y nocturna, disminución de días con temperaturas menores a 0 °C, mayor frecuencia de precipitaciones extremas y mayor variación en el rango de temperaturas (Thibeault *et al.* 2010). A partir del análisis de tendencias para 50 estaciones climáticas distribuidas desde la ribera sur del Lago Titicaca hasta el límite sur del Lago Poopó, Soria (2013a) observó un incremento sostenido de la temperatura media anual entre el período 1970 – 2010. Esta tendencia también fue evidenciada por García (2012b) para el área del Parque Nacional Sajama.

Reportes recientes de los Andes peruanos muestran que las temperaturas máximas diarias entre octubre y mayo son superiores a los 0 °C aún a elevaciones de 5.680 m, valores que apoyan las tendencias reportadas por los modelos de circulación general (GCM) a nivel global (Bradley *et al.* 2006). Dichos cambios en temperatura son suficientes para causar alteraciones significativas en procesos ecosistémicos, en los rangos de distribución de especies nativas, en la composición de las comunidades y en la disponibilidad de agua (Buytaert *et al.* 2011).

Paralelamente, el retroceso de los glaciares andinos producido por efecto del calentamiento global (Ramírez *et al.* 2001, Ramírez 2008, Ramírez & Machaca 2011, Buitrón & Fernández 2012) constituye un agravante para la oferta futura de agua en los cauces principales de las cuencas andinas y el balance hídrico general. Más del 80% del agua fresca de las regiones áridas y semiáridas de los trópicos se origina en las regiones montañosas (Messerli 2001), siendo los glaciares la principal fuente de agua superficial en época seca (Vuille *et al.* 2008), gracias a su capacidad de liberación lenta de agua acumulada en la época de lluvias.

Por otro lado, los registros de precipitación en los Andes Tropicales para el período 1950–1994 con información de 42 estaciones meteorológicas, no evidencian patrones regionales claros (Vuille *et al.* 2003) y en tal sentido, las proyecciones de cambio en la precipitación son mucho más erráticas e inciertas entre los modelos de circulación general (Cuesta *et al.* 2012). Esto se corresponde con lo manifestado por Soria (2013a) a partir del análisis de tendencias para 50 estaciones del Altiplano boliviano, mismas que para el periodo de 1970 al 2010 no muestran tendencia en un solo sentido, es decir, negativa o positiva, sino que a través del tiempo se muestran periodos de incremento intercalados con otros de decremento y periodos invariables.

2. Antecedentes

Las primeras investigaciones en bofedales se concentraron en establecer su productividad en relación a la composición florística que presentaban (Alzérreca & Cardozo 1991, Castellaro *et al.* 1986, Villagran & Castro 1997, Villaroel 1997), así como en su capacidad de carga animal (Troncoso 1982, Sotomayor 1990). Ingresando al presente siglo, investigaciones en esta temática se extendieron para un área importante del territorio boliviano, destacando los estudios del equipo liderado por Humberto Alzérreca, cuyo aporte permitió la caracterización de los diferentes tipos de bofedales presentes en el sistema Titicaca-Desaguadero-Poopo-Salar (TDPS) y la elaboración de un primer mapa de distribución de bofedales (Alzérreca 2001, Prieto *et al.* 2003).

En los últimos años se han incrementado los estudios e investigaciones relacionados a bofedales pues sus funciones y valor están siendo reconocidos (Buttolph & Coppock 2004, Cadima & López 2009, Coronel 2009, Solíz 2011, Lorini 2012), así como las evidencias que dan cuenta de su alarmante disminución (Flores 2002, Castro 2011, Buitrón & Fernández 2012). En tal sentido se pueden citar estudios que muestran patrones de reducción de bofedales de Bolivia, como el de Flores (2002), quien analizó cuatro escenas satelitales de una porción de la cordillera occidental boliviana y parte del altiplano, encontrando que entre 1990 y el 2001, el área de bofedales había disminuido en 12,1% para una escena del área de estudio, mientras que en las otras escenas se encontraron reducciones del 4,7% (entre 1990 y 1998); del 15% (entre 1990 y 1995); y del 12% (entre 1987 y 1998); por su parte, Carafa (2009) a través de un análisis multitemporal de imágenes en el bofedal del nevado Illimani, determinó superficies de 81,9 ha en 1994, de 64,2 ha en 1999, de 43,8 ha en el 2005 y de 107,6 ha para el 2009; finalmente, Lorini (2012) estableció una reducción en superficie del 28,8% para el período 1986 – 2009 en el área del Parque Nacional Sajama y su área de influencia.

Tanto los bofedales, como los bosques de queñua, pajonales y otra vegetación altoandina, forman parte del ciclo hidrológico en tierras altas, y aunque algunos autores resaltan la importancia ecológica de estos ecosistemas en la regulación climática e hídrica (Körner 2003, Fjeldsa & Kessler 2004), aún faltan estudios que establezcan su contribución relativa al balance hídrico general. En el área de recarga hídrica del arroyo Sururúa en el Parque Nacional Sajama, Lorini (2012) estableció que el bofedal de Aychuta se comporta como una esponja verde, acumulando agua superficial por encima del nivel freático a razón de 18.341 m³/ha/año, mientras que los pajonales de *Festuca orthophylla* desarrollaron adaptaciones para lograr extraer la mayor cantidad de agua posible del suelo para sobrellevar el estrés hídrico que deviene en época seca, identificándose que la paja brava empleaba el 76,4% del agua que infiltra en el suelo. Las investigaciones desarrolladas en el área de recarga del arroyo Sururúa (Lorini 2012) sugieren que los bofedales podrían reemplazar parcialmente los servicios de regulación hídrica que proporcionan los glaciares, sin embargo, para confirmar este patrón es necesario profundizar las investigaciones aislando el efecto del derretimiento glaciar. Es en tal sentido, que se identificó la necesidad de replicar las investigaciones en áreas de recarga hídrica de valles que carezcan de glaciares. Si los patrones de conservación del nivel de agua en bofedales de un bofedal sin influencia glaciar fueran similares a los observados en Aychuta, se generarían datos robustos como para sugerir la conformación de “represas verdes” en otras áreas de recarga hídrica.

Para profundizar estas investigaciones, el equipo de Agua Sustentable gestionó fondos adicionales a través de la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE), financiamiento que se concretó en el mes de mayo del 2012, efectuándose el primer desembolso en fecha 17 de julio de ese año.

Tomando en cuenta que más de 17.000 personas dependen económicamente de los bofedales y que éstos ocupan entre el 0,27% y 1,10% de superficie en el altiplano y altoandino boliviano (Flores 2002, Prieto *et al.* 2003), resulta prioritario el monitoreo de su estado de conservación a través del tiempo y la caracterización de sus funciones ecológicas para promover su conservación.

3. Objetivo

Identificar la influencia del derretimiento glacial y composición florística sobre los patrones de escurrimiento subsuperficial en bofedales y pajonales de dos microcuencas localizadas en el Parque Nacional Sajama y su área de influencia.

4. Área de estudio

El Parque Nacional Sajama (PNS) se encuentra entre los 17°55' y 18°15' de latitud sur y 68°40' – 69°10' de longitud oeste, cubriendo un rango altitudinal de 4.250 a 6.542 m, dentro de la ecoregión de puna seca. Presenta siete meses del año secos, temperaturas mínimas medias bajo cero a lo largo de todo el año, así como todos los meses con heladas nocturnas (Lieberman 1986, García 2012a). Estos factores, así como la amplitud térmica diaria (19,1°C) limitan el desarrollo de la agricultura en la zona, por lo que la principal actividad económica radica en el pastoreo (Lieberman 1986, García 2012a).

El Parque Nacional Sajama presenta alta presión de pastoreo, principalmente de llamas, cuya población se estima entre 39.000 y 45.000 individuos; alpacas, con 29.000 – 33.000 cabezas; y ovejas con 8.000 – 11.000; pero también por vicuñas, cuyo número poblacional asciende a 3.302 individuos gracias a los esfuerzos de conservación impulsados por el área protegida (Alzérreca 2001, CITES 2001, Espinoza 2001, MMAYA 2010).

La época de crecimiento vegetal se halla determinada por la precipitación y se extiende desde el mes de diciembre a marzo (Patty *et al.* 2010). Los valores promedio de precipitación anual ascienden a 347 mm (Lieberman 1986), aunque en años bajo oscilación climática producida por los efectos de “El Niño”, la misma puede descender a 279 mm (Patty *et al.* 2010). Los suelos son arenosos y de origen volcánico (López *et al.* 2007).

El presente estudio se desarrolla en el valle glaciar del río Sururúa (Municipio de Curahuara de Carangas) y en el valle sin influencia glaciar del río Jaruma (Municipio de Turco).

Sururúa es una microcuenca que nace en las coordenadas 18°7'59.2"S y 68°52'27.4"O, al sur del nevado Sajama. La microcuenca se inicia en un valle denominado localmente Aychuta, donde se observan acumulaciones de material volcánico que sufrieron los efectos de las glaciaciones pleistocénicas, con morrenas laterales en sus laderas, presencia de rodales abiertos de *Polylepis tarapacana* (queñua) y pajonales dominados por *Festuca orthophylla* (paja brava). En el fondo del valle se presentan bofedales que reciben aporte de humedad durante todo el año (Lieberman 1986). Sondeos geoeléctricos desarrollados por Villegas (2012), determinaron que el bofedal de Aychuta alcanza entre 5 y 37 metros de profundidad. Palabral (2013) por su parte, estimó una profundidad mínima del bofedal de 0,81 m empleando varillas metálicas¹. La zona de Aychuta fue identificada como el área de recarga de la microcuenca del río Sururúa (Fig 1a).

Desde la zona de Aychuta, el río Sururúa desciende por el valle glaciar a través de un cauce definido hasta las coordenadas 18°10'28" S y 68°53'24" O, punto en el que parte de su caudal se desvía a través de un canal de origen antrópico, habilitado para irrigar un pequeño bofedal en el punto donde el valle se abre a la estepa. Algunos kilómetros abajo, el río vuelve a bifurcarse (18°11'27" S – 68°53'54" O) para alimentar dos zonas importantes de bofedales de llanura en la localidad de Lagunas. Al finalizar el curso del brazo occidental del río Sururúa se seleccionó un bofedal permanentemente húmedo con elevada carga animal para el estudio (Fig. 1b).

¹ Método que no fue adecuado para estimar profundidades máximas por el largo limitado del equipamiento (6,12 m)

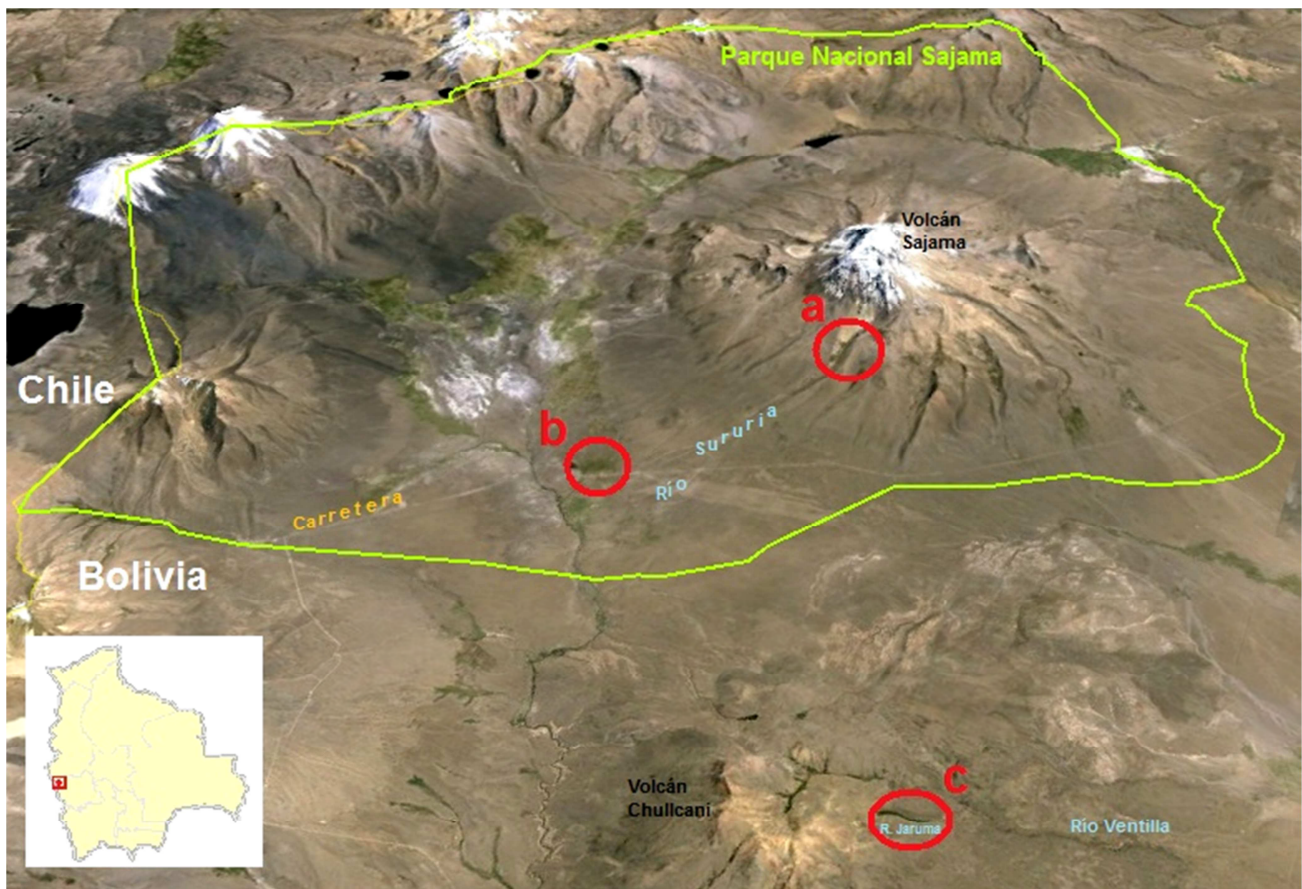


Fig. 1: Ubicación de las áreas de estudio en el Parque Nacional Sajama: a) Aychuta, área de recarga del río Sururí; b) Bofedal permanentemente húmedo de la localidad de Lagunas, contiguo a la carretera internacional; c) Bofedal de Aynacha Pacoco

La microcuenca del río Jaruma se encuentra al sur del nevado Sajama sobre la vertiente oriental del volcán Chullcani (**Fig 1c**). El bofedal seleccionado en este valle se denomina Aynacha Pacoco y se encuentra rodeado de los picos Carhun Khollo, Wila Khollo, Koya Khuchu y Sanco Chanka, nombres locales que se asignan a diferentes formaciones del volcán Chullcani. Este segundo valle presenta estructura y unidades vegetales similares a las de Aychuta, así como alta similitud vegetal en la composición florística de los bofedales que se desarrollan en el área de recarga de ambos valles.

Palabral (2013) determinó que los bofedales de Aynacha Pacoco y Aychuta alcanzan una similitud del 99,7%. Por otro lado, los bofedales altoandinos muestran poca similitud con el bofedal de Lagunas, en el orden del 28,9% respecto a Aynacha Pacoco y de 34,2% respecto a Aychuta. A través de curvas de abundancia dominancia (**Fig. 2**) se puede apreciar que tanto el bofedal de Aynacha Pacoco como el de Aychuta presentan alta dominancia de *Oxychloe andina* (ork'ó paco), y aunque esta especie también domina en el bofedal de Lagunas, su frecuencia es cuatro veces menor que en los bofedales de altura, así el bofedal de llanura muestra mayor riqueza y equitatividad de especies.

reconocidas en campo fueron colectadas, prensadas y secadas, para su identificación posterior según claves dicotómicas y comparación con muestras del Herbario Nacional de Bolivia, este proceso contó con el apoyo de Rosa Isela Meneses (especialista en bofedales del HNB) y de Ariel Lliully.

El relevamiento florístico en bofedales se concentró alrededor de los piezómetros instalados en la red de monitoreo de cada microcuenca, empleando una modificación del sistema fitosociológico de Braun-Blanquet (Matteucci & Colma 1982) aplicado a un área de 1 m². Este método permite estimar la dominancia de especies por medio de la cobertura aérea en porcentaje (Mostacedo & Fredericksen 2000).

5.2. Caracterización del suelo o sustrato

Complementando el análisis de cobertura aérea, se caracterizó la biomasa subterránea de las especies dominantes, a partir de la obtención de muestras de sustrato en los bofedales de Aynacha Pacoco y Lagunas. Este trabajo fue posible gracias a que los relevamientos florísticos desarrollados por Palabral coincidieron con el proceso de instalación de la red piezométrica en Aynacha Pacoco, por lo que el origen de las muestras de suelo se originaron durante la apertura de pozos para los piezómetros. De esta manera, fue posible caracterizar la biomasa subterránea en rangos de 20 cm, hasta una profundidad de 180 cm. En el caso de Lagunas no fue necesaria una prospección profunda de tal magnitud, pues la mayor proporción de especies en este bofedal no superaron los 20 cm de profundidad.

Se emplearon dos modelos de augers para la apertura de pozos en bofedales, ambos de dos pulgadas de diámetro en el extremo de perforación. Palpando las muestras de suelo se determinó el porcentaje de materia orgánica, arcilla, limo, arena y clastos en cada segmento de suelo.

En el rango de alturas de 0 – 20 cm y en el rango de 140 – 160 cm, se obtuvieron muestras estándar de suelo empleando un cilindro de volumen conocido, para establecer la densidad aparente del suelo y porosidad. A partir de estas muestras también se pudo estimar el contenido de humedad en el suelo. La metodología empleada corresponde a Llambi y colaboradores (2012), pudiéndose encontrar mayor detalle de las fórmulas empleadas en Palabral (2013).

5.3. Relaciones hídricas en bofedales

El nivel piezométrico o freático es la profundidad a la que se encuentra el nivel de agua en un pozo. Es de interés establecer las variaciones del nivel piezométrico en bofedales a lo largo de un ciclo hidrológico, comparándolas con las variaciones que se pudieran registrar en áreas contiguas de suelo desnudo. Una disminución gradual del nivel piezométrico en bofedales después de la época de lluvias, contrastada con disminuciones abruptas en áreas de suelo desnudo (áreas control) podrían resaltar el carácter de “esponja” de los bofedales, por ello se instalaron nueve piezómetros en diferentes puntos de cada bofedal y cuatro piezómetros en suelo sin vegetación, adyacentes a cuatro piezómetros de cada bofedal (Fig. 3).

Cada piezómetro fue elaborado por el equipo de Agua Sustentable en tubos PVC de dos pulgadas esquema 40, ranurados cada 5 cm a través de cortes transversales que se extendieron desde la base hasta el punto en el que el piezómetro alcanzó la superficie del suelo, evitando de esta manera, que el agua de escorrentía pudiera penetrar al mismo. Una sección de 20 cm (no ranurada) sobresalió por encima de la superficie del suelo al momento de la instalación de cada piezómetro. Cada unidad fue protegida con tela de serigrafía en la porción subterránea para evitar el ingreso de sedimentos y con una tapa en la porción superior para impedir el ingreso de la precipitación. Los primeros piezómetros instalados a través del proyecto “Adaptación al cambio climático

en comunidades andinas boliviana que dependen de glaciares”² fueron revestidos con malla milimétrica y media nylon como empaque filtrante, pero este diseño resultó inadecuado para evitar la entrada de sedimento a los piezómetros, por lo que se fabricó un auger de diámetro reducido para efectuar la limpieza de piezómetros que llegaron a llenarse con sedimento. A través del monitoreo mensual de la sedimentación dentro de los piezómetros, se pudo tomar la previsión de adelantar la limpieza de éstos equipos antes de que llegaran a colmatarse.

Estos “piezómetros caseros” fueron instalados en bofedales entre octubre y noviembre del 2011 en la zona de Aychuta, en junio del 2012 en el bofedal de Lagunas y febrero del 2013 en el bofedal de Aynacha Pacoco. La instalación de piezómetros en áreas contiguas a los bofedales tomó más tiempo, pues la presencia de clastos (principalmente en las cabeceras de cada microcuenca) demandó mayor esfuerzo y creatividad. En el área control de Aychuta las unidades de monitoreo piezométrico se instalaron entre julio del 2012 y enero del 2013; en el área control de Lagunas se instalaron en el mes de marzo del 2013; y en el área control de Aynacha Pacoco en el mes de febrero del 2013.

El registro de nivel piezométrico (freático) se efectuó en una fecha fija (último o primer día de cada mes) con ayuda de una cinta métrica de dos metros que permitiera cubrir el largo total de cada unidad (Fig. 4). En uno de los piezómetros de Aychuta y tres piezómetros de Aynacha Pacoco se instalaron sensores de presión que permitieron registrar las variaciones del nivel piezométrico de manera continua (cada 10 minutos).

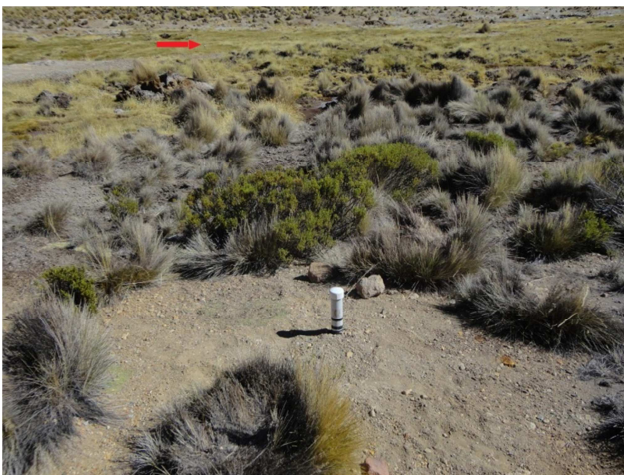


Fig. 3: Piezómetros instalados en área control (primer plano) y bofedal (localización indicada con flecha) de Aychuta.



Fig. 4: Medición del nivel freático en piezómetro casero, empleando cinta métrica.

5.4. Relaciones hídricas en pajonales

Estableciendo la misma predicción que se describió para el caso de los bofedales, en la unidad de vegetación de pajonales se instaló equipamiento para el registro del volumen de agua de escurrimiento profundo que pudiera percolar áreas de suelo desnudo y áreas con cobertura de *Festuca orthophylla*.

Tratándose de una experiencia inédita para Bolivia la **determinación del escurrimiento profundo**, se contactó a diferentes especialistas para validar el método de registro, recogiendo aportes valiosos del Dr. Christian Körner para definir el mismo. Se estableció que el equipamiento adecuado para el registro de escurrimiento profundo serían lisímetros elaborados a partir de turriles de 200 litros. A partir de un diseño de Genid y

² Antecedente al presente estudio, ejecutado por Agua Sustentable con financiamiento de Nordic Climate Facility.

colaboradores (1982) y consultas posteriores en Internet, se desarrolló un diseño propio de este equipamiento en material inoxidable, cuyo prototipo fue descrito en Lorini (2012b) e implementado en el mes de octubre del 2011 en la zona de Aychuta. Al constatar la operatividad del lisímetro instalado, en el mes de diciembre del 2011 se instalaron dos lisímetros más con vegetación, así como un cuarto lisímetro en suelo desnudo en el mes de febrero del 2012 y un quinto lisímetro con paja brava en agosto del 2012.

Cada lisímetro registra el volumen de agua que secuestran 0,25 m² de suelo con presencia o ausencia de vegetación. Para los lisímetros que cuentan con *Festuca orthophylla* se tuvo el cuidado de incorporar fragmentos monolíticos de suelo en cada unidad, es decir, columnas de suelo que conservaran su estructura y vegetación intacta (Fig. 5 y Fig. 6). Esta tarea resultó compleja y en la práctica se registraron resquebrajamientos y pequeñas pérdidas de estructura, daños menores que se piensa no alteran significativamente la físico-química del suelo y los datos de escurrimiento.



Fig. 5: Formación de pieza monolítica de suelo en proceso de construcción de lisímetro con vegetación.



Fig. 6: Registro de agua de escurrimiento profundo del área de almacenamiento de lisímetro con vegetación.

Los meses posteriores a la instalación de cada lisímetro se registró el volumen de agua recolectado por cada uno en una fecha fija (último día de cada mes) con ayuda de una probeta graduada de 100 ml y un vaso de precipitados de 500 ml. De esta manera, se totalizó el volumen de escurrimiento profundo para un mes, valores que se relacionaron con las mediciones de precipitación registrados en cada microcuenca (Fig. 7 y Fig. 8).



Fig. 7: Estación climática HOBO instalada por Agua Sustentable en la microcuenca del Jaruma



Fig. 8: Estación climática HOBO instalada por Agua Sustentable la microcuenca del Sururía

En pajonales también se instaló equipamiento para la **estimación de la escorrentía superficial**, delimitando 1 m² de superficie con planchas clavadas en el suelo en forma de caja, formando una parcela que permitió el direccionamiento del agua a un solo punto de captura. Este punto de salida se conecta con un envase que recibe el agua de escorrentía que atraviesa la parcela (**Fig. 9**).

Este equipamiento fue sugerido por José Lorini (com. pers. 2011) con base en un diseño que desarrolló y probó el año 1981 en el área del Parque Nacional Sajama. Al igual que en el caso de los lisímetros, se desarrolló un modelo propio, cuyo prototipo se instaló en pajonal de la zona de Aychuta en el mes de noviembre del 2011.



Fig. 9: Parcela para registro de escorrentía (superficial) con 20% de cobertura vegetal. Prototipo instalado en la zona de Aychuta, en el que se observa el punto de recolección de agua capturada.

5.5. Diseño experimental

A partir de las investigaciones desarrolladas por Lorini (2012) en los bofedales de altura y llanura presentes en la microcuenca del Sururia, se identificaron dos factores que podrían incidir en los patrones de conservación del nivel freático al interior de los bofedales:

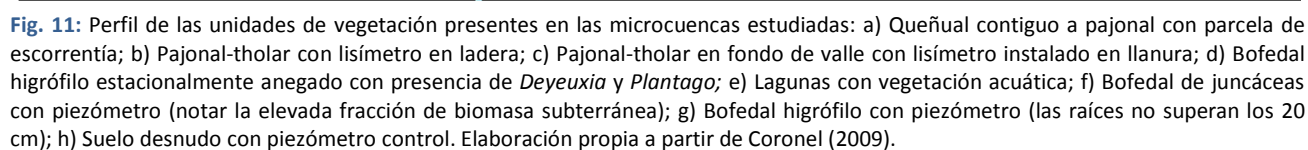
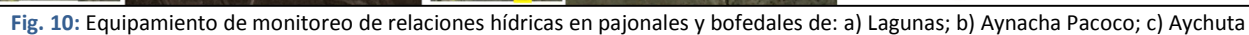
1. El derretimiento glaciar en época de estiaje como fuente de ingreso de agua al bofedal
2. Fracción de biomasa subterránea en el suelo, a mayor biomasa mayor capacidad de retención de agua

Para aislar la influencia del primer factor se implementó una red de monitoreo piezométrico en un valle sin influencia glaciar (Aynacha Pacoco) similar a la implementada en el área de Aychuta. La fluctuación de nivel piezométrico en ambos bofedales constituiría la variable de respuesta, esperándose hidrogramas diferentes en la fluctuación del nivel freático para ambas áreas si el derretimiento glaciar determinara la conservación de nivel en época de estiaje.

Para sustentar estas apreciaciones se definió con el equipo de monitoreo hidrológico del proyecto (Soria com. pers 2012) puntos de monitoreo de caudales al ingreso de cada bofedal en las áreas de recarga. El hidrograma de caudales al ingreso de cada bofedal debería corresponderse con el de fluctuación de nivel piezométrico si éste segundo dependiera del aporte glaciar. Puntos adicionales de monitoreo de caudales a la salida de cada bofedal, permitirán comprender los patrones de escurrimiento subsuperficial a través de ambos bofedales.

Para identificar la influencia del porcentaje de biomasa subterránea, se instalaron nueve piezómetros en cada bofedal distribuidos aleatoriamente, así como cuatro piezómetros control que se instalaron en áreas contiguas bajo criterios subjetivos³. Bajo este diseño, los piezómetros eventualmente se situaron en áreas del bofedal con diferente composición florística.

³ Velando porque se localicen cerca de un piezómetro en bofedal, en suelo desnudo y a una altitud similar en relación al piezómetro de bofedal más cercano.



6. Resultados y discusiones

6.1. Composición florística alrededor de piezómetros

Se realizaron nueve relevamientos en el bofedal de Lagunas, ocho en Aynacha Pacoco y 11 en el bofedal de Aychuta, todos alrededor de los piezómetros instalados (Palabral 2013). El número de especies registradas en Lagunas asciende a 29 plantas vasculares, 19 en el bofedal de Aychuta y 17 en el de Aynacha Pacoco (**Tabla 1**). Adicionalmente se encontró la presencia de musgos en los bofedales de Lagunas y Aychuta, que no llegaron a determinarse taxonómicamente. Los resultados obtenidos por Palabral (2013) son similares a los que obtuvo Sandoval (2012) empleando un método diferente de muestreo (líneas de intercepción) para los bofedales de Lagunas y Aychuta: de 33 y 21 especies respectivamente. Un análisis más fino analizando la composición de especies, permite identificar que a través de las líneas de intercepción se registraron nueve especies que no se encontraron a través del método fitosociológico (parcelas) en Aychuta; y 17 especies para el caso de Lagunas. Sin embargo, se debe notar también que a través del método fitosociológico en Aychuta se registraron ocho especies que no se encontraron a través de las líneas de intercepción, y que para el caso de Lagunas se encontraron 14 especies en las parcelas que no se registraron a lo largo de las líneas de intercepción. Estos resultados muestran la alta heterogeneidad de los bofedales y la necesidad de un muestreo adecuado si el objetivo es establecer valores de biodiversidad presentes en los mismos. Para los fines de este estudio, basta reconocer que la distribución espacial de los piezómetros brindan una adecuada representación de la heterogeneidad florística presente en cada bofedal, y por ello una adecuada caracterización de las relaciones hídricas que ocurren en su interior.

La información de composición florística alrededor de cada piezómetro será empleada adelante para relacionar las fluctuaciones de nivel piezométrico con atributos de la biomasa subterránea. La composición de especies en la superficie refleja un arreglo espacial de la biomasa por debajo del suelo, mismo que podría incidir de una u otra forma en la interacción de la vegetación con el agua y los patrones de escurrimiento subsuperficial, por ello en la **Fig. 12** se representan a las juncáceas *Distichia muscoides* y *Oxychloe andina* en diferente color (verdes) respecto a las especies de raíces más cortas.

El bofedal de Lagunas muestra mayor equitatividad respecto a los bofedales altoandinos, en los cuales se presenta una marcada dominancia de *Oxychloe andina* (ork'ó paco). La dominancia de *O. andina* en Aynacha Pacoco es del 79,6%, mientras en Aychuta se eleva a 89,3%. *O. andina* también es la especie dominante en Lagunas, pero en este caso solo cubre el 21,4% del área circundante a los piezómetros, compartiendo los valores de dominancia con *Deyeuxia spicigera* (14,2%), *Plantago tubulosa* (10,6%), *Lachemilla diplophylla* (10,1%) y *Deyeuxia vicunarum* (8,9%).

En campo se observó que cuando existe una alta dominancia de *Oxychloe andina* en el bofedal, son pocas las especies que pueden crecer en medio de los cojines que conforma. Solamente especies pequeñas como *Arenaria*, *Gentiana sedifolia* o musgos, prosperan sin mayores inconvenientes, así como las gramíneas. Esto puede deberse a la morfología que tiene *Oxychloe andina*, con hojas largas, puntiagudas y lignificadas que llegan incluso a penetrar o cubrir los cojines de *Distichia* (Ruthsatz 2012) y que dificultarían la presencia de otras especies en el cojín (Palabral 2013).

Jasivia Gonzáles (CAE 2001) sugiere que la presencia de *Festuca orthophylla* y *Deyeuxia curvula* en bofedales es una evidencia de procesos de colonización que se dan en bofedales disturbados, pero este fenómeno también podría caracterizar un proceso sucesional inverso, es decir, evidenciar que los bofedales se puedan estar

extendiendo hacia áreas ocupadas previamente por otras unidades de vegetación. Esto puede ser particularmente cierto para el bofedal de Lagunas, pues se observó canales de riego y un sistema de manejo de caudales que promueven la expansión del bofedal a las áreas contiguas.

Tabla 1: Frecuencia de especies vegetales encontradas en los bofedales de Aynacha Pacoco, Aychuta y Lagunas

Especies	Aynacha Pacoco	Aychuta	Lagunas
<i>Arenaria</i> sp.	0,06%	0,01%	0,15%
<i>Carex</i> cf. <i>maritima</i>	0,19%	0,22%	3,54%
<i>Cuatrecasasiella argentina</i>		0,03%	0,06%
<i>Deyeuxia eminens</i>		0,02%	
<i>Deyeuxia heterophylla</i>			2,25%
<i>Deyeuxia spicigera</i>	3,56%	0,62%	14,17%
<i>Deyeuxia vicunarum</i>			8,89%
<i>Distichia muscoides</i>	6,24%	8,57%	5,96%
<i>Eleocharis</i>		0,01%	1,46%
<i>Eleocharis albibracteata</i>			0,09%
<i>Eleocharis tucumanensis</i>		0,02%	0,01%
<i>Festuca orthophylla</i>			
<i>Festuca rigescens</i>	1,79%		
<i>Gentiana sedifolia</i>	0,02%	0,09%	0,06%
<i>Hypochaeris taraxacoides</i>			4,61%
Indeterminada 1		0,08%	
Indeterminada 2			0,67%
<i>Juncus stipulatus</i>	0,12%		0,25%
<i>Lachemilla diplophylla</i>			10,12%
<i>Lachemilla pinnata</i>			4,61%
<i>Lilaeopsis macloviana</i>			0,62%
<i>Lobelia olygophylla</i>	0,19%	0,07%	1,87%
Musgo		0,22%	0,56%
<i>Myosmodes paludosa</i>	0,25%		0,15%
<i>Oritrophium limnophilum</i>			0,73%
<i>Oxychloe andina</i>	79,62%	89,25%	21,37%
<i>Phylloscirpus boliviensis</i>	5,12%		0,39%
<i>Phylloscirpus deserticola</i>	0,87%	0,11%	4,18%
<i>Plantago tubulosa</i>	0,62%		10,57%
<i>Poa gymnantha</i>	0,06%		0,15%
<i>Werneria apiculata</i>		0,02%	0,62%
<i>Werneria heteroloba</i>	0,66%	0,42%	0,06%
<i>Werneria pygmaea</i>	0,16%	0,02%	1,35%
<i>Werneria spathulata</i>	0,45%	0,13%	0,47%
<i>Zameioscirpus</i> cf. <i>atacamensis</i>		0,02%	
<i>Zameioscirpus muticus</i>		0,03%	
Riqueza	17	20	30

Nota: Se resaltan en negrilla las especies dominantes encontradas en cada bofedal

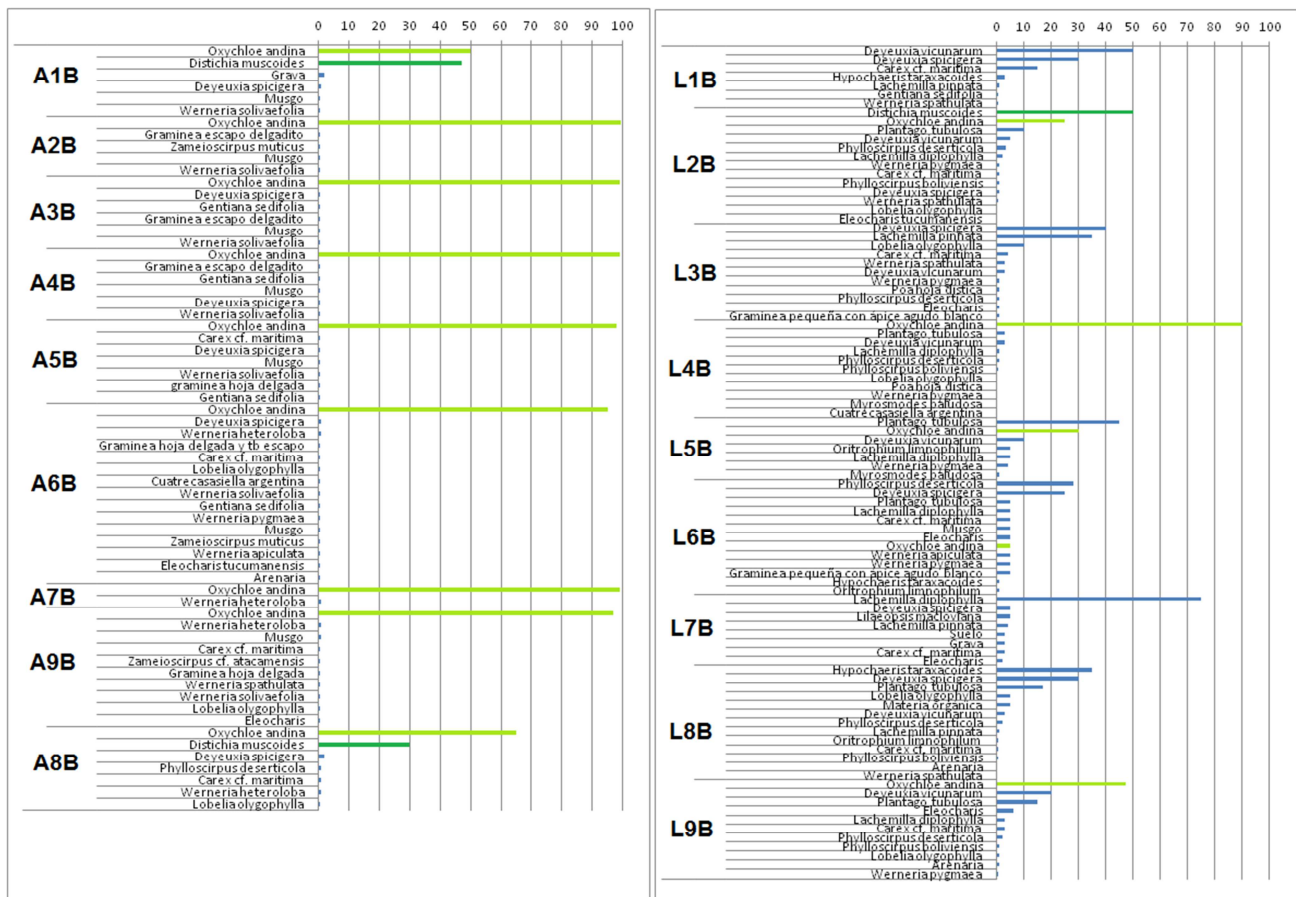


Fig. 12: Curvas de abundancia-dominancia reflejando la riqueza y abundancia de especies encontradas alrededor de los piezómetros de Aychuta y Lagunas. Los pacos (*Distichia muscoides* y *Oxychloe andina*) se resaltan en tonos verdes.

6.2. Biomasa subterránea y forma de las raíces

Las estimaciones de biomasa subterránea y forma de raíces se concentraron en los bofedales de Lagunas y Aynacha Pacoco, pues las muestras de Aychuta presentaron elevado nivel de deterioro. Sin embargo, se asume que las muestras de Aynacha Pacoco son representativas para ambos bofedales altoandinos. La **Fig.13** muestra la forma de las raíces de las especies dominantes en los bofedales caracterizados donde especies que comparten dominancia junto a *O. andina* en el bofedal de Lagunas corresponden a plantas de raíces cortas, que difícilmente sobrepasan los 20 cm, mientras la especie dominante de los bofedales altoandinos supera la escala gráfica de la figura, de hecho, se encontraron raíces de *Oxychloe andina* a una profundidad de 180 cm, límite que se estableció para la apertura de pozos para los piezómetros (**Fig. 14**).

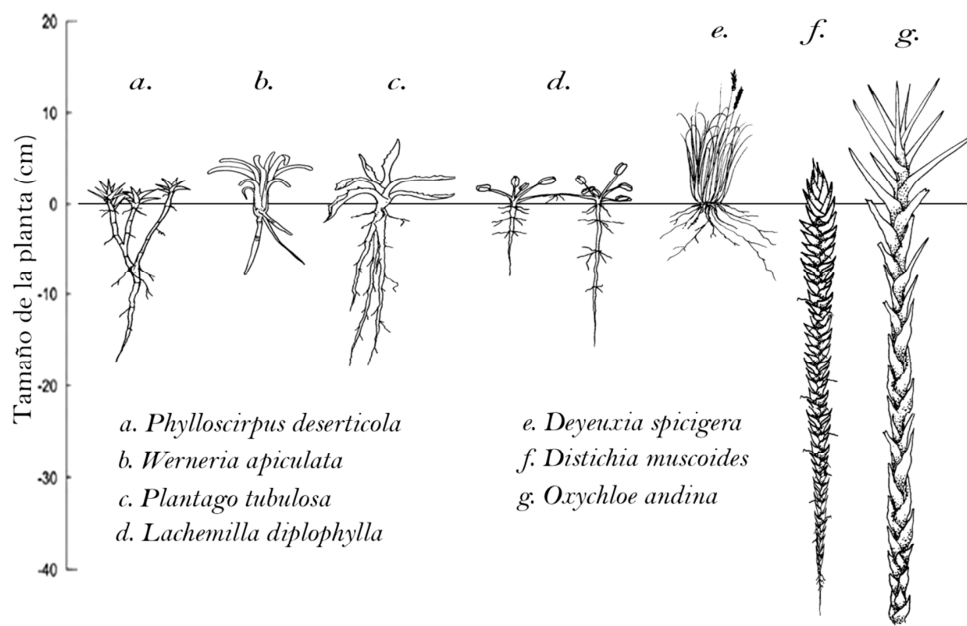


Fig. 13: Forma y profundidad que alcanzan las raíces de las especies dominantes en bofedal (Palabral 2013)

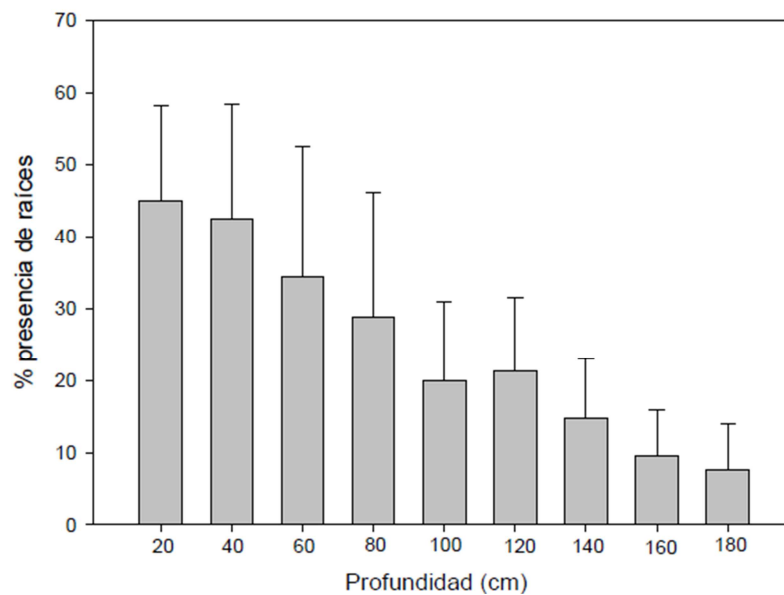


Fig. 14: Porcentaje de raíces de *Oxychloe andina* encontrado en segmentos de suelo obtenidos con intervalos de 20 cm (Palabral 2013)

6.3. Caracterización del suelo o sustrato

En general el suelo en los bofedales puede caracterizarse como una combinación de materia orgánica y sedimentos arenosos o arcillosos, relativamente húmedos, oscuros y con una gran capacidad de retención de agua (Palabral 2013). La **Fig. 15** esquematiza el contenido de materia orgánica en los rangos de 20 cm de suelo que se obtuvieron durante el proceso de apertura de pozos para los piezómetros.

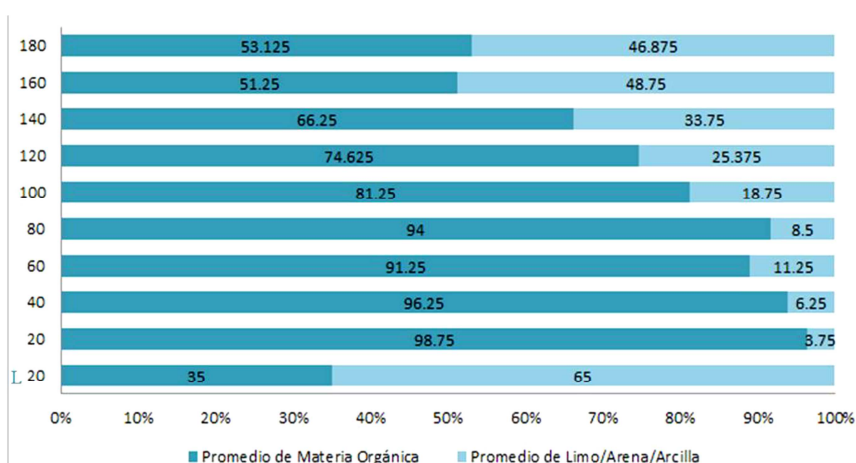


Fig. 15: Porcentaje de materia orgánica en segmentos de suelo obtenidos con intervalos de 20 cm en Lagunas (L) y Aynacha Pacoco

En relación a las muestras de suelo obtenidas en el rango de 140 – 160 cm de profundidad, se estableció que contenían entre 60% y 90% de agua entre sus espacios porosos, mismos que representan un valor de 75 a 95% de porosidad (Palabral 2013). Con esta información, se pudo establecer el contenido volumétrico de agua en el suelo, a partir de los datos de densidad aparente que se obtuvieron en el bofedal de Aynacha Pacoco (**Tabla 2**).

Tabla 2: Datos descriptivos del suelo a 140 cm de profundidad en el bofedal de Aynacha Pacoco. Densidad aparente (D_a), porosidad, contenido de humedad del suelo (Θ_m) y contenido volumétrico de agua del suelo (Θ_v)

Código de piezómetro	D_a (g/cm ³)	Porosidad (%)	Θ_m (%)	Θ_v (%)
P1B	0,49	81,6	152,2	70,8
P3B	0,17	93,7	515,9	85,8
P4B	0,12	95,4	800,5	97,4
P7B	0,66	75,3	113,3	73,1
P8B	0,38	85,8	238,4	88,2
P9B	0,45	83,1	182,5	77,1

Nota: Los códigos de los piezómetros expresan el bofedal donde se encuentran (primera letra, abreviación del nombre del bofedal, P: Aynacha Pacoco), número de piezómetro y ecosistema en el que se instalaron (B. para bofedal; C: área control)

6.4. Relación entre la biomasa subterránea y las variaciones del nivel piezométrico

Schenk & Jackson (2002) sistematizaron más de 1.300 registros de la bibliografía sobre sistemas radiculares en pastos perenes, hierbas, arbustos y árboles, destacando que en ecosistemas xéricos, el tamaño y la forma de las raíces son determinantes en la economía hídrica de las plantas. Lastimosamente no se encuentran estudios similares en la literatura para bofedales, y el estudio desarrollado a través de este componente constituye una experiencia inédita para establecer algunas relaciones entre los aspectos de forma radicular con patrones de conservación del agua a nivel sub-superficial. Palabral (2013) llegó a la conclusión que el elevado porcentaje de materia orgánica en suelos de bofedal aumenta la capacidad de retención hídrica en sus espacios porosos y parece tener una relación positiva con el nivel piezométrico. En esta sección se profundizan estos patrones empleando los hidrogramas de niveles piezométricos generados a la fecha.

Las secciones anteriores permiten identificar que el contenido de biomasa en el suelo está estrechamente relacionado con la presencia de las especies que se encuentran a nivel superficial. Las juncáceas *Oxychloe andina* y *Distichia muscoides*, juegan un papel preponderante en este sentido, pues su crecimiento indefinido desde la parte apical del tallo, promueve la acumulación de biomasa en los niveles inferiores a medida que la planta se proyecta hacia arriba. Es debido a esta característica que los bofedales dominados por juncáceas son en general más profundos⁴ que aquellos dominados por especies de raíces cortas (Villegas 2012, Palabral 2013). Partiendo de este criterio, se puede asumir que el contenido de biomasa en el suelo estará directamente relacionado con los valores de cobertura aérea que se establecieron a partir del muestreo en parcelas fitosociológicas. Las figuras siguientes (**Fig. 16** y **Fig. 17**) permiten relacionar gráficamente las variaciones de nivel piezométrico a lo largo del año, con los valores de abundancia-dominancia vegetal que se encuentran en la superficie de cada piezómetro. En las gráficas de abundancia-dominancia se resaltó en verde claro la presencia de *O. andina* y en verde oscuro la presencia de *D. muscoides*, las especies de raíces cortas (<20 cm) se representan en azul.

De manera general, se puede observar que los piezómetros ubicados en áreas dominadas por *Oxychloe andina* y *Distichia muscoides* muestran menores fluctuaciones en el nivel piezométrico respecto a las áreas dominadas por especies de raíces cortas. Una excepción se presenta en el piezómetro L8B, donde las fluctuaciones de nivel son incluso menores a las que se presentan en áreas dominadas por juncáceas. Esto sugiere que el tipo de vegetación determina la conservación del nivel freático en los bofedales, pero además existen otros factores (hidrogeológicos) que podrían influir en los patrones de conservación de nivel. En el afán de entender el comportamiento de las fluctuaciones piezométricas en L8B, así como en L2B y L4B, piezómetros que muestran hidrogramas diferentes a los esperados, desde el mes de noviembre del 2013 se empezó a monitorear la presencia de agua en canales de riego cercanos a estos puntos de monitoreo, identificándose una relación positiva entre la presencia de agua en estos y las variaciones de nivel en los piezómetros, información que sugiere la importancia del riego en los patrones de conservación del nivel freático. Estas observaciones preliminares serán corroboradas o descartadas a medida que se generen mayores datos en los meses posteriores. Una forma de corroborar los patrones gráficos que se presentan es a través de pruebas estadísticas de ordenación (i.e. análisis de correspondencia canónica), mismas que serán presentadas en informes posteriores a medida que la información de monitoreo se vaya completando para un ciclo hidrológico completo.

Los vacíos en la información piezométrica que muestran ciertos hidrogramas (L9B y L7B) se generaron a partir de problemas de sedimentación en el equipo instalado. El diseño de protección de los piezómetros empleando medias nylon no fue el más adecuado para controlar el ingreso de sedimento, y en ciertos meses se llegaron a colmar algunos piezómetros impidiendo el registro de nivel freático. Al presente este inconveniente fue solucionado a través de la construcción de un auger de limpieza, cuyo diámetro permite su ingreso al interior de los tubos PVC de los piezómetros instalados. Actualmente se efectúa la limpieza de sedimento periódicamente y es en tal sentido que se proyecta desarrollar análisis estadísticos posteriores.

Para la nueva red de monitoreo piezométrico instalada en el bofedal de Aynacha Pacoco, así como en las áreas control de Lagunas y Aychuta, se incorporaron las lecciones aprendidas para el diseño del nuevo equipamiento de monitoreo, protegiendo los piezómetros del sedimento a través de mallas para serigrafía, que demostraron ser durables y eficientes en el control de la sedimentación en el área de Aychuta.

⁴ El término correcto sería “más altos”

Fig. 16: Abundancia-dominancia de especies vegetales alrededor de piezómetros en relación a las variaciones de nivel freático para el período diciembre/2012 a noviembre/2013. Los valores para piezómetros de Lagunas se alinean a la izquierda, para el bofedal de Aychuta se alinean al medio y para Aynacha Pacoco a la derecha.

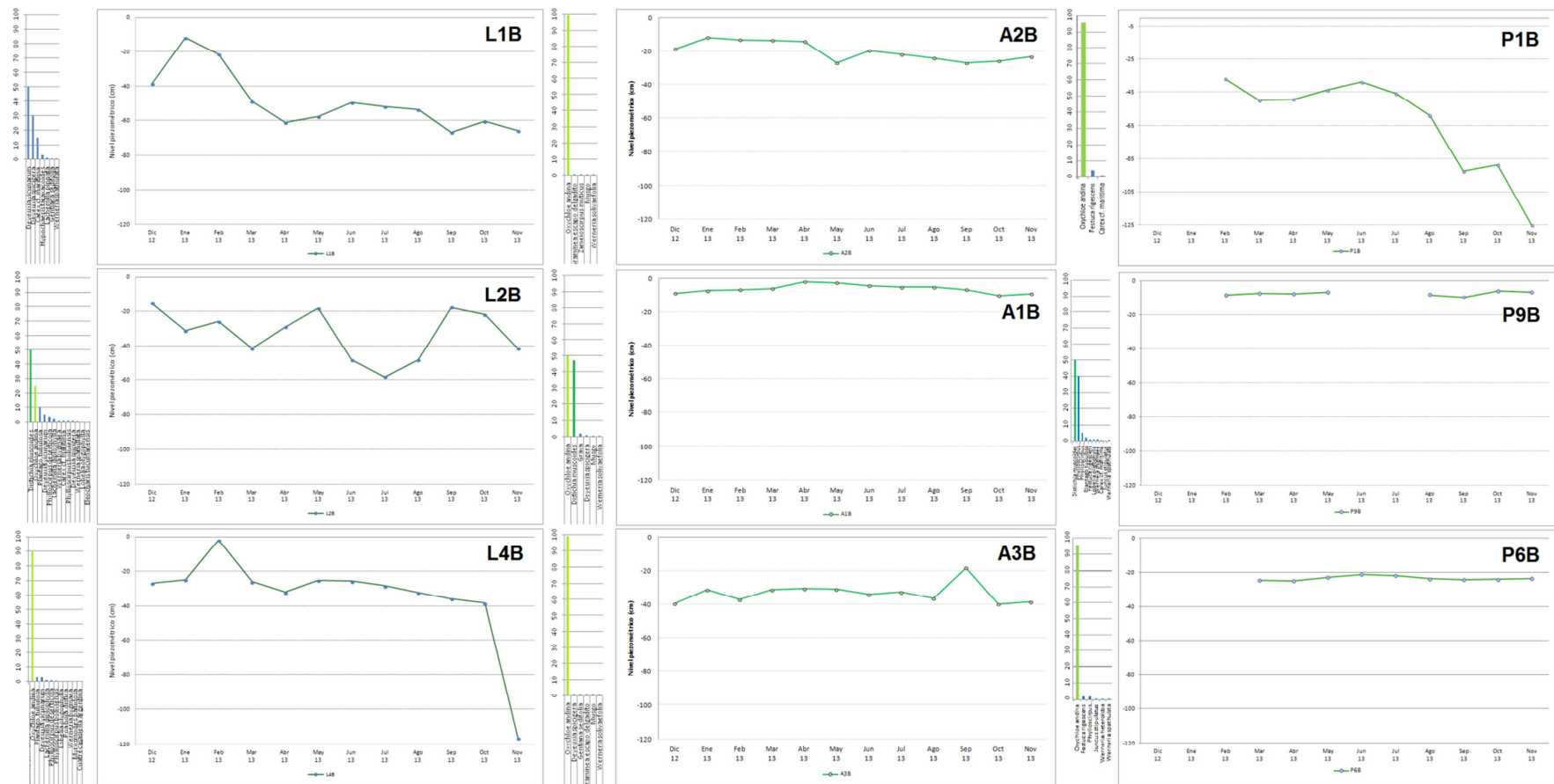


Figure 1 displays the evolution of neural parameters for different layers (L2B, L1B, L3B, L4B, L5B, L6B, L9B, L8B, L7B) over time (Dec 12 to Nov 13). Each plot includes a line graph of 'New parameters (nm)' and a bar chart of 'Parameters'.

- L2B:** Shows a general downward trend in new parameters, with a significant drop in November 13.
- L1B:** Shows a fluctuating trend, with a notable peak in January 13 and a sharp drop in November 13.
- L3B:** Shows a fluctuating trend, with a notable peak in January 13 and a sharp drop in November 13.
- L4B:** Shows a fluctuating trend, with a notable peak in January 13 and a sharp drop in November 13.
- L5B:** Shows a fluctuating trend, with a notable peak in January 13 and a sharp drop in November 13.
- L6B:** Shows a fluctuating trend, with a notable peak in January 13 and a sharp drop in November 13.
- L9B:** Shows a fluctuating trend, with a notable peak in January 13 and a sharp drop in November 13.
- L8B:** Shows a fluctuating trend, with a notable peak in January 13 and a sharp drop in November 13.
- L7B:** Shows a fluctuating trend, with a notable peak in January 13 and a sharp drop in November 13.

6.5. Fluctuaciones de nivel piezométrico en relación a variaciones en el caudal de los cursos principales de agua que atraviesan los bofedales

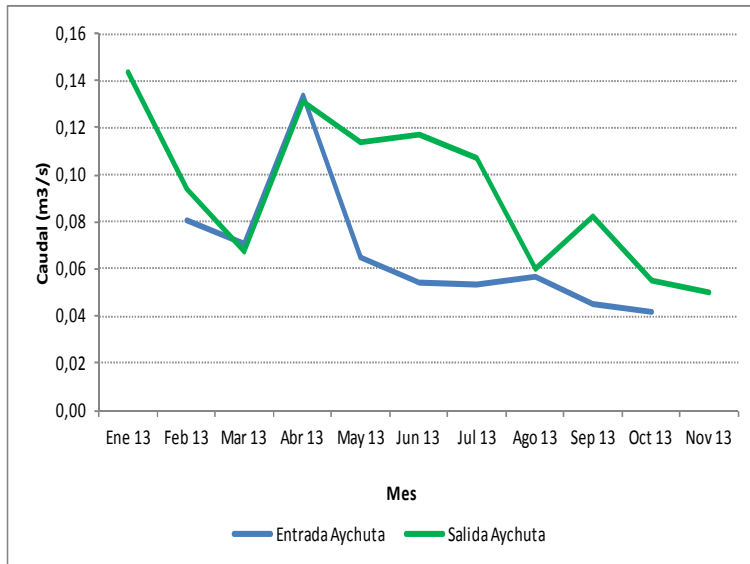


Fig. 18: Fluctuaciones de caudales del río Sururúa a la entrada y salida del bofedal de Aychuta

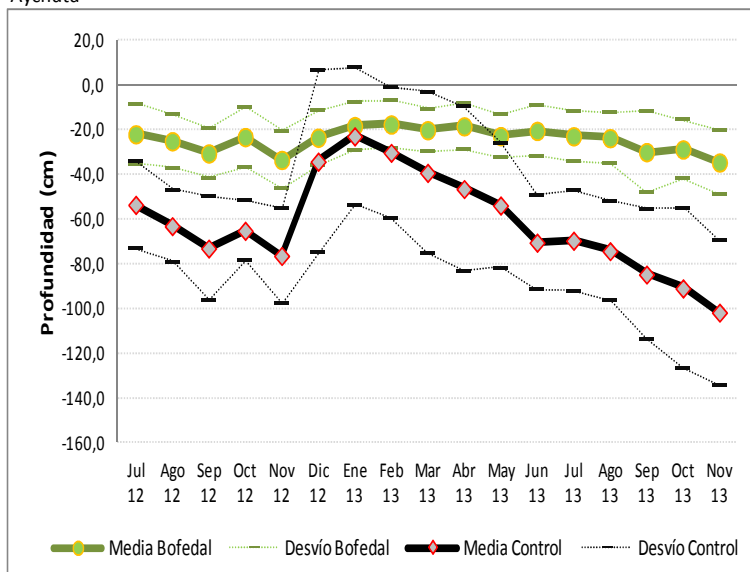


Fig. 19: Fluctuaciones de nivel piezométrico en el bofedal de Aychuta y su área control

A partir del monitoreo de caudales efectuado por el componente hidrológico del presente proyecto, se viene generando información interesante que corrobora algunos patrones que se observan en bofedales. La Fig. 18 muestra que el caudal del río Sururúa al ingreso del bofedal de Aychuta, describe un hidrograma similar al que se observa en el área control adyacente al bofedal, mientras el caudal a la salida del bofedal se muestra superior, corroborando el hidrograma de nivel piezométrico que se registra en el bofedal de Aychuta (Fig. 19).

La Fig. 19 muestra fluctuaciones de nivel notoriamente mayores en los piezómetros control respecto a las variaciones en los piezómetros del bofedal de Aychuta

Por otro lado, se puede notar que para el caso de Aynacha Pacoco, los hidrogramas que describen los caudales de entrada y salida del río Jaruma (Fig. 20) no guardan relación con los que se observan a partir del monitoreo de nivel piezométrico en el bofedal de Aynacha Pacoco (Fig. 21). A pesar de ello, los datos de Aynacha Pacoco vienen mostrando una tendencia de conservación de nivel piezométrico que se corresponde con los patrones encontrados al comparar los hidrogramas del bofedal de Aychuta y su área control, donde las fluctuaciones son menores en el bofedal respecto a las áreas control.

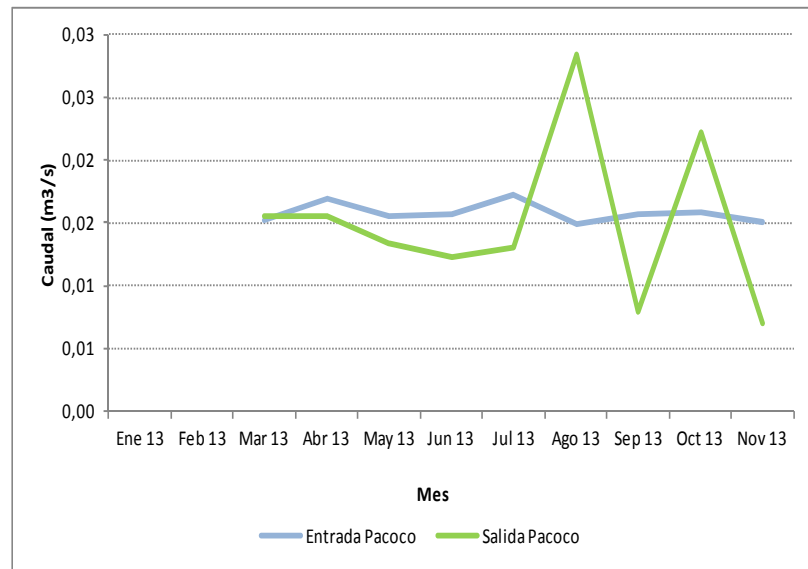


Fig. 20: Fluctuación de caudales del río Jaruma a la entrada y salida del bofedal de Aynacha Pacoco

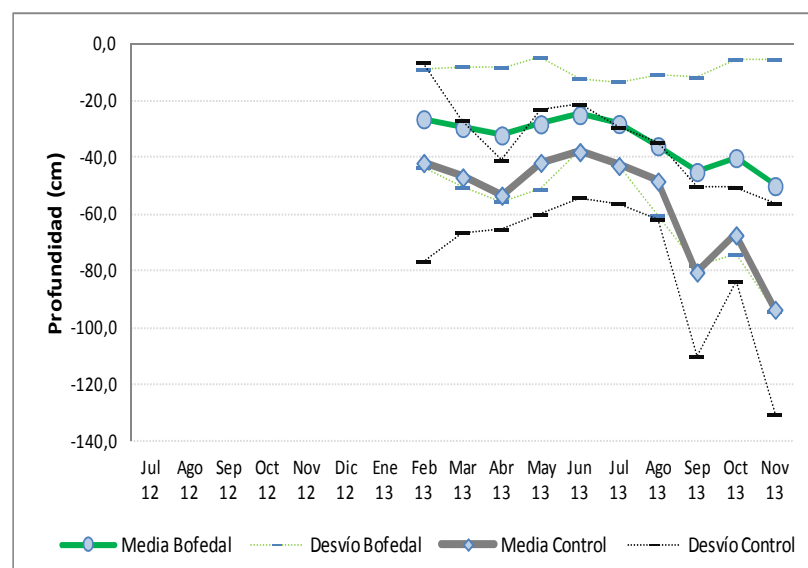


Fig. 21: Fluctuaciones I nivel piezométrico en el bofedal de Aynacha Pacoco y su área control

6.6. Esguerrimiento profundo en pajonales

Se determinó que en promedio 145 mm de agua llegan a escurrir en áreas vegetadas a nivel del suelo, mientras en un área sin cobertura vegetal se totalizó un volumen de 339 mm de esguerrimiento profundo. Esto significa que del total de agua que llega al suelo, los pajonales transpiran el 57% del agua contenida en el suelo durante un ciclo hidrológico. De esta manera, en el área de recarga del río Sururúa llegaría a percolar el 92% de la

precipitación a través del suelo desnudo, mientras que en las áreas cubiertas por paja brava (*Festuca orthophylla*), el escurrimiento profundo solo representaría el 39% de la precipitación. Esta información muestra la elevada eficiencia de *F. orthophylla* para capturar agua del suelo y hacer frente a las condiciones de aridez en los altos Andes. Los porcentajes mostrados se estiman a partir de los datos de precipitación promedio de la estación climática de Chungará, pero para una adecuada estimación se precisará contar con datos climáticos del valle bajo estudio.

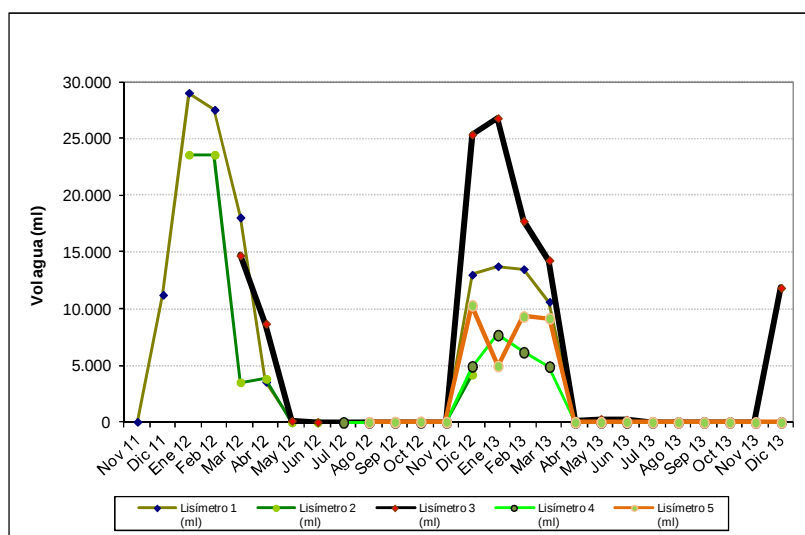


Fig. 22: Escurrimiento profundo registrado a través de lisímetros instalados en cabecera de cuenca del río Sururá en lisímetros con *Festuca orthophylla* y un lisímetro instalado en suelo desnudo (Lisímetro 4)

La Fig 22 muestra la marcada estacionalidad en el régimen de precipitaciones y el agua que llega a escurrir a través del suelo, representando el marcado estrés hídrico al que se enfrenta la vegetación del PNS entre los meses de mayo y noviembre. Los datos de diciembre del 2013 sugieren que a partir de la necesidad de agua de las plantas que sobreviene después de un larga época de estiaje, éstas llegan a aprovechar todo el volumen de agua que llega a nivel del suelo, por ello no se registra escurrimiento profundo en las áreas vegetadas a diferencia de los 11,8 litros que se recolectaron del lisímetro instalado en suelo desnudo.

7. Agradecimientos

A Viviana Casas y Vilma Alanoca por su apoyo en las jornadas de monitoreo en campo; a Freddy Soria por sus valiosos comentarios y aportes en las discusiones metodológicas y conceptuales; a Victor Mamani por el apoyo logístico y durante la instalación de la red piezométrica del bofedal Aynacha Pacoco; al Programa Nacional Biocultura por confiar en un modelo de asistencia rural tipo investigación – acción, y en especial a Gonzalo Mérida; en particular a Mónica Palacios y al equipo de trabajo de Agua Sustentable en general.

8. Bibliografía

- Alzerreca H & A Cardozo. 1991. Valor de los alimentos para la ganadería andina. Serie técnica: IBTA/SR-CRSP/001 La Paz – Bolivia.
- Alzérreca H. 2001. Característica y distribución de los bofedales en el ámbito boliviano del sistema TDPS. La Paz-Bolivia.
- Beck S, A Domic, C García, RI Meneses, K Yager & S Halloy. 2010. El Parque Nacional Sajama y sus plantas. Herbario Nacional de Bolivia - Conservación Internacional Bolivia - Fundación PUMA, La Paz-Bolivia.
- Bradley R, M Vuille, H Diaz & W Vergara. 2006. Threats to water supplies in the Tropical Andes. *Science* 312: 1755–1756.
- Braun-Blanquet J. 1979. Fitosociología. Bases para el Estudio de las Comunidades Vegetales. Blume. España.
- Buitrón C & J Fernández. 2012. Evaluación de potenciales impactos del cambio climático en comunidades andinas boliviana en una región del Parque Nacional Sajama mediante el estudio espacial multitemporal de variaciones en superficie observadas a través de imágenes satelitales. Agua Sustentable, La Paz, Bolivia.
- Buttolph L P & D Coppock. 2004. Influence of deferred grazing on vegetation dynamics and livestock productivity in an Andean pastoral system. *Journal of Applied Ecology* 41, 664–674.
- Buytaert W, F Cuesta-Camacho & C Tobón. 2011. Potential impacts of climate change on the environmental services of humid tropical alpine regions. *Global Ecology and Biogeography* 20: 19–33.
- Cadima M & L López. 2009. Las algas en los bofedales altoandinos de Bolivia. *Rev. Bol. de Ecol. Y Cons. Amb.* 26 : 53-62
- CAE (Centro de Análisis Espacial). 2001. Informe sobre criterios de planificación para el Parque Nacional Sajama. Proyecto Transferencia de Métodos Integrales de Percepción Remota y SIG para el Manejo De Recursos Naturales – Modelo Sajama. IE-UMSA. La Paz – Bolivia.
- Cano A, W Mendoza, S Castillo, M Morales, M Torre, H Aponte, A Delgado, N Valencia & N Vega. 2010. Flora y vegetación de suelos crioturbados y hábitats asociados en la Cordillera Blanca, Ancash, Perú. *Revista Peruana de Biología* 17: 095– 0103.
- Carafa T. 2009. Evaluación de bofedales de la cuenca circundante al nevado Illimani. Agua Sustentable, La Paz, Bolivia.
- Casas V. 2012. Informe de actividades e investigación en campo correspondiente al mes de julio. Agua Sustentable, La Paz, Bolivia.
- Castellaro G, C Gajardo & L Raggi. 1996. Parinacota. Valor pastoral y nutritivo de los bofedales. *Tierra Adentro* 9, 44-46.
- Castro M. 2011. Una valoración económica del almacenamiento de agua y carbono en los bofedales de los Páramos Ecuatorianos - La experiencia en Oña-Nabón-Saraguro-Yacuambi y el Frente Suroccidental de Tungurahua. *EcoCiencia-Wetlands International-UTPL-MAE*, Quito, Ecuador.
- Chen IC, J Hill, R Ohlemüller, D Roy & C Thomas. 2011. Rapid Range Shifts of Species Associated with High Levels of Climate Warming. *Science* 333: 1024–1026.
- CITES.2001.<http://ip30.eti.uva.nl/bis/flora.php?selected=beschrijving&menuentry=soorten&id02271>
- Coronel J. 2009. Bofedales de la cuenca del río Mauri: Vegetación y características físico-químicas. Agua Sustentable, Cochabamba, Bolivia.
- Cowardin L, V Carter, F Golet & E LaRoe. 1979. Classification of wetlands and deepwater habitats of the United States. U.S. Department of the Interior, Fish and Wildlife Service, Office of Biological Services Washington
- Cuesta F, P Muriel, S Beck, RI Meneses, S Halloy, S Salgado, E Ortiz & MT Becerra (Eds). 2012. Biodiversidad y Cambio Climático en los Andes

- Tropicales - Conformación de una red de investigación para monitorear sus impactos y delinear acciones de adaptación. Red Gloria - Andes, Lima – Quito.
- Deutsch C, J Tewksbury, R Huey, K Sheldon, C Ghalambor, D Haak & P Martin. 2008. Impacts of climate warming on terrestrial ectotherms across latitude. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105: 6668–6672.
- Espinoza CW. 2001. Caracterización de los sistemas productivos del Parque Nacional Sajama y estrategia de desarrollo ganadero. Documento del plan ganadero. Proyecto MAPZA, La Paz - Bolivia, 375 pp.
- Fjeldsa J & M Kessler. 1996. Conserving the biological diversity of *Polylepis* woodland of highland of Perú and Bolivia. A contribution to sustainable natural resource management in the Andes. NORDECO, Copenhagen-Dinamarca.
- Flores D. 2002. Identificación y análisis de cambios en bofedales de la Cordillera Occidental y del Altiplano de Bolivia. Tesis de Maestría en Levantamiento de Recursos Hídricos, Universidad Mayor de San Simón. Cochabamba-Bolivia.
- García M. 2011a. Tres décadas de observación de la vegetación de alta montaña en el Parque Nacional Sajama. Tesis de Licenciatura, Universidad Mayor de San Andrés. La Paz-Bolivia. 77 p.
- García M. 2012a. Caracterización agroclimática del Parque Sajama. Agua Sustentable, La Paz, Bolivia.
- García M. 2012b. Evaluación agroclimática de la zona del Parque Sajama. Agua Sustentable, La Paz, Bolivia.
- Genid AYA, HG Frede & B Meyer. 1982. Wasserhaushalt von loss in grundwasser – lysimetern. *Gottinger Bodenkundliche berichte*: 74.
- Geyger E. 1985. Untersuchungen zum Wasserhaushalt der Vegetation im nordwest-argentinischen Andenhochland. Vaduz, Cramer Verlag. *Dissertationes Botanicae* Bd. 88: 1-182.
- Geyger E, M Liberman & J Lorini. 1992. Ecofisiología de plantas cultivadas y silvestres en el altiplano central de Bolivia. *Ecología en Bolivia* 19: 1-42.
- Josse C, G Navarro, F Encarnación, A Tovar, P Comer, W Ferreira, F Rodriguez, J Saito, J Sanjurjo, J Dyson, E Rubin de Celis, R Zárate, J Chang, M Ahuite, C Vargas, F Paredes, W Castro, J Maco & F Reátegui. 2007. Sistemas Ecológicos, de la cuenca Amazónica de Perú y Bolivia. Clasificación y mapeo. Nature Serve. Arlington, Virginia, EEUU.
- Körner Ch, G Wieser & A Cernusca. 1989. Der Wasserhaushalt waldfreier Gebiete in den österreichischen Alpen zwischen 600 und 2600 m Höhe. In: Cernusca A (Ed) *Struktur und Funktion von Graslandökosystemen im Nationalpark Hohe Tauern*. Veröffentlichungen Österr MaB-Hochgebirgsprogramms Hohe Tauern, vol 13. Österr Acad Wiss (Wien) and Wagner, Innsbruck.
- Körner Ch. 2003. *Alpine Plant Life*. 2nd ed. Springer, Berlin - Alemania.
- Llambi LD, Soto A, Céleri R, De Bievre B, Ochoa B & P Borja. 2012. Ecología, hidrología y suelos de páramos. Proyecto Páramo Andino. CONDESAN. Perú
- Liberman M. 1986. Microclima y distribución de *Polylepis tarapacana*, en el Parque Nacional del Nevado Sajama, Bolivia. *Documents phytosociologiques* X (II): 235-272.
- Lopez RP, S Valdivia, N Sanjinés & D de la Quintana. 2007. The role of nurse plants in the establishment of shrub seedlings in the semi-arid subtropical Andes. *Oecologia* 152: 779–790.
- Lorini H. 2012. Cambio climático y relaciones hídricas en bofedales y pajonales de un valle glacial del Parque Nacional Sajama. Agua Sustentable, La Paz, Bolivia.
- Lorini H. 2012b. Composición florística y relaciones hídricas en vegetación de un valle glacial. Agua Sustentable, La Paz, Bolivia.
- Lorini H. 2013. Caracterización florística de bofedales incorporados al sistema de monitoreo. Agua Sustentable, La Paz, Bolivia.
- Lorini J, E Geyger & M Liberman. 1984. Ecofisiología de algunas halófitas en un ambiente especial del altiplano central de Bolivia. *Ecología en Bolivia* 5: 1-28.

- Luebert F & R Gajardo. 2005. Vegetación alto andina de Parinacota (norte del Chile) y una sinopsis de la vegetación de la Puna meridional. *Phytocoenologia* 35: 79–128.
- MAMAYA (Ministerio de Medio Ambiente y Agua). 2010. Estado poblacional de la vicuñas en Bolivia - 2009. Ministerio de Medio Ambiente y Agua - Viceministerio de Medio Ambiente, Biodiversidad, Cambios Climáticos y de Gestión y Desarrollo Forestal, La Paz-Bolivia.
- Matteucci SD & A Colma. 1982. Metodología para el estudio de la vegetación. Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos. Washington D.C. 144p.
- Messerli B. 2001. The International Year of Mountains (IYM). The Mountain Research Initiative (MRI) and PAGES Editorial, Pages News 9(3):2.
- Mitsch W & J Gosselink. 1993. Wetlands. 2da Ed. Van Nostrand Reinhold. New York. USA. 722p.
- Mostacedo B & T Fredericksen. 2000. Manual de métodos básicos de muestreo y análisis en ecología vegetal. Memoria del curso. BOLFOR. Santa Cruz, Bolivia.
- Palabral A. 2013. Relación de la composición florística y su biomasa subterránea con las variables hidrológicas en bofedales de Sajama. Agua Sustentable, La Paz, Bolivia
- Patty L, S Halloy, E Hiltbrunner & Ch Körner. 2010. Biomass allocation in herbaceous plants under grazing impact in the high semi-arid Andes. *Flora* 205: 695-703.
- Pauli H, M Gottfried, S Dullinger, O Abdaladze O, M Akhalkatsi, JL Benito Alonso, G Coldea, J Dick, B Erschbamer, R Fernández Calzado, D Ghosn, JI Holten, R Kanka, G Kazakis, J Kollár, P Larsson, P Moiseev, D Moiseev, U Molau, J Molero Mesa, L Nagy, G Pelino, M Puşcaş, G Rossi, A Stanisci, AO Syverhuset, JP Theurillat, M Tomaselli, P Unterluggauer, L Villar, P Vittoz & G Grabherr. 2012. Recent plant diversity changes on europe's mountain summits. *Science* 336: 353–355.
- Prieto G, H Alzérreca, J Laura, D Luna & S Laguna. 2003. Características y distribución de los bofedales en el ámbito del sistema TDPS. En: Rocha O y C Sáez (eds). *Uso pastoril en humedales altoandinos - Talleres de capacitación para el manejo integrado de humedales altoandinos de Argentina, Bolivia, Chile y Perú*. Sitio Ramsar Lago Titicaca, Huarina, 28 de octubre al 1 de noviembre de 2002. Convención Ramsar, WCS/Bolivia. La Paz, Bolivia.
- Ramírez E, B Francou, P Ribstein, M Descloîtres, R Guerin, J Mendoza, R Gallaire, B Pouyaud & E Jordan. 2001. Small glaciers disappearing in the tropical Andes: a case-study in Bolivia: Glaciar Chacaltaya (16°S). *Journal of Glaciology* 47(157): 187-194.
- Ramírez E. 2008. Impactos del cambio climático y gestión del agua sobre la disponibilidad de recursos hídricos para las ciudades de La Paz y El Alto. *Revista virtual REDESMA* 2 (3): 49-61
- Ramírez E & A Machaca. 2011. Determinación de balances de masa de los glaciares del nevado Illimani mediante técnicas geodésicas. UMSA-IHH-IDRC_CRDI-AGUA SUSTENTABLE, La Paz, Bolivia.
- RAMSAR. 2002. High Andean wetlands as strategic ecosystems. 8th Meeting of the Contracting Parties to the Convention on Wetlands, Valencia.
- Rasmussen T. 2003. Quantitative hydrology. Lecture notes. <http://www.hydrology.uga.edu/rasmussen/class/4500/index.html>.
- Ruthsatz B. 2012. Vegetación y ecología de los bofedales altoandinos de Bolivia. *Phytocoenologia*, 42 (3-4), 133-179.
- Sklenář P. 2000. Vegetation ecology and phytogeography of Ecuadorian superpáramos. Unpublished PhD Thesis, Charles University.
- Schenk J & R Jackson. 2002. Rooting depths, lateral root spreads and below-ground/above-ground allometries of plants in water-limited ecosystems. *Journal of Ecology* 90: 480-494.
- Smith A & T Young. 1987. Tropical Alpine Plant Ecology. *Annual Review of Ecology and Systematics* 18: 137–158.
- Sandoval P. 2012. Evaluación de la composición florística del Parque Nacional Sajama, con énfasis en los bofedales. Agua Sustentable. La Paz, Bolivia.

- Soliz H. 2011. Hidrogeología del bofedal del Nevado Illimani. Tesis de Maestría, Universidad Mayor Real Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca. Sucre-Bolivia.
- Soria F. 2013a. Tendencias climáticas (tiempo presente) en la cuenca del río Sajama. Informe de avance. Agua Sustentable. La Paz, Bolivia.
- Soria F. 2013b. Monitoreo hidrológico para el estudio preliminar de relaciones precipitación-escurrimiento en microcuencas con presencia de bofedales, en la Cordillera Occidental de los Andes, Bolivia. Agua Sustentable, La Paz, Bolivia
- Sotomayor M. 1990. Tecnología campesina en el pastoreo Altoandino. Proyecto Alpacas (INIAA-CORPUNO-COTESU/IC). Puno, Perú.
- Thibeault J, A Seth & M García. 2010. Changing climate in the Bolivian Altiplano: CMIP3 projections for temperature and precipitation extremes. *Journal of Geophysical Research* 115: D08103.
- Troncoso R. 1982. Evaluación de la capacidad de carga del Parque Nacional Lauca. 222 p. CONAF. I Región. Informe de Consultoría. Corporación Nacional Forestal (CONAF). Arica, Chile.
- Villa J & C Tobón C. 2012. Modeling hydrologic dynamics of a created wetland, Colombia. *Ecological Engineering* 40, 173– 182.
- Villagrán C & C Castro. 1997. Etnobotánica y manejo ganadero de las vegas, bofedales y quebradas en el Loa superior, Andes de Antofagasta, Segunda Región, Chile. *Chungará* 29 (2), 275-304.
- Villarroel J. 1997. Balance forrajero y nutricional en áreas de producción de alpacas de Ulla Ulla. Tesis de Ingeniero Agrónomo. Universidad Mayor de San Simón. Cochabamba, Bolivia.
- Villegas R. 2012. Estudio hidrogeológico del bofedal Huaychuta en el volcán Sajama. Tesis de Grado, Universidad Mayor de San Andrés. La Paz-Bolivia.
- Vuille M & R Bradley. 2000. Mean temperature trends and their vertical structure in the Tropical Andes. *Geophysical Research Letters* 27: 3885–3888.
- Vuille M, R Bradley, M Werner & F Keimig. 2003. 20th century climate change in the Tropical Andes: observations and model results. *Climate Change* 59: 75–99.
- Vuille M, B Francou, P Wagnon, I Juen, G Kaser, BG Mark & R Bradley. 2008. Climate change and tropical Andean glaciers: Past, present and future. *Earth-Science Reviews* 89 : 79-96.