

EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE CAPTURA DE DIÓXIDO DE CARBONO (CO₂) EN PASTIZALES DE CHILLIGUA (*Festuca dolichophylla* J.Presl) EN ECOSISTEMAS ALTOANDINOS

EVALUATION OF CARBON DIOXIDE (CO₂) CAPTURE POTENTIAL IN CHILLIGUA (*Festuca dolichophylla* J.Presl) PASTURES IN ALTOANDINE ECOSYSTEMS

Mario Flores-Aroni^{1*} y Giovana Mamani-Huayhua¹

¹ Universidad Nacional del Altiplano, Escuela Profesional de Ingeniería Agronómica. Puno, Perú

 <https://orcid.org/0000-0002-1206-0743>

 <https://orcid.org/0000-0001-8279-9925>

*Autor para correspondencia, email: mariofloresaroni@gmail.com

Resumen

Los ecosistemas altoandinos desempeñan un papel fundamental en la provisión de servicios ecosistémicos, sin embargo, la información sobre su capacidad para capturar dióxido de carbono (CO₂) es limitada. Este estudio tuvo como objetivo determinar el potencial de captura de dióxido de carbono en pastizales de Chilligua (*Festuca dolichophylla* J.Presl) en el Centro Experimental (CE) Illpa. Se evaluaron tres componentes (hojas, tallos y raíces) de la Chilligua. Se utilizó el método de conteo de plantas en parcelas cuadradas para estimar la densidad, y se determinó la biomasa en materia verde y seca y el contenido de carbono mediante el método de poder calórico. Los resultados mostraron que la densidad de Chilligua fue de 10 650 matas ha⁻¹ en CE Illpa. La biomasa seca en el CE Illpa fue de 5.73 tnMS ha⁻¹, con diferencias significativas en la producción de biomasa seca y el tallo fue el componente que más contribuyó a la biomasa. El contenido de carbono fue 2.52 tnC ha⁻¹ en hoja, tallo y raíz, el tallo almacena más carbono. Finalmente, la captura de CO₂ fue de 9.24 tnCO₂ ha⁻¹ en hoja, tallo y raíz, el tallo almacena más CO₂ en su estructura. En total, se estima que en las 105.60 ha de Chilligua se capturan 275.64 tnCO₂, destacando la importancia de estos ecosistemas en la mitigación del cambio climático.

Palabras clave: Ecosistemas altoandinos, dióxido de carbono (CO₂), *Festuca dolichophylla*, biomasa seca, captura de CO₂

Abstract

High Andean ecosystems play a fundamental role in the provision of ecosystem services, however, information on their capacity to capture carbon dioxide (CO₂) is limited. The objective of this study was to determine the carbon dioxide sequestration potential of Chilligua (*Festuca dolichophylla* J.Presl) grasslands at the Experimental Center (EC) Illpa. Three components (leaves, stems and roots) of Chilligua were evaluated. The method of counting plants in square plots was used to estimate the density, and the biomass was determined in the stove, and the carbon content by the caloric power method. The results showed that the density of Chilligua was 10 650 mats ha⁻¹ in CE Illpa. Dry biomass in CE Illpa was 5.73 tnMS ha⁻¹, with significant differences in dry biomass production and the stem was the component that contributed most to biomass. Carbon content was 2.52 tnC ha⁻¹ in leaf, stem and root, with the stem storing more carbon. Finally, CO₂ capture was 9.24 tnCO₂ ha⁻¹ in leaf, stem and root, the stem stores more CO₂ in its structure. In total, it is estimated that 275.64 tnCO₂ are captured in the 105.60 ha of Chilligua, highlighting the importance of these ecosystems in climate change mitigation.

Keywords: high Andean ecosystems, carbon dioxide (CO₂), *Festuca dolichophylla*, dry biomass, CO₂ sequestration

Introducción

Las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) durante la mitad del siglo XIX en la atmósfera han ocasionado cambios en el clima (IPCC, 2014). El dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), ozono (O₃) y óxido nitroso (N₂O) son gases de origen natural o derivados de las actividades humanas que retienen radiación, causando el efecto invernadero (IPCC, 2018). El CO₂ es considerado de importancia dentro de los GEI por la cantidad presente en la atmósfera (IPCC, 2007).

Ante el actual escenario del cambio climático, es necesario estudiar y determinar aquellas especies vegetales capaces captar y almacenar CO₂ de la atmósfera (Luccini et al., 2018). Es crucial analizar la reserva o "Stock" de carbono que almacenan los ecosistemas forestales, ya que son considerados como los sumideros más importantes de CO₂ (Eyzaguirre, 2018). La captura y almacenamiento de carbono se ha transformado en una estrategia a nivel internacional para reducir el impacto de los GEI (Medina et al., 2020). La vulnerabilidad de los servicios de regulación del clima probablemente aumentará como resultado del cambio climático (Villa et al., 2019). Por lo tanto, la comprensión de la dinámica del carbono en los biomas o ecosistemas es fundamental para el éxito de los proyectos de mitigación (Andrade et al., 2019).

La *Festuca dolichophylla* es una especie perenne que crece en zonas altoandinas. Es una especie nativa que vive en los Andes de América del Sur. Además, se puede encontrar en América del Norte y Central, en particular en México y Costa Rica. La Chilligua juega un papel importante en los ecosistemas y comunidades andinas de Ecuador, Perú, Bolivia y el norte de Argentina (Eduardo-Palomino et al., 2024).

El 14.2% del territorio peruano está cubierto por pastizales altoandinos, los géneros *Festuca*, *Calamagrostis* y *Stipa* dominan los pajonales (Valverde et al., 2022). Las praderas de Chilligua se encuentran distribuidas en forma discontinua, los pastizales naturales en el Perú ocupan una superficie total de 15 127 000 hectáreas, en la sierra existen 14 300 000 hectáreas, en el altiplano de Puno los pastizales naturales ocupan una extensión de 3 304 000 hectáreas y un total de 241 789 ha de pastizal Chilligua. Por lo general esta pradera se localiza en las zonas de vida bosque húmedo montano y páramo muy húmedo subalpino entre los 3830 y 4600 metros de altitud (Choque, 2015). La *Festuca dolichophylla* es conocida por su contribución a la biodiversidad y estabilidad del suelo en los pastizales altoandinos y por su capacidad para adaptarse a suelos pobres (Tirado et al., 2022).

Los ecosistemas altoandinos tienen especies que son considerados como sumideros significativos de carbono por área, entre ellos *Stipa ichu* (Ruiz y Pav.) Kunth, 1829

(Rivera y Zamora, 2019), otras especies como la totora, junco, hinea, carricillo y grama salada (Luccini et al., 2018). Por lo tanto, en un enfoque basado en los ecosistemas, su conservación es esencial para la adaptación al cambio climático y su mitigación (Kabishch et al., 2017). No obstante, hasta el momento, la investigación sobre el servicio ecosistémico de almacenamiento de carbono en los ecosistemas altoandinos en Perú ha sido limitada (Rivera & Zamora, 2019). Aun careciendo de información adecuada sobre los inventarios en estos ecosistemas.

Dado el creciente interés por las estrategias de mitigación del cambio climático, la evaluación del potencial de captura de CO₂ en Chilligua en los pastizales altoandinos es un tema de gran relevancia. La presencia de esta especie en altitudes elevadas y condiciones climáticas extremas ofrece una oportunidad importante para capturar carbono en ecosistemas vulnerables. El objetivo del presente estudio fue determinar el potencial de captura de CO₂ en Chilligua, analizando su capacidad de almacenamiento de carbono y su contribución a la mitigación del cambio climático, además de promover prácticas de manejo sostenible que optimicen el uso de estos ecosistemas como sumideros de carbono.

Dado que los pastizales juegan un papel crucial en la regulación de las emisiones de CO₂ a través de la fotosíntesis, fijando el carbono en el follaje, tallo y raíz, es fundamental estudiar estos ecosistemas mediante métodos específicos para cada especie. Esto permitirá, en futuros estudios, modelar la cantidad de carbono secuestrado en esta área, reforzando su potencial como herramienta para mitigar los efectos del cambio climático.

Materiales y Métodos

Área de estudio

El estudio se desarrolló en el Centro Experimental (CE) Illpa de la Universidad Nacional del Altiplano ubicado en el departamento de Puno, distrito de Paucarcolla, Puno, a una altitud de 3850 m.s.n.m., con UTM 19S 384809.00 E, 8262886.00 S (Figura 1).

El área del CE Illpa se localiza en la región ecológica Suni, en la zona de vida de Bosque Húmedo Montano Subtropical, entre 3815 y 4000 m.s.n.m. Esta región presenta temperaturas que oscilan entre 6 °C y 12 °C, con una precipitación anual de 700 mm y una humedad relativa baja, lo que genera un clima frío y seco. Según la clasificación de ecorregiones del Perú, el CE Illpa pertenece a la ecorregión Puna y los altos andes, donde las temperaturas nocturnas son inferiores a 6 °C y pueden alcanzar hasta 30 °C durante el día.

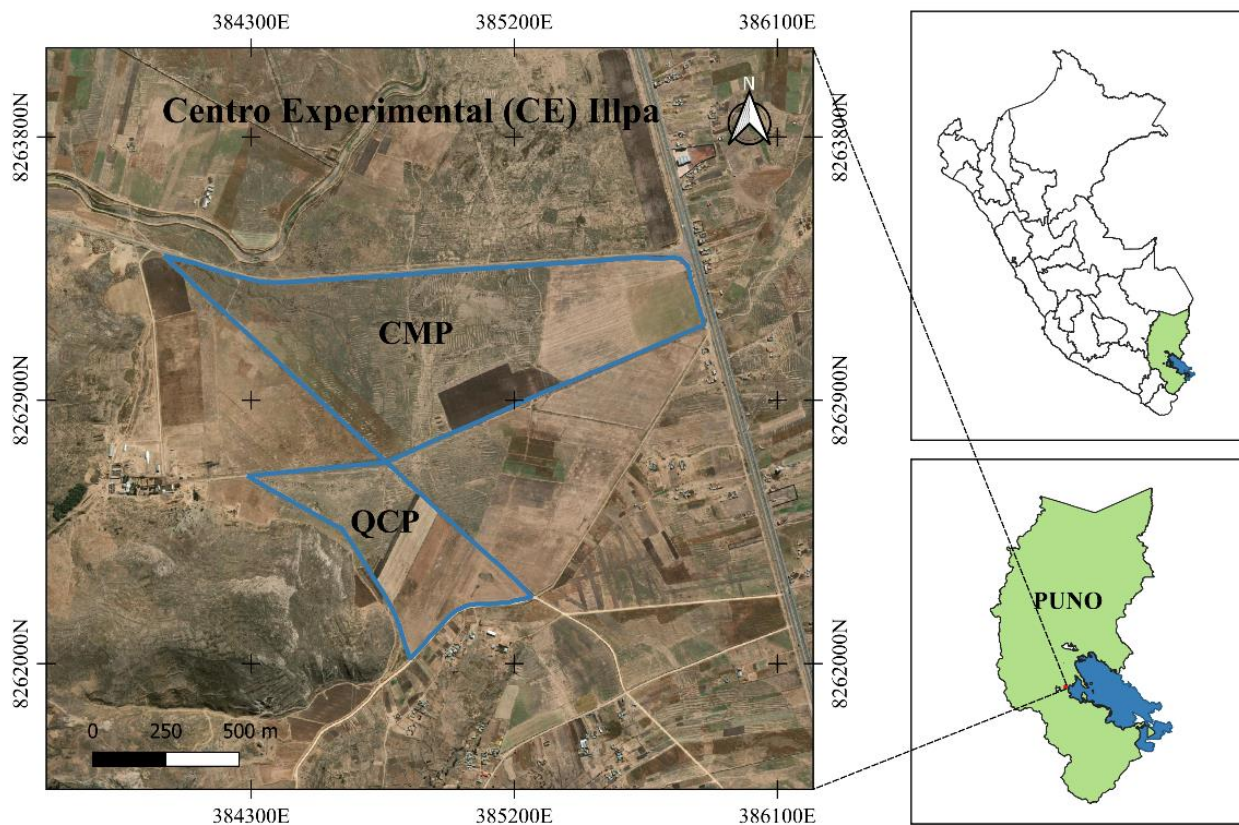


Figura 1. Ubicación del área de estudio

Diseño experimental

Disposición de las parcelas

1. Chiji Mocco Pampa (CMP) con coordenadas UTM 384922 E, 8263078 S, de fisiografía plana, adyacente a la carretera a Sillustani, del CE Illpa. En esta área se desarrolla la asociación *Festuchetum-Muhlenbergietum*, el cual tiene como especie dominante al pastizal Chilligua. La asociación se encuentra en el piso altitudinal montano a 3820 m.s.n.m., ocupa un sitio de relieve plano poco ondulado, con una pendiente ligera de 2 a 3%, perteneciendo a la serie de suelos Titicaca (Choque, 2015). Además, el sitio CMP cubre una extensión de 69.97 ha (Figura 1).

2. Quello Circa Pampa (QCP) con coordenadas UTM 384733 E, 8262517 S, de fisiografía plana, donde se desarrolla la asociación *Muhlenbergietum-Festuchetum*, con presencia de dos especies perennes dominantes *Muhlenbergia fastigiata* (J.Presl) Henrard y *Festuca dolichophylla*. La asociación se encuentra en el piso

altitudinal montano a 3824 m.s.n.m., ocupa una fisiografía de relieve plano, poco ondulado, con una pendiente de 3 a 4%, perteneciendo a suelos de la serie Titicaca (Choque, 2015). Cubre una extensión total de 35.63 ha (Figura 1).

Densidad de la Chilligua

La densidad de la Chilligua se determinó utilizando el método de “Conteo de plantas en parcela cuadrada” propuesto por (Choque, 2015; MINAM, 2015). Este método se utiliza para estimar con mayor precisión la cantidad de especies arbustivas y de especies cespitadas amacolladas de crecimiento erecto existentes por hectárea del pastizal. Se ubicó al azar cuatro parcelas cuadradas de 25 m² de cada sitio (Figura 2), la densidad (D) o el número de matas de Chilligua por parcela (m²), se calculó con la fórmula siguiente:

$$D/m^2 = \frac{\text{suma de plantas contadas de una especie}}{\text{suma del area de las parcelas cuadradas}}$$

El área promedio que ocupa la Chilligua (A), se calculó dividiendo la suma del área de las parcelas por la suma de las Chilliguas contados, con la siguiente fórmula:

$$A = \frac{\text{suma del área de las parcelas cuadradas}}{\text{suma de una planta contada}} = \text{m}^2/\text{planta}$$

La densidad de las matas de “Chilligua” por hectárea (D/ha), se calculó por la siguiente fórmula:

$$D/\text{ha} = \frac{(1 \text{ planta})(10\,000\text{m}^2)}{\text{Área ocupada por cada planta}}$$



Figura 2. Pastizal de Chilligua

Medición de biomasa

La medición de biomasa verde por hectárea se realizó utilizando el método “Destructivo”, que consistió en la extracción física de las matas, separación y pesaje de sus componentes (hoja, tallo y raíz) (Choque, 2015). Las muestras se extrajeron con ayuda de un pico, separados por tamaño (pequeño de 0.01-0.40 m, mediano de 0.41-0.80 m y grande de 0.81 m a más) y separados manualmente la hoja, tallo y raíz, estas muestras fueron analizadas en el laboratorio de Pastos y Forrajes de la Universidad Nacional del Altiplano; para determinar el porcentaje de humedad y materia seca.

Determinación del contenido de carbono

La determinación del contenido de carbono, se realizó a través de la fracción de conversión del carbono de la Chilligua, en la hoja, tallo y raíz; las muestras se analizaron en el Laboratorio de Evaluación Nutricional de Alimentos (LENA) de la Universidad Nacional Agraria la Molina (UNALM), utilizando el método del poder calórico (Eduarte y Segura, 1998).

Para estimar el contenido de carbono (tnC ha^{-1}) almacenado en la hoja, tallo y raíz de la Chilligua se utilizó la siguiente fórmula propuesta por Eduarte y Segura (1998):

$$C = MS \times FC$$

Dónde:

C :Contenido de carbono (tnC ha^{-1})

MS :Materia seca (tn ha^{-1})

FC :Fracción de carbono

Cuantificación de dióxido de carbono

Con los datos obtenidos en el cálculo del carbono (tnC ha^{-1}), se estimó la captura de CO_2 de un ecosistema de pastizal Chilligua (Eduarte y Segura, 1998). Para ello se utilizó la siguiente fórmula:

$$\text{CO}_2 = C \times Kr$$

Dónde:

CO_2 : Dióxido de carbono en toneladas

C : Carbono (tnC ha^{-1})

Kr : 44/12 (Factor de conversión de carbono a dióxido de carbono)

Diseño experimental

Para analizar los datos de producción de materia seca de la Chilligua se utilizó el diseño completamente al azar en parcelas divididas (dos áreas y tres tamaños de Chilligua en sub parcelas, con cuatro repeticiones). Se utilizó análisis de varianza (ANOVA) y se compararon mediante la prueba de Tukey para indicar las diferencias significativas entre las medias. Las diferencias fueron considerados significativas al nivel de probabilidad de $p < 0.05$. Los análisis estadísticos fueron realizados con el software estadístico InfoStat versión 2020.

Resultados y discusión

Densidad de matas de Chilligua

La densidad de matas de Chilligua en Chiji Mocco Pampa (CMP) fueron mayores en comparación a Quello Circa

Pampa (QCP) de 11 100 matas ha⁻¹ y 10 200 matas ha⁻¹ de Chilligua, respectivamente. El tamaño con mayor densidad de matas en CMP fue medianos con 39.64% y en QCP fue grande con 37.25% (Tabla 1).

Tabla 1. Densidad de *Festuca dolichophylla*

Tamaño	Altura Chilligua (m)	Sitios pastizal Chilligua					
		Chiji Mocco Pampa (CMP)			Quello Circa Pampa (QCP)		
		N° Matas		%	N° Matas		%
		25 m ²	ha		25 m ²	ha	
Grande	0.81 a +	10.25	4 100	36.94	9.5	3 800	37.25
Mediano	0.41 - 0.80	11	4 400	39.64	9.25	3 700	36.27
Pequeño	0.01 - 0.40	6.5	2 600	23.42	6.75	2 700	26.47
TOTAL			11 100	100.00		10 200	100.00

De acuerdo a los resultados obtenidos, la Chilligua de tamaño mediano es la más abundante en sitio CMP, mientras que las matas en QCP de tamaño grande son más abundantes, seguido de mediano y pequeño. Los datos de densidad proporcionan un elemento esencial para comprender la dinámica de población de la misma especie a través del tiempo, la menor densidad refleja en nivel reemplazamiento (Heady, 1971).

La variación en la densidad de matas de Chilligua puede ser atribuido al suelo, topografía, pendiente y zona donde se desarrollan. La presencia de *Festuca dolichophylla* indica un suelo profundo de pH neutro y por su resistencia a bajas temperaturas hace que sea apetecible aún en los meses de la época seca, sin embargo, su valor nutricional decrece enormemente a medida que la Chilligua madura (Ruiz y Tapia, 1987). En una investigación con *Stipa ichu* encontraron una mayor densidad de 63035.67 matas ha⁻¹ (Rivera y Zamora, 2019), este resultado es mucho mayor en comparación a los resultados obtenidos en este estudio.

Por su parte Choque (2015), indica que las praderas de Chilligua se encuentran distribuidas en forma discontinua en el altiplano, ocupan principalmente zonas de relieve plana, planicie angosta ondulada, se desarrollan en suelos profundos, de textura franco-arcilloso estacionalmente húmedos, de permeabilidad moderadamente lenta y ligeramente ácido a neutro. En el altiplano norte ocupan una extensión estimada de 229 781 hectáreas y en la zona sur ocupa una superficie estimada de 12 008 hectáreas. Por lo general esta pradera se localiza en las zonas de vida bosque húmedo montano y páramo muy húmedo subalpino entre los 3830 y 4600 metros de altitud.

Producción de biomasa

La producción de biomasa verde y seca de la Chilligua por componentes en el sitio Chiji Mocco Pampa fue 5.46 tn ha⁻¹ y 4.84 tn ha⁻¹ respectivamente. Mientras que la producción de biomasa verde y seca en el sitio Quello Circa Pampa fue 7.56 tn ha⁻¹ y 6.61 tn ha⁻¹ respectivamente (Tabla 2). El tallo muestra la mayor producción de biomasa, seguido de la hoja y raíz, probablemente debido a que los tallos de Chilligua son hueco, cilíndrico, erecto, muy abundante, las hojas involutas son escasos; a diferencia de las raíces que son fibrosas profundas.

Ticona (2012), indica que la producción promedio de biomasa verde y seca de arbustos de Añahuaya (*Adesmia miraflorensis* J.Rémy) fue 14.73 tn ha⁻¹ y 8.89 tn ha⁻¹ respectivamente. En el presente estudio se observa que la producción de biomasa verde promedio es de 6.51 tn ha⁻¹ y 5.73 tn ha⁻¹ de biomasa seca, este resultado es menor al encontrado por Ticona, se puede atribuir al mayor tamaño del arbusto Añahuaya. Así mismo, en *Stipa ichu* reportaron una biomasa verde de 26.56 tn ha⁻¹ y 15.43 tn ha⁻¹ de biomasa seca (Rivera y Zamora, 2019), este resultado es mayor al presente estudio, puede ser atribuido a la mayor densidad del *Stipa ichu* en comparación a *Festuca dolichophylla*.

Por su parte, Ttimpo (2010), reportó para el sitio Chiji Mocco Pampa, la disponibilidad de materia seca (MS) de la asociación *Festuchetum-Muhlenbergietum*, es 2.41 ± 0.58 tn ha⁻¹ para época de lluvia y 2.37 ± 0.62 tn ha⁻¹ para la época seca, mientras para el sitio Quello Circa Pampa, la disponibilidad de la MS de la asociación *Muhlenbergietum-Festuchetum* es de 3.29 ± 0.75 tn ha⁻¹

Tabla 2. Producción de biomasa verde y seca del pastizal Chilligua por componente del CE Illpa.

Componente	Sitios del pastizal Chilligua							
	Chiji Mocco Pampa (CMP)				Quello Circa Pampa (QCP)			
	Producción de biomasa				Producción de biomasa			
	Verde		Seca		Verde		Seca	
	tn ha ⁻¹	%	t/ha	%	tn ha ⁻¹	%	t/ha	%
Hoja	0.62 ^b	11.31	0.40 ^b	8.29	0.87 ^a	11.46	0.62 ^a	9.40
Tallo	4.49 ^b	82.12	4.19 ^b	86.42	6.46 ^a	85.43	5.82 ^a	88.05
Raíz	0.36 ^a	6.57	0.26 ^a	5.28	0.24 ^a	3.11	0.17 ^a	2.55
Total	5.46	100.00	4.84	100.00	7.56	100.00	6.61	100.00

para época de lluvia y 2.84 ± 0.49 tn ha⁻¹ para época seca, considerándose en ambos casos solo la biomasa aérea, mas no la raíz. Comparando estos resultados con los encontrados en el presente estudio que se desarrolló en época de transición, encontramos que la producción de biomasa de la Chilligua es mayor, esta diferencia puede ser atribuida por que se ha considerado toda la biomasa aérea y de la raíz.

tallo 1.83 tnC ha⁻¹ y raíz 0.10 tnC ha⁻¹, lo que en conjunto hace en total 2.10 tnC ha⁻¹; mientras que para el sitio Quello Circa Pampa es 0.27 tnC ha⁻¹ en hoja, 2.61 tnC ha⁻¹ en tallo y 0.07 tnC ha⁻¹ en raíz, lo que hace en total 2.94 tnC ha⁻¹; tendencia muy similar a lo encontrado en los resultados de fracción de carbono. Además, podemos indicar que el mayor contenido de carbono se encuentra en el tallo, hoja y raíz, en ambos sitios (Tabla 3 y Figura 3).

Carbono en la Chilligua

El contenido de carbono que almacena la Chilligua en el sitio Chiji Mocco Pampa en hoja fue 0.17 tnC ha⁻¹, en

Tabla 3. Contenido de carbono por tamaño de la Chilligua del CE Illpa

Componentes	Sitios del pastizal Chilligua					
	Chiji Mocco Pampa (CMP)			Quello Circa Pampa (QCP)		
	Fracción de carbono	Contenido de carbono		Fracción de carbono	Contenido de carbono	
		tnC ha ⁻¹	%		tnC ha ⁻¹	%
Hoja	0.42	0.17 ^b	8.02	0.43	0.27 ^a	9.06
Tallo	0.44	1.83 ^b	87.37	0.45	2.61 ^a	88.70
Raíz	0.38	0.10 ^a	4.61	0.39	0.07 ^a	2.24
Total		2.10	100.00		2.94	100.00

Por otra parte, podemos indicar que el contenido de carbono en la Chilligua está directamente relacionada al ritmo de crecimiento de la especie, es decir a mayor tamaño, mayor producción de biomasa lo que se traduce en un mayor contenido de carbono en las matas.

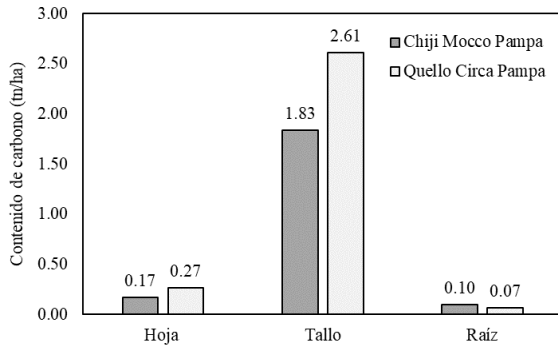


Figura 3. Contenido de carbono por componente (hoja, tallo y raíz) de la Chilligua

Según Rivera y Zamora (2019), el almacenamiento de carbono promedio en *Stipa ichu* fue de 8.67 tnC ha⁻¹, este resultado es mayor al reportado en el presente estudio. Los tallos de *Festuca dolichophylla* contienen una gran cantidad de carbono fijado (Eduardo-Palomino et al., 2024). En otro estudio, realizado en el pajonal *Deyeuxia recta* Kunth almacena 7.02 tC ha⁻¹ en su biomasa aérea y 8.41 tC ha⁻¹ en su biomasa radicular (Medrano et al.,

2012). El servicio ecosistémico de captura y almacenamiento de CO₂ según el tipo de formación vegetal y su extensión (Medina et al., 2020). Así mismo, los pastizales con alta perturbación pueden capturar 7.8 tC ha⁻¹, mientras que los pastizales de baja perturbación pueden capturar 12.7 tC ha⁻¹ (Chavez, 2021).

Captura de dióxido de carbono de la Chilligua

La captura de CO₂, en Chiji Mocco Pampa fue 0.62 tnCO₂ ha⁻¹ en hojas, 6.73 tnCO₂ ha⁻¹ en tallos y 0.35 tnCO₂ ha⁻¹ en raíces, lo que hace en total 7.70 tnCO₂ ha⁻¹; en cambio el sitio Quello Circa Pampa presentó 0.98 tnCO₂ ha⁻¹ en hojas, 9.56 tnCO₂ ha⁻¹ en tallos y en raíces 0.24 tnCO₂ ha⁻¹, lo que hace en total 10.78 tnCO₂ ha⁻¹ (Tabla 4). Además, podemos indicar que la mayor captura de CO₂ se encuentra en el tallo, seguido de la hoja y la raíz en ambos sitios.

Tabla 4. Captura de dióxido de carbono por componente de la Chilligua del CE Illpa

Componente	Sitios							
	Chiji Mocco Pampa (CMP)				Quello Circa Pampa (QCP)			
	Contenido de carbono (tnC ha ⁻¹)	Factor	Captura de carbono		Contenido de carbono (tnC ha ⁻¹)	Factor	Captura de carbono	
			tnCO ₂ ha ⁻¹	%			tnCO ₂ ha ⁻¹	%
Hoja	0.17	44/12	0.62 ^b	8.02	0.27	44/12	0.98 ^a	9.06
Tallo	1.83	44/12	6.73 ^b	87.37	2.61	44/12	9.56 ^a	88.70
Raíz	0.10	44/12	0.35 ^a	4.61	0.07	44/12	0.24 ^a	2.24
Total	2.10		7.70	100.00	2.94		10.78	100.00

La media de almacenamiento de carbono y CO₂ por la biomasa aérea obtenida en este estudio fue similar a la de otros estudios (Lapeyre et al., 2004; Mota et al., 2014). Por otro lado, el C y CO₂ fueron menores que los presentados por Luccini et al. (2018), Medrano et al. (2012) y Rivera & Zamora (2019), y mayores cuando se comparan a los presentados por Lapeyre et al. (2004). La diferencia puede atribuirse a las diferentes especies, técnica de análisis de carbono y madurez fisiológica (Tabla 5). Otro estudio realizado en pajonal, dominado por *Stipa spp.* Linnaeus y *Festuca orthophylla* Pilg., la cantidad de carbono almacenado fue 16.84 tnCO₂ ha⁻¹, (Medina et al., 2020). El servicio de almacenamiento y secuestro de CO₂ varía según el tipo de formación vegetal (Medina et al., 2020),

que podría responder a las diferencias en los resultados de este estudio.

Tabla 5. Carbono almacenado y dióxido de carbono en biomasa aérea de diferentes plantas herbáceas

Especie	Contenido de carbono (tnC ha ⁻¹)	Captura de CO ₂ (tnCO ₂ ha ⁻¹)	Referencia
<i>Brachiaria brisantha</i> (Pasto alambre)	2.30	8.43	Lapeyre et al. (2004)
<i>Zea mays</i> L. (Maiz)	4.40	16.13	Lapeyre et al. (2004)
<i>Oryza sativa</i> L. (Arroz)	1.70	6.23	Lapeyre et al. (2004)
<i>Distichlis spicata</i> (Gramma salada)	11.25	41.25	Luccini et al. (2018)
<i>Phragmites australis</i> (Carricillo)	10.16	37.25	Luccini et al. (2018)
<i>Schoenoplectus californicus</i> (Totora)	16.83	61.71	Luccini et al. (2018)
<i>Deyeuxia recta</i> Kunth (Pajonal)	7.02	25.74	Medrano et al. (2012)
<i>Juncos arcticus</i> Var. Andicola (Junco)	8.70	31.90	Medrano et al. (2012)
<i>Triticum aestivum</i> L. (Trigo)	3.00	11.00	Mota et al. (2014)
<i>Hordeum vulgare</i> L. (Cebada)	3.60	13.20	Mota et al. (2014)
<i>Avena sativa</i> L. (Avena)	3.00	11.00	Mota et al. (2014)
<i>Adesmia miraflorensis</i> J.Rémy (Añahuaya)	4.34	15.91	Ticona (2012)
<i>Stipa ichu</i> (Ruiz & Pav.) Kunth (Ichu)	8.67	31.79	Rivera & Zamora (2019)
<i>Festuca dolichophylla</i> J.Presl (Chilligua)	2.88	10.56	Estudio actual

La capacidad de *Festuca dolichophylla* para la captura de CO₂ la hace crucial para programas de revegetación, lo que contribuye significativamente a la mitigación del cambio climático. También fortalece la estructura del suelo, evita la erosión y recupera ecosistemas dañados, aumentando la capacidad de resistencia de los pastizales altoandinos.

La revegetación es una estrategia fundamental para la conservación ambiental y el bienestar climático global porque promueve la biodiversidad, regula el ciclo hídrico y garantiza la sostenibilidad ecológica al favorecer el secuestro de carbono en la biomasa y el suelo. Estudio realizado por Mamani et al. (2024) y Eduardo-Palomino et al. (2024), indican que para la revegetación de la *Festuca dolichophylla*, se puede revegetar a través de macollos vegetativos, semillas y esquejes, junto con otras especies nativas, para mantener la diversidad en los pastizales.

En particular en las zonas andinas, donde *Festuca dolichophylla* tiene múltiples aplicaciones y ventajas, es esencial realizar esfuerzos de gestión y conservación adaptativos, estratégicos y organizados. Además, el uso de esta especie en proyectos de revegetación y restauración de pastizales destaca la necesidad de realizar esfuerzos continuos de investigación y gestión para garantizar su conservación y uso sostenible (Eduardo-Palomino et al., 2024).

Conclusiones

La densidad de matas de Chilligua varía entre el sitio Chiji Mocco Pampa predominando las matas de tamaño mediano, mientras que en Quello Circa Pampa las matas grandes son más abundantes. Las diferencias en densidad reflejan las condiciones del suelo, topografía y clima.

La producción de biomasa fue mayor en Quello Circa Pampa en comparación con Chiji Mocco Pampa, los tallos son los componentes que más contribuyen a la biomasa total, seguidos de las hojas y raíces, lo que resalta la importancia de esta especie en la captura de carbono.

La captura de carbono en ambos sitios mostró que los tallos almacenan la mayor cantidad de carbono, seguidos de hojas y raíces. En Quello Circa Pampa se capturó un total de 10.78 tnCO₂ ha⁻¹, mientras que en Chiji Mocco Pampa se capturaron 7.70 tnCO₂ ha⁻¹, evidenciando el potencial de la Chilligua para mitigar el cambio climático.

La *Festuca dolichophylla* desempeña un papel importante como sumidero de carbono en la captura de CO₂ en los pastizales altoandinos. Esta planta absorbe el CO₂ de la atmósfera a través del proceso de fotosíntesis y lo almacena en su biomasa (raíces, tallos y hojas). Esto indica que la Chilligua no solo contribuye a la mitigación del cambio climático en los ecosistemas altoandinos, sino que su manejo y conservación son fundamentales para maximizar su potencial en la captura de carbono.

Referencias

- Andrade, H. J., Segura, M. A., y Sons, A. C. (2019). Estimación rápida y sencilla del carbono en la biomasa de bosques andinos y altoandinos y herbazales no arbolados del Tolima y Boyacá, Colombia (Grupo de Investigación Producción Ecoamigable de Cultivos Tropicales (PROECUT), Vol. 1). CMYK Diseño e Impresos S.A.S. <https://repository.ut.edu.co/entities/publication/6b45ffb-a351-4c5d-a6aa-57c6c4aed22c>
- Chavez, A. (2021). Influencia antrópica en la captura de carbono por los pastizales naturales del distrito de Santillana (Laupay), Ayacucho [Tesis Pregrado, Universidad San Ignacio de Loyola]. <https://repositorio.usil.edu.pe/entities/publication/f7e63d41-af89-4751-b14c-9bc57c69a8f4>
- Choque, J. (2015). Manual de inventario y evaluación de pastizales naturales y pasturas. Universidad Nacional del Altiplano.
- Eduardo-Palomino, F., Gibson, D. J., Barberá, P., Castro, J., Trillo, F., La Torre, M. I., & Walters, S. A. (2024). International Biological Flora: *Festuca dolichophylla*†. *Journal of Ecology*, 112(7), 1655-1682. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.14343>
- Eduarte, E., y Segura, M. (1998). Determinación de carbono utilizando la calorimetría (Nota técnica). *Revista de Ciencias Ambientales*, 15(2), Article 2. <https://doi.org/10.15359/rca.15-1.6>
- Eyzaguirre, I. L. (2018). Stock de carbono almacenado en la biomasa aérea, sotobosque y suelo en bosques andinos, Huancayo, Perú, 2013. *Revista ECIPerú*, 11(2), Article 2. <https://doi.org/10.33017/RevECIPeru2014.0012/>
- Heady, H. (1971). La explotación de los pastizales de secano. *Pastos: Revista de la Sociedad Española para el Estudio de los Pastos*, 1(2), 304-305. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5121323>
- IPCC. (2007). *Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (p. 996) [Report]. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar4/wg1/>
- IPCC. (2014). *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* (p. 151). https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf
- IPCC. (2018). *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change* (p. 32). World Meteorological Organization. <https://www.ipcc.ch/sr15/>
- Kabishch, N., Korn, H., Stadler, J., y Bonn, A. (2017). Nature-based solutions to climate change adaptation in urban areas: Linkages between science, policy and practice. Springer Nature. <http://www.springer.com/series/13408>
- Lapeyre, T., Alegre, J., y Arévalo, L. (2004). Determinación de las reservas de carbono de la biomasa aérea, en diferentes sistemas de uso de la tierra en San Martín, Perú. *Ecología Aplicada*, 3(1-2), 35-44. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1726-22162004000100006&lng=es&nrm=iso&tlng=en
- Luccini, E., Flores, M., Ramírez, K., Pérez Pinedo, H., Herrera, L. A., Parodi, M., Matar, M., Gómez Insausti, J., Barrea, L., Mechini, M., & Calcagno, G. (2018). Análisis comparativo de la captura y almacenamiento de CO₂ por especies vegetales de tres ecosistemas en Perú. *Energeia*, 15(15), 13-21. <https://repositorio.uca.edu.ar/handle/123456789/5870>
- Mamani, J., Terroba, N., Quispe, J., y Supo, F. (2024). Respuesta de pastizales naturales degradados a la revegetación y la aplicación de estiércol de ovino. *Journal of High Andean Research*, 26(2), Article 2. <https://doi.org/10.18271/ria.2024.623>
- Medina, C. E., Medina, Y. K., y Bocardo, E. F. (2020). Economic valuation of carbon capture and storage in the puna dry of southwestern Peru. *Revista Bosque*, 41(2), Article 2. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002020000200165>
- Medrano, R., Chupan, L., y Vila, M. (2012). Almacenamiento de carbono en especies predominantes de flora en el lago Chinchaycocha. *Apuntes de Ciencia & Sociedad*, 2(2), Article 2. <https://doi.org/10.18259/acs.2012013>
- MINAM. (2015). Guía de inventario de la flora y vegetación. En Ministerio del Ambiente (Dirección General de Evaluación, Valoración y Financiamiento del Patrimonio Natural). Ministerio del Ambiente. <http://repositoriodigital.minam.gob.pe/xmlui/handle/123456789/775>
- Rivera, E., & Zamora, N. S. (2019). Evaluación del potencial almacenamiento de carbono en *stipa ichu* (ruiz & pav.) kunth 1829 (*ichu*) en la microcuenca chaclatacana, huancavelica, Perú. *The Biologist*, 17(2), 237-247. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9397953>
- Ruiz, & Tapia. (1987). *Producción y manejo de forrajes en los andes del Perú* Universidad nacional de San Cristóbal de Huamanga-Ayacucho (Proyecto de Investigaciones de los sistemas agropecuarios andinos PISA (INIPA-CIIPACDI). Servicios editoriales Adolfo Arteta.

- Ticona, R. (2012). Captura de Carbono (CO₂) por la vegetación arbustiva Añahuaya (*Adesmia miraflorensis* Remy) CIP ILLPA-Puno [Tesis Pregrado]. Universidad Nacional del Altiplano.
- Tirado, E. D., Tirado, L. U. M., & Montanez, E. G. (2022). Estado de conservación de la especie *Festuca Dolichophylla* en la micro cuenca de calientes, provincia de Candarave, región Tacna, Perú—2017. *Revista Ciencia, Tecnología e Innovación*, 20(26), 179-190. <https://doi.org/10.56469/rcti.vol20n26.713>
- Ttimpó, E. (2010). Evaluación agrostológica de los pastizales naturales en época de lluvia y seca del Centro de Investigación y Producción Illpa-Puno [Tesis Pregrado]. Universidad Nacional del Altiplano.
- Valverde, H., Fuentealba, B., Blas, L., y Oropeza, T. (2022). La importancia de los pastizales altoandinos peruanos (p. 16). Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (DIEM-INAIGEM). <https://hdl.handle.net/20.500.12748/450>
- Villa, J. A., Mejía, G. M., Velásquez, D., Botero, A., Acosta, S. A., Marulanda, J. M., Osorno, A. M., y Bohrer, G. (2019). Carbon sequestration and methane emissions along a microtopographic gradient in a tropical Andean peatland. *Science of The Total Environment*, 654, 651-661. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.109>