**Datos de vegetación y rasgos funcionales de plantas a lo largo de un gradiente de elevación de 1314 m con historial de incendios en pastizales de puna, Perú**

**Autores**

Aud H. Halbritter, Vigdis Vandvik, Sehoya H. Cotner, William Farfan-Rios, Brian S Maitner, Sean T. Michaletz, Imma Oliveras Menor, Richard J Telford, Adam Ccahuana, Rudi Cruz, Jhonatan Sallo-Bravo, Paul Efren Santos-Andrade, Lucely L. Vilca-Bustamante, Matiss Castorena, Julia Chacon-Labella, Casper Tai Christiansen, Sandra M Duran, Dagmar D Egelkraut, Ragnhild Gya, Siri Vatsø Haugum, Lorah Seltzer, Miles R Silman, Tanya Strydom, Marcus P. Spiegel, Agustina Barros, Kristine Birkeli, Mickey Boakye, Fernanda Chiappero, Adam Chmurzynski, Josef C. Garen, Joseph Gaudard, Tasha-Leigh J. Gauthier, Sonya R. Geange, Fiorella N. Gonzales, Jonathan J. Henn, Kristýna Hošková, Anders Isaksen, Laura H. Jessup, Will Johnson, Erik Kusch, Kai Lepley, Mackenzie Lift, Trace E. Martyn, Miguel Muñoz Mazon, Sara L. Middleton, Natalia L Quinteros Casaverde, Jocelyn Navarro, Verónica Zepeda, Korina Ocampo-Zuleta, Andrea Carmeli Palomino-Cardenas, Samuel Pastor Ploskonka, Maria Elisa Pierfederici, Verónica Pinelli, Jess Rickenback, Ruben E. Roos, Hilde Stokland Rui, Eugenia Sanchez Diaz, Andrea Sánchez-Tapia, Alyssa Smith, Erickson Urquiaga-Flores, Jonathan von Oppen, and Brian J. Enquist.

**Afiliaciones**

Vea el artículo publicado en <https://doi.org/10.1038/s41597-024-02980-3>

Autores corresponsales: Aud Halbritter ([aud.halbritter@uib.no](mailto:aud.halbritter@uib.no)), Vigdis Vandvik ([vigdis.vandvik@uib.no](mailto:vigdis.vandvik@uib.no)), Brian J. Enquist ([benquist@arizona.edu](mailto:benquist@arizona.edu))

**Resumen**

La vegetación de los pastizales alpino en los Andes, también conocimos como pastizales de puna, albergan una gran biodiversidad y ecosistemas de importancia mundial que están cada vez más amenazados por el calentamiento climático y otros cambios ambientales. Los enfoques basados en rasgos funcionales de plantas pueden contribuir a entender las respuestas de la vegetación a los efectos del cambio global y sus consecuencias para el funcionamiento de los ecosistemas. Durante tres años, se recopilaron datos sobre composición de plantas vasculares, rasgos funcionales de plantas, biomasa, flujos de carbono y agua, y datos climáticos en seis sitios a lo largo de un gradiente de elevación de 1314 m en pastizales de puna de los Andes peruanos. Los datos se tomaron en la estación húmeda y seca y en parcelas con diferentes historiales de incendios. Seleccionamos rasgos funcionales asociados con el uso de los recursos, el crecimiento y las estrategias ecológicas (área foliar, masa seca/húmeda de las hojas, grosor foliar, área foliar específica, contenido de materia seca de las hojas, contenido de C, N, P de las hojas, e isótopos de C y N). Los datos de rasgos contienen 3,665 registros de plantas de 145 taxones, 54,036 mediciones de rasgos (lo que aumenta la cobertura de datos de rasgos de la flora regional en un 420%) que cubren 14 rasgos y 121 taxones de plantas (aproximadamente el 40% de los cuales no tienen datos previos de rasgos disponibles públicamente) en 33 familias.

**Antecedentes & resumen**

Las montañas cubren el 27% de la superficie terrestre del mundo y desempeñan un papel clave al albergar y mantener la biodiversidad global y brindar funciones ecosistémicas y beneficios indispensables para las personas1–4. Las regiones montañosas de gran altitud en todo el mundo albergan ecosistemas alpinos característicos5,6 y, estos ecosistemas se encuentran especialmente constreñidos por las temperaturas, lo que los convierte en susceptibles a los efectos del cambio climático, especialmente porque los climas a gran elevación se están calentando más rápido que los promedios globales7. Como resultado, los ecosistemas alpinos y su biodiversidad están particularmente amenazados por el cambio climático, como lo demuestran los cambios continuos en la distribución de las especies, la fenología, las comunidades ecológicas, los ciclos del carbono, los nutrientes y el agua8,9. El conocimiento de las distribuciones de la biota y el funcionamiento de los ecosistemas alpinos es crucial para predecir y mitigar los futuros impactos del cambio global en los ecosistemas de montaña, así como para las sociedades humanas que dependen de estos sistemas, de sus funciones y servicios ecosistémicos2,3.

Los rasgos funcionales pueden ayudar a mejorar nuestra comprensión mecanicista de las respuestas de las especies y el funcionamiento de los ecosistemas a los cambio ambientales, al vincular los fenotipos de los individuos a la variación ambiental10,11. Por lo tanto, los enfoques basados en rasgos pueden proporcionar información que ayude a comprender y predecir cómo las especies y las comunidades de plantas responden a los cambios ambientales s y cómo los cambios en las comunidades vegetales, a su vez, impactan el funcionamiento de los ecosistemas12–14. Por ejemplo, los rasgos pueden ayudar a entender el impacto del cambio climático en la biodiversidad y pueden dilucidar mecanismos de retroalimentación entre los ecosistemas y los ciclos globales del carbono, los nutrientes y el agua15. Por ejemplo, cuantificar de forma explícita de la variación de rasgos a nivel intraespecífico puede proporcionar información valiosa sobre los procesos ecológicos y evolutivos —incluyendo las respuestas de las comunidades y poblaciones, la plasticidad y las adaptaciones locales— que sustentan los patrones que observamos como consecuencia de los impactos del cambio climático16–18. Los rasgos asociados con el tamaño de la planta19 y con la teoría del “leaf economic spectrum” (un conjunto de rasgos correlacionados que caracterizan a las especies a lo largo de un eje de tasas de captación de nutrientes y tasas fotosintéticas de "rápidas" a "lentas" y básicamente una estrategia de vida basada en un uso determinado de los recursos)20-22, son particularmente relevantes para entender las respuestas de las especies y las comunidades de plantas a los efectos del calentamiento climático.

Los pastizales altoandinos de puna y páramo cubren un área de 470,000 km2, y son un punto caliente de biodiversidad global, proporcionando importantes servicios ecosistémicos a nivel global y regional, como el suministro de agua y el secuestro de carbono23–26. Debido a una temporada de crecimiento continuo y frecuentes anegamientos, los ecosistemas de pastizales alpinos tropicales húmedos, como la puna, son depósitos de carbono de importancia mundial que acumulan más de 250 Mg ha-1 de C27,28. La gente ha utilizado los pastizales de puna y páramo para aprovisionamiento y para diferentes servicios culturales, incluida la caza, el pastoreo de ungulados domesticados, el transporte y la producción de cultivos, desde la época preincaica29. Estos ecosistemas y sus funciones ecosistémicas y beneficios se encuentran ahora amenazados por el cambio climático junto con las crecientes presiones humanas asociadas con el cambio de usos del territorio y otros motores del cambio global23,25,30.

Si bien las proyecciones del cambio climático son inciertas para las regiones de gran altitud de los Andes, se espera que continúe el calentamiento y que aumente el riesgo de experimentar temperaturas extremas7, que podrían ocasionar cambios en todo el ecosistema altoandino, incluyendo los pastizales de puna y páramo25, 26,31. En particular, es probable que el avance de la línea de árboles reduzca el área de vegetación de pastizales, aumentando así la pérdida de biodiversidad y extinción de taxones endémicos23. Los cambios en los patrones de precipitación y el aumento de la evapotranspiración probablemente aumentarán la liberación de carbono del suelo y disminuirá el almacenamiento de carbono orgánico subterráneo, lo que a su vez afectará el suministro de agua23. La agricultura y la ganadería podrían expandirse hacia elevaciones mayores, lo que podría aumentar la frecuencia de los incendios debido a las quemas que habitualmente se emplean para mejorar el forraje para el ganado32,33. Sin embargo, existen datos empíricos limitados sobre el impacto combinado del cambio climático y los cambios de usos del territorio en los pastizales de puna y páramo y sobre su biodiversidad y funcionamiento26.

Este artículo presenta una colección completa de datos de rasgos funcionales de plantas recopilados en pastizales de puna con diferentes historiales de incendios a lo largo de un gradiente de elevación de 1314 m desde 3072 a 4386 m sobre el nivel del mar (s.n.m.) en Perú. En seis sitios de estudio y 12 tratamientos únicos de elevación e historial de incendios (Fig. 1), se recopilaron datos sobre rasgos funcionales estructurales, de estrategia del uso de los recursos en las hojas, de composición química foliar, así como datos sobre la composición de la comunidad vegetal asociada: riqueza de especies, cobertura vegetal, altura y biomasa. También se aportan datos sobre flujos ecosistémicos, en particular flujos de carbono y agua, y datos de microclima en cada uno de los sitios y tratamientos, durante las estaciones húmedas y secas entre 2018 y 2020 (Tabla 1). Estos datos proporcionan una base para comprender cómo la variación en la elevación y el historial de incendios afectan los rasgos de las plantas y la dinámica de los ecosistemas en los pastizales de la puna, un ecosistema crucial para la biodiversidad y los servicios ecosistémicos en los Andes. Esto proporciona una línea base para futuras investigaciones destinadas a monitorear los cambios e informar las estrategias de conservación, particularmente frente al cambio climático y las perturbaciones inducidas por el hombre en estos ecosistemas sensibles. Además, esperamos que esta serie de datos de una región históricamente poco estudiada sean valiosos para comparaciones globales de vegetación alpina.

Recopilamos rasgos funcionales de plantas para el 73.8 % de las especies encontradas en las comunidades de plantas de pastizales de la Puna en nuestros sitios de estudio, incluyendo datos sobre la variación de rasgos a nivel intraespecífico para las especies dominantes. El conjunto de datos resultante (Tabla 1) abarca 54,036 mediciones de rasgos de 121 taxones, lo que amplía los datos de rasgos existentes de la flora regional en aproximadamente 36 especies adicionales y aumenta el número de mediciones de rasgos únicos de esta flora regional en un 420 %, en relación con la base de datos pública TRY database34. Nuestros datos se obtuvieron como parte de dos cursos internacionales de rasgos funcionales de plantas35 (PFTC3 y PFTC5) para estudiantes internacionales. Dichos cursos abarcan conocimientos teóricos, conceptuales y metodológicos sobre la ecología basada en rasgos36,37. También se aportan datos de campañas adicionales (PUNA) que permiten aumentar los datos a lo largo de años y estaciones. Los datos son comparables con los datos de los cursos PFTC en China38, Svalbard y Noruega y con los datos que se obtendrán en futuras ediciones de los cursos (ver <https://plantfunctiontraitscourses.w.uib.no/>), proporcionando un recurso único para la evaluación regional integrada de rasgos funcionales, el ensamblaje de comunidades y el funcionamiento de los ecosistemas, y para futuros estudios comparativos interregionales y globales.

**Tabla 1. Descripción y ubicación de los conjuntos de datos sobre rasgos funcionales de plantas de pastizales de puna y datos asociados**. *Esta tabla resume información sobre el número de conjunto de datos, las variables de respuesta, el número de observaciones, el rango temporal de los datos, la ubicación de los datos primarios, los datos finales publicados y el código para extraer y limpiar datos de los datos primarios*.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Conjunto de datos** | **Variable de respuesta** | **Número de puntos de datosa y taxab** | **Rango temporal** | **Citación de datos sin procesar, datos limpios y código** |
| i | Composición de la comunidad vegetal | 3,665a  145b | 2018 - 2020 | Datos sin procesar[39](https://paperpile.com/c/dUbnVn/yqWjX), datos limpios[39](https://paperpile.com/c/dUbnVn/yqWjX), código[40](https://paperpile.com/c/dUbnVn/vXIWA) |
| ii | Altura y estructura de la vegetación | 1,627a | 2018 - 2020 | Datos sin procesar[39](https://paperpile.com/c/dUbnVn/yqWjX), datos limpios[39](https://paperpile.com/c/dUbnVn/yqWjX), código[40](https://paperpile.com/c/dUbnVn/vXIWA) |
| iii | Rasgos funcionales de la planta | 54,036a\*  121b | 2018 - 2020 | Datos sin procesar[39](https://paperpile.com/c/dUbnVn/yqWjX), datos limpios[39](https://paperpile.com/c/dUbnVn/yqWjX), código[40](https://paperpile.com/c/dUbnVn/vXIWA) |
| iv | Biomasa aérea | 129a | 2019 | Datos sin procesar[39](https://paperpile.com/c/dUbnVn/yqWjX), datos limpios[39](https://paperpile.com/c/dUbnVn/yqWjX), código[40](https://paperpile.com/c/dUbnVn/vXIWA) |
| v | Flujos ecosistémicos | Flujo de ecosistema CO2: 609a  Respiración de suelo: 455a  Evapotranspiración: 609a | 2018 - 2020 | Datos sin procesar[39](https://paperpile.com/c/dUbnVn/yqWjX), datos limpios[39](https://paperpile.com/c/dUbnVn/yqWjX) |
| vi | Clima | 761,624a | 2019 - 2020 | Datos sin procesar[39](https://paperpile.com/c/dUbnVn/yqWjX), datos limpios[39](https://paperpile.com/c/dUbnVn/yqWjX), código[40](https://paperpile.com/c/dUbnVn/vXIWA) |

**Métodos**

***Gestión de datos y flujos de trabajo.*** Nuestro enfoque para la planificación, ejecución, presentación de informes y gestión de la investigación sigue enfoques de buenas prácticas para una ciencia abierta y reproducible, como se describe y recomienda, por ejemplo, en 41–44. Específicamente, utilizamos estándares aprobados por la comunidad para el diseño experimental y la recopilación de datos, limpiamos y administramos los datos mediante un flujo de trabajo de datos totalmente programado y reproducible, y depositamos datos y códigos en repositorios abiertos. Para más detalles, consulte la Fig. 2 en 45. Nuestros datos de pastizales de puna constan de seis tablas de datos principales vinculadas por claves relacionadas con el tiempo, lugares de muestreo, tratamientos, especies, parcelas replicadas e individuos (Fig. 2).

***Selección del sitio de investigación e información básica del sitio.*** El estudio se realizó en los pastizales de puna de los Andes del sureste peruano, en la zona de amortiguamiento del Parque Nacional Manu, Departamento del Cusco, provincia de Paucartambo, distrito de Challabamba, Perú. Los pastizales de puna se encuentran por encima del límite superior del bosque nublado. En el límite entre el bosque nublado y la pradera de puna (c. 3000 m.s.n.m.), la precipitación anual es de aproximadamente 1560 mm y la temperatura media anual del aire es de 11.8 °C46. La estación seca en estos sistemas es entre mayo/junio y agosto/septiembre, y aunque llueve poco, la niebla del bosque lluvioso proporciona abundante humedad. Los pastizales de puna están dominados por pastos formadores de matas, siendo los géneros dominantes *Calamagrostis*, *Stipa* y *Festuca*47. La puna es un paisaje cultural tradicionalmente utilizado para el pastoreo de ganado. Si bien no hay pastoreo dentro del Parque Nacional del Manu, las comunidades locales circundantes comúnmente usan el área de amortiguamiento para el pastoreo de ganado y, a veces, el ganado ingresa y pasta dentro del parque28. Los suelos tienen capas orgánicas profundas27,48 (20 cm en promedio, pero pueden tener hasta 110 cm de profundidad, Oliveras observación personal).

Seleccionamos seis sitios a lo largo de un gradiente altitudinal sobre el límite arbóreo del bosque nublado (Fig. 1), y en marzo del 2019, establecimos sitios en Wayqecha (WAY; 3101 m.s.n.m.), Acjanaco (ACJ; 3468 m.s.n.m.), Pilco Grande (PIL; 3676 m.s.n.m.), Tres Cruces (TRE 3715 m.s.n.m.) y Quello Casa (QUE; 3888 m.s.n.m.). WAY pertenece al Área de Conservación Privada Wayqecha la cual es administrada por ACCA47, mientras que todos los demás sitios están ubicados dentro del área protegida del Parque Nacional Manu. En abril del 2019, establecimos un sexto sitio en Ocoruro (OCC; 4383 m.s.n.m.), ubicado en la provincia de Calca, fuera del Parque Nacional Manu.

A screenshot of a computer game

Description automatically generated

**Fig. 1.** Sitios experimentales y tratamientos a lo largo de un gradiente de elevación en los pastizales de Puna en Perú. La tabla insertada muestra los conjuntos de datos que están disponibles para cada sitio (cuadros de verde a rojizo), tratamiento (cuadrados amarillos, marrones y azules dentro de los sitios) y estacionalidad (rectángulos oscuros versus rectángulos descoloridos más claros dentro de los cuadrados). Es importante destacar que en QUE solo hay una casilla porque el sitio se quemó en noviembre de 2019 y, por lo tanto, las parcelas cambiaron de quemadas a quemadas recientemente. Los conjuntos de datos se describen con más detalle en la Tabla 1 y la Fig. 2. El mapa insertado en la parte superior derecha muestra la ubicación del Parque Nacional Manu en Perú.

**Tratamientos de incendios.** En cada sitio, seleccionamos áreas que diferían en el tiempo transcurrido desde la última quema: Ninguna quema en los últimos 20 años (C; control), 11 a 15 años desde la quema (B; quema antigua) y < 3 años desde la quema (NB; nueva quema) y quema experimental (BB), ver47,49,50 (Fig. 1). Todos los sitios excepto QUE tienen parcelas de control, todos los sitios excepto TRE y OCC tienen tratamiento quemado antiguo, todos los sitios excepto OCC, QUE y WAY tienen las áreas quemadas recientemente. También tomamos muestras de un área en PIL que fue quemada experimentalmente en el 2006 y luego nuevamente en 2013 (BB; quema experimental). Es importante tener en cuenta que el sitio QUE se quemó en noviembre de 2019 y, por lo tanto, pasó de ser un sitio quemado a uno recientemente quemado.

***Selección de parcelas y colección de datos***. Instalamos cinco parcelas de 1.2 x 1.2 m dentro de cada tratamiento de quema en cada sitio (es decir, n = 5 - 15 por sitio). En PIL, se instalaron tres parcelas en el área quemada experimentalmente (BB) por limitaciones de espacio. Marcamos las esquinas de cada parcela de forma permanente con palos de metal. Los datos se recolectaron entre marzo de 2018 y marzo de 2020, durante los dos cursos de rasgos funcionales de plantas con múltiples campañas adicionales de recolección de datos para permitir la recolección de datos durante la estación húmeda (marzo de 2018 y 2020, abril de 2019) y la estación seca (julio y noviembre de 2019). El número total de parcelas es de 63.

***Identificación de especies, taxonomía y flora***. Todas las especies muestreadas para el estudio de la vegetación y rasgos funcionales fueron identificadas en el campo. Se recolectaron pliegos de plantas para controles de identificación utilizando la literatura especializada51–53, los especímenes que fueron difíciles de identificar fueron llevados a la Universidad del Cusco para que uno de los coautores (LLVB) los identificara y depositara los pliegos en el herbario. Algunas especies solo se identificaron a nivel de género o familia debido a dificultades para identificar graminoides estériles o plantas jóvenes debido a quemas recientes. Todos los nombres de taxones se estandarizaron utilizando el paquete TNRS R54 basado en las bases de datos Taxonomic Name Resolution Service55, Tropicos56, The Plant List57 y USDA58.

A screenshot of a computer

Description automatically generated

**Fig. 2.** Estructura de datos del gradiente de elevación en los pastizales de Puna en Perú. Los cuadros representan tablas de datos que incluyen la composición de la comunidad (conjunto de datos i), altura y estructura de la comunidad (conjunto de datos ii), rasgos funcionales de las plantas (conjunto de datos iii), biomasa (conjunto de datos iv), flujos de ecosistemas (conjunto de datos v) y clima (conjunto de datos vi). Los nombres de las tablas de datos individuales se proporcionan en el área del título y una selección de las variables principales está disponible dentro de las tablas en las listas internas. Para conjuntos completos de variables para cada conjunto de datos, consulte las Tablas 2 a 7. Tenga en cuenta que todas las variables en negrita se comparten entre varias tablas y se pueden usar como claves para unirlas.

**Conjunto de datos (i): Muestreo de composición de comunidades vegetales**

Todas las especies de plantas vasculares en cada parcela fueron evaluadas en marzo de 2018 y se volvieron a evaluar en abril, julio y noviembre de 2019. Como algunos sitios recientemente quemados se instalaron en 2019 (ACJ, TRE, QUE), estos tuvieron menos evaluaciones y fueron evaluados adicionalmente en marzo de 2020. Utilizamos un marco de 1.2 x 1.2 m superpuesto con una cuadrícula de 25 subparcelas. Durante cada evaluación (muestreo), estimamos el porcentaje de cobertura de cada especie en la parcela al 1% más cercano, y también registramos si las especies presentes eran fértiles (es decir, contenían botones, flores, semillas) y la ocurrencia de plántulas. Tenga en cuenta que la cobertura total en cada parcela puede exceder 100 debido a la estratificación de la vegetación. Las identificaciones se verificaron con la literatura disponible y por expertos (ver arriba).

**Conjunto de datos (ii): Muestreo de estructura y altura de la vegetación**

Los datos de la estructura de la vegetación para cada una de las 63 parcelas de vegetación se registraron en cada campaña de composición de la comunidad vegetal (ver arriba). La altura mínima, mediana y máxima de la vegetación y la profundidad de las briófitas se midieron utilizando una regla en cinco puntos espaciados uniformemente por parcela. También registramos el porcentaje total de cobertura de gramíneas, hierbas, arbustos, briofitas, líquenes, hojarasca, suelo y rocas desnudas.

**Conjunto de datos (iii): Muestreo de rasgos funcionales de plantas y análisis de laboratorio**

*Muestreo a nivel de parcela para análisis de rasgos foliares.* Recolectamos plantas enteras para análisis de rasgos foliares de todos los tratamientos dentro de cada sitio en múltiples campañas en marzo de 2018 y abril de 2019, durante la estación húmeda, y julio y noviembre de 2019, durante la estación seca, excepto en el sitio de OCC, donde las plantas solo se recolectaron una vez en abril de 2019. En cada campaña, a ser posible, tomamos muestras de rasgos de hasta cinco individuos de todas las especies presentes en cada parcela. El muestreo se realizó fuera de las parcelas experimentales, dentro de un transecto de 50 m a cada lado de la parcela. Para evitar muestreos repetidos de un solo clon, seleccionamos individuos visiblemente separados de otras ramas de esa especie. De acuerdo con los estándares comunitarios59, las campañas de rasgos consecutivas apuntaron a obtener datos de rasgos de especies que conforman acumulativamente al menos el 80% de la cobertura vegetal, y como estábamos interesados en la variación de rasgos intraespecíficos, intentamos lograrlo con mediciones de rasgos locales en parcelas control y quemadas en cada sitio durante la temporada seca y húmeda. En marzo de 2020, recopilamos rasgos adicionales de los sitios según fue necesario, centrándonos en las parcelas recientemente quemadas en ACJ, TRE, QUE, y las parcelas de control asociadas en ACJ y TRE porque se instalaron más tarde y, por lo tanto, contenían menos datos de rasgos (ver arriba).

*Muestreo de variabilidad intraespecífica de rasgos foliares*. Para explorar más a fondo la variabilidad de los rasgos a nivel intraespecífico e intraindividuales, recolectamos hojas de varios individuos de especies seleccionadas en tres sitios a lo largo del gradiente de elevación en los tratamientos de control en 2020 (WAY, AJC y TRE). Para ello seleccionamos seis especies (*Halenia umbellata*, *Lachemilla orbiculata*, *Paspalum bonplandianum*, *Rhynchospora macrochaeta*, *Gaultheria glomerata* y *Vaccinium floribundum*) que abundaban a lo largo de todo el gradiente. En cada sitio, se eligieron al azar dos individuos en una banda que abarcaba de 5 a 10 m a la izquierda y a la derecha de cada parcela, lo que resultó en 10 individuos por especie y por sitio. Cuando no se pudieron muestrear dos individuos en cada parcela, se muestrearon de otras parcelas en el mismo sitio, con el objetivo de evaluar 10 individuos por sitio, pero menos individuos cuando esto no fue posible. Todos los individuos de la misma especie estaban separados por al menos dos metros para garantizar que el mismo individuo genético no fuera muestreado varias veces.

*Procesamiento y almacenamiento*. Los individuos de plantas muestreados se etiquetaron, se colocaron en bolsas de plástico con toallas de papel húmedas y se almacenaron en oscuridad a 4 °C hasta su posterior procesamiento. El procesamiento se realizó generalmente a más tardar un día después de la recolección en el campo, pero algunas muestras se almacenaron hasta por 4 días. Antes del procesamiento, se verificó la identificación de la planta (ver arriba). Se tomaron muestras de cada individuo hasta tres hojas sanas y completamente expandidas. Las hojas se cortaron lo más cerca posible del tallo, incluyendo la lámina, el pecíolo y las estípulas cuando estaban presentes. Para las especies de *Lycopodiella*, *Lycopodium* e *Hypericum*, que tienen hojas delgadas y en forma de aguja, y para las especies de *Baccharis*, que tienen hojas en forma de alas unidas al tallo, se cortó una sección del tallo de 8 a 11 cm, incluyendo los brotes laterales cuando estuvieran presentes, y todas las hojas de esta sección fueron eliminadas y utilizadas en una muestra. Para *Vaccinium floribundum*, que tiene hojas diminutas, tomamos muestras de 5 a 10 hojas por muestra. El procesamiento adicional se completó dentro de las 24 horas (ver más abajo).

*Mediciones de rasgos funcionales de plantas*. Medimos 14 rasgos funcionales foliares que están relacionados con las tasas potenciales de crecimiento y la tolerancia ambiental de las plantas, siguiendo los protocolos estandarizados en Pérez-Harguindeguy et al.59: altura de la planta (cm), masa húmeda de la hoja (g), masa seca de la hoja ( g), área foliar (cm2), grosor foliar (mm), contenido de materia seca de la hoja (LDMC, g/g), área foliar específica (SLA, cm2/g), contenido en carbono foliar (C, %), nitrógeno (N, % ), fósforo (P, %), relación carbono-nitrógeno (C:N), relación nitrógeno-fósforo (N:P), relación de isótopos carbono13 (δ13C, ‰) y relación de isótopos nitrógeno15 (δ15N, ‰). El procesamiento inicial de las hojas se realizó en la Estación Biológica de Wayqecha en la Provincia de Paucartambo, Región Cusco, Perú. El procesamiento se realizó en los siguientes pasos:

1. **Altura de la planta.** Antes de recolectar las hojas en el campo, a cada individuo se le midió la altura en pie (medida en cm) desde el suelo hasta el órgano vegetativo más alto sin estirar, para los graminoides medimos tanto la altura en pie como la altura estirada, que equivale a la longitud de la hoja (la altura estirada se midió en el campo o en el laboratorio después).

2. **Masa húmeda de la hoja.** Cada hoja (incluyendo lámina, pecíolo y estípulas cuando estaban presentes) se pesó con una precisión de 0.001 g para evaluar la masa fresca.

3. **Área foliar.** Las hojas (incluidos el limbo, el pecíolo y las estípulas cuando estaban presentes) se secaron cuidadosamente con toallas de papel, se aplanaron (doblaron hasta su área máxima) y se escanearon con un escáner de superficie plana modelo Canon LiDE 220 a 300 dpi. Las hojas que crecieron naturalmente plegadas (por ejemplo, algunas especies de *Agrostis*, *Calamagrostis*, *Carex*, *Festuca* y *Trichophorum*) se escanearon como tales; posteriormente, el área se multiplicó por dos durante el procesamiento de datos. Cualquier borde oscuro en los escaneos se recortó automáticamente durante el procesamiento de datos. El área foliar se calculó utilizando ImageJ 60 y el paquete LeafArea61.

4. **Grosor de la hoja**. El espesor de la hoja se midió en tres lugares de cada lámina con un micrómetro digital (Micromar 40 EWR, Mahr) y se promedió para análisis posteriores. Cuando fue posible, las tres medidas se tomaron en el nervio medio de la hoja y en la lámina con y sin nervios. No se midió el espesor del pecíolo ni de la estípula.

5. **Masa seca de la hoja**. Las hojas (incluyendo la lámina, el pecíolo y las estípulas cuando estaban presentes) se secaron durante al menos 72 horas a 65 °C antes de medir la masa seca con una precisión de 0.0001 g.

6. Calculamos el **área foliar específica** (SLA) dividiendo el área foliar por la masa seca y el contenido de **materia seca de las hojas** (LDMC) como la relación entre la masa seca y húmeda de las hojas.

7. **Estequiometría foliar e isótopos**. Se realizaron ensayos de estequiometría foliar y de isótopos (P, N, C, δ15N y δ13C) para un subconjunto de hojas. Estas hojas se almacenaron en un horno de secado a 65 °C y luego se transportaron a la Universidad de Arizona para su análisis. Primero, cada hoja (incluyendo la lámina, el pecíolo y las estípulas cuando estaban presentes) se molió hasta obtener un polvo fino y homogéneo. La concentración de fósforo total se determinó mediante oxidación de persulfato seguida de la técnica de acidmolybdate (APHA 1992), y luego se midió colorimétricamente la concentración de fósforo con un espectrofotómetro (TermoScientifc Genesys20, EE. UU.). Los isótopos de nitrógeno, carbono, nitrógeno estable (δ15N) y carbono (δ13C) se midieron en el Laboratorio de Isótopos Ambientales del Departamento de Geociencias de la Universidad de Arizona. Se quemaron muestras de 1.0 ± 0.2 mg en un analizador elemental Costech y se realizaron mediciones de relación de gases de flujo continuo en un espectrómetro de masas (Finnigan Delta PlusXL). La estandarización se basó en acetanilida para la concentración elemental, NBS-22 y USGS-24 para δ13C, y OIEA-N-1 y OIEA-N-2 para δ15N. La precisión es de al menos ± 0.2 para δ15N (1 s), según estándares internos repetidos. Además de las mediciones, también se informan las relaciones entre C:N y N:P. Al momento de esta publicación, se han procesado 754 hojas para rasgos químicos. Hay más hojas disponibles y se agregarán al conjunto de datos a medida que se procesen.

**Conjunto de datos (iv): Biomasa aérea**

Los datos de biomasa se recopilaron en abril de 2019 de parcelas adicionales establecidas en el área de control y quema en WAY y ACJ, el área de control y recientemente quemada en TRE, el área quemada en PIL y QUE, con un total de 8 parcelas. En cada sitio y tratamiento, se cosechó biomasa de una parcela de 1.2 x 1.2 m cerca de las parcelas de vegetación existentes para un total de 8 parcelas. Para cada parcela, se tomaron muestras de la altura y la estructura de la vegetación como se describe anteriormente (ver conjunto de datos ii). Luego se cortó toda la vegetación aérea de la parcela a 2-5 cm del suelo y se clasificó en grupos funcionales (graminoides, herbáceas, leñosas, helechos, musgos y briofitas). La biomasa se secó a 60 °C durante 48 horas y se pesó.

**Conjunto de datos (v): Flujos del ecosistema (CO2 y H2O)**

*Mediciones de flujo a nivel de parcela.* Utilizamos una instalación denominada “de tienda o carpa” que asemeja un sistema cerrado para medir el CO2 que se absorbe o libera por el ecosistema y evaluar así el intercambio neto del ecosistema (NEE), la respiración del ecosistema (Reco) y la productividad primaria bruta (GPP), y los flujos de H2O del ecosistema para estimar la evapotranspiración (ET) y la evaporación (E). Cada medición de flujo consiste en una medición pareada de luz/oscuridad a partir de la cual calculamos los flujos del ecosistema siguiendo a Sloat et al.62. Brevemente, los flujos de CO2 en condiciones de luz miden el NEE, que es el resultado de la fotosíntesis y la respiración del ecosistema (Reco:; incluye a su vez la respiración de las plantas y del suelo), mientras que los flujos en condiciones de oscuridad miden únicamente la Reco (nuevamente, tanto la planta como el suelo). Como NEE = GPP - Reco, estas medidas se pueden utilizar para calcular GPP63. De manera similar, el aumento de vapor de agua en la tienda durante las mediciones se debe tanto a la evaporación (E) como a la transpiración (T) de agua. Tenga en cuenta que “E” dentro de la tienda refleja la evaporación de agua al aire desde fuentes como el suelo, el dosel y cualquier superficie de agua dentro de la tienda, mientras que “T” refleja el movimiento del agua dentro de las plantas y la posterior pérdida de agua en forma de vapor a través de los estomas. Por lo tanto, los flujos de H2O en condiciones de luz reflejan ET, mientras que las mediciones en condiciones de oscuridad representan solo E, y como ET = E + T, estas tasas se pueden usar para calcular T63.

La configuración del sistema cerrado utilizado para estas mediciones se construyó utilizando un marco de PVC en forma de cubo (para una parcela de 1.2 x 1.2 m; con un volumen de 2.197 m3). El cubo de PVC se cubrió con una tienda de campaña ajustada hecha de tela translúcida de polietileno ripstop que transmite ~75% de la radiación fotosintéticamente activa (PAR) y que a su vez limita la acumulación de calor (Shelter Systems, véanse 64–66). La tienda o carpa cuenta con un faldón de aproximadamente 30 cm de ancho alrededor del borde de la tienda. Sobre este faldón se depositó una cadena pesada que permite sellar la tienda al suelo durante las mediciones y generar un sistema prácticamente estanco. Para mediciones en oscuridad, la tienda se cubrió con una lona oscura opaca que impide que entre la luz al interior de la tienda. Los flujos de CO2 y H2O del ecosistema se midieron con un analizador de gas infrarrojo (IRGA) Li-Cor 7500 CO2/H2O montado en un trípode (LI-COR Inc., Lincoln, NE, EE. UU.) con dos ventiladores alimentados por baterías que se utilizaron para mezclar el aire dentro de la cámara.

Cada medición pareada de los flujos en luz y oscuridad se realizó siguiendo los siguientes pasos: (i) colocamos el IRGA y los ventiladores dentro de la parcela (ii) medimos el CO2 y el H2O ambientales durante 90 s, (iii) colocamos la tienda sobre la parcela y la sellamos sobre la superficie del suelo usando la cadena (iv) medimos el CO2 y H2O dentro de la tienda en condiciones de luz durante 90 s, (iv) se retira la tienda de la parcela durante 2 minutos para permitir que el aire de la tienda y de la vegetación se equilibraren con el aire exterior, (v) colocamos de nuevo la tienda de campaña en la parcela y la cubrimos con una lona opaca a la luz por 30 segundos (vi) medimos el CO2 y H2O dentro de la tienda en condiciones de oscuridad durante 90 s. El motivo para medir durante 90 s se basa en estudios anteriores que han demostrado que el gradiente de presión causado por las concentraciones cambiantes de CO2 y H2O en el sistema cerrado comienza a afectar la conductancia estomática después de aproximadamente 90 s64. Medir durante un tiempo relativamente corto también mitiga el efecto del aumento de temperatura en las plantas bajo la tienda.

Medimos los flujos de CO2 y H2O una vez en cada combinación de parcela/tratamiento/sitio durante cada campaña en marzo de 2018, abril de 2019, julio de 2019, noviembre de 2019 y marzo de 2020. Las mediciones de flujos de cada parcela se realizaron en horas centrales del día cuando las tasas fotosintéticas son máximas. Como no todas las mediciones se pueden hacer en pleno sol, también se aportan curvas de respuesta a la luz. Los datos de respuesta a la luz están disponibles para la estandarización de GPP para algunas parcelas, sitios y tratamientos en abril de 2019, julio de 2019, noviembre de 2019 y marzo de 2020. Cada curva de respuesta a la luz consta de una medición a plena luz, tres mediciones en tres niveles diferentes de sombra utilizando capas de tul blanco progresivamente para ir oscureciendo la tienda, y una última medida en plena oscuridad utilizando la lona opaca descrita anteriormente67.

*Mediciones de la respiración del suelo*. Para medir los flujos de CO2 del suelo, es decir, la respiración del suelo (Rs), utilizamos un analizador de gas infrarrojo LI-840 (LI-COR Inc., Lincoln, NE, EE. UU.), conectado a cámaras de respiración del suelo personalizadas hechas de tubos/cilindros de PVC (en adelante cilindros de PVC), instalados aproximadamente tres semanas antes de la primera medición en 2018. Insertamos dos cilindros de PVC en el suelo en todas las parcelas. Cada cilindro de PVC tenía aproximadamente 8-10 cm de diámetro y creó una cámara de suelo con un volumen de espacio libre de ~1 L. Para ajustar la heterogeneidad topográfica, medimos la altura de cada cilindro en cuatro puntos, utilizando la altura media para calcular el volumen exacto del cilindro. Cada cilindro de suelo se colocó de forma segura con una tapa de polietileno para garantizar una cámara cerrada. La tapa tiene el mismo diámetro que los cilindro menos un par de mm para permitir un sellado adecuado. La concentración de CO2 dentro de las cámaras de respiración del suelo se registró durante aproximadamente 90 segundos. Estas mediciones se realizaron durante las mismas campañas que para los flujos de CO2 y H2O.

*Mediciones ambientales*. Para cada medición de flujo, medimos datos ambientales, medimos la radiación fotosintética activa (PAR; µmol fotones m-2 s-1) dentro de la tienda aproximadamente cada 15 segundos durante el intervalo de medición de 90 segundos utilizando un sensor quantum PAR (Li-190, LI-COR Biosciences, Lincoln, NE, EE.UU.). La humedad del suelo (% de volumen) se midió en cinco puntos distribuidos uniformemente dentro de cada parcela y dos veces en dos puntos adyacentes a cada cilindro de respiración del suelo justo después de cada medición de flujo. La temperatura del suelo (°C) se midió usando un termómetro digital con una precisión de ± 0.1 °C en dos lugares dentro de cada parcela y en cada cilindro de respiración del suelo durante todas las mediciones del flujo de CO2. La temperatura del dosel de la vegetación (°C) se midió para cada medición del flujo del ecosistema con un termómetro infrarrojo con puntero láser. Se realizaron cinco mediciones distribuidas uniformemente en la parcela justo después de cada medición de flujo para cada parcela.

*Cálculos*. Se evaluó visualmente la calidad de todas las mediciones, y para los cálculos de NEE solo se utilizaron mediciones que mostraron una relación lineal consistente entre el CO2 y el tiempo durante al menos 60 s. La NEE se calculó utilizando un modelo lineal a partir del cambio temporal de la concentración de CO2 dentro de la cámara cerrada siguiendo a Jasoni et al.68, utilizando esta ecuación:

(1)

Donde δCO2/δt es la pendiente de la concentración de CO2 en función al tiempo (μmol mol-1 s-1), P es la presión atmosférica (kPa), R es la constante de los gases (8.314 kPa m3 K-1 mol-1), T es la temperatura del aire dentro de la cámara (°C), V es el volumen de la cámara (m3), A es la superficie (m2). También utilizamos un enfoque mediante un modelo no lineal para el mismo cálculo basado en el método de “cámara con fugas”, es decir, un modelo que asume algunas que la tienda no es perfectamente estanca, desarrollado por Saleska et al.69. Es importante tener en cuenta que NEE está definido de manera que los valores negativos reflejan la liberación de CO2 del ecosistema a la atmósfera, mientras que los valores positivos reflejan la absorción de CO2 en el ecosistema. Proporcionamos únicamente los flujos medidos en campo, dado que GPP y T se pueden calcular a partir de estos valores.

**Conjunto de datos (vi): datos climáticos**

Los datos climáticos, incluyendo la temperatura del aire (medido a 15 cm por encima de la superficie del suelo), la temperatura al nivel del suelo (0 cm), la temperatura del suelo (medido a -5 cm por debajo de la superficie del suelo) y la humedad del suelo (medido a -5 cm por debajo de la superficie del suelo), se registraron utilizando los sensores de datos climáticos TOMST TMS-470. Los datos climáticos se midieron entre abril de 2019 y marzo de 2020 en entre 2 y 4 parcelas por sitio y tratamiento (ver Fig. 1), excepto para OCC, QUE y el tratamiento BB. Los datos sin procesar de humedad del suelo se convirtieron a humedad del suelo utilizando un tipo de suelo intermedio, "franco arenoso A" proporcionado por TOMST. Se puede acceder a los valores de humedad del suelo sin procesar; es importante tener en cuenta que es posible realizar otras conversiones.

**Datos adicionales**

También medimos las curvas de respuesta a la fotosíntesis-luz para *Paspalum bonplandianum* y *Gaultheria glomerata*, y las curvas de respuesta a la fotosíntesis-temperatura para *Paspalum bonplandianum*, *Rhynchospora macrochaeta* y *Gaultheria glomerata*. Estos datos se publicarán en un artículo complementario (Michaletz et al. en preparación).

**Registros de datos**

Este artículo informa sobre datos de experimentos de campo sobre la historia de los incendios y los impactos del cambio climático en los pastizales de puna de gran altitud en los Andes orientales del Perú realizados entre 2018 y 2020. Contiene datos sobre la comunidad vegetal, la estructura de la vegetación, los rasgos funcionales de las plantas, la biomasa y los flujos del ecosistema y datos climáticos recopilados en una o varias campañas entre marzo de 2018 y marzo de 2020. Los datos resultantes constan de seis conjuntos de datos, (i) la composición de especies en los sitios a lo largo del gradiente y de los tratamientos de incendio, (ii) la altura y estructura de la vegetación en los sitios a lo largo del gradiente y de los tratamientos de incendio, (iii) biomasa cosechada en un conjunto adicional de parcelas en cinco sitios en el control y tratamiento de incendio, (iv) rasgos funcionales de las plantas de los individuos muestreados en los sitios a lo largo del gradiente y de los tratamientos de incendio, (v) flujos del ecosistema de los sitios a lo largo del gradiente y tratamientos de incendio y (vi) datos de temperatura y humedad del suelo de los sensores TOMST de cada sitio y tratamiento (Tabla 1). Estos datos se verificaron y limpiaron de acuerdo con los procedimientos descritos en la validación técnica, y se generaron los archivos de datos finales y los metadatos asociados.

Los archivos de datos finales (consulte la Tabla 1 para obtener una descripción general), los diccionarios de datos y todos los datos sin procesar, incluidos los escaneos de hojas, están disponibles en Open Science Framework (OSF)39. Para garantizar la reproducibilidad y los flujos de trabajo abiertos, el código necesario para acceder a los datos sin procesar y producir estos conjuntos de datos limpios, junto con un archivo “readme” que explica los diversos pasos, problemas y resultados de la limpieza de datos, están disponibles en un repositorio abierto de GitHub, con una copia versionada archivada en Zenodo40. Para obtener información detallada sobre el proceso de limpieza de datos, nos referimos al código y la codificación detallada, la limpieza de datos, los comentarios sobre la precisión de los datos y las tablas de metadatos, datos sin procesar y limpios asociados. La sección de Notas de uso de este documento resume la precisión de los datos y los procedimientos de limpieza, incluidas advertencias sobre la calidad de los datos y nuestros consejos sobre "buenas prácticas" en el uso de los datos.

**Conjunto de datos (i): Composición de la comunidad vegetal.** El conjunto de datos de la comunidad de plantas a nivel de parcela tiene 145 taxones y 3,665 observaciones de 63 parcelas de vegetación (taxones x parcelas x campaña) (Tabla 1, Tabla 2). La riqueza media de especies por parcela y año (media ± SE) es de 17.2 ± 0.37 especies, y la riqueza aumenta aproximadamente en 3 especies por cada 1000 m de elevación (E=0.003, *t*5,210= 2.25, *P*=0.026). En las parcelas quemadas, la riqueza es menor que los controles en elevaciones bajas, pero también aumenta más hacia elevaciones más altas (E=0.005, *t*5.210= 2.31, *P*=0.022), y esto es especialmente evidente en los tratamientos recientemente quemados (E=0.028, *t*5.210= 6.44, *P*<0.001; Fig. 3). La diversidad y la equidad no cambian con la elevación en los controles, pero son menores en el tratamiento recientemente quemado en elevaciones bajas y aquí también aumentan con la elevación (diversidad: E=0.002, *t*5.210=4.50, *P*=<0.001; equidad: E=0.0003, *t*5.210=2.18, *P*=0.030; Fig. 3). La cobertura de graminoide es variable pero generalmente menor en el tratamiento recién quemado, donde también disminuye con la elevación (E=-0.0003, *t*5.210 =2.35, *P*=0.19; Fig. 3).

Para obtener una descripción general del conjunto de datos limpios y enlaces al código para limpiar y extraer estos datos de los datos sin procesar, consulte la Tabla 1. Se puede acceder a los datos limpios finales en la carpeta "community", se proporciona un diccionario de datos en el folder "meta", y se puede acceder a los datos sin procesar en la carpeta “raw data” en OSF39. El código para descargar y limpiar los datos se proporciona en el repositorio de GitHub40 en el archivo code/2\_species\_cover.R.

A diagram of different types of treatment

Description automatically generated with medium confidence

**Fig. 3.** Índices de diversidad, cobertura de graminoides y altura de la vegetación a lo largo de un gradiente de elevación en los tratamientos de incendio. Las líneas continuas indican una relación significativa con la elevación para ese tratamiento de quema. Los colores indican los tratamientos del fuego: C= control, B = quemado, NB = recién quemado. Vea el texto para más detalles.

**Tabla 2**. *Diccionario de datos para la composición de la comunidad de plantas vasculares (conjunto de datos i) de los pastizales de Puna en los Andes del sureste, en la zona de amortiguamiento del Parque Nacional Manú, Departamento del Cusco, provincia de Paucartambo, distrito de Challabamba, Perú. El conjunto de datos contiene 3,665 observaciones de las coberturas de 145 taxones en 63 parcelas de vegetación muestreadas en seis sitios, tres con historiales de incendios y tres años. Se proporcionan nombres de variables, descripción del tipo de variable, rango o niveles, unidades y una breve descripción de todas las variables*.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Nombre de la variable** | **Descripción** | **Tipo de variable** | **Rango o niveles variables** | **Unidades** | **Como fue medido** |
| year | Año de muestreo | numérico | 2018 - 2020 | año | registrado |
| season | Hora de recolección de datos; estación húmeda o seca | categórico | estación seca – estación húmeda |  | registrado |
| month | Mes de muestreo | categórico | abril - noviembre | mes | registrado |
| site | ID de sitio único que utiliza las primeras tres letras del nombre del sitio | categórico | ACJ - WAY |  | definido |
| treatment | Tratamiento de quema; C = control, B = quemado, NB = recién quemado y BB = quemado experimentalmente | categórico | B - NB |  | definido |
| plot\_id | ID de parcela | numérico | 1 - 5 |  | definido |
| family | Nombre de la familia de la planta | categórico | Alstroemeriaceae - Violaceae |  | identificado |
| functional\_group | Grupo funcional de la planta | categórico | Briofita - leñoso |  | identificado |
| taxon | taxón | categórico | *Acaena cylindristachya* - *Zephyranthes* sp1 |  | identificado |
| cover | Estimación de la cobertura de especies individuales. | numérico | 0.5 - 92 | porcentaje | registrado |
| burn\_year | Año del último incendio | numérico | 2005 - 2019 | año | registrado |
| elevation | Elevación del sitio | numérico | 3071.7 - 4385.8 | m.s.n.m | registrado |
| latitude | Latitud del sitio | numérico | -13.451 - -13.12 | grados N | registrado |
| longitude | Longitud del sitio | numérico | -71.741 - -71.588 | grados E | registrado |

**Conjunto de datos (ii): altura y estructura de la vegetación.** El conjunto de datos sobre la altura de la vegetación a nivel de parcela y otras variables estructurales tiene un total de 1,627 observaciones (campaña x sitio x tratamiento x variable x clase de variable) (Tabla 1, Tabla 3, Fig. 2). La altura de la vegetación disminuye bruscamente con la elevación (E=-0.018, *t*5.135 = -4.80, *P* <0.001; Fig. 2), desde un promedio de 31.0 ± 2.41 cm en WAY a 4.46 ± 1.11 cm en OCC, pero no se ve afectada por los tratamientos de incendios. También hay datos sobre la cobertura de gramíneas, helechos, herbáceas, arbustos, hojarasca, suelo desnudo y rocas, y cobertura y profundidad de briofitas, con respuestas generalmente débiles a lo largo de la elevación y entre tratamientos.

Para obtener una descripción general del conjunto de datos limpios y enlaces al código para limpiar y extraer estos datos de los datos sin procesar, consulte la Tabla 1. Se puede acceder a los datos limpios finales en la carpeta "community ", se proporciona un diccionario de datos en el folder "meta”, y se puede acceder a los datos sin procesar en la carpeta “raw data” en OSF39. El código para descargar y limpiar los datos se proporciona en el repositorio de GitHub40 en el archivo code/3\_community\_structure.R.

**Tabla 3**. *Diccionario de datos para las variables de estructura de la comunidad de plantas vasculares (conjunto de datos ii) de los pastizales de Puna en los Andes del sureste, en la zona de amortiguamiento del Parque Nacional Manú, Departamento del Cusco, provincia de Paucartambo, distrito de Challabamba, Perú. El conjunto de datos reporta 1,627 observaciones de la cobertura de grupos funcionales de plantas, suelo desnudo y hojarasca, profundidad de la capa de briófitos y altura de la vegetación muestreadas en 63 parcelas en seis sitios, tres historiales de incendios y tres años. Se proporcionan nombres de variables, descripción del tipo de variable, rango o niveles, unidades y una breve descripción de todas las variables*.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Nombre de la variable** | **Descripción** | **Tipo de variable** | **Rango o niveles variables** | **Unidades** | **Como fue medido** |
| year | Año de muestreo | numérico | 2018 - 2020 | año | registrado |
| season | Hora de recolección de datos; estación húmeda o seca | categórico | estación seca – estación húmeda |  | registrado |
| month | Mes de muestreo | categórico | Abril - marzo | mes | registrado |
| site | ID de sitio único que utiliza las primeras tres letras del nombre del sitio | categórico | ACJ - WAY |  | definido |
| treatment | Tratamiento de quema; C = control, B = quemado, NB = recién quemado y BB = quemado experimentalmente | categórico | B - NB |  | definido |
| plot\_id | ID de parcela | numérico | 1 - 5 |  | definido |
| burn\_year | Año del último incendio | numérico | 2005 - 2019 | año | registrado |
| elevation | Elevación del sitio | numérico | 3071.7 - 4385.8 | m.s.n.m | registrado |
| latitude | Latitud del sitio | numérico | -13.451 - -13.12 | grados N | registrado |
| longitude | longitud del sitio | numérico | -71.741 - -71.588 | grados E | registrado |
| course | Campaña de muestreo | categórico | PFTC3 - Puna |  | registrado |
| variable | Nombre de la variable; Cobertura, altura mínima, media y máxima de la vegetación y profundidad de briofitas. | categórico | briofita\_profundidad – altura\_minima |  | definido |
| variable\_class | Clase variable; herbáceas, gramíneas, arbustos, helechos, briofitas, líquenes, fondo, campo, capa de arbustos, hojarasca, suelo desnudo y roca (cobertura), vegetación (altura) y briofitas (profundidad) | categórico | suelo\_desnudo - vegetación |  | definido |
| value | Valor de cobertura, altura o profundidad | numérico | 0 - 100 | porcentaje or cm | registrado |

**Conjunto de datos (iii): rasgos funcionales de la planta**. Medimos rasgos físicos y estructurales (altura de la planta, masa húmeda de las hojas, masa seca de las hojas, área de las hojas, grosor de las hojas, área foliar específica [SLA] y contenido de materia seca de las hojas [LDMC]) para 7,609 muestras de hojas de 121 taxones en todos los sitios y tratamientos, para un total de 50,264 observaciones de rasgos (Tabla 1, Tabla 4). Hay números variables de hojas por sitio (WAY=1,565; ACJ=2,011; PIL=1,323; TRE=1,483; QUE=1,162; OCC=75) y tratamiento (C=3,788; B=2,641; NB=1,053 y BB= 137).

Debido a que muchos especímenes tenían hojas diminutas, fue necesario fusionar algunos individuos para obtener suficiente material para las características químicas y de nutrientes (Carbono [C], Nitrógeno [N], Fósforo, proporciones C:N y NP, e isótopo [d13C, d15N]). Por lo tanto, se utilizó un subconjunto de 753 muestras de hojas combinadas de 54 taxones en todos los sitios para un total de 3,772 observaciones de rasgos químicos o nutricionales. Tenga en cuenta que se agregarán más muestras a este conjunto de datos a medida que se procesen en el laboratorio.

Las distribuciones de rasgos no ponderados por sitio muestran que los "rasgos relacionados con el tamaño", como son la altura, la masa y el área, tienden a disminuir hacia elevaciones más altas (Fig. 4). LDMC muestra una tendencia decreciente, lo que indica hojas más tolerantes al estrés en elevaciones más altas. SLA no muestra una tendencia clara con la elevación.

El conjunto de datos es muy adecuado para explorar distribuciones de rasgos ponderados, ya que tenemos mediciones de rasgos para especies que representan al menos el 80% de la cobertura acumulada para todos los rasgos en todas las parcelas, siguiendo los estándares de comunidad59 (cálculos basados en los conjuntos de datos i). Como casi la mitad de las parcelas (48,2%) cumplen con este criterio para las mediciones de rasgos locales (a nivel de parcela), los datos son muy adecuados para explorar las consecuencias a nivel de comunidad de la variación de rasgos intraespecíficos.

Para obtener una descripción general del conjunto de datos limpios y enlaces al código para limpiar y extraer estos datos de los datos sin procesar, consulte la Tabla 1. Se puede acceder a los datos limpios finales en la carpeta "traits", se proporciona un diccionario de datos en el folder "meta", y se puede acceder a los datos sin procesar en la carpeta “raw data” en OSF39. El código para descargar y limpiar los datos se proporciona en el repositorio de GitHub40 en el archivo code/1\_species\_trait\_export.R.

A graph of different sizes of data

Description automatically generated with medium confidence

**Fig. 4.** Distribuciones de las densidades de rasgos de seis sitios a lo largo de un gradiente de elevación en los pastizales de Puna en Perú. Distribuciones de datos de rasgos (valores no ponderados) basados en todas las hojas muestreadas (gradiente y tratamientos de quema) de los seis sitios a lo largo del gradiente de elevación en los pastizales de Puna en Perú. Los rasgos de tamaño (altura, masa, área y grosor) están transformados logarítmicamente.

**Tabla 4.** *Diccionario de datos para los rasgos funcionales de plantas (conjunto de datos iii) de pastizales de Puna del sureste de los Andes, en la zona de amortiguamiento del Parque Nacional Manú, Departamento de Cusco, provincia de Paucartambo, distrito de Challabamba, Perú. El conjunto de datos contiene 54,036 observaciones de rasgos de 11 rasgos estructurales, económicos y químicos de 121 taxones muestreados en 63 parcelas de vegetación en seis sitios, tres historiales de incendios y tres años. Se proporcionan nombres de variables, descripción del tipo de variable, rango o niveles, unidades y una breve descripción de todas las variables*.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Nombre de la variable** | **Descripción** | **Tipo de variable** | **Rango o niveles variables** | **Unidades** | **Como fue medido** |
| year | Año de muestreo | numérico | 2018 - 2020 | año | registrado |
| season | Hora de recolección de datos; estación húmeda o seca | categórico | estación seca – estación húmeda |  | registrado |
| month | Mes de muestreo | categórico | Abril - noviembre | mes | registrado |
| site | ID de sitio único que utiliza las primeras tres letras del nombre del sitio | categórico | ACJ - WAY |  | definido |
| treatment | Tratamiento de quema; C = control, B = quemado, NB = recién quemado y BB = quemado experimentalmente | categórico | B - NB |  | definido |
| plot\_id | ID de parcela | categórico | 1 - general |  | definido |
| individual\_nr | numero de individuo | numérico | 1 - 10 |  | definido |
| leaf\_nr | Número de hojas por individuo | numérico | 1 - 7 |  | definido |
| id | ID de hoja única | categórico | AAA0656 - SVH1234 |  | definido |
| functionalgroup | Grupo funcional de la planta | categórico | helechos - leñosos |  | identificado |
| family | Nombre de la familia de la planta | categórico | Alstroemeriaceae - Violaceae |  | identificado |
| taxon | taxón | categórico | *Acaena cylindristachya* - *Werneria villosa* |  | identificado |
| trait | Rasgo funcional de la planta | categórico | c\_porcentaje – masa\_humeda\_g |  | definido |
| value | Valor del rasgo de la hoja | numérico | -34.942 - 593.892 | cm, g, cm2, mm, cm2/g, porcentaje, permil | registrado |
| burn\_year | Año del último incendio | numérico | 2005 - 2019 | año | registrado |
| elevation | Elevación del sitio | numérico | 3071.7 - 4384.3 | m.s.n.m | registrado |
| latitude | Latitud del sitio | numérico | -13.451 - -13.12 | grados N | registrado |
| longitude | longitud del sitio | numérico | -71.741 - -71.588 | grados E | registrado |
| course | Campaña de muestreo | categórico | PFTC3 - Puna |  | registrado |

**Conjunto de datos (iv): biomasa aérea.** El conjunto de datos de biomasa aérea reporta datos de las ocho parcelas adicionales establecidas para permitir la recolección destructiva de biomasa (ver arriba) y tiene un total de 672 observaciones (sitio x tratamiento x variable x clase de variable; tenga en cuenta que no todas las combinaciones de sitio de tratamiento fueron muestreadas; Tabla 1, Tabla 5). La biomasa total de la parcela y la biomasa de hierbas, arbustos, briófitos y hojarasca disminuyen con la elevación, mientras que las graminoides tienen una tendencia negativa no significativa (total: *t*1.38=-5,13, *P*<0.001, hierbas: *t*1.23=-2.17, *P*=0.043, *P*=0.070, arbustos: *t*1.18= -6.39, *P*<0.001, briofitas: *t*1.33=-2.11, *P*=0.043, hojarasca: *t*1.33=-2.47, *P*=0.020, graminoides: *t*1.33=-1.88).

Para obtener una descripción general del conjunto de datos limpios y enlaces al código para limpiar y extraer estos datos de los datos sin procesar, consulte la Tabla 1. Se puede acceder a los datos limpios finales en la carpeta "biomass", se proporciona un diccionario de datos en el folder "meta", y se puede acceder a los datos sin procesar en la carpeta “raw data” en OSF39. El código para descargar y limpiar los datos se proporciona en el repositorio de GitHub40 en el archivo code/4\_biomass.R.

**Tabla 5.** *Diccionario de datos para la biomasa aérea (conjunto de datos i) de los pastizales de Puna de los Andes del sureste, en la zona de amortiguamiento del Parque Nacional Manú, Departamento del Cusco, provincia de Paucartambo, distrito de Challabamba, Perú. El conjunto de datos contiene 129 observaciones de biomasa o cobertura para diferentes grupos de plantas (graminoides, helechos, herbáceas, arbustos, hierbas, briofitas, líquenes) más hojarasca, suelo desnudo y cobertura total en ocho parcelas adicionales muestreadas en 2019 en cinco sitios y tres Historias de incendios. Se proporcionan nombres de variables, descripción del tipo de variable, rango o niveles, unidades y una breve descripción de todas las variables*.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Nombre de la variable** | **Descripción** | **Tipo de variable** | **Rango o niveles variables** | **Unidades** | **Como fue medido** |
| date\_of\_harvest | Fecha de cosecha de biomasa | fecha | 2019-04-05 - 2019-04-13 | año-mes-día | definido |
| season | Hora de recolección de datos; estación húmeda o seca | categórico | estación húmeda – estación húmeda |  | registrado |
| site | ID de sitio único que utiliza las primeras tres letras del nombre del sitio | categórico | ACJ - WAY |  | definido |
| treatment | Tratamiento de quema; C = control, B = quemado, NB = recién quemado y BB = quemado experimentalmente | categórico | B - NB |  | definido |
| plot\_id | ID de parcela | numérico | 1 - 5 |  | definido |
| burn\_year | Año del último incendio | numérico | 2005 - 2018 | año | registrado |
| elevation | Elevación del sitio | numérico | 3071.7 - 3893.1 | m.s.n.m. | registrado |
| latitude | Latitud del sitio | numérico | -13.214 - -13.12 | grados N | registrado |
| longitude | longitud del sitio | numérico | -71.641 - -71.588 | grados E | registrado |
| treatment | Tratamiento de quema: C = control, B = quemado y NB = recién quemado | categórico | B - NB |  | definido |
| variable | Nombre de la variable; biomasa, cobertura, altura mínima, media y máxima de la vegetación y profundidad de briofitas | categórico | biomasa – altura\_mínima |  | definido |
| variable\_class | Nombre de la clase de variable; herbáceas, gramíneas, arbustos, helechos, briófitos, líquenes, hojarasca, suelo desnudo y roca (biomasa y/o cobertura), vegetación (altura) y briófitos (profundidad) | categórico | suelo desnudo - vegetación |  | definido |
| value | Valor de biomasa, cobertura, altura o profundidad | numérico | 0 - 2273.67 | porcentaje, cm, g | registrado |

**Conjunto de datos (v): flujos ecosistémicos**

El conjunto de datos sobre flujos de ecosistemas a nivel de parcela tiene un total de 1,673 observaciones (sitio x tratamiento x variable), incluidas 609 mediciones de flujo de carbono y agua y 455 mediciones de respiración del suelo (Tabla 1, Tablas 6-8). A lo largo de los años y las estaciones, el intercambio neto de ecosistemas (NEE) varía según los sitios y oscila entre 2.87 ± 0.314 µmols m-2 s-1 en PIL y 5.07 ± 0.654 µmols m-2 s-1 en ACJ. Por el contrario, la respiración del ecosistema (Reco) disminuye monótonamente hacia elevaciones más altas desde -3.49 ± 0.261 µmols m-2 s-1 en WAY hasta -1.36 ± 0.353 µmols m-2 s-1 en QUE (sin datos de OCC). La respiración del suelo también disminuye hacia elevaciones más altas, de -1.12 ± 0.0951 µmols m-2 s-1 en WAY a -4.09 ± 0.786 µmols m-2 s-1 en OCC. La transpiración del ecosistema también disminuye hacia elevaciones más altas desde 2.26 ± 0.130 µmols m-2 s-1 en PIL a 1.30 ± 0.106 µmoles m-2 s-1 en QUE. Estos datos están sin procesar y no estandarizados por temperatura, PAR y/o biomasa. Para obtener una descripción general del conjunto de datos limpios y enlaces al código para limpiar y extraer estos datos de los datos sin procesar, consulte la Tabla 1. Se puede acceder a los datos limpios finales en la carpeta "flux", se proporciona un diccionario de datos en el folder "meta”, y se puede acceder a los datos sin procesar en la carpeta “raw data” en OSF39.

**Tabla 6.** *Diccionario de datos para el flujo de CO2 del ecosistema (conjunto de datos v) de los pastizales de Puna de los Andes del sureste, en la zona de amortiguamiento del Parque Nacional Manú, Departamento de Cusco, provincia de Paucartambo, distrito de Challabamba, Perú. El conjunto de datos contiene 609 observaciones de flujos de ecosistemas entre 2018 y 2020. Se proporcionan nombres de variables, descripción del tipo de variable, rango o niveles, unidades y una breve descripción de todas las variables*.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Nombre de la variable** | **Descripción** | **Tipo de variable** | **Rango o niveles variables** | **Unidades** | **Como fue medido** |
| year | Año de muestreo | numérico | 2018 - 2020 | año | registrado |
| month | Mes de muestreo | categórico | Abril - noviembre | mes | registrado |
| day | Día de muestreo | categórico | 5 - 27 | días | definido |
| site | ID de sitio único que utiliza las primeras tres letras del nombre del sitio | categórico | ACJ - WAY |  | definido |
| treatment | Tratamiento de quema; C = control, B = quemado, NB = recién quemado y BB = quemado experimentalmente | categórico | B - NB |  | definido |
| plot\_id | ID de parcela | numérico | 1 - 5 |  | definido |
| flux | Flujo de carbono del ecosistema: NEE = intercambio neto del ecosistema, Reco = respiración del ecosistema, NEE1-3 = intercambio neto del ecosistema durante las curvas de respuesta a la luz, donde 1 es el de menor sombra y 3 el de mayor sombra. | categórico | NEE - Reco |  | definido |
| t\_start | Hora de inicio de la adaptación del modelo | numérico | 1 - 60 | segundos | definido |
| t\_finish | Hora de finalización de la adaptación del modelo | numérico | 30 - 100 | segundos | definido |
| c\_amb | Concentración media de CO2 fuera de la tienda, bajo condiciones ambientales, medido por el LiCOR | numérico | 277.523 – 457.12 | µmols m-2 s-1 | medido |
| t\_ave | Temperatura media dentro de la tienda de flujo medida por el LiCOR | numérico | -66.254 - 37.649 | Grados centígrados | medido |
| p\_ave | Presión promedio dentro de la tienda de flujo medida por el LiCOR | numérico | 64.204 - 71.141 | kilo Pascales | medido |
| linear\_model | Flujo de carbono como pendiente del modelo lineal de concentración de CO2 versus tiempo | numérico | -10.926 - 28.161 | µmols m-2 s-1 | calculado |
| nls\_model | Flujo de carbono como pendiente del modelo no lineal de concentración de CO2 versus tiempo | numérico | -49.683 - 93.991 | µmols m-2 s-1 | calculado |
| linear\_rsqd | R cuadrado para el modelo lineal | numérico | 0 - 0.998 |  | calculado |
| nls\_sigma | Chi-cuadrado para el modelo no lineal | numérico | 0.163 - 4.662 | | calculado |
| linear\_aic | Criterio de información de Akaike (AIC) del modelo lineal | numérico | -87.266 - 290.242 | | calculado |
| nls\_aic | Criterio de información de Akaike (AIC) del modelo no lineal | numérico | -46.727 - 418.159 | | calculado |

**Tabla 7.** *Diccionario de datos de la respiración del suelo del ecosistema (conjunto de datos v) de los pastizales de Puna del sureste de los Andes en la zona de amortiguamiento del Parque Nacional Manú, Departamento del Cusco, provincia de Paucartambo, distrito de Challabamba, Perú. El conjunto de datos contiene 455 observaciones de flujos de ecosistemas entre 2018 y 2020. Se proporcionan nombres de variables, descripción del tipo de variable, rango o niveles, unidades y una breve descripción de todas las variables*.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Nombre de la variable** | **Descripción** | **Tipo de variable** | **Rango o niveles variables** | **Unidades** | **Como fue medido** |
| year | Año de muestreo | numérico | 2018 - 2020 | año | registrado |
| month | Mes de muestreo | categórico | Abril - noviembre | mes | registrado |
| day | Día de muestreo | categórico | 5 - 27 | días | definido |
| site | ID de sitio único que utiliza las primeras tres letras del nombre del sitio | categórico | ACJ - WAY |  | definido |
| treatment | Tratamiento de quema; C = control, B = quemado, NB = recién quemado y BB = quemado experimentalmente | categórico | B - NB |  | definido |
| plot\_id | ID de parcela | numérico | 1 - 5 |  | definido |
| flux | Flujo de carbono del ecosistema: Rsuelo = respiración del suelo | categórico | Rsuelo - Rsuelo |  | definido |
| collar\_position | Posición del collar de PVC dentro de la parcela. A = esquina superior derecha, B = esquina inferior izquierda | categórico | A - B |  | definido |
| t\_start | Hora de inicio de la adaptación del modelo | numérico | 5 - 30 | segundos | definido |
| t\_finish | Hora de finalización de la adaptación del modelo | numérico | 40 - 90 | segundos | definido |
| date | Fecha de la medición | categórico | 05.04.19 - 27.11.19 | año-mes-día | registrado |
| time | Hora de la medición | | | Hora-minutos-segundos | registrado |
| t\_start\_recording |  | categórico | 10:55:01 – 22:37:13 | Hora-minutos-segundos | registrado |
| t\_finish\_recording |  | categórico | 10:56:11 – 22:38:24 | Hora-minutos-segundos | registrado |
| collar\_heigth\_ave | Altura media del cuello para el cálculo del volumen. | numérico | 0.044 - 0.092 | cm | medido |
| t\_ave | Temperatura promedio medida por el LiCOR dentro de la tienda. | numérico | 39.359 - 51.399 | grados centígrados | medido |
| p\_ave | Presión promedio dentro de la tienda de fundente medida por el LiCOR | numérico | 55.776 - 70.115 | kilo Pascales | medido |
| w\_ave | H2O promedio medida por el LiCOR dentro de la tienda. | numérico | 9.623 – 49.371 | µmols m-2 s-1 | medido |
| linear\_model | Flujo de carbono como pendiente del modelo lineal de concentración de CO2 versus tiempo | numérico | -12.331 - 0.188 | µmols m-2 s-1 | calculado |
| linear\_rsqd | R cuadrado para el modelo lineal | numérico | 0.503 - 0.999 |  | calculado |
| linear\_aic | Criterio de información de Akaike (AIC) del modelo lineal | numérico | -3971.3 - 455.7 |  | calculado |

**Tabla 8.** *Diccionario de datos para el flujo de agua del ecosistema (conjunto de datos v) de los pastizales de Puna de los Andes del sureste, en la zona de amortiguamiento del Parque Nacional Manú, Departamento de Cusco, provincia de Paucartambo, distrito de Challabamba, Perú. El conjunto de datos contiene 609 observaciones de flujos de ecosistemas entre 2018 y 2020. Se proporcionan nombres de variables, descripción del tipo de variable, rango o niveles, unidades y una breve descripción de todas las variables*.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Nombre de la variable** | **Descripción** | **Tipo de variable** | **Rango o niveles variables** | **Unidades** | **Como fue medido** |
| year | Año de muestreo | numérico | 2018 - 2020 | año | registrado |
| month | Mes de muestreo | categórico | Abril - noviembre | mes | registrado |
| day | Día de muestreo | categórico | 5 - 27 | días | definido |
| site | ID de sitio único que utiliza las primeras tres letras del nombre del sitio | categórico | ACJ - WAY |  | definido |
| treatment | Tratamiento de quemas; C = control, B = quemado, NB = recién quemado y BB = quemado experimentalmente | categórico | B - NB |  | definido |
| plot\_id | ID de parcela | numérico | 1 - 5 |  | definido |
| flux | Flujo de agua del ecosistema: E = evaporación, ET = evapotranspiración | categórico | E - ET3 |  | definido |
| t\_start | Hora de inicio de la adaptación del modelo | numérico | 1 - 20 | segundos | definido |
| t\_finish | Hora de finalización de la adaptación del modelo | numérico | 40 - 90 | segundos | definido |
| w\_amb | Concentración media de H2O fuera de la tienda, bajo condiciones ambientales, medido por el LiCOR | numérico | 6.878 – 44.835 | µmols m-2 s-1 | medido |
| t\_ave | Temperatura promedio dentro de la tienda de flujo medida por el LiCOR | numérico | -66.254 - 37.649 | Grados Celsius | medido |
| p\_ave | Presión promedio dentro de la tienda de fundente medida por el LiCOR | numérico | 64.204 - 71.141 | kilo Pascales | medido |
| c\_amb | Concentración media de CO2 fuera de la tienda, bajo condiciones ambientales, medido por el LiCOR | numérico | 261.254 - 444.187 | µmols m-2 s-1 | medido |
| linear\_model | Flujo de carbono como pendiente del modelo lineal de concentración de CO2 versus tiempo | numérico | -1.39 - 4.286 | µmols m-2 s-1 | calculado |
| nls\_model | Flujo de carbono como pendiente del modelo no lineal de concentración de H2O versus tiempo | numérico | -7.775 – 4.814 | µmols m-2 s-1 | calculado |
| linear\_rsqd | R cuadrado para el modelo lineal | numérico | 0.007 - 0.999 |  | calculado |
| nls\_sigma | Chi-cuadrado para el modelo no lineal | numérico | 0.014 – 1.507 |  | calculado |
| linear\_aic | Criterio de información de Akaike (AIC) del modelo lineal | numérico | -427.055 - 70.057 |  | calculado |
| nls\_aic | Criterio de información de Akaike (AIC) del modelo no lineal | numérico | -393.554 – 259.994 |  | calculado |

**Conjunto de datos (vi): datos climáticos.**

El conjunto de datos climáticos contiene datos a nivel de parcela de temperatura del aire, al nivel del suelo y del suelo, y datos de humedad del suelo corregidos por la temperatura del suelo entre abril de 2019 y marzo de 2020 (Conjunto de datos vi). El conjunto de datos completo contiene 761,624 observaciones. Para obtener detalles sobre el conjunto de datos limpio y el código para limpiar y extraer estos datos de los datos sin procesar, consulte la Tabla 2, Tabla 9, que presenta resúmenes de datos para este conjunto de datos (consulte la sección **Validación de datos climáticos en Validación técnica**).

Durante el año de mediciones, la temperatura promedio diaria fue más baja durante la estación seca en agosto. La temperatura promedio diaria del aire disminuyó con el aumento de la elevación (11.6 °C en WAY, 9.11 °C en ACJ, 7.81 °C en PIL y 8.13 °C en TRE), pero no difirió entre los tratamientos del fuego.

Para obtener una descripción general del conjunto de datos limpios y enlaces al código para limpiar y extraer estos datos de los datos sin procesar, consulte la Tabla 1. Se puede acceder a los datos limpios finales en la carpeta "climate", se proporciona un diccionario de datos en el folder "meta", y se puede acceder a los datos sin procesar en la carpeta “raw data” en OSF39. El código para descargar y limpiar los datos se proporciona en el repositorio de GitHub40 en el archivo code/5\_climate\_data.R.

**Tabla 9.** *Diccionario de datos para los datos climáticos (conjunto de datos vi) de los pastizales de Puna al sureste de los Andes, en la zona de amortiguamiento del Parque Nacional del Manu, Departamento de Cusco, provincia de Paucartambo, distrito de Challabamba, Perú. El conjunto de datos contiene 761,624 observaciones de datos climáticos muestreados de 26 parcelas de vegetación en seis sitios, tres historiales de incendios y dos años. Se proporcionan nombres de variables, descripción del tipo de variable, rango o niveles, unidades y una breve descripción de todas las variables*.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Nombre de la variable** | **Descripción** | **Tipo de variable** | **Rango o niveles variables** | **Unidades** | **Como fue medido** |
| date\_time | Fecha y hora de la medición | fecha y hora | 2019-04-04 01:15:00 - 2020-03-15 20:45:00 | año-mes-día  hora-minutos-segundos | registrado |
| site | ID de sitio único que utiliza las primeras tres letras del nombre del sitio | categórico | ACJ - WAY |  | definido |
| treatment | Tratamiento de quema; C = control, B = quemado, NB = recién quemado y BB = quemado experimentalmente | categórico | B - NB |  | definido |
| plot\_id | ID de parcela | numérico | 1 - 5 |  | definido |
| variable | Variable micro climática | categórico | temperatura del aire – temperatura del suelo |  | definido |
| value | Temperatura del aire, del suelo, del suelo o de la humedad del suelo por parcela | numérico | -10.375 - 40.5 | °C, (m3 agua x m-3 suelo) x 100 | medido |
| unit | Unidad variable con °C para temperatura y (m3 agua x m-3 suelo) x 100 para humedad. | categórico |  |  | definido |
| raw\_soilmoisture | Valores de humedad del suelo sin procesar. | numérico | 351 - 3617 | | medido |
| burn\_year | Año del último incendio | numérico | 2005 - 2019 | año | registrado |
| elevation | Elevación del sitio | numérico | 3071.7 - 3714.7 | m.s.n.m. | registrado |
| latitude | Latitud del sitio | numérico | -13.181 - -13.12 | grados N | registrado |
| longitude | longitud del sitio | numérico | -71.641 - -71.588 | grados E | registrado |
| logger\_id | ID de registrador único | numérico | 94191301 - 94191330 | | definido |
| treatment | Tratamiento de quema: C = control, B = quemado y NB = recién quemado | categórico | B - NB |  | definido |

**Validación Técnica**

**Validación taxonómica.** Durante el período de recopilación de datos en tres años, una coautora (LLVB) fue responsable de la identificación de especies, la armonización taxonómica entre todos los conjuntos de datos y la verificación de especímenes problemáticos. En particular, los graminoides estériles o las plantas jóvenes pueden resultar difíciles de identificar. A las especies que no pudieron identificarse en campo se les dio un nombre descriptivo y se elaboró un pliego que fue llevado a la Universidad del Cusco para ser identificado por expertos.

La taxonomía de la comunidad y los datos de rasgos se verificaron y corrigieron con TNRS (ver arriba). Una lista completa de todas las especies identificadas en los conjuntos de datos, incluida su autoridad, también está disponible en el repositorio OSF en la carpeta "community". Hay en total 25 taxones no identificados (es decir, solo están identificados grupos funcionales, familias o géneros), 25 en la comunidad vegetal (conjunto de datos i) y 15 en los rasgos (conjunto de datos iii). Tenga en cuenta que los taxones desconocidos se armonizaron entre los conjuntos de datos, por lo que Género sp1 en el conjunto de datos de rasgos es el mismo que Género sp1 en el conjunto de datos de rasgos.

**Validación de datos de comunidades.** Verificamos y corregimos los valores de cobertura faltantes o poco realistas con las notas de campo para detectar errores tipográficos. El código de verificación de datos y los resultados de estos diversos procedimientos están documentados en el código de GitHub40.

**Validación de datos de rasgos.** Esta sección describe nuestro procedimiento para la verificación y validación de datos de rasgos. Las identificaciones de muestras faltantes o erróneas en una o más de las mediciones se compararon con notas de campo y notas en los sobres de las hojas. Se compararon los valores irrealmente altos o bajos de uno o más valores de rasgos con las notas de laboratorio y de campo para detectar errores tipográficos, se verificaron los escaneos de hojas para detectar problemas que surgieran durante el proceso de escaneo (por ejemplo, escaneos vacíos, escaneos dobles, áreas en blanco dentro del perímetro de la hoja, suciedad u otros objetos que no sean hojas en los escaneos). Corregimos todos los problemas que podían resolverse con certeza (por ejemplo, recalcular manualmente el área de la hoja para detectar partes de la hoja faltantes en el escaneo, coincidencia incorrecta entre el escaneo y la identificación de la hoja, etc.). Se eliminaron todas las muestras restantes con valores de rasgos poco realistas que podrían resultar de errores de medición (n = 291 valores). Esto se hizo para hojas con valores de área foliar claramente erróneos, valores de materia seca foliar superiores a 1 g/g, hojas con valores de área foliar específica superiores a 600 cm2/g, contenido de carbono superior al 65% y contenido de P negativo (ver código 40 para más detalles). Finalmente, buscamos valores atípicos trazando los datos (por ejemplo, masa húmeda de hojas versus masa seca de hojas). El código y los resultados de estos diversos procedimientos están documentados y disponibles en el código40.

**Validación de datos climáticos.** Se inspeccionaron los datos climáticos de cada parcela y se eliminaron las entradas basadas en rangos cuantiles de humedad del suelo, que contenían saltos notables que indicaban la instalación de los sensores en el campo. Las fechas en las que los rangos de cuantiles indicaban la primera instalación en el campo se ampliaron un día adicional para evitar errores de medición durante la instalación y permitir la aclimatación del equipo de medición. Todos los datos están disponibles, y los datos anteriores a la instalación del sensor en el campo están marcados con indicadores de error.

**Notas de uso**

**Uso de datos y mejores prácticas.** Los datos se proporcionan bajo una licencia CC-BY. Sugerimos que los datos presentados aquí y a los que se accede a través de OSF39, incluidas futuras adiciones a los datos de rasgos químicos, se cite en este documento de datos. Agradecemos que los usuarios de estos datos nos contacten para solicitar asesoramiento o colaboración, si procede. En los casos en que nuestros datos representen >10% de los datos utilizados en publicaciones posteriores, anticipamos que reconocer adecuadamente nuestras contribuciones resultaría en una invitación a colaborar.

**Notas taxonómicas.** Para utilizar adecuadamente estos datos, tenga en cuenta que la taxonomía de los pastizales de la Puna es un desafío porque no existe literatura de identificación integral disponible y puede haber identificaciones erróneas tanto en los datos de la comunidad como de los rasgos. Tenga en cuenta que los taxones no identificados están armonizados en todos los conjuntos de datos.

**Comentarios y opciones de calidad de datos.** Este documento y el código asociado describen e implementan nuestros procedimientos sugeridos de gestión, limpieza y verificación de datos, produciendo lo que consideramos conjuntos de datos finales limpios y de "mejores prácticas" de los proyectos y cursos de pastizales de la Puna. Las diversas columnas de "flag", "comment" y "notes" en las tablas del conjunto de datos (Tablas 2 a 7) brindan más información sobre puntos de datos que podrían usarse para crear procedimientos de limpieza más o menos restrictivos. Los usuarios que prefieran estrategias de manejo de datos más estrictas o inclusivas deben verificar las banderas en los conjuntos de datos sin procesar y ajustar la limpieza de datos en consecuencia.

En los datos de rasgos, seguimos las mejores prácticas de la comunidad para garantizar la calidad de los datos. Filtramos lo que consideramos puntos de datos poco confiables, por ejemplo, masa seca de hojas mayor que masa húmeda de hojas, áreas foliares de escaneos erróneos y mediciones obviamente poco realistas (ver arriba). Toda la limpieza se realiza utilizando el código disponible en GitHub y se recomienda a los usuarios que consulten nuestros procedimientos de limpieza de datos para garantizar que los datos limpios satisfagan sus necesidades de investigación. Tenga en cuenta que los datos de algunos especímenes están incompletos (es decir, puede haber valores de LDMC o SLA, pero no hay masa o área específica de la hoja) debido al muestreo masivo de hojas pequeñas. Debido a los costos de laboratorio y al muestreo masivo de hojas pequeñas, los datos químicos sólo están disponibles para un subconjunto de hojas.

Debido a la interrupción por COVID-19 del curso de rasgos de marzo de 202036,37, las especies solo se muestrearon parcialmente en los sitios ACJ y WAY ese año, centrándose en las especies objetivo para el muestreo de variabilidad de rasgos intraespecíficos (*Halenia umbellata*, *Lachemilla orbiculata*, *Paspalum bonplandianum*, *Rhynchospora macrochaeta*, *Gaultheria glomerata* y *Vaccinium floribundum*) y algunas otras especies fácilmente identificables (*Lachemilla orbiculata*, *Eriosorus cheilanthoides*, *Elaphoglossum huacsaro*, *Hieracium* c.f. *mandonii*, *Baccharis genistelloides*, *Carex pichinchensis*, *Elaphoglossum amphioxys*, *Chaptalia cordata*, *Miconia rotundifolia*, *Lycopodium clavatum*). Además, por la misma razón, no hubo muestreo de composición comunitaria en ningún sitio.

Para el conjunto de datos v, flujos del ecosistema, si los usuarios desean establecer umbrales de exclusión de datos más o menos restrictivos para que los flujos se incluyan en el análisis, esto se puede hacer a partir de los datos sin procesar disponibles en OSF39. Por ejemplo, es posible que los usuarios quieran inspeccionar visualmente mediciones individuales y establecer diferentes períodos de tiempo, utilizar otros cálculos, según sus propios criterios u objetivos de investigación.

Para el conjunto de datos vi, los datos climáticos, utilizamos un tipo de suelo intermedio “franco arenoso A” proporcionado por TOMST para convertir los datos sin procesar de humedad del suelo en la humedad final del suelo proporcionada en los datos limpios. Otras conversiones son posibles y se pueden realizar utilizando los valores de humedad del suelo sin procesar en los datos sin procesar.

**Disponibilidad de código**

El código utilizado para verificar, limpiar y analizar los datos está disponible en el repositorio abierto de GitHub (<https://github.com/Plant-Functional-Trait-Course/pftc3_punaproject_pftc5>), del cual hay una copia versionada disponible en Zenodo40. También hay un enlace al código del conjunto de datos publicado40.

**Disponibilidad de idioma español**

Una versión en español de este documento está disponible en [doi.to\_be\_added\_in\_proof]

**Agradecimientos**

Esta investigación se llevó a cabo en la Estación Biológica de Wayqecha, agradecemos al personal de la estación de campo por su invaluable y generoso apoyo y asistencia. Se agradece al Grupo de Investigación Andes Biodiversity and Ecosystem Research Group (ABERG) por su apoyo y orientación en el establecimiento de esta investigación. La financiación fue proporcionada por el Centro Noruego para la Cooperación Internacional en Educación (SIU) (subvenciones n.º 2013/10074 y HNP2015/10037). Agradecemos a Efraín Santos, Yubert Rojas, Cristian Alvarez y Juliana Centeno por el apoyo durante el trabajo de campo, al Herbario de San Marcos, al Museo de Historia Natural-Universidad Nacional Mayor de San Marcos por apoyar a LLVB para la identificación de especies, y a Christine Schirmer y a los estudiantes de pasantía por brindar ayuda con análisis estequiométricos y de isótopos en la Universidad de Arizona. En especial, agradecemos al Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (SERFOR), al Servicio de Áreas Naturales Protegidas por el Estado (SERNANP) y al personal del Parque Nacional del Manu por otorgar las respectivas autorizaciones de investigación y apoyo logístico.

**Contribuciones de autor**

Seguimos la taxonomía CreDiT71 y reconocemos las siguientes contribuciones de los autores: Conceptualización (co), Curación de datos (da), Análisis formal (fo), Adquisición de fondos (fu), Investigación (in), Metodología (me), Administración de proyectos (pr ), Recursos (re), Software (so), Supervisión (su), Validación (va), Visualización (vi), Escritura – borrador original (wo) y Escritura – revisión y edición (wr), de la siguiente manera: AHH (co, da, fo, fu, in, me, pr, so, su, va, vi, wo), VV (co, fu, in, me, pr, re, su, wo), SHC (co, pr, su), WF-R (co, in, me, pr, re, wr), BSM (co, da, in, me, so, va, vi, wr), STM (co, da, in, me, re, so, va, vi, wr) IOM (co, in, me, pr, re, wr), RJT (co, da, so, va, vi, wr), AC, RC, JSB, PESA (da, in, me, pr, va, wr), LLVB (da, in, me, pr, va, wr), MC, JC-L, CTC, SMD, DDE, RG, SVH, LS, MPS, (co, da, in, me, su, va, wr), MRS (co, pr, su), TS (da, in, me, va, vi, wr), AB, KB, MB, MFC, AC, JG, JG, T-LJG, SRG, FG, JH, KH, AI, LHJ, WJ, EK, KL, ML, TM, MMM, SLM, NLQC, JN, VZ, KO-Z, ACPC, SPP, MEP, VP, JR, RR, HSR, ESD, AS-T, AS, EGUF, JO (da, in, me, va, wr), and BJE (co, fu, in, me, pr, re, su, wr).

**Conflicto de intereses**

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

**Referencias**

1. Rahbek, C. et al. Building mountain biodiversity: Geological and evolutionary processes. Science 365, 1114–1119 (2019).

2. CBD. Mountain Biodiversity. Convention of Biological Diversity https://www.cbd.int/mountain/importance.shtml (2007).

3. Martín-López, B. et al. Nature’s contributions to people in mountains: A review. PLoS One 14, e0217847 (2019).

4. Payne, D., Spehn, E. M., Snethlage, M. & Fischer, M. Opportunities for research on mountain biodiversity under global change. Current Opinion in Environmental Sustainability 29, 40–47 (2017).

5. Elias, S. A. Overview of Mountains (Alpine Systems): Life at the Top. in Encyclopedia of the World’s Biomes (eds. Goldstein, M. I. & DellaSala, D. A.) 251–264 (Elsevier, 2020).

6. Testolin, R., Attorre, F. & Jiménez‐Alfaro, B. Global distribution and bioclimatic characterization of alpine biomes. Ecography 43, 779–788 (2020).

7. IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021).

8. IPBES. Summary for policymakers of the regional assessment report on biodiversity and ecosystem services for Europe and Central Asia of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. (2018).

9. IPCC. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (2014).

10. Shipley, B. et al. Reinforcing loose foundation stones in trait-based plant ecology. Oecologia 180, 923–931 (2016).

11. Funk, J. L. et al. Revisiting the Holy Grail: using plant functional traits to understand ecological processes. Biol. Rev. Camb. Philos. Soc. 92, 1156–1173 (2017).

12. Suding, K. N. et al. Scaling environmental change through the community-level: a trait-based response-and-effect framework for plants. Glob. Chang. Biol. 14, 1125–1140 (2008).

13. McGill, B. J., Enquist, B. J., Weiher, E. & Westoby, M. Rebuilding community ecology from functional traits. Trends Ecol. Evol. 21, 178–185 (2006).

14. Garnier, E. & Navas, M.-L. A trait-based approach to comparative functional plant ecology: concepts, methods and applications for agroecology. A review. Agron. Sustain. Dev. 32, 365–399 (2012).

15. Enquist, B. J. et al. Chapter Nine - Scaling from Traits to Ecosystems: Developing a General Trait Driver Theory via Integrating Trait-Based and Metabolic Scaling Theories. in Advances in Ecological Research (eds. Pawar, S., Woodward, G. & Dell, A. I.) vol. 52 249–318 (Academic Press, 2015).

16. Siefert, A. et al. A global meta-analysis of the relative extent of intraspecific trait variation in plant communities. Ecol. Lett. 18, 1406–1419 (2015).

17. Violle, C. et al. The return of the variance: intraspecific variability in community ecology. Trends Ecol. Evol. 27, 244–252 (2012).

18. Bolnick, D. I. et al. Why intraspecific trait variation matters in community ecology. Trends Ecol. Evol. 26, 183–192 (2011).

19. Bjorkman, A. D. et al. Plant functional trait change across a warming tundra biome. Nature 562, 57–62 (2018).

20. Reich, P. B. The world-wide ‘fast–slow’ plant economics spectrum: a traits manifesto. J. Ecol. 102, 275–301 (2014).

21. Díaz, S. et al. The global spectrum of plant form and function. Nature 529, 167–171 (2016).

22. Wright, I. J. et al. The worldwide leaf economics spectrum. Nature 428, 821–827 (2004).

23. Buytaert, W., Cuesta-Camacho, F. & Tobón, C. Potential impacts of climate change on the environmental services of humid tropical alpine regions. Glob. Ecol. Biogeogr. 20, 19–33 (2011).

24. Myers, N., Mittermeier, R. A., Mittermeier, C. G., da Fonseca, G. A. & Kent, J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. Nature 403, 853–858 (2000).

25. IPBES. The IPBES regional assessment report on biodiversity and ecosystem services for the Americas. http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.3236253 (2018).

26. Christmann, T. & Oliveras, I. Nature of Alpine Ecosystems in Tropical Mountains of South America. in Encyclopedia of the World’s Biomes (eds. Goldstein, M. I. & DellaSala, D. A.) 282–291 (Elsevier, 2020).

27. Zimmermann, M. et al. No Differences in Soil Carbon Stocks Across the Tree Line in the Peruvian Andes. Ecosystems 13, 62–74 (2010).

28. Oliveras, I. et al. Andean grasslands are as productive as tropical cloud forests. Environ. Res. Lett. 9, 115011 (2014).

29. Miller, G. R. & Burger, R. L. Our father the Cayman, our dinner the llama: Animal utilization at Chavín de Huántar, Peru. Am. Antiq. 60, 421–458 (1995).

30. Rolando, J. L. et al. Key ecosystem services and ecological intensification of agriculture in the tropical high-Andean Puna as affected by land-use and climate changes. Agric. Ecosyst. Environ. 236, 221–233 (2017).

31. Urrutia, R. & Vuille, M. Climate change projections for the tropical Andes using a regional climate model: Temperature and precipitation simulations for the end of the 21st century. J. Geophys. Res. 114, (2009).

32. Oliveras, I. et al. Changes in forest structure and composition after fire in tropical montane cloud forests near the Andean treeline. Plant Ecol. Divers. 7, 329–340 (2014).

33. Young, K. R. & León, B. Tree-line changes along the Andes: implications of spatial patterns and dynamics. Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci. 362, 263–272 (2007).

34. Kattge, J. et al. TRY plant trait database - enhanced coverage and open access. Glob. Chang. Biol. 26, 119–188 (2020).

35. Plant Functional Traits Courses – Hands-on training in Plant Functional Traits ecology. https://plantfunctionaltraitscourses.w.uib.no/ (2023).

36. Patrick, L., Thompson, S. & Halbritter, A. H. Adding value to a field‐based course with a science communication module on local perceptions of climate change. Bull. Ecol. Soc. Amer. 101, e01680 (2020).

37. Geange, S. R. et al. Next generation field courses: integrating Open Science and online learning. Ecol. Evol. 11: 3577-3587(2021).

38. Vandvik, V. et al. Plant traits and vegetation data from climate warming experiments along an 1100 m elevation gradient in Gongga Mountains, China. Sci Data 7, 189 (2020).

39. Halbritter A.H. et al. PFTCourses, Elevational Gradient, Puna Project and Fire Experiment, Wayquecha, Peru. OSF https://doi.org/10.17605/OSF.IO/GS8U6 (2023).

40. Halbritter, A. H. et al. PFTC3, Puna project and PFTC5 - PFTCourses, Elevational Gradient, Puna Project and Fire Experiment, Wayquecha, Peru. Zenodo https://doi.org/10.5281/zenodo.10071893 (2023).

41. Halbritter, A. H. et al. The handbook for standardized field and laboratory measurements in terrestrial climate change experiments and observational studies (ClimEx). Methods Ecol. Evol. 11, 22–37 (2020).

42. Wilkinson, M. D. et al. The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship. Sci Data 3, 160018 (2016).

43. Alston, J. M. & Rick, J. A. A beginner’s guide to conducting reproducible research. Bull. Ecol. Soc. Am. 102, 1–14 (2021).

44. Hampton, S. E. et al. The Tao of open science for ecology. Ecosphere 6, art120 (2015).

45. Vandvik, V. et al. The role of plant functional groups mediating climate impacts on carbon and biodiversity of alpine grasslands. Sci Data 9, 451 (2022).

46. Girardin, C. A. J. et al. Productivity and carbon allocation in a tropical montane cloud forest in the Peruvian Andes. Plant Ecol. Divers. 7, 107–123 (2014).

47. Oliveras, I. et al. Grass allometry and estimation of above-ground biomass in tropical alpine tussock grasslands. Austral Ecol. 39, 408–415 (2014).

48. Gibbon, A. et al. Ecosystem carbon storage across the grassland–forest transition in the High Andes of Manu National Park, Peru. Ecosystems 13, 1097–1111 (2010).

49. Van der Eynden, M. Effects of fire history on species richness and carbon stocks in a Peruvian puna grassland, and development of allometric equations for biomass estimation of common puna species. (nmbu.brage.unit.no, 2011).

50. Román-Cuesta, R. M. et al. Implications of fires on carbon budgets in Andean cloud montane forest: The importance of peat soils and tree resprouting. For. Ecol. Manage. 261, 1987–1997 (2011).

51. P. Sklenář, J. L. Luteyn, C. Ulloa Ulloa, P. M. Jørgensen & M. O. Dillon. Flora genérica de los Páramos. Guía Ilustrada de las Plantas Vasculares. vol. 92 (The New York Botanical Garden Press, 2005).

52. Tovar, O. Manual de identificación de pastos naturales de los andes del sur peruano (Gramíneas). http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=iicacr.xis&method=post&formato=2&cantidad=1&expresion=mfn=024204 (1988).

53. Sylvester, S. P. et al. Páramo Calamagrostis s.l. (Poaceae): An updated list and key to the species known or likely to occur in páramos of NW South America and southern Central America including two new species, one new variety and five new records for Colombia. PhytoKeys 122, 29–78 (2019).

54. Maitner, B. & Boyle, B. TNRS: Taxonomic Name Resolution Service. Preprint at https://CRAN.R-project.org/package=TNRS (2021).

55. Boyle, B. et al. The taxonomic name resolution service: an online tool for automated standardization of plant names. BMC Bioinformatics 14, 16 (2013).

56. Missouri Botanical Garden. Tropicos. Preprint at http://www.tropicos.org (2012).

57. TPL. The plant list version 1.1. Preprint at http://www.theplantlist.org}, (2013).

58. USDA, NRCS. The PLANTS Database. Preprint at http://plants.usda.gov (2015).

59. Pérez-Harguindeguy, N. et al. New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide. Austral. Bot. (2013) doi:10.1071/BT12225.

60. Schneider, C. A., Rasband, W. S. & Eliceiri, K. W. NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. Nat. Methods 9, 671–675 (2012).

61. Katabuchi, M. LeafArea: Rapid Digital Image Analysis of Leaf Area. (2017).

62. Sloat, L. L., Henderson, A. N., Lamanna, C. & Enquist, B. J. The Effect of the Foresummer Drought on Carbon Exchange in Subalpine Meadows. Ecosystems 18, 533–545 (2015).

63. Schlesinger, W. H. & Bernhardt, E. S. Biogeochemistry: An Analysis of Global Change. (Academic Press, 2013).

64. Huxman, T. E. et al. Response of net ecosystem gas exchange to a simulated precipitation pulse in a semi-arid grassland: the role of native versus non-native grasses and soil texture. Oecologia 141, 295–305 (2004).

65. Huxman, T. E. et al. Precipitation pulses and carbon fluxes in semiarid and arid ecosystems. Oecologia 141, 254–268 (2004).

66. Arnone, J. A. & Obrist, D. A large daylight geodesic dome for quantification of whole-ecosystem CO2 and water vapour fluxes in arid shrublands. J. Arid Environ. 55, 629–643 (2003).

67. Street, L. E., Shaver, G. R., Williams, M. & Van Wijk, M. T. What is the relationship between changes in canopy leaf area and changes in photosynthetic CO2flux in arctic ecosystems? J. Ecol. 95, 139–150 (2007).

68. Jasoni, R. L., Smith, S. D. & Arnone, J. A. Net ecosystem CO2 exchange in Mojave Desert shrublands during the eighth year of exposure to elevated CO2. Glob. Chang. Biol. 11, 749–756 (2005).

69. Saleska, S. R., Harte, J. & Torn, M. S. The effect of experimental ecosystem warming on CO 2 fluxes in a montane meadow. Glob. Chang. Biol. 5, 125–141 (1999).

70. Wild, J. et al. Climate at ecologically relevant scales: A new temperature and soil moisture logger for long-term microclimate measurement. Agric. For. Meteorol. 268, 40–47 (2019).

71. CRediT - Contributor Roles Taxonomy. https://casrai.org/credit/ (2019).