

Capítulo 5

HIDROLOGÍA DE UNA TURBERA DE *SPHAGNUM* EN LA PATAGONIA CHILENA

Brian Reid & Robert McCulloch

Centro de Investigación en Ecosistemas de la Patagonia (CIEP), Moraleda 16, Coyhaique, Chile.

E-mail: brian.reid@ciep.cl

Resumen

La hidrología es el impulsor principal de la biogeoquímica en los humedales, que a su vez se refleja en la biodiversidad acuática y florística. El complejo de turberas dominadas por el musgo *Sphagnum* en el sur de la Patagonia, considerado entre los mayores humedales a nivel mundial, ha sido objeto de mapeo, explotación e investigación ocasional. Sin embargo, el conocimiento sobre la hidrología de estos sistemas es aún muy limitado. El objetivo principal de este estudio fue caracterizar la hidrología de una turbera ombrotrofica de *Sphagnum* localizada en un valle en la región de Aysén (45°S). Con una red de piezómetros, sensores y registradores de datos de alta frecuencia, se evaluaron las variaciones del nivel del agua (nivel freático) y la humedad del musgo *Sphagnum* a microescala en respuesta a la precipitación durante un año. El rango de oscilación anual del nivel freático varía entre 43 a 66 cm total dependiendo del sitio, con niveles máximos de inundación durante el invierno (mayo-agosto) y también durante una primavera inusualmente lluviosa (noviembre). El balance hídrico para el 2019 mostró una entrada anual de 1.595 mm de precipitación, un flujo de salida estimado de 805 mm y una evapotranspiración de 545 mm. La relevancia hidrológica se discute en términos de la formación y persistencia de los charcos superficiales (y su biota acuática potencial), y los patrones de humedad dentro de la microtopografía de la turbera, tanto en depresiones como en montículos (potencialmente importante para la vegetación). En este contexto, se puede entender mejor el impacto y los efectos de la presión por la cosecha del musgo *Sphagnum* y alteraciones como zanjas y carreteras, sobre la dinámica hidrológica natural y su correspondiente impacto sobre la biodiversidad y el funcionamiento ecosistémico de las turberas patagónicas. Finalmente, el ejemplo presentado aquí ilustra herramientas y métodos simples para establecer una línea base hidrológica y determinar las alteraciones del régimen hidrológico en turberas.

Palabras clave: balance hídrico, redes de sensores, modelo hidrológico, conservación acuática.

INTRODUCCIÓN

Los humedales se encuentran entre los ecosistemas menos conocidos y apreciados en Chile, suelen ser subestimados a pesar del valor que poseen para la biodiversidad, el hábitat de la vida silvestre y los servicios ecosistémicos, como la regulación del agua y el almacenamiento de carbono. Una excepción notable son las extensas turberas naturales de *Sphagnum* en la región de Magallanes (50°- 55°S), con casi 100 años de mapeo y estudios (Vega-Valdés & Domínguez, 2015), y las cuales han sido, además, reconocidas como uno de los complejos de humedales más importantes del mundo (Fraser & Keddy, 2005). Las turberas de *Sphagnum* también han recibido cierta atención en la provincia de Chiloé (41° - 42°S), quizás a consecuencia de la reciente explotación del musgo (Díaz *et al.* 2008) y a la mayor accesibilidad y proximidad de los investigadores a estas áreas. Sin embargo, hay un gran territorio entre estas dos regiones donde las turberas naturales de *Sphagnum* han pasado desapercibidas tanto para la industria de extracción como para la investigación: la región de Aysén (44 - 47°S).

A pesar de todo el creciente reconocimiento sobre la importancia de las turberas naturales de *Sphagnum* en Chile (Domínguez & Vega-Valdés, 2015) y recientes iniciativas enfocadas en su conservación (*La Tercera*, 25 ago. 2020), la gran mayoría de las investigaciones en estos sistemas se ha centrado en el aspecto florístico y, en forma secundaria, en la reconstrucción paleoecológica (principalmente en la región de Magallanes). La biodiversidad y el ecosistema acuático son poco conocidos (Fernández, 2021; Reid & Torres, 2021, Capítulo 6 y 4) comparándolos con los significativos avances y descubrimientos en las turberas en Argentina (Garraza *et al.* 2012; Mataloni *et al.* 2015; García *et al.* 2016; Koppers *et al.* 2016). En el sur de la Patagonia, existe una línea base limitada sobre la formación y descomposición de la turba (Rodríguez, 2015), y un desconocimiento de los controles hidrológicos y biogeoquímicos. Finalmente, no hay caracterizaciones detalladas de la hidrología de las turberas de *Sphagnum*, aparte de la caracterización básica de los cambios estacionales del nivel freático en turberas de Chiloé (Díaz *et al.* 2008) y de las suposiciones no comprobadas de menor variación del nivel freático (Kleinebecker *et al.* 2008). La pobre caracterización hidrológica de las turberas en Chile contradice su importancia en términos de almacenamiento de agua. Comprender la hidrología de los humedales es el primer paso para caracterizar los procesos del ecosistema, la química y la biodiversidad (Keddy, 2010). Dados los extremos gradientes climáticos en el sur de la Patagonia y la considerable incertidumbre de las

consecuencias hidrológicas en un clima cambiante, se necesita con urgencia una mejor comprensión de la hidrología de las turberas y de los correspondientes controles biogeoquímicos. Las turberas ya pueden verse afectadas por las tendencias climáticas, como se ha demostrado recientemente en otros sistemas acuáticos (como en ríos principales) en la Patagonia chilena (Garreaud, 2018; León-Muñoz *et al.* 2018).

Existen tremendas oportunidades para la conservación de los ecosistemas de turberas en el extenso y diverso territorio de la región de Aysén (44°–47°S), donde las turberas de *Sphagnum* habían pasado desapercibidas tanto para la industria de extracción como para los investigadores. El objetivo principal de este estudio es caracterizar la hidrología de una turbera natural ombrotrófica de *Sphagnum* en la región de Aysén, en la cual se realizan experimentos de restauración de musgo *Sphagnum* (Domínguez *et al.* 2020). Se estima el balance hídrico basado en el monitoreo del nivel freático y de las precipitaciones a través de sensores *in situ* de alta frecuencia. Se evalúan los patrones a microescala del contenido de humedad del musgo *Sphagnum*, dado el contexto actual de la presión por su cosecha, y los impactos correspondientes sobre la microtopografía de turberas y los ecosistemas asociados (*e.g.* charcos). Este trabajo representa la primera caracterización hidrológica y balance hidrológico para una turbera en Chile.

METODOLOGÍA

Descripción del sitio de estudio

El sitio principal de estudio fue la turbera Pedro Aguirre Cerda (PAC), en la cuenca del río Aysén, cerca de la confluencia de los ríos Toqui y Mañihuales (Fig. 1a). El contexto hidrogeomórfico de la turbera PAC se clasifica como un sistema ombrotrófico de pendiente, situado dentro de un valle (Rodríguez, 2015). Una pequeña vertiente en el contacto de la ladera noreste forma un área de pozones y turbera boscosa. Esta área drena de manera difusa hacia el oeste aproximadamente 0,7 km, la cual se junta con un arroyo que se origina en la misma ladera, continuando 0,9 km al oeste hasta el río Mañihuales. El lago Pedro Aguirre Cerda forma el límite sur de la turbera, un lago poco profundo con una elevación base de 267 m s.n.m. en su superficie. El desagüe del lago forma el nacimiento del río Mañihuales, el cual forma el límite occidental de la turbera, fluyendo con un pequeño gradiente (<0,06%) por aproximadamente 1,6 km hacia la confluencia de un río sin nombre, mientras que el límite oriental de la turbera está marcado por una ladera. Las estaciones de muestreo se ubicaron en el noreste de la turbera, donde se encuentra la elevación más alta de 274 m s.n.m.

La zona de turbera con cobertura dominada por el musgo *Sphagnum* abarca aproximadamente 0,74 km², inclinándose suavemente hacia el suroeste con un gradiente de 0,3%, hasta una elevación de 272 m s.n.m. (Fig. 1b). La turbera transiciona a *fen* y cipresal (*Pilgerodendron uviferum*) hacia el oeste y norte, y a áreas anegadas dominadas por ciperáceas (e.g. *Schoenoplectus californicus*) en el borde del lago al sur. La turbera PAC se encuentra localizada aproximadamente a 70 km al este del volcán Macá, siendo una zona de suelos andosoles de 0,7 a 1 metro de profundidad (Vanderkerkhove *et al.* 2016). La geología está dominada por depósitos cuaternarios no consolidados, que incluyen morrenas, terrazas y la llanura fluvial del río Toqui. El sitio de estudio está dentro de los límites estimados del lago paleo-glacial holocénico Cisnes (García *et al.* 2019), posiblemente formado sobre substratos lacustres menos permeables después del drenaje de este inmenso paleo-lago. El clima regional se clasifica como oceánico templado frío, con una temperatura media anual de -6°C y una precipitación media anual de ~2.500 mm (DGA, 2004). La cobertura vegetal está dominada por bosques mixtos de *Nothofagus* spp., tanto siempreverdes como caducifolios, y el paisaje que rodea el sitio de estudio ha sido fuertemente afectado por incendios forestales en el siglo pasado. El uso de la tierra es principalmente ganadero de intensidad moderada. Sin embargo, en el límite norte, en el arroyo sin nombre, fue instalada una de las primeras pisciculturas para la industria del salmón, aunque no parece tener impacto directo sobre los ecosistemas de turberas. Por otra parte, la cosecha del musgo *Sphagnum* comenzó aproximadamente el año 2012, produciendo algunos impactos locales en la topografía superficial y la compactación por vehículos.

MÉTODOS

Se emplearon varios diseños de piezómetro en el sitio, instalándose: i) tres pares de tubos de PVC de drenaje de 10 cm de diámetro (P1, P2, P3) y de 80 cm de largo, en cada una de las tres parcelas de restauración (Domínguez *et al.* 2020); ii) cinco pozos (piezómetros) profundos, que consistieron en tubos de PVC de 20 mm de diámetro a la profundidad del sustrato mineral subyacente (4-5 m). Los tubos de 0,25 mm de espesor fueron cortados con una sierra para metales, cada 20 cm, cada un metro de profundidad, correspondiendo a las parcelas (P1-3) de monitoreo; los dos piezómetros adicionales (P4 y P5) se instalaron formando un transecto de 100 m desde P1 hacia el interior de la turbera; y iii) tres pozos (piezómetros) someros, que consistieron en tubos de PVC de 20 mm de diámetro, perforados de la misma manera, de 1 metro de profundidad, instalados a lo largo del transecto (P1s, P4s, P5s). Los pozos profundos se anclaron en el sustrato con

una extensión de fierro, para reducir el desplazamiento vertical del pozo durante los ciclos de contracción/hinchamiento de la superficie. Los piezómetros someros fueron anidados y fijados a los pozos profundos correspondientes (Fig. 1b).

El nivel del agua estática fue medido con respecto a la cabeza del piezómetro utilizando un multímetro modificado con cable de cobre y una batería en línea de 9 voltios. Fue instalado un sensor (Hobo U20-001-004, rango de 3 m, Onset Inc.), para registrar el nivel del agua a intervalos de 10 minutos, a una profundidad de 1 metro dentro de un piezómetro adicional de 40 mm en el sitio P1. Un sensor de presión instalado sobre la superficie y a la sombra fue utilizado para la compensación de la presión barométrica. Las precipitaciones se midieron a través de un pluviómetro (Hobo RG3), conectado a un registrador de datos (Hobo H21) marcando con una frecuencia de 5 minutos. Sensores de contenido de humedad basado en la resistividad (EC5, Decagon Inc.) fueron instalados en tres puntos a lo largo de un montículo de *Sphagnum* (superior, medio e inferior), abarcando una separación vertical de 40 cm (Fig. 4a). En forma adicional, previamente se instalaron dos sensores para medir el nivel freático (Solinst Inc.) en dos sitios en una turbera natural intervenida, formada en una terraza fluvial cerca de Tortel (turbera Vargas) (Fig. 2 en Reid & Torres, 2021, Capítulo 4), con el objetivo de comparar la variación del nivel freático entre un área de cosecha de musgo *Sphagnum* y una turbera sin intervención como condiciones referenciales (Figs. 7a y b). Estos sensores registraron los niveles freáticos cada 15 minutos desde diciembre de 2017 hasta mayo de 2019, mientras que la compensación barométrica se calculó en función de la estación meteorológica de Villa O'Higgins (Dirección Meteorológica de Chile, www.meteochile.cl/PortalDMC-web).

Se desarrolló el balance hídrico anual y también períodos mensuales basados en datos hidrológicos continuos. Se calculó la regresión lineal entre la precipitación (PPT) y el cambio en el nivel freático para eventos de lluvia (precipitación acumulada 1 a 5 días) durante condiciones de verano, otoño e invierno (corrigiendo para drenaje, discutido en seguida). El inverso del pendiente de cada recta representa la porosidad disponible para almacenar agua, que varía con estación y condiciones inherentes del espesor que se rellena. Esta relación también permitió estimar la precipitación durante los períodos carentes de datos. Se generó una regresión entre el nivel del agua y la disminución neta diaria del nivel del agua (fuera de los eventos de precipitación) durante los mismos períodos estacionales. La regresión invernal (junio-julio, suponiendo evapotranspiración cero) se usó para estimar la salida diaria de agua por advección (Q_{sal}). Esta regresión se aplicó de manera posterior, usando el nivel

freático para estimar las salidas diarias durante el año. Los residuales desde esta línea (es decir, la pérdida diaria de agua no atribuida al flujo de salida) se utilizaron para estimar la pérdida diaria por evapotranspiración (ET) durante el resto del año. Se sumaron los valores de Q_{sal} y ET diarias a valores mensuales y balance anual. El cambio de almacenamiento ΔS se calculó por el cambio neto en la altura de agua durante el período anual, corregido a equivalentes de agua con la estimación de la porosidad disponible de verano. Finalmente, se calculó el error residual entre las entradas diarias (PPT medida y estimada) y las salidas (Q_{sal} , ET), el cambio de almacenamiento (ΔS). Este valor representa en parte a las posibles entradas de vertientes superficiales y aguas subterráneas (Q_{ent}), más la incertidumbre en la estimación de los otros parámetros.

RESULTADOS

La serie temporal hidrológica mostró una variación anual significativa en el nivel freático de aproximadamente 45 cm cerca el sitio P1 (Fig. 2a). Períodos de inundación de corta duración fueron frecuentes durante mayo a agosto (5-6 eventos) y también durante un noviembre excepcionalmente lluvioso (1-2 eventos; Fig. 2b). Estos eventos potencialmente corresponden a ciclos de llenado y drenaje de los charcos superficiales (área sombreada) (Fig. 2a). El rango de nivel freático anual varió entre los sitios (Fig. 3), el sitio P1 estaba relativamente amortiguado (43 cm rango de oscilación, basado en medición manual) en comparación con los rangos de oscilación anual entre 53-66 cm en el borde de la turbera (P2-3), o mayor de 64 cm en el transecto interior (P4). Una expansión vertical del musgo *Sphagnum* de hasta 5 cm se documentó durante los meses de invierno, con efectos más fuertes a lo largo del borde de la turbera (correspondiendo a zonas de mayor elevación a lo largo del sistema de pendiente) (Fig. 1). Ciclos diarios en el nivel freático de hasta 1-2 cm también fueron evidentes para todos los meses excepto en invierno (mayo-agosto).

El régimen de humedad del musgo exhibió ciclos diarios como señal hídrica de evapotranspiración y aumento de humedad después de breves eventos de lluvia (Fig. 4a), cambios estacionales en la saturación (Fig. 4b) y recesión por drenaje después de los eventos de lluvia (Fig. 4c). En general, el rango más dinámico se observó en la elevación más baja (depresiones, indicador de la formación de charcos). Sin embargo, fue evidente la diferencia en el contenido de humedad entre los tres micrositos, respondiendo a escalas de tiempo estacionales, a eventos de precipitación de corta duración y a niveles estables cerca de la

capacidad de campo. Por ejemplo, el contenido de humedad fue notablemente elevado para la elevación media durante las condiciones de verano (Fig. 4a). Tomando en cuenta que los sensores de humedad están calibrados de fábrica para suelos minerales típicos, los valores representan sólo cambios relativos al contenido de agua. El rango de 18 a 55% indicado aquí probablemente corresponde a niveles más cercanos a 10 y 90% respectivos: el menor valor correspondiendo con agua residual después de drenaje (el 10% esperado para 10 kPA tensión, aproximando la capacidad de campo) y el mayor valor con la saturación de la matriz de la turbera de *Sphagnum* (aproximadamente 90%; Damman & French, 1987).

La representación gráfica de la precipitación neta y la respuesta en los cambios del nivel freático (Fig. 5a) y la relación entre nivel estático del agua y la tasa de pérdida de agua diaria (disminución de altura por drenaje y evapotranspiración; Fig. 5b) mostraron fuertes patrones estacionales. Existe una diferencia significativa entre las pendientes de las líneas de regresión como se muestra en la Fig. 5a, entre el período verano/otoño (nivel freático bajo, febrero-marzo) y el período de invierno (nivel freático alto, junio-julio). Esta diferencia es probablemente una consecuencia de las variaciones verticales en las propiedades hidrológicas de material de turbera con varios grados de descomposición (Damman & French, 1987; Verry *et al.* 2011). Por ejemplo, la capacidad de almacenamiento de agua (*e.g.* en términos del volumen) es 90% para *Sphagnum* en vivo, <50% para musgo parcialmente descompuesto. Mientras la retención después del drenaje (*e.g.* la capacidad de campo, o tensión negativa de 10 kPA) es 10% para *Sphagnum* en vivo, aproximadamente 25% para musgo descompuesto (Verry *et al.* 2011). El valor inverso de los pendientes en Fig. 5a representa la porosidad disponible para el almacenamiento de agua durante los períodos y formaciones de turba inundables respectivos. Esto corresponde a un almacenamiento de 41% a 35-50 cm de profundidad (febrero-marzo; pendiente 2,42); 52% a 20-30 cm de profundidad (abril-mayo; pendiente 1,91) y 76% en la superficie de 0-10 cm de profundidad (junio-julio; pendiente 1,31). Lo último corresponde casi precisamente a la diferencia de 80% entre almacenamiento de *Sphagnum* vivo durante la saturación (contenido de agua aproximadamente 90-91%; Keddy, 2010; Rodríguez, 2015) y el agua residual de esta misma formación después de drenaje (10%; Verry *et al.* 2011).

Las tasas diarias de disminución del nivel freático mostraron una respuesta fuerte y casi lineal durante los períodos de invierno (Fig. 5b). Esta regresión, durante períodos de poca pérdida de agua por evapotranspiración, representa

una estimación del escurrimiento horizontal, o el caudal de salida desde el sistema, lo que es significativo durante los períodos de altos niveles freáticos en junio y julio (Fig. 6). El cese del drenaje fue estimado para la intersección cero en la Fig. 5b, a niveles de agua de aproximadamente 26 cm por debajo de la superficie en la estación P1 (o 34 cm, según la elevación de referencia relativa Fig. 5b). La pérdida diaria del nivel del agua durante otros meses, aunque mostró pendientes más suaves, es de la misma magnitud y representa la pérdida por evapotranspiración. La estimación de valores diarios de evapotranspiración es posible después de corregir por la capacidad de almacenamiento de agua (*i.e.* calculado desde Fig. 5a en el párrafo anterior), presumiendo que el escurrimiento horizontal es negligible (menos que la altura de 34 cm, que representa la mayoría de los casos). Evapotranspiración diaria se calcula como $-3,0 \pm 1,0$ mm/d (febrero-marzo), $-3,0 \pm 1,4$ mm/d (abril-mayo) y $0,3 \pm 0,9$ mm/d (junio-julio).

Los flujos diarios estimados a partir de los datos y modelos en Figs. 2 y 5 se sumaron para estimar el balance hídrico mensual y anual para el período de estudio 2019–2020 (Fig. 6). La precipitación total llegó a 1.595 mm/a (medición directa y estimación indirecta para un período sin datos, en función de los incrementos positivos en el nivel del agua durante invierno). El flujo de salida (Q_{sal}) dominó las pérdidas de agua: 805 mm/a estimados como flujo desde el sistema, probablemente por la filtración a lo largo de los límites sur y oeste durante el otoño y el invierno. La pérdida de agua por evapotranspiración se estimó en 545 mm/a, con tasas aparentemente más altas durante la primavera. Esto último también mostró un efecto de histéresis, por una pérdida más alta con períodos de mayor humedad excedente del *Sphagnum* (Fig. 4d), y reflejado en las diferencias en pendiente de pérdida diaria correspondiendo a las estaciones (Fig. 5b). El cambio en el almacenamiento ($S = +15$ mm) fue evidente directamente (*e.g.* la napa freática elevada por 4 cm después del ciclo anual). El balance total mostró un valor residual negativo de -230 mm/a (modelo de "caja" en la Fig. 6), que se atribuye a baja estimación de Q_{sal} y evapotranspiración. Por ejemplo, la forma no lineal de la regresión en la Fig. 5b subestima el Q_{sal} durante períodos de alto nivel del agua. Tampoco fue posible estimar la evapotranspiración durante períodos de lluvia - incorporando el valor promedio estacional de evapotranspiración, como $-3,0$ mm-d en verano en el párrafo anterior, a períodos de lluvia, resulta en un error residual casi cero. Las entradas de aguas subterráneas son probablemente menores, aunque la concentración de sílice disuelta (Reid & Torres, 2020, Capítulo 4) es indicador de la existencia de entradas (Q_{ent} en Fig. 6). Es más probable que el valor residual represente un error acumulado, por ejemplo, a raíz de la dispersión en los modelos de regresión (Fig. 5). En general, se recomienda precaución al

interpretar parámetros hidrológicos no medidos basados en errores residuales (LaBaugh, 1986).

Las fluctuaciones del nivel freático en la turbera Vargas, en una zona de mayor precipitación cerca de Tortel, mostraron un rango similar de 40-50 cm durante el período anual (Fig. 7c). Además, la variación interanual fue muy evidente, con una disminución de los niveles del agua de hasta 20 cm más en verano de 2019 en comparación con el año anterior. También son notables las diferencias con respecto a los niveles freáticos relativos a la superficie: en el sitio cosechado (intervenido) el agua estaba frecuente más por encima de la elevación de la superficie en comparación con el sitio no cosechado (no intervenido) (Fig. 7d).

DISCUSIÓN

A pesar del diseño simple y de las herramientas básicas utilizadas en este estudio, es evidente que se puede generar información de línea base muy útil sobre la hidrología de las turberas naturales de *Sphagnum*, una herramienta potencialmente aplicable a un amplio rango de condiciones de sitio y contextos relevantes a la gestión y prácticas de manejo. Usando solamente un pluviómetro y un sensor de nivel del agua, se puede establecer una estimación gruesa de la pérdida de agua tanto por drenaje como por evapotranspiración, ambas potencialmente medidas en forma diaria (incluso con series de datos incompletas, como fue el caso de este estudio). La relación central para desarrollar este modelo es la tasa de pérdida diaria invernal (Fig. 5b). Esta relación probablemente variaría ampliamente dentro y entre sitios, debido a los controles geomorfológicos en el drenaje. Un análisis refinado de la pérdida diaria invernal representa una aplicación potente para evaluar la hidrología de otras turberas y dentro de otros contextos relevantes para la gestión. Por ejemplo, zonas de pendiente comparada con zonas planas, o áreas de zanjas, carreteras o cosecha, mostrarían efectos sitio-específicos, en un contexto antes y después de una intervención, así como también se pueden realizar análisis a diferentes distancias desde el área de intervención para poder estimar la magnitud del impacto (Fig. 7c). Por lo tanto, esta técnica puede ofrecer un método relativamente simple para cuantificar los efectos de las actividades humanas o los factores climáticos sobre los recursos hídricos en las turberas. Con seguimiento de observaciones, se puede entender la respuesta hidrológica combinada con el efecto de los ciclos climáticos.

Otro mejoramiento consiste en observaciones en las escalas finas de la dimensión

vertical. Generalmente, en turberas la conductividad hidráulica y la porosidad varían con la profundidad, una consecuencia del estado de descomposición y origen vegetal de material de turba (Campbell & Jackson, 2004; Verry *et al.* 2011), al igual que el área de filtración disminuye con el nivel freático. Como consecuencia, el flujo de salida de las turberas no debería ser lineal (como en la Fig. 5b), sino escala logarítmica o log-log, similar a los modelos de caudal vs. nivel en ríos (Leopold *et al.* 1995). El cese del drenaje a 26 cm (con referencia al lugar del sensor P1), en realidad puede interpretarse como tasa decreciente del flujo de salida hasta niveles inferiores a 30 cm, como lo sugieren los puntos de datos de noviembre en azul (Fig. 5b; observando también que la regresión del invierno se acercó a no más de 5 cm sobre la intersección cero). Un segundo umbral no lineal es evidente en los valores residuales positivos (Fig. 5b; símbolos naranjos sobre la línea de tendencia) correspondientes a niveles del agua por encima de los 45 cm (15 cm por debajo de la superficie en estación P1). Esto puede reflejar el escurrimiento del agua superficial (Fig. 5b). De hecho, el modelo para jun-ago se mejora significativamente desde la versión lineal (Fig. 5b; $R^2 = 0,58$) después de aplicarlo a valores transformados por el logaritmo ($R^2 = 0,83$), y otra iteración más eliminando observaciones justo después de la precipitación ($R^2 = 0,95$).

La determinación de los parámetros hidrológicos basados en material de turba representa otra manera de mejorar el balance hídrico. Por ejemplo, se puede estimar directamente el almacenamiento de agua y retención (Verry *et al.* 2011; Rodríguez, 2015), y cómo se varía con profundidad, comparandolos con los valores indicados por las Figs. 5a y 5b. La calibración de los sensores de humedad para la matriz del *Sphagnum* permitiría una contribución más fina de la hidrología y del balance hídrico general. La medición directa del balance energético y el flujo neto de radiación de onda larga y corta (Rydin & Jeglum, 2013) establecería un base más sólido para las estimaciones de evapotranspiración. Estas metodologías también serían potencialmente sensibles a los efectos de los tipos de vegetación, la micro-topografía de montículo/depresiones y la respuesta a la cosecha. Esto produciría indicadores potencialmente importantes, especialmente cuando los impactos de actividades antrópicas son menores a escala local, pero se suman a efectos significativos a escala de un sistema. El balance de energía junto con la medición de los gradientes verticales de vapor de agua (humedad) son compatibles con estudios sobre el efecto de intervención a las emisiones de gases de efecto invernadero. Cualquier intervención que afecte la variación natural del nivel freático y del ciclo hidrológico, como por ejemplo un cambio en el perfil de humedad natural dentro de los montículos de las turberas, también afectaría las tasas de pérdida de agua por evapotranspiración y como consecuencia la

emisión de gases. La cosecha resultaría en este mismo efecto en términos de exposición superficial al agua durante largos períodos del año. Finalmente, nuestro modelo unidimensional, basado en una planilla de cálculo simple, podría mejorarse sustancialmente a través de modelos numéricos bidimensionales o tridimensionales, junto con una red ampliada de piezómetros y mediciones en terreno de las condiciones límites calibradas (e.g. nivel del lago y ríos).

Las observaciones sobre los cambios del nivel freático en la turbera PAC tienen implicaciones potencialmente importantes para la formación y persistencia de los microambientes de charcos (Fig. 1a). Los charcos parecen ser más abundantes y dominan la hidrología de las turberas durante los meses fríos y húmedos del invierno en este sitio. Mientras tanto, la mayoría de los charcos probablemente se seca durante gran parte de las temporadas de primavera, verano y otoño, un período normalmente importante para el crecimiento y la productividad de los organismos acuáticos superficiales. Es posible que los charcos sólo ofrezcan un hábitat limitado o efímero para diferentes organismos acuáticos, especialmente aquellos con tiempos de desarrollo variado, como las libélulas y los anfibios. Las posibles consecuencias de la hidrología de los charcos se discuten en términos de efectos sobre la química y la biota (Reid & Torres, 2021, Capítulo 4). El régimen hidrológico de los charcos puede tener efectos significativos en el ciclo de vida del musgo *Sphagnum*. Por ejemplo, en Moor House Bog (Reino Unido), las tasas de crecimiento de *Sphagnum* fueron doblemente más altas en áreas planas e intermedias de los montículos y más bajas en charcos inundados, aunque hubo algunas excepciones estacionales (tasas de crecimiento intermedias en charcos durante el final del verano; Clymo *et al.* 1984). Teniendo en cuenta que en el estudio de Clymo los tres microambientes corresponden a tres especies de *Sphagnum*, las cuales pueden tener contribuciones distintas en la acumulación de turba (Stivirins *et al.* 2017), las turberas de la Patagonia, tratando sólo una especie (*S. magellanicum*) en los tres microambientes (Rodríguez, 2015), presentarían una comparación interesante.

Estudios de los patrones de humedad existentes en la microtopografía, y la relación con la colonización/crecimiento de las plantas vasculares, sugieren otra línea de investigación: cómo se relaciona la diversidad de plantas vasculares con el régimen hídrico. Además, los patrones verticales y temporales de la humedad en la matriz de *Sphagnum*, especialmente la variación entre los montículos y depresiones, sugieren un efecto potencial sobre la colonización y la germinación de plantas vasculares leñosas como el ciprés (*Pilgerodendron uviferum*). Una comprensión del ciclo de vida dentro de un sitio y la variación florística entre

turberas ubicadas en zonas bioclimáticas distintas, probablemente, toman una forma análoga al modelo de "caja" hidrológica para los álamos *Populus* de las planicies de inundación fluvial en el hemisferio norte (Meier & Hauer, 2010). La alteración de las turberas a estas escalas (microtopografía) puede ser muy importante en términos de evaluar los efectos de la cosecha de *Sphagnum* y otras perturbaciones, teniendo implicaciones para la eficacia de los esfuerzos de restauración.

Las implicaciones combinadas de esta caracterización hidrológica son relevantes en términos de comprensión de la magnitud de los impactos por zanjas, drenaje o pérdida de espesor de la turbera de *Sphagnum* por efecto de la cosecha de musgo o extracción de turba. Estas alteraciones afectarán claramente la hidrología, efectos potencialmente a escala mucho mayor que sólo local (Fig.7d). La variación hidrológica mostrada aquí y en otros lugares (Díaz *et al.* 2008) es un control esencial sobre los procesos químicos y biológicos (Rydin & Jeglum, 2013; ver Fig. 1 en Reid & Torres, 2021, Capítulo 4. Las alteraciones en la hidrología y la disminución de las fluctuaciones del nivel freático (Díaz *et al.* 2008; véase también la Fig. 7), a su vez, están relacionadas con cambios profundos en las características químicas y físicas de las aguas superficiales y subterráneas. Ahora bien, también se tiene que tomar en cuenta las escalas de tiempo involucradas en la formación durante miles de años de las turberas naturales; escalas de tiempo que, en su mayoría, son incomprensibles para el observador casual, el conductor de una excavadora o el cosechador relleno un saco (aquellos en contacto más cercano con estos ecosistemas de turberas). Por lo tanto, la creciente intervención por el ser humano en la hidrología, biogeoquímica y biodiversidad de los ecosistemas de turberas, puede representar una de las amenazas más notorias para el patrimonio natural en la región de Aysén, así como en la Patagonia austral.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al programa INIA FIC: Bases Ambientales y Productivas para la Conservación y Uso Sustentable del musgo *Sphagnum* en la región de Aysén, y el aporte de María Paz y Erwin Domínguez. Aporte a BLR y RM fue por el Programa Regional ANID R17A10002. RM y Sebastián Alfaro (ayuda con la instalación de los sensores) fueron financiados por el Proyecto Laboratorio Ecoclimático, Centro CIEP. En tributo al Dr. Bill Niering, quien presentó a BLR por primera vez a las excepcionales turberas de Maine EE.UU.

BIBLIOGRAFÍA

- Campbell, D., & Jackson, R. (2004). Hydrology of Wetlands. In J. Harding, P. Mosley, C. Pearson, & B. Sorrell (eds.), *Freshwaters of New Zealand* (pp. 20.1–20.14). Christchurch, Caxton Press for the New Zealand Hydrological Society and New Zealand Limnological Society. Retrieved from https://www.canterbury.ac.nz/media/documents/science-research/ferg/FoNZ_2004_0_whole-book_web.pdf
- Clymo, R. S., Kramer, J. R., & Hammerton, D. (1984). *Sphagnum*-Dominated Peat Bog: A Naturally Acid Ecosystem [and Discussion]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 305(1124), 487–499. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/2396100>
- Damman, A., & French, T. (1987). The Ecology of Peat Bogs of the Glaciated Northeastern United States: a Community Profile. U.S. Fish and Wildlife Service, Biological Report 85 (7.16). 100 pp.
- Díaz, M. F., Larraín, J., Zegers, G., & Tapia, C. (2008). Caracterización florística e hidrológica de turberas de la Isla Grande de Chiloé, Chile. *Revista Chilena de Historia Natural*, 81(4), 455–468. <https://doi.org/10.4067/S0716-078X2008000400002>
- Dirección General de Aguas (2004). *Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Cuenca del Río Aysén*. Preparado por Cade-Idepe consultores. Retrieved from <https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2017/12/Aysen.pdf>
- Domínguez, E., & Vega-Valdés, D. (eds.). 2015. *Funciones y servicios ecosistémicos de las turberas en Magallanes*. Colección libros INIA N° 33. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Centro Regional de Investigación Kampenaik. Punta Arenas, Chile 334 pp. <http://biblioteca.inia.cl/mEDIOS/biblioteca/libros/NR40171.pdf>
- Domínguez, E., Martínez, M.P. y Henríquez, J.M. 2020. Restauración en turberas de *Sphagnum* cosechadas de la región de Aysén. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. INIA Tamel Aike. Informativo diciembre, N°56:1– 4.
- Fernández, L.D. (2021). Amebas tecadas (protistas) de las turberas de la región de Aysén, Chile. Cap. 6 p. 133 – 159. En Domínguez, E. y Martínez, M.P. (eds.). *Funciones y servicios ecosistémicos de las turberas de Sphagnum en la región de Aysén*. Colección libros INIA N° 41. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Centro Regional de Investigación Tamel Aike, Chile. Coyhaique, 344 pp.
- Fraser, L. H., & Keddy, P. A. (eds.). (2005). *The World's Largest Wetlands: Ecology and Conservation*. Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511542091>
- García, P.E., García, R.D., Marinone, M.C., Casa, V., Garraza, G.G., & Mataloni, G. (2016). Aquatic microinvertebrate abundance and species diversity in peat bogs of Tierra del Fuego (Argentina). *Limnology*, 18(1), 85–96.
- García, J., Maldonado, A., De Porras, M., Nuevo-Delaunay, A., Reyes, O., Ebensperger, C., ... Méndez, C. (2019). Early deglaciation and paleolake history of Río Cisnes Glacier, Patagonian Ice Sheet (44°S). *Quaternary Research*, 91, 1–24. <https://doi.org/10.1017/qua.2018.93>
- Garraza, G., Mataloni, G., Iturraspe, R., Lombardo, R., Camargo, S., & Quiroga, M. (2012). The limnological character of bog pools in relation to meteorological and hydrological features. *Mires and Peat*, 10(7), 1–14.
- Garreaud, R. D. (2018). Record-breaking climate anomalies lead to severe drought and environmental disruption in western Patagonia in 2016. *Climate Research*, 74(3), 217–229. <https://doi.org/10.3354/cr01505>

- Keddy, P. A. (2010). *Wetland Ecology: Principles and Conservation* (2nd ed.). Cambridge: Cambridge University Press.
- Kleinebecker, T., Hölzel, N., & Vogel, A. (2008). South Patagonian ombrotrophic bog vegetation reflects biogeochemical gradients at the landscape level. *Journal of Vegetation Science*, 19(2), 151-160. <https://doi.org/10.3170/2008-8-18370>
- Kuppers, G., Garraza, G., Quiroga, M., Lombardo, R., Marinone, M., Vinocur, A., & Mataloni, G. (2016). Drivers of highly diverse planktonic ciliate assemblages in peat bog pools from Tierra del Fuego (Argentina). *Hydrobiologia*, 773, 117-134.
- LaBaugh, J. W. (1986). Wetland ecosystem studies from a hydrologic perspective. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 22(1), 1-10. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1986.tb01853.x>
- León-Muñoz, J., Urbina, M. A., Garreaud, R., & Iriarte, J. L. (2018). Hydroclimatic conditions trigger record harmful algal bloom in western Patagonia (summer 2016). *Scientific Reports*, 8(1), 1330. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-19461-4>
- Leopold, L. B., Wolman, M. G., & Miller, J. P. (1995). *Fluvial Processes in Geomorphology*. Dover Publications. Retrieved from <https://books.google.cl/books?id=BLk-GyV8RhaYC>
- Mataloni, G., Garraza, G., & Vinocur, A. (2015). Landscape-driven environmental variability largely determines abiotic characteristics and phytoplankton patterns in peat bog pools (Tierra del Fuego, Argentina). *Hydrobiologia*, 751(1), 105-125.
- Meier, C., & Hauer, F. (2010). Strong effect of coarse surface layer on moisture within gravel bars: Results from an outdoor experiment. *Water Resources Research*, 46. <https://doi.org/10.1029/2008WR007250>
- Reid, B., & Torres, R. (2021). La conexión entre hidrología y calidad de aguas: Un factor clave en la conservación de las turberas en la región de Aysén. Cap. 4 p. 91 - 109. En Domínguez, E. y Martínez, M.P. (eds.). *Funciones y servicios ecosistémicos de las turberas de Sphagnum en la región de Aysén*. Colección libros INIA N° 41. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Centro Regional de Investigación Tamel Aike, Chile. Coyhaique, 344 pp.
- Rodríguez, A. C. (2015). *Hydrogeomorphic classification of mire ecosystems within the Baker and Pascua Basins in the Region Aysén, Chilean Patagonia: a tool for their assessment and monitoring*. Berlin: Humboldt University.
- Rydin, H., & Jeglum, J. (2013). *The biology of peatlands, second edition*. New York: Oxford University Press (The biology of habitats).
- Stivirins, N., Ozola, I., Gałka, M., Kuske, E., Al-liksaar, T., Andersen, T., & Reitalu, T. (2017). Drivers of peat accumulation rate in a raised bog: Impact of drainage, climate, and local vegetation composition. *Mires and Peat*, 19, 1-19. <https://doi.org/10.19189/MaP.2016.OMB.262>
- Vanderkerkhove, E., Bertrand, S., Reid, B., Bartels, A., & Charlier, B. (2016). Sources of dissolved silica to the fjords of northern Patagonia (44-48°S): the importance of volcanic ash soil distribution and weathering. *Earth Surface Processes and Landforms*, 41(4), 499-512. <https://doi.org/10.1002/esp.3840>
- Vega-Valdés, D., & Domínguez, E. (2015). Análisis espacial de la distribución geográfica de las Turberas de *Sphagnum* en la Región de Magallanes y la Antártica Chilena. En E. Domínguez, & D. Vega-Valdés (eds.). *Funciones y Servicios Ecosistémicos de las Turberas en Magallanes*. (Colección, p. 334). Punta Arenas, Chile: Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Centro Regional de Investigación Kampenaike. Retrieved from <http://biblioteca.inia.cl/medios/biblioteca/libros/NR40171.pdf>
- Verry, E., Boelter, D., Paivanen, J., Nichols, D., Malterer, T., & Gafni, A. (2011). Physical Properties of Organic Soils. En E. Verry *et al.* (eds.), *Peatland Biogeochemistry and Watershed Hydrology*. Taylor and Francis.

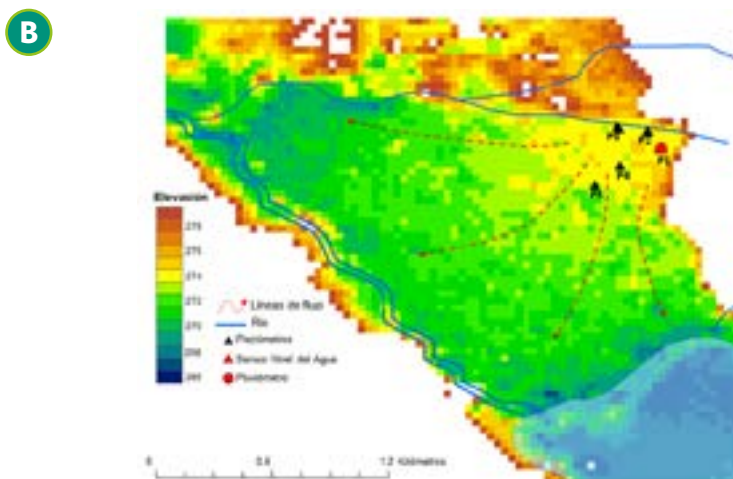
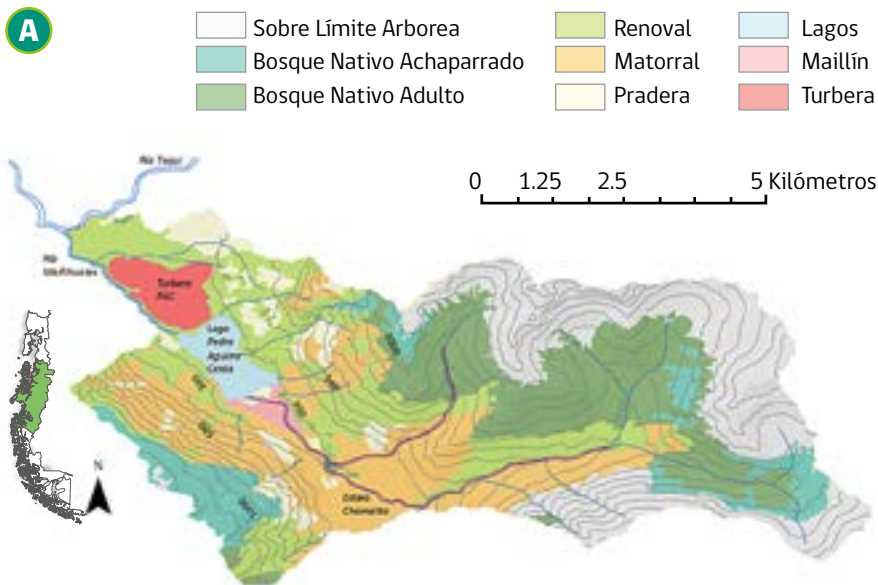


Fig. 1. Área de estudio. **(A)** La cuenca hidrográfica contribuyendo al lago y turbera PAC, y **(B)** detalles de la red de muestreo e instrumentación. Elevaciones basadas en el modelo digital ALOS (resolución 30 metros; www.earth.jaxa.jp). Nótese que la cobertura renoval según el catastro de CONAF (www.ide.cl) incluye cipresal, entre otras comunidades naturales. Estimaciones preliminares de las líneas de flujo (flechas rojas interrumpidas) basadas en la elevación superficial, sin contar con mayores antecedentes sobre la superficie potenciométrica afuera de la red de muestreo y de las condiciones límites de lagos y ríos.

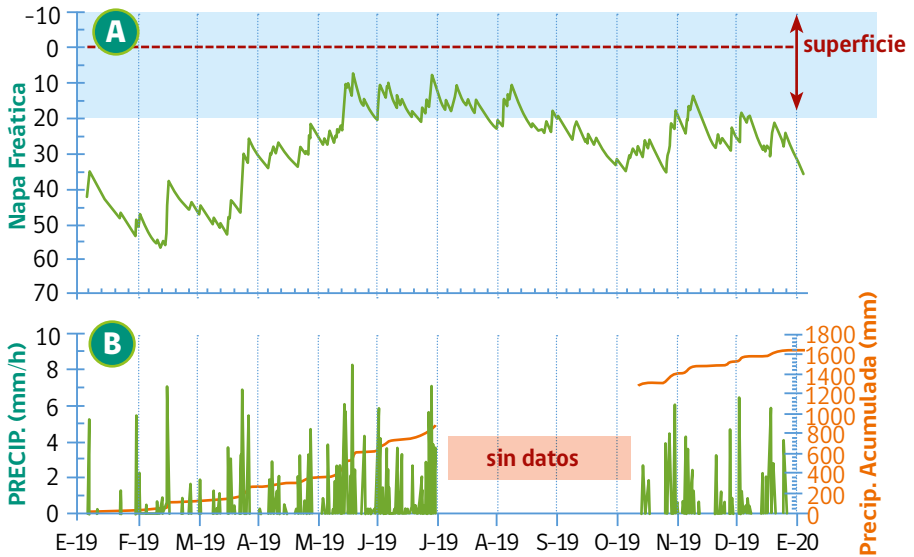


Fig. 2. Serie de tiempo hidrológica para el período enero 2019 a enero 2020. **(A)** Nivel del agua relativa a la superficie del musgo *Sphagnum* y a la ubicación del sensor (0 cm). Área sombreada representa períodos de fluctuación de nivel del agua dentro de la microtopografía del cojín y la depresión - como indicador de la formación de charcos (i.e. rango aproximado 40 cm, 10 cm sobre el nivel de la cubierta vegetal de musgo y 30 cm debajo del nivel de referencia). **(B)** Precipitación diaria (azul) y acumulada (naranja).

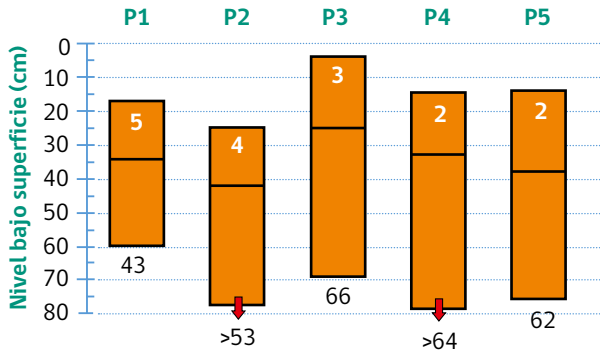
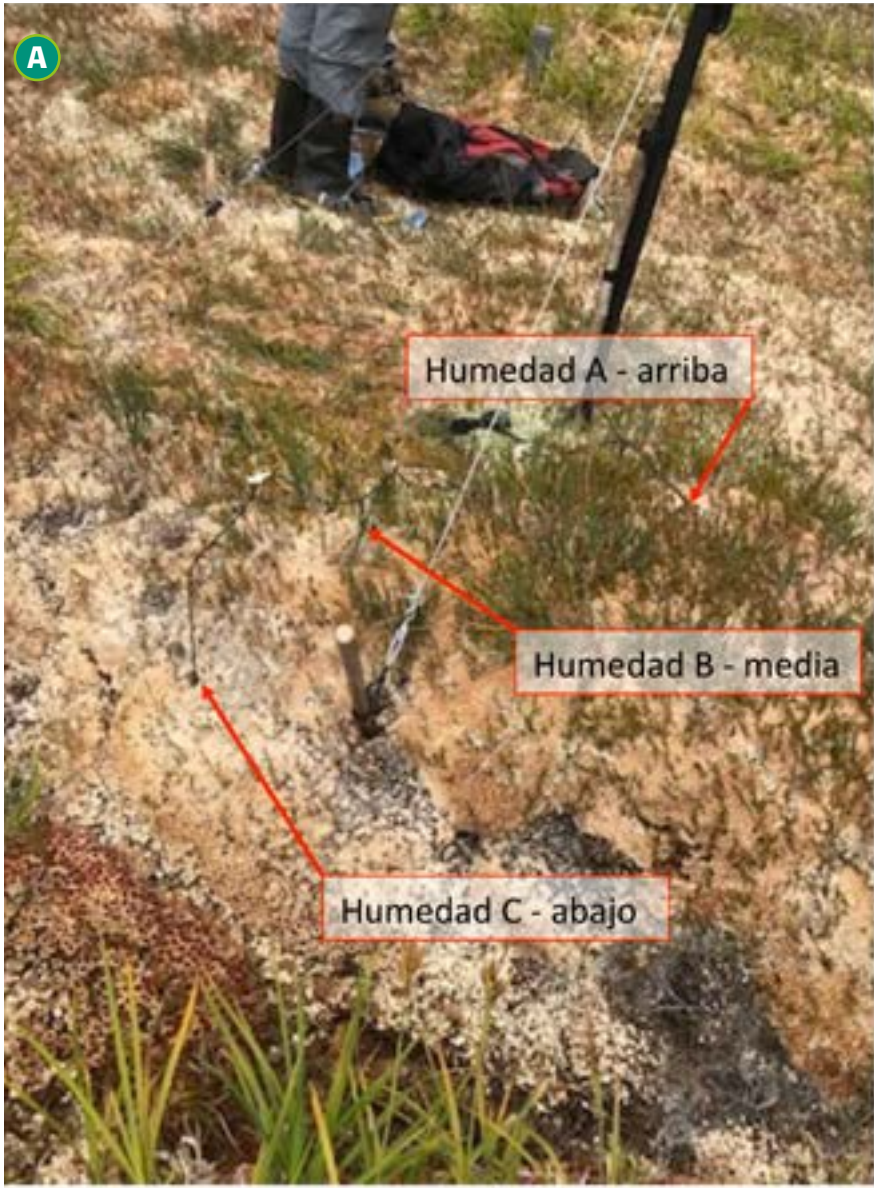


Fig. 3. Variación espacial del rango de fluctuación del nivel freático durante el ciclo anual en la turbera PAC. Las barras indican los valores medianos máximos y mínimos para los 5 grupos de piezómetros. Los números debajo de las barras señalan el rango de variación anual total en centímetros. Cuando los valores se extendieron más que el rango de los piezómetros se indican con flechas rojas (P2 y P4). Se señala en blanco, en la parte superior de cada barra, el cambio en la elevación de la superficie por la expansión del musgo relativo al datum de los piezómetros profundos.



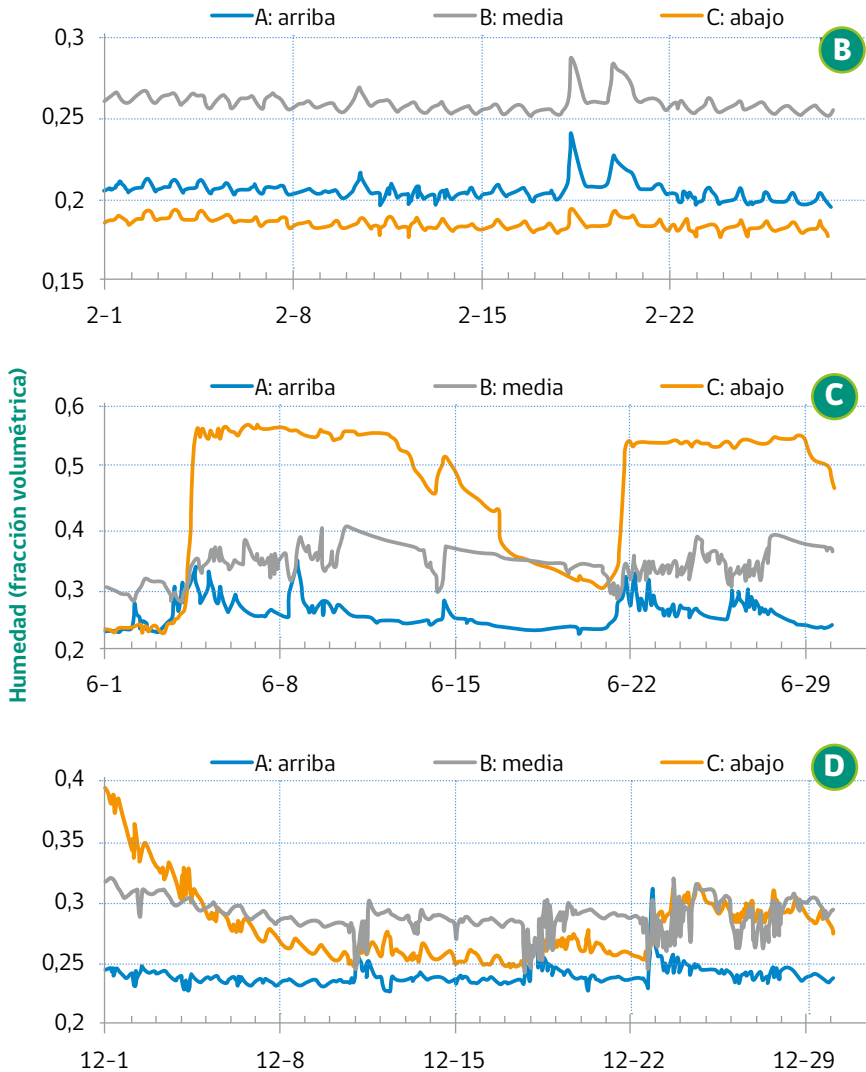


Fig. 4. Variación microtopográfica de la humedad del musgo *Sphagnum*. **(A)** Ubicación de sensores de humedad a lo largo de un gradiente vertical de 40 cm, desde un cojín de *Sphagnum/Empetrum* a un charco seco de puro *Sphagnum*. **(B)** Serie de tiempo de humedad para febrero 2019 mostrando los ciclos diarios de evapotranspiración y la respuesta a los eventos cortos de precipitación. **(C)** Serie de tiempo para junio 2019 mostrando el cambio repentino después de un período de lluvia intensa. **(D)** Serie de tiempo para diciembre 2019 mostrando el decaimiento en los niveles de humedad seguido al comienzo de los ciclos de evapotranspiración.

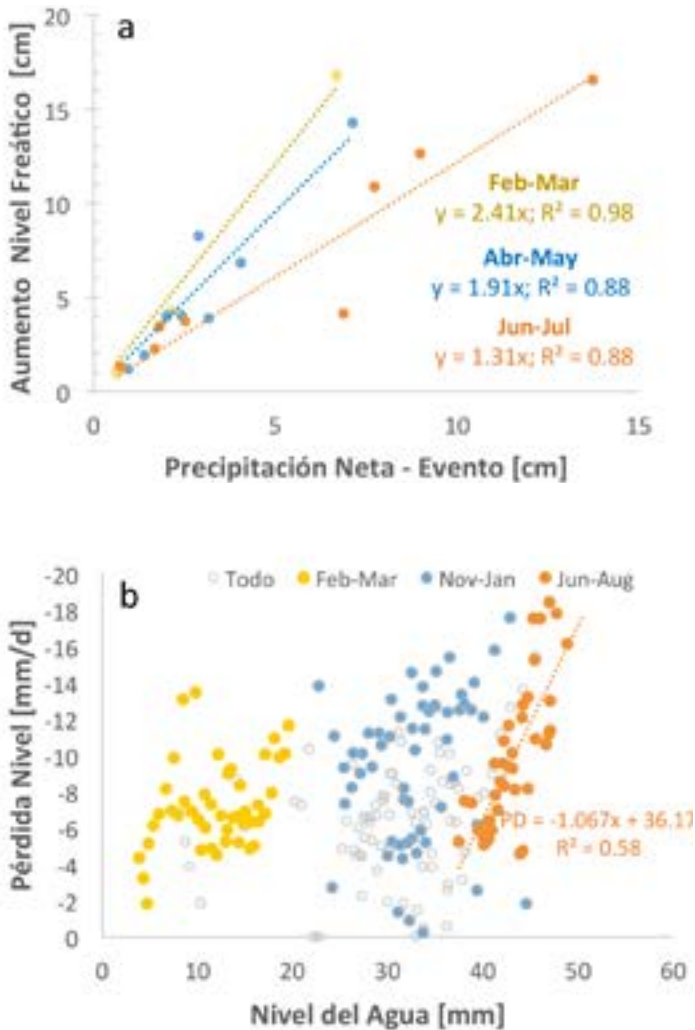


Fig. 5. Análisis de regresión para desarrollar el modelo de balance hídrico. **(a)** Variación estacional en la respuesta en el nivel freático a la precipitación neta - cada punta representando el efecto neto a precipitación acaudalada por la duración del evento (entre 1 a 5 días, corregidos por efecto del drenaje). **(b)** Relación entre el nivel freático y la tasa diaria de pérdida de nivel del agua (períodos afuera de los eventos de precipitación, no corregidos por capacidad de almacenamiento del sustrato). La tasa de drenaje en períodos de poca evapotranspiración (jun-jul) se considera como indicador de drenaje natural del sistema, mientras los otros períodos de verano y otoño muestran el efecto combinado de evapotranspiración y drenaje. El nivel freático en el eje horizontal se ha convertido en un datum arbitrario, el cero representando el nivel freático mínimo anual en el lugar del sensor.

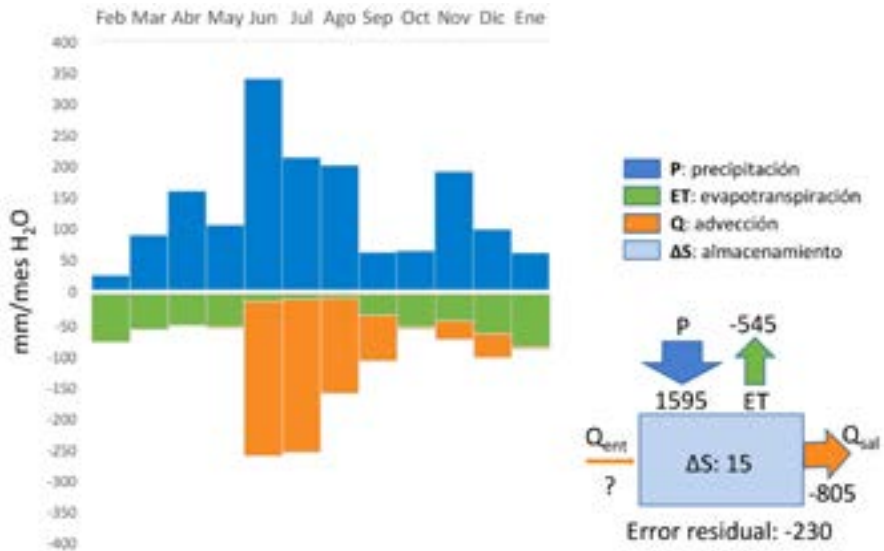


Fig. 6. Balance hídrico para la turbera PAC durante el período febrero 2019 a enero 2020. Se muestran incrementos mensuales para la precipitación (P), medida directamente y estimado, y flujos de salida por advección (Q_{sal}) y evapotranspiración (ET). El modelo tipo caja muestra los totales anuales y componentes adicionales: cambio de almacenamiento (ΔS), flujos de entrada no determinada (Q_{ent}) y error residual.

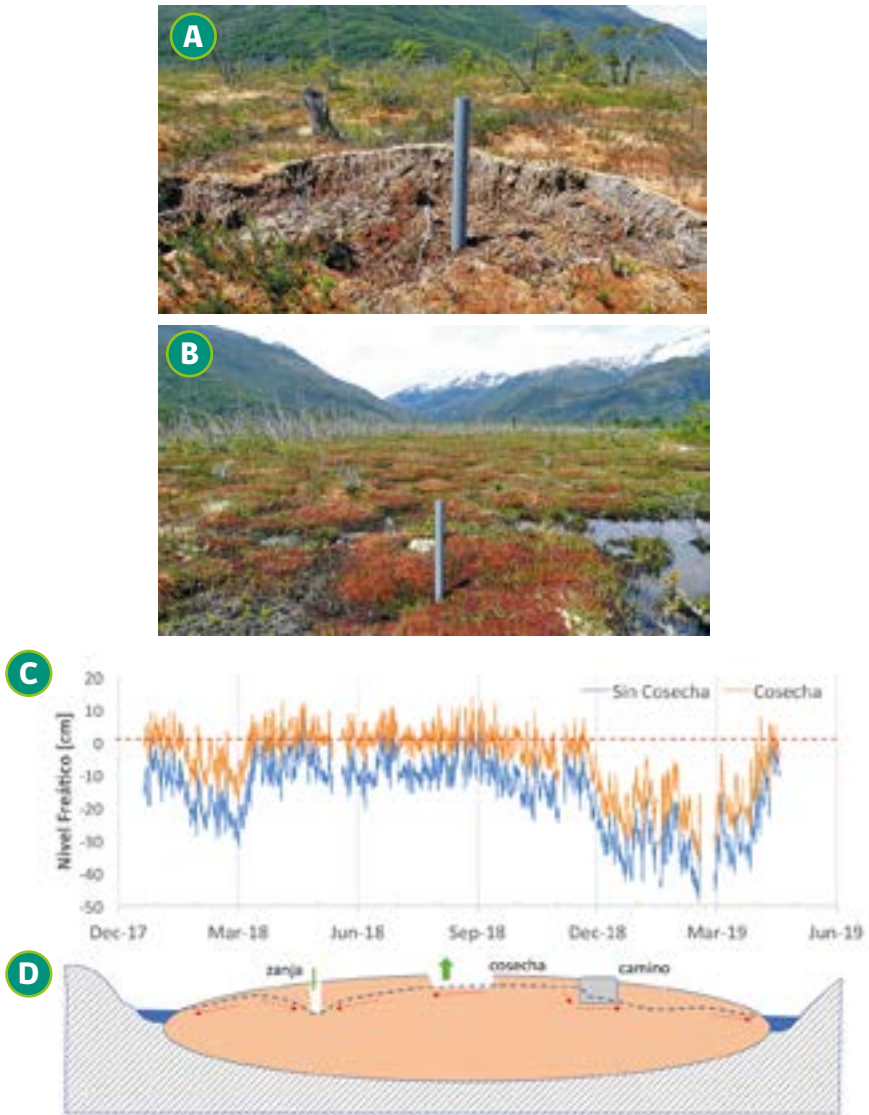


Fig. 7. Variaciones en nivel freático para una turbera intervenida sector Vargas (cerca Tortel). **(A)** Zona de cosecha donde ~ 20 cm de *Sphagnum* han sido removidos, la flecha indica el piezómetro con el sensor de nivel freático. **(B)** Zona de turbera no intervenida con piezómetro y sensor de referencia (indicado por flecha). **(C)** Variaciones en el nivel freático para la zona de cosecha y zona no intervenida, ciclo anual desde diciembre 2017 a mayo 2019. **(D)** Modelo conceptual del efecto de las intervenciones humanas como zanja, cosecha y relleno/caminos sobre el nivel freático (línea azul intermitente), direcciones de flujo (flechas rojas) y aumento de pérdida de agua por ET (flechas verdes).