

ALMACENAMIENTO DE CARBONO ORGÁNICO EN SUELOS AGRÍCOLAS DE LA ZONA INTERSALAR POTOSINO EN DIFERENTES TIPOS DE USO

Organic carbon storage in agricultural soils of the Potosi intersalt zone under different types of use

Oscar Ranulfo Ayala Aragón^{1*}, Milenka Vanessa Almanza López²

RESUMEN

Al encontrarse los suelos agrícolas productores de quinua de la zona intersalar en un proceso de desertificación; debido, principalmente, a los problemas de aridez, erosión eólica y uso indiscriminado de maquinaria en el suelo, se intensifica la pérdida de C orgánico del suelo, contribuyendo al calentamiento global y por ende en la aceleración del cambio climático, en esta región de alta vulnerabilidad; por lo que, se convierte en una prioridad el realizar mayores estudios en estas zonas altamente vulnerables. En este marco, la presente investigación se realizó con el objetivo de evaluar la capacidad de almacenamiento de C orgánico en los suelos de estas zonas para los diferentes tipos de uso. A partir de ello, se ha realizado un muestreo y el análisis físico químico en suelos de las Comunidades de Chacala, Chita, Keluyo, Opoco y Palaya en suelos en descanso, cultivo y puruma o virgen. Obteniéndose en promedio un almacenamiento de C de 6 a 20 t ha⁻¹ y para el caso de N de 0.30 a 1.72 t ha⁻¹. Realizando el análisis estadístico, se ha determinado la no significancia entre los parámetros físico químicos asociados al C orgánico tanto entre los suelos de las comunidades de estudio, como en los diferentes usos de suelo. El análisis de componentes principales ha establecido una alta correlación entre el almacenamiento de C y N con la disponibilidad de materia orgánica e inversamente proporcional con la densidad aparente del suelo. Uno de los factores determinantes para la baja mineralización y descomposición de materia orgánica se debe a las particularidades del tipo de suelo leptosol y regosol, característico de regiones áridas, semiáridas y altamente erosionados como es el caso de los suelos estudiados.

Palabras clave: carbono orgánico, nitrógeno orgánico, quinua, suelos erosionados, materia orgánica.

ABSTRACT

The agricultural soils, producing quinoa, of the intersalar area are in a process of desertification; Due, mainly, to the problems of aridity, wind erosion and the indiscriminate use of machinery in the soil; therefore, the loss of organic C from the soil intensifies, contributing to global warming and the acceleration of climate change, in this region of high vulnerability; in consequence, it becomes a priority to carry out further studies in these highly vulnerable areas. In this framework, the present investigation was carried out with the objective of evaluating the storage capacity of organic C in the soils of these areas for the different types of use. Based on this, a sampling and physical-chemical analysis has been carried out in soils of the Communities of Chacala, Chita, Keluyo, Opoco and Palaya in resting, cultivated and puruma or virgin soils. Obtaining on average a storage of C from 6 to 20 t ha⁻¹ and for the case of N from 0.30 to 1.72 t ha⁻¹. Carrying out the statistical analysis, a non-significance has been determined between the physical-chemical parameters associated with organic C both among the soils of the study communities and in the different land uses. The principal component analysis has established a high correlation between the storage of C and N with the availability of OM and inversely proportional with the apparent density of the soil. One of the determining factors for the low mineralization and decomposition of OM is also due to the particularities of the type of soil leptosol and regosol, characteristic of arid, semi-arid and highly eroded regions as is the case of the soils studied.

Keywords: organic carbon, organic nitrogen, quinoa, eroded soils, organic matter.

¹✉ Docente, Carrera de Ingeniería Agronómica, Universidad Autónoma Tomás Frías, Bolivia; Investigador Principal, Proyecto PIA.ACC.UATF.65. ayalaoscar@yahoo.es, ayalaoscarr@gmail.com

²Investigador Adscrito, proyecto PIA.ACC.UATF.65. mileox@hotmail.com. Bolivia.

INTRODUCCIÓN

El suelo no es simplemente la parte externa que cubre la superficie terrestre, es un medio tridimensional y multifuncional que cumple una extensa variedad de funciones ecológicas y socioeconómicas (Brissio, 2005). Las alteraciones de los procesos edáficos producen cambios en el funcionamiento de los ecosistemas, y muchos problemas medioambientales que cobran visibilidad en otros medios, se originan en realidad en el suelo (Montico, 2010).

Al ser un componente altamente complejo muchas veces se reduce su importancia a solo su capacidad productiva; sin embargo, los múltiples servicios ambientales que provee son escasamente valorados y reconocidos. Entre ellos, la captura y almacenamiento de carbono (C) que se constituye en un punto focal de interés científico por la enorme cantidad que almacena el suelo (Ayala et al., 2018) y no menos importante el almacenamiento y disponibilidad del nitrógeno (N), como el segundo elemento después del agua para la sostenibilidad de las especies vegetales en zonas áridas y semiáridas.

En el caso de zonas áridas y semiáridas, las reservas de carbono orgánico en el suelo, comprenden un 27 % de las reservas globales de carbono orgánico (Trumper et al., 2008 citado por Mogollon et al., 2015). Por consiguiente, las pérdidas potenciales de carbono de los ecosistemas, relacionadas a la conversión de ecosistemas naturales a agroecosistemas es mucho mayor en las reservas de carbono del suelo, que en el carbono contenido en la biomasa vegetal.

En lo que respecta al N en el suelo, intrínsecamente asociado al C orgánico, éste tiene una dependencia directa con el bajo contenido en materia orgánica, especialmente en zonas áridas y semiáridas, por la escasa cubierta vegetal y limitada productividad (Celaya y Castellanos, 2011). El escaso N contenido en la materia orgánica de zonas áridas y semiáridas se transforma en compuestos inorgánicos vía los procesos de mineralización; por lo que, la disponibilidad de N se constituye en una limitante para la productividad de las plantas en esos ecosistemas.

Lamentablemente, la importancia de estos nutrientes en los sistemas productivos y naturales, particularmente en el contexto boliviano, es altamente subestimado y desconocido. Esta nesciencia, es preocupante ya que en las tierras áridas el almacenamiento de carbono es especialmente valiosa,

gracias a su alto nivel de permanencia; es decir, el tiempo que el carbono se mantiene almacenado en el suelo (Laban et al., 2018). De ahí, su alta importancia como servicio ambiental en los ecosistemas. Sin embargo, dependiendo del manejo de los suelos bajo diversos sistemas de producción, éstos pueden actuar como sumideros o fuentes de gases de efecto invernadero (GEI) (IPCC, 2006); y esto depende de las formas en la que las prácticas específicas influyan sobre las entradas y salidas de C de los suelos en los sistemas (Dossa et al., 2008). Motivo por el cual, estudiar el carbono en las zonas áridas es prioritario para entender las consecuencias del incremento acelerado de la concentración de CO₂ en la atmósfera, así como para diseñar estrategias en la reducción de emisiones y mitigar el cambio climático global (Briones, 2017).

Esta dinámica se refleja en los sistemas productivos de quinua (*Chinopodeum quinoa* Willd.) en la zona intersalar de Potosí, donde los procesos de conversión desmedida de tierras vírgenes a tierras de cultivo se han acelerado de forma desmedida, producto del “boom” de la quinua a nivel mundial entre los años 2004 y 2013 (Teomiro, 2018). Bajo las condiciones de monocultivo y de manera semintensiva y mecanizada en su mayoría; las estimaciones de pérdida de C son altas, debido sobre todo al arado destructivo (Magos, 2018). El problema se agrava, considerando las extremas condiciones climáticas y ambientales a las que se hallan sometidas las comunidades vinculadas, que resultan muy vulnerables al cambio climático, degradación de la tierra y la desertificación (Maestre, 2016).

Este problema es extensivo, y se constituye en un problema ambiental visible, y altamente delicado para la sostenibilidad de los agroecosistemas en las regiones productoras de quinua. Por lo que las soluciones tendrán que llegar de manera pronta y eficaz, principalmente por estrategias como la mejora de la calidad y productividad de los suelos de tierras áridas, a través del aumento en el contenido orgánico del suelo –incremento de niveles de C orgánico a través de prácticas de manejo de alternativas, tales como labranza reducida y gestión sostenible de los pastos. La importancia de aplicar estas prácticas y todas las medidas inherentes, dependerán en una primera instancia del conocimiento y la información disponible, para tomar las decisiones que sean convenientes, particularmente en zonas altamente vulnerables como es la zona intersalar del departamento de Potosí (con poca información disponible).

El presente estudio surge a partir de la iniciativa del proyecto de investigación: “Gestión y manejo de suelos con fines de planificación territorial frente a la vulnerabilidad producida por el cambio climático y estrategias de conservación a partir de tecnologías locales, en las principales zonas productoras de quinua en los municipios de Uyuni, Tomave y Llica de Potosí PIA.ACC.UATF.65”, mismo que fue gestionado por Agroecología Universidad Cochabamba (AGRUCO- UMSS) y la Cooperación Suiza en Bolivia (COSUDE).

En el estudio se ha propuesto como objetivo el evaluar la capacidad de almacenamiento de C orgánico del suelo en la zona intersalar potosino a partir de sus diferentes formas de uso. Planteándose como hipótesis que, los suelos agrícolas de las zonas de intersalar potosino tienen una baja capacidad de almacenamiento de C orgánico, independientemente de su tipo de uso.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación y características de la zona de estudio

La investigación se desarrolló en la zona intersalar de Potosí, en suelos de las comunidades de Chita y Chacala, ubicadas en el municipio de Uyuni; comunidades de Keluyo y Opoco en el municipio de Tomave; y la comunidad de Palaya en el municipio de Llica. Las zonas de estudio se encuentran ubicadas en el área de coordenadas S 20° 28' 20", W 66° 49' 53" y S 19° 51' 00", W 68° 15' 00", entre los 3 650 y 3 823 m s.n.m. El clima en la región de acuerdo a la clasificación de Koopen es desértico y frío; además de semiárido y árido de acuerdo a la clasificación climática de Thornthwaite (Almanza, 2018). Esta región se caracteriza por déficit de precipitación con prolongadas sequías, permanentes heladas y vientos fuertes erosivos del suelo. Los parámetros climatológicos de estas zonas, obtenidos del sistema SYSMET del SENAMHI (2017) se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Características climatológicas de las zonas de estudio.

Parámetros de clima	Chacala	Chita	Opoco	Keluyo	Palaya
Altura (m s.n.m.)	3 825	3 825	3 970	3 950	3 650
Provincia	Antonio Quijarro	Antonio Quijarro	Antonio Quijarro	Antonio Quijarro	Daniel Campos
Municipio	Uyuni	Uyuni	Tomave	Tomave	Llica
Estación meteorológica	Uyuni	Uyuni	Tomave	Tomave	Llica
Temperatura máxima absoluta (°C)	31.5	31.5	29.5	29.5	27.6
Temperatura mínima absoluta (°C)	-25.7	-25.7	-12	-12	-18
Temperatura promedio (°C)	7.4	7.4	8.9	8.9	8.9
Heladas(días)	221.4	221.4	139.7	139.7	152.9
Precipitación (mm)	181.2	181.2	426.5	426.5	142.9
Viento (km h ⁻¹)	W 11.7	W 11.7	NW 10.8	NW 10.8	W 10.2

Fuente: Elaborado a partir de datos del SYSMET (SENAMHI, 2017).

La vegetación nativa predominante en estos suelos están: Supu thola (*Parastrephia lepidophylla*), Ñaka thola (*Baccharis incarum*), Humo thola (*Parastrephia lucida*), Jamachi thola (*Baccharis boliviensis*), Ichu (*Stipa ichu*), Iru ichu (*Festuca ortophylla*), Chillihua (*Festuca dolichophylla*), Suicu suicu (*Tagetes pusilla*), Anu suicu (*Heterosperma tenuiseta*), Chiji (*Distichys humilis*), Pasto pluma (*Nasella asplundii*), Chijma (*Astragalus micranthellus*), Kela (*Lupinus altamontanus*), Lampaya (*Lampaya castellani*), Liwi liwi (*Atriplex cristata*), Kaylla (*Tetraglochin cristatum*) y Ayrampu (*Opuntia soebersii*). Existe escasa cobertura vegetal y dispersión entre especies (Almanza, 2017; Ayala, 2018; Cárdenas y Choque, 2008).

Estas zonas son productoras de quinua con un rendimiento que oscila entre los 451 kg ha⁻¹ (Gandarillas, 1982) a 650 kg ha⁻¹ (Del Castillo citado por Caballero et al., 2015). Estos bajos rendimientos se deben a la escasa fertilidad de los suelos, principalmente de materia orgánica (MO) y N aprovechable en el suelo (Ballon, 1975), además de las pérdidas de capa arable por la erosión eólica y la excesiva e inadecuada labranza de los suelos en estas regiones (Apeztiguia y Sereno, 2002; Orsag, 2010). Los suelos en las zonas de estudio se caracterizan por estar altamente erosionados y con deficiente contenido de macro y micronutrientes, las características físico-químicas de los suelos en las zonas de estudio, se presentan en la Tabla 2:

Tabla 2. Características físico-químicas de los suelos en las zonas de estudio.

Parámetros	Chacala	Chita	Opoco	Keluyo	Palaya
Orden de suelo	Regosol	Regosol	Regosol	Regosol	Leptosol
Origen	Volcánica Roca	Volcánica Roca	Volcánica Roca	Volcánica Roca	Volcánica Roca
	Calcárea	Calcárea	Calcárea	Calcárea	Calcárea
pH	6.5 - 8.4	6.8 - 8.8	7.1-8	5.9-9.1	6.8-9.3
CE ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	24 - 94	23-155	28-205	7.7-332	46-503
Ca (cmol kg^{-1})	1.1 - 14.6	1.3 - 8.8	1.4-2-2	0.5-24.3	1.6-11
Mg (cmol kg^{-1})	0.04 - 5.8	0.6-3.1	0.4-1.1	0.2-14	0.5-2.2
Na (cmol kg^{-1})	0.04 - 21.5	0.04-0.21	0.04-0.52	0.07-17.9	0.08-1.38
K (cmol kg^{-1})	0.05 - 2.2	0.32-0.85	0.28-0.87	0.23-1.66	0.23-0.77
CICE	1.9 - 44	2.6 - 11.3	2.7-4.3	1.7-51	3.4-14.2
P (mg kg^{-1})	2 -15	1 - 20	5-12	2-39	2-26
Fe (ppm)	6 -51	6-61	4-94	4-104	13-47
Mn (ppm)	2 - 83	14-51	18.48	6-61	24-81
Cu (ppm)	0.81 - 1	0.03-0.7	0.01-15	0.1-0.9	0.2-1.4
Zn (ppm)	1.1 - 4.6	0.9-4.1	1.7-5.6	1-5.3	1.1-6
S (ppm)	1 - 11	1-6	2 - 13	1-14	2-24
Textura	Arenoso franco- Franco arenoso	Arenoso franco- Franco arenoso	Franco arenoso- Arenoso franco	Arenoso franco- Franco arenoso	Arenoso-Franco arenoso
Estructura	Sin estructura	Sin estructura	Sin estructura	Sin estructura	Sin estructura

CE = conductividad eléctrica; CICE = capacidad de intercambio catiónico efectiva.

En cuanto a las características de las zonas de vida, en las regiones, se presenta una fisiografía de planicies aluviales con pie de monte entre coluvial y ligero; con pisos ecológicos de matorral desértico, meseta altiplánica y puna alta (PDM Uyuni, 2012; PDM Llica, 2012 y PDM Tomave, 2012).

Metodología

El procedimiento de estudio comparativo se estableció a partir del contraste entre los suelos de las comunidades de estudio y los tipos de uso de suelo: descanso, cultivo y puruma (denominación de suelo nativo virgen en la región). Se realizaron muestreos sistemáticos y aleatorios, para evaluación tipo variabilidad horizontal, en las diferentes comunidades y tipos de uso de suelo, durante los meses de abril a

julio del 2017. Estos muestreos se realizaron a 20 cm de profundidad con un muestreador de suelos tubular, tipo barreno de 60 cm, marca GAMA. Obteniéndose las muestras, por cuarteo, de 1 kg para su análisis en el laboratorio químico de servicios analíticos de suelos CIAT en Santa Cruz de la Sierra.

El proceso de levantamiento de información de los suelos, además de la recolección de muestras, fue participativo, en aplicación de la metodología participativa y diálogo de saberes (Delgado y Rist, 2016) con el apoyo de una persona designada de la comunidad. Se registró en todos los casos la ubicación geográfica de los lugares de muestreo con un navegador GPS ETrex 30X marca Garmin. La información de los sitios y lugares de muestreo por comunidad y uso de suelo se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Sitios y lugares de muestreo por comunidad y uso de suelo.

Comunidad	Lugar	Uso	Altura	X (Zona19)	Y (Zona19)	
Chacala	Apostaca	Cultivo	3 912.56	728171.55	7767638.54	
		Descanso	3 912.56	728171.55	7767638.54	
	Chuicunca	Descanso	3 799.28	721571.68	7765571.42	
		Cultivo	3 671.77	721192.51	7770906.97	
	Jach'a Cerca	Puruma	3 789.69	720924.4	7771090.33	
		Descanso	3 798.92	721286.98	7771098.12	
	K'ala Parcata	Puruma	3 895.81	728285.49	7768208.81	
		Cultivo	3 810.57	721334.93	7764690.86	
	Chita	Callejon	Cultivo	3 730.88	713652.51	7775950.59
			Descanso	3 734.64	713838.49	7775856.07
Puruma			3 734.50	713830.7	7775929.02	
Chacualckani		Descanso	3 793.91	719288.39	7775226.11	
		Cultivo	3 783.53	718204.55	7773095.34	
Ck'asa		Descanso	3 784.46	718276.59	7773093.66	
		Puruma	3 781.25	718382.14	7772894.78	
Keluyo		K'ala Muntuna	Cultivo	3 851.61	722649.8	7794294.47
			Puruma	3 851.91	722585.72	7794477
		Kamaque	Descanso	3 851.18	727636.18	7788216.23
	Puruma		3 853.32	728071	7788147.67	
	Vila Cota	Descanso	3 789.92	722387.23	7785966.11	
		Puruma	3 791.75	722457.91	7785927.34	
	Vila Nasa	Descanso	3 869.48	723699.7	7795510.76	
		Cultivo	3 828.13	726780.34	7787373.3	
	Opoco	Bajo Wacomá	Cultivo	3 842.63	726822.75	7816128.39
			Descanso	3 836.16	726414.33	7816266.7
Puruma			3 835.75	726549.61	7816268.52	
Chut'i Put'uncu		Descanso	3 835.96	736894.71	7815488.89	
		Cultivo	3 845.25	738217.43	7814187.46	
Estancia Chokóllita		Puruma	3 842.21	737302.94	7815396.4	
		Descanso	3 677.08	590498.06	7810492.22	
Palaya		Jacha Tatavi	Cultivo	3 672.06	590780.65	7808607.72
			Puruma	3 666.70	590569.98	7808455.96
		Sao Pacha	Cultivo	3 703.66	589003.18	7809634.69
	Puruma		3 712.21	589268.54	7809748.45	
	Uma Pata	Puruma	3 720.49	589309.42	7810709.74	
		Cultivo	3 714.79	589284.69	7810374.43	
	Uta Pata	Puruma	3 722.93	589286.56	7810516.85	

Para la estimación de la cantidad de almacenamiento de C y N en el suelo, se utilizaron las ecuaciones (1) y (2).

$$\text{Almacenamiento C en suelo (t ha}^{-1}\text{)} = \%C \times DA \times E \times A \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Almacenamiento N en suelo (t ha}^{-1}\text{)} = \%N \times DA \times E \times A \times 100 \quad (2)$$

Dónde: % C = porcentaje de carbono, % N = porcentaje de carbono, DA = densidad aparente (g cm^{-3}), E = espesor muestreo (20 cm), A = área de referencia (1 ha).

Para el análisis comparativo de los parámetros de estudio % MO, % C, % N, relación de C/N, densidad aparente y almacenamiento de C y N, dentro de cada comunidad por el tipo de uso de suelo, se utilizó la prueba de Kruskal Wallis (para una significación de $p < 0.05$). Para el análisis entre comunidades por tipo de uso de suelo se utilizó el análisis de varianza de doble vía y la prueba de rango múltiple de Duncan (significación $p < 0.05$). En ambos análisis se utilizó el software SPSS V.22 (IBM Corp, 2013).

Asimismo, se utilizó el análisis de componentes principales (ACP) a fin de reducir y explicar la variabilidad en los dos primeros componentes en los parámetros de estudio: % MO, % C, % N, relación de C/N, densidad aparente y almacenamiento de C y N. La variable de agrupación utilizada fue: comunidad-uso de suelo, utilizándose para el análisis ACP el software Infostat (Di Rienzo et al., 2020).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las cantidades de C de 6 a 20 t ha^{-1} y N de 0.3 a 1.72 t ha^{-1} , se encuentran en los 20 cm de la capa arable del suelo, aplicando la prueba de Kruskal – Wallis, no presentan diferencias significativas comparativas

($p > 0.05$) en los diferentes usos de suelo (cultivo, descanso y puruma) en las comunidades de estudio (Chacala, Chita, Keluyo, Opoco y Palaya); aspecto que se refleja, de igual manera, en el contenido de C de 0.17 a 0.49 % y N de 0.01 a 0.05 % (Tabla 4). Estos resultados se encuentran por debajo de los valores porcentuales de los encontrados en otras zonas del intersalar (Llica, Uyuni y Tres Cruces del departamento de Potosí); que para el caso del C tiene una media de 1.53 % y un mínimo de 0.67 % (Cárdenas y Choque, 2008). No obstante, en otras zonas aledañas a las comunidades de estudio (comunidades de Pampa Aullagas, Quillacas y Salinas de Garci Mendoza, del departamento de Oruro); se ha encontrado que, para el caso del N, se tienen valores promedio de 0.08 % para uso de suelo en cultivo y 0.06 % para uso de suelo en descanso en planicies (Orsag et al., 2011). Estos valores, no significativos, pueden deberse al escaso tiempo de reposición de fertilidad por uso de suelo en transición de cultivo a descanso como se muestran en algunas experiencias de fertilización orgánica de suelos semiáridos donde, aún en cinco años no se evidenciaban diferencias significativas (Krüger et al., 2013) y más aún en el corto plazo (Bolinder et al., 1999); como es el caso de los suelos de las zonas de estudio con periodos de transición menores a tres años (Almanza, 2017). En el caso de los suelos puruma y sus valores de no significatividad con relación a los suelos en cultivo y descanso, pueden deberse al tipo de vegetación nativa dispersa de puna xerofítica (Ayala, 2018; Almanza, 2018), los cuales no aportan N ni C vía hojarasca, tal como lo realizan otras especies como las leguminosas (López-Hernández et al., 2013) asociadas con una alta capacidad de fijación de N simbiótico (Zitser et al., 1996).

Asimismo, el contenido de materia orgánica de 0.30 a 1.03 %, tampoco presenta diferencias significativas ($p > 0.05$) en los diferentes usos de suelo y entre comunidades; no obstante de ello, los suelos de la comunidad de Palaya tienen menor contenido de materia orgánica de 0.30 a 0.50 %, en los diferentes usos de suelo con relación a las otras comunidades (Tabla 4). Estos valores están por debajo de los obtenidos en la zona del intersalar de Oruro y Potosí, en regiones colindantes a la estudiadas, donde obtuvieron un promedio de 2.64 %, con un valor mínimo de 1.15 % (Cárdenas y Choque, 2008). Sin embargo, se mantienen dentro de los rangos obtenidos de 0.21 a 1.27 % en evaluaciones de fertilidad de suelos en descanso y cultivo de suelos de regiones del intersalar, cercanas a las comunidades de estudio

(Orsag et al., 2011). En cualquier caso, estos valores son característicos de zonas áridas y semiáridas en suelos esqueléticos y con comportamientos agroclimatológicos similares en esas regiones, con alto grado de erosión eólica (ZONISIG, 2001); sin embargo, esta reducción se intensifica por la labranza mecanizada, especialmente con tractores, en terrenos en planicies (Gómez et al., 2018).

La relación C/N de 10.63 a 18.69 muestra, además de la no significatividad comparativa, un bajo nivel de descomposición de la materia orgánica y una lenta mineralización, característico de climas fríos y desérticos del altiplano sur boliviano (Sipe, 2011). Obteniéndose los valores mayores en la comunidad de Opoco con 18.69 para uso en cultivo, y en la comunidad de Palaya con 17.40 para uso de suelo puruma, tal como se muestra en la Tabla 4. Estos valores se encuentran dentro del valor promedio de C/N de 29.56 obtenido en regiones colindantes de la zona del intersalar de Oruro y Potosí (Cárdenas y Choque, 2008).

El análisis de varianza de la densidad aparente entre comunidades de estudio y la prueba de Duncan, muestra una diferencia significativa ($p < 0.05$) de la comunidad de Palaya con un valor de 1.73 g cm^{-3} , con relación a las otras comunidades que tuvieron en promedio un valor de 1.70 g cm^{-3} (Tabla 4). Esta diferencia significativa podría explicarse debido a la combinación del muy bajo contenido de materia orgánica, el alto contenido particulado de arena, característicos de textura arena - franco y arenosa de la región de Palaya (Almanza, 2018), y que tiene su efecto en la distribución del espacio poroso del suelo (Jaramillo, 2002; Díaz et al., 2009); además de la excesiva e inadecuada aplicación de prácticas de mecanización en labores de cultivo en las planicies (Sá Pereira et al., 2015; Reyes et al., 2002). Estos valores se encuentran dentro del rango de 1.40 a 1.90 g cm^{-3} reportados por Cárdenas y Choque (2008) en regiones colindantes; encontrándose también dentro del rango de 1.62 a 1.73 g cm^{-3} registrados por Orsag et al. (2011) particularmente en la región de Quillacas que se encuentra colindante a las zonas de estudio. Estos valores de densidad aparente tanto en las regiones circundantes como en las zonas de estudio, son característicos de suelos en situación de desertificación, aridez y con problemas de compactación, mismos que tienen un rango de densidad aparente de 1.6 a 1.8 g cm^{-3} (Murillo et al., 2014).

Tabla 4. Variación de los parámetros de evaluación por tipo de uso de suelo en las comunidades de estudio.

Comunidad	Uso	MO (%)	C (%)	N (%)	C/N	DA (g cm ⁻³)	C (t ha ⁻¹)	N (t ha ⁻¹)
Chacala	Cultivo	0.76a (0.20)*	0.44a (0.12)	0.04a (0.01)	13.66a (1.62)	1.71a (0.01)	14.96a (3.87)	1.31a (0.43)
	Descanso	0.70a** (0.23)	0.41a (0.13)	0.04a (0.01)	11.88a (1.42)	1.71a (0.01)	13.80a (4.48)	1.31a (0.47)
	Puruma	0.77a (0.14)	0.44a (0.08)	0.04a (0.01)	11.49a (1.32)	1.70a (0.01)	15.10a (2.68)	1.49a (0.33)
Chita	Cultivo	0.50a (0.04)	0.29a (0.02)	0.03a (0.01)	13.53a (3.25)	1.72a (0.00)	9.94a (0.79)	0.86a (0.17)
	Descanso	0.54a (0.07)	0.31a (0.04)	0.03a (0.00)	12.08a (1.51)	1.71a (0.01)	10.71a (1.45)	0.97a (0.17)
	Puruma	0.83a (0.16)	0.48a (0.09)	0.04a (0.00)	11.87a (1.47)	1.70a (0.00)	16.25a (3.11)	1.38a (0.14)
Keluyo	Cultivo	0.43a (0.13)	0.25a (0.08)	0.02a (0.01)	14.98a (2.42)	1.72a (0.01)	8.63a (2.59)	0.69a (0.34)
	Descanso	0.83a (0.20)	0.48a (0.11)	0.04a (0.01)	12.51a (1.23)	1.7a (0.01)	16.24a (3.83)	1.47a (0.50)
	Puruma	0.85a (0.24)	0.49a (0.14)	0.04a (0.01)	13.10a (0.83)	1.70a (0.01)	16.70a (4.67)	1.29a (0.38)
Opoco	Cultivo	0.57a (0.09)	0.33a (0.05)	0.02a (0.01)	18.69a (8.23)	1.71a (0.01)	11.23a (1.71)	0.80a (0.23)
	Descanso	1.03a (0.32)	0.60a (0.18)	0.05a (0.02)	12.48a (1.45)	1.70a (0.01)	20.36a (6.25)	1.72a (0.53)
	Puruma	0.70a (0.20)	0.41a (0.11)	0.04a (0.01)	11.99a (1.87)	1.71a (0.01)	13.81a (3.80)	1.29a (0.38)
Palaya	Cultivo	0.33a (0.13)	0.19a (0.08)	0.02a (0.01)	10.63a (0.97)	1.73a (0.01)	6.66a (2.61)	0.69a (0.34)
	Descanso	0.50a (0.30)	0.29a (0.17)	0.03a (0.02)	10.77a (0.83)	1.73a (0.02)	9.88a (5.83)	1.03a (0.69)
	Puruma	0.30a (0.06)	0.17a (0.03)	0.01a (0.00)	17.40a (3.35)	1.73a (0.01)	6.03a (1.14)	0.34a (0.01)

MO(%)=% Materia orgánica, C(%)=%Carbono, N(%)=%Nitrógeno, C/N=Relación Carbono Nitrógeno, C(t.ha⁻¹) =Almacenamiento carbono toneladas por hectárea, N(t ha⁻¹)=Almacenamiento nitrógeno toneladas por hectárea, DA=Densidad aparente.

*Mismas letras minúsculas, en cada comunidad, presentan diferencias no significativas para tipos de uso de suelo ($p>0.05$).

**Los valores entre paréntesis corresponden al error estándar.

Los componentes principales ACP (Figura 1), muestra que el 98.0% de la variación es explicada en los dos componentes CP1 (84.2%) y CP2 (13.8%). En el componente CP1, el vector carbono almacenado en el suelo por hectárea se encuentra ampliamente correlacionado con la materia orgánica y porcentaje de carbono. El vector cantidad de nitrógeno en el suelo por hectárea, se encuentra correlacionado con el porcentaje de nitrógeno; reflejándose además una relación positiva entre los vectores cantidad almacenada de C y N; y una correlación negativa con el vector de la densidad aparente del suelo. En el componente CP2, muestra el vector de relación C/N en el suelo independiente de los vectores anteriores.

El vector cantidad de C almacenado por hectárea, refleja un mayor almacenamiento de carbono en el suelo para suelos en descanso de 16 a 20 t ha⁻¹ con relación a suelos puruma 15 a 16 t ha⁻¹ y suelos en cultivo 11 a 15 t ha⁻¹. Esto se explica debido a que, en un suelo en descanso, se han incorporado a través de la cosecha, residuos del cultivo tales como tallos,

raíces y hojas (Wagner y Wolf, 1998); y para el caso de la quinua se aportaría en contenido de C un total de 20.00 g en el tallo, 16.00 g en la inflorescencia y 0.79 g en las hojas por cada planta incorporada como rastrojo, con un aprovechamiento de hasta el 80 % de la materia seca total (González et al., 2020). Por su parte, estas incorporaciones de residuos de cosechas en suelos en descanso favorecerían la aireación y porosidad del suelo; resultando, además, de los procesos de descomposición de la materia orgánica, la liberación de C orgánico y nutrientes en el suelo (Vela et al., 2012); produciéndose, asimismo, un proceso de agregación del material particulado del suelo, a partir de la materia orgánica de los rastrojos incorporados (Follett y Stewart, 1985). Resultados similares se han encontrado a partir de experiencias en suelos semiáridos en España (Caravaca y Albadejo, 2001) y en algunos suelos en Inglaterra (Chaney y Swift, 1984).

En el caso de los suelos puruma, los valores de almacenamiento de C, estarían condicionados por el nivel de compactación y la consiguiente resistencia a la

penetración, lo que, sumado a la escasa vegetación nativa de cubierta, dificultaría un flujo de masa del C entre las diferentes capas del suelo (Healy et al., 1996). La menor capacidad de almacenamiento de C en suelos en cultivo se debería principalmente al excesivo uso de labranza con maquinaria agrícola combinado con la erosión eólica de estos suelos, particularmente en zonas de planicie (Apezteguia y Sereno, 2002). La intensidad de la labranza eventualmente incrementaría los flujos de CO₂ y CH₄ hacia la atmósfera (Reicosky, 2002) a través del flujo de masa por gradiente de difusión hacia la atmósfera y por las variaciones de presión y temperatura, lo que produciría en definitiva la pérdida gaseosa de C del suelo (Nelson y Sommers, 1996) y la concentración como gas de efecto invernadero en la atmósfera, coadyuvando al calentamiento global e intensificando el cambio climático (Burbano, 2018).

El almacenamiento de C, a partir del análisis de componentes principales, se produce en mayor cantidad en las comunidades de Opoco de 13 a 20 t ha⁻¹, Keluyo de 8 a 16 t ha⁻¹, Chita de 9 a 16 t ha⁻¹ y Chacala de 13 a 15 t ha⁻¹, con relación a la comunidad de Palaya de 6 a 10 t ha⁻¹, que presenta además una mayor densidad aparente del suelo (1.73 g cm⁻³). Esta relación inversamente proporcional, reflejada en la Figura 1, se explicaría por la rápida erosión eólica de los suelos en planicie de la comunidad de Palaya, que además de estar sometida a labranzas intensificadas de roturación, produce una alta pérdida de materia orgánica del suelo (Orsag et al., 2011); de esta manera se establece que existe una relación directamente proporcional de la densidad aparente, el contenido de MO y el almacenamiento de C en el suelo, cuya relación fue también establecida en investigaciones en suelos colombianos (Suarez y Rodriguez, 1962; Alveiro y Sadeghian, 2005), tomando en cuenta que un factor determinante en éstas relaciones constituyen las condiciones de humedad a las que se encuentran sometidos los suelos (Marulanda y Villa, 2015), siendo además determinantes los factores erosivos eólicos, característicos de la zona, que en definitiva determinarían la interrelación de estos factores y el comportamiento del suelo en el proceso de compactación y/o contracción del suelo (Hossne y Américo, 2008) y la consiguiente captura o liberación de C en forma de gases a la atmósfera.

El vector cantidad de N en el suelo, presenta una mayor cantidad en suelos descanso con 1.30 a 1.72 t ha⁻¹, con relación a suelos puruma con 1.29 a 1.49 t ha⁻¹, y suelos en cultivo con 0.80 a 1.29 t ha⁻¹; produciéndose un mayor almacenamiento en las comunidades de Opoco con 1.29 a 1.72 t ha⁻¹, Chacala con 1.30 a 1.49 t ha⁻¹, Keluyo con 1.29 a 1.46 t ha⁻¹ y Chita con 0.86 a 1.38 t ha⁻¹; esto con relación a la comunidad de Palaya que presentó una cantidad de 0.34 a 1.03 t ha⁻¹; manteniéndose, al igual que en el caso del almacenamiento de C en el suelo, la tendencia inversamente proporcional con relación a la densidad aparente del suelo. Siendo, de igual manera, los factores determinantes la escasa materia orgánica en los suelos de Palaya con relación a las otras comunidades; además del uso intensivo de labranza mecanizada, que intensifica la reducción de la concentración de N en el suelo (Cristóbal et al., 2011) ocasionando un efecto directo, por su dinámica de interrelación, en el comportamiento y flujo de masa del C del suelo y en los cambios temporales y espaciales de las propiedades físico químicas del suelo (Celaya et al., 2015).

En el vector de relación C/N se presentan valores mayores en suelos de cultivo de 13.5 a 18.7, que en suelos puruma de 13.1 a 17.4 y suelos descanso de 10.8 a 12.5. En el caso de las comunidades se presentan los mayores valores en la comunidad de Opoco, para uso suelo cultivo con un valor de 18.7 y la comunidad de Palaya para uso de suelo puruma con un valor de 17.4. En todos los casos, se evidencian procesos de mineralización lenta por los elevados valores de la relación C/N (Bruckman y Brady, 1966), característicos de los suelos de tipo Leptosoles y Regosoles, a los que pertenecen los suelos en las zonas de estudio (ZONISIG, 2001). Estos tipos de suelos al tener origen de intrusiones volcánicas sobre roca calcárea meteorizada (FAO, 2008), generan minerales esqueléticos primarios y arcillas mineralógicas secundarias (Flores et al., 2009; Ponce et al., 1967; Dávila et al., 1962) que en gran medida definen los fragmentos granulares del suelo, tipo gravilloso y pedregoso en el caso de los leptosoles y arenosos no muy someros en el caso de los regosoles. Lo que en definitiva condicionaría, también, estos niveles de baja mineralización y bajo nivel de descomposición de la materia orgánica del suelo (Gamarra et al., 2018).

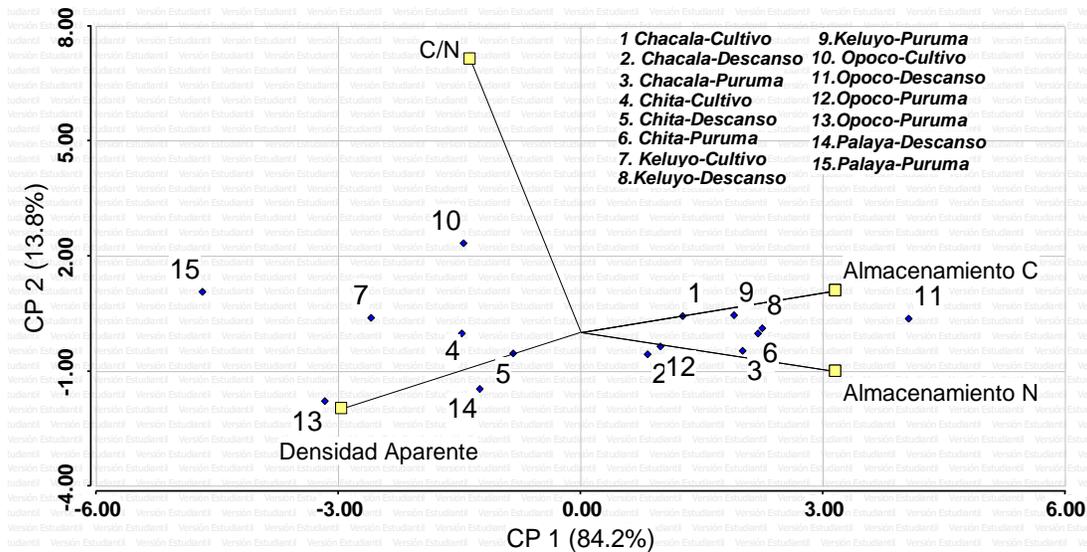


Figura 1. Componentes principales para los parámetros de estudio por variable agrupación comunidad-uso de suelo.

CONCLUSIONES

El almacenamiento de C en el suelo, en las zonas de estudio, se encuentra entre 6.03 y 20.36 t ha⁻¹, para el caso de nitrógeno de 0.34 a 1.72 t ha⁻¹. Encontrándose diferencias no significativas en las comunidades de estudio: Chacala, Chita Keluyo, Opoco y Palaya; y entre los diferentes tipos de uso de suelo: descanso, puruma y cultivo. Estos valores se encuentran por debajo de valores obtenidos, otras investigaciones, en zonas colindantes del departamento de Potosí; resultados que se encuentran dentro de los rangos obtenidos en zonas aledañas del intersalar en el departamento de Oruro.

El contenido de materia orgánica se encuentra en el rango de 0.30 a 1.03 % en promedio, valores muy bajos característicos de zonas áridas y semiáridas con alto grado de erosión eólica como es el caso de las zonas de estudio; intensificado por la labranza mecanizada particularmente en áreas de planicies. Estos valores, se encuentran, también, por debajo de los valores obtenidos en zonas colindantes del departamento de Potosí y dentro de los rangos obtenidos en zonas aledañas de la zona del intersalar de Oruro. Presentándose, diferencias no significativas entre las comunidades de estudio, y entre los diferentes tipos de uso de suelo.

El valor promedio de la relación C/N, en las zonas de estudio está entre 10.63 a 18.69, que demuestra una lenta mineralización y una baja tasa de mineralización de la materia orgánica; verificándose, además, una no significatividad entre los suelos de las comunidades de

estudio y entre diferentes tipos de uso de suelo. Estos valores se encuentran dentro de los rangos obtenidos en zonas aledañas del intersalar en el departamento de Oruro.

Los resultados de la densidad aparente mostraron una significatividad en la comunidad de Palaya con un valor de 1.73 g cm⁻³ con relación a los suelos de las otras comunidades en las zonas de estudio, que obtuvieron un valor promedio de 1.70 g cm⁻³. Estos valores son característicos de zonas en proceso de desertificación y aridez. Encontrándose dentro de los rangos obtenidos tanto en las zonas circundantes, como colindantes de la zona del intersalar de Potosí y Oruro. El análisis de componentes principales refleja una alta correlación entre la cantidad almacenada de C, N y materia orgánica y una correlación negativa N con la densidad aparente, manteniéndose la relación C/N de forma independiente. Existe un mayor almacenamiento de C y N en suelos en descanso con relación a suelos puruma y cultivo. Esto se debe a la acción de labores de roturación del suelo, donde se realiza la incorporación de rastrojos de cosecha, en los suelos en descanso, produciendo la descomposición de la materia orgánica y liberación del C orgánico y nutrientes en el suelo. Esto en contraste con la resistencia a la penetración y dificultad de flujo de masa de carbono entre las diferentes capas en suelos puruma. Para el caso de los suelos en cultivo; debido, principalmente, al uso excesivo de labranza con maquinaria agrícola y factores erosivos eólicos en las zonas de estudio, se produce la pérdida de C por el flujo de masa de la gradiente de difusión entre el suelo y la atmósfera.

Uno de los factores determinantes para la baja mineralización y descomposición de materia orgánica reflejados en la relación C/N, de los suelos en las zonas de estudio, se debe a las particularidades del tipo de suelo leptosol y regosol, característico de regiones áridas, semiáridas y altamente erosionados, principalmente por los minerales esqueléticos primarios y arcillas mineralógicas secundarias que determinan los fragmentos granulares del suelo en texturas arenosas y arenoso francoso de los suelos en las zonas de estudio.

BIBLIOGRAFÍA

- Almanza, M. 2018. Caracterización de la vulnerabilidad de los suelos con relación al cambio climático las principales zonas productoras de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) en las comunidades de Palaya (Llica); Opoco, Keluyo (Tomave) y Chacala, Chita (Uyuni). Proyecto de investigación PIA.ACC. UATF.65. AGRUCO - Universidad Autónoma Tomás Frías. Potosí, Bolivia.
- Almanza, M. 2017. Estudio de fertilidad de los suelos con relación al cambio climático en las principales zonas productoras de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) en las comunidades de Palaya (Llica); Opoco, Keluyo (Tomave) y Chacala, Chita (Uyuni). Proyecto de investigación PIA.ACC. UATF.65. AGRUCO - Universidad Autónoma Tomás Frías. Potosí, Bolivia.
- Alveiro, S; Sadeghian, S. 2005. La densidad aparente y su relación con otras propiedades en suelos de la zona cafetera colombiana. *Cenicafé* 56(4): 381-397.
- Apezteguia, H; Sereno, R. 2002. Influencia de los sistemas de labranza sobre la cantidad y calidad del carbono orgánico del suelo (en línea). Consultado 1 jul. 2021. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.4067/S0365-28072002000300007>
- Ayala, F; Maya, Y; Troyo, E. 2018. Almacenamiento y flujo de carbono en suelos áridos como servicio ambiental: Un ejemplo en el noroeste de México. *Chapingo Mexico. Terra Latinoamericana* (en línea). Consultado 29 jun. 2021. Disponible en http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792018000200093.
- Ayala, O. 2018. Bases para el desarrollo de un modelo de vulnerabilidad de suelos en zonas productoras de quinua aplicados a regiones áridas y del intersalar del departamento de potosí. "I Simposio de intercambio de saberes y experiencias agroecológicas resilientes en el contexto del cambio climático" Universidad Autónoma Tomás Frías. Potosí, Bolivia.
- Ballon, E. 1975. Informe Anual del programa de Quinua. Instituto Boliviano de Tecnología Agropecuaria. La Paz, Bolivia.
- Bolinder, M; Angers, E; Carter, M. 1999. The response of soil quality indicators to conservation management. *Canadian Journal of Soil Science* (ed). 79. 37-45. 10.4141/S97-099.
- Briones, O. 2017. El ciclo del carbono en las zonas áridas mexicanas. *Puebla México.Inecol* (en línea). Consultado 29 jun. 2021. Disponible en <https://www.inecol.mx/inecol/index.php/es/ct-menu-item-25/ct-menu-item-27/17-ciencia-hoy/850-el-ciclo-del-carbono-en-las-zonas-aridas-mexicanas>
- Brissio, P. 2005. Evaluación preliminar del estado de contaminación en suelos de la provincia del Neuquén donde se efectúan actividades de explotación hidrocarburífera. San Martín Argentina. Universidad Nacional de Comaegue. Bioética (ed).
- Bruckman, H; Brady, M. 1966. Naturaleza y propiedades de los suelos. Distrito federal México. UTEHA (ed).
- Burbano, H. 2018. El carbono orgánico del suelo y su papel frente al cambio climático (en línea):82 – 96. Consultado 2 jul. 2021. Disponible en <https://doi.org/10.22267/rcia.183501.85>
- Caballero, A; Maceda, W; Miranda, R; Bosque, H. 2015. Rendimiento y contenido de proteína de la quinua (*Chenopodium quinoa* Willd), en cinco fases fenológicas, bajo cuatro niveles de incorporación de estiércol (en línea). Consultado 4 jul. 2021. Disponible en http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2409-16182015000100009
- Caravaca, F; Lax, A; Albaladejo, J. 2001. Soil aggregate stability and organic matter in clay and fine silt fractions in urban refuse-amended semiarid soils. *Soil Sci* (ed). Soc. Am. J. 65, 1235-1238.
- Cárdenas, J; Choque W. 2008. Fertilidad, uso y manejo de suelos en la zona del intersalar, departamentos de Oruro y Potosí. Primera edición Fautapo (ed). Oruro, Bolivia.
- Celaya, H; Castellanos A. 2011. Mineralización de nitrógeno en el suelo de zonas áridas y semiáridas. *Terra latinoamericana* (en línea). Consultado 23 jun. 2021. Disponible en

- <http://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v29n3/2395-8030-tl-29-03-00343.pdf>
- Celaya, H; García, F; Rodríguez, J; Castellanos A. 2015. Cambios en el almacenamiento de nitrógeno y agua en el suelo de un matorral desértico transformado a sabana de buffel (*Pennisetum ciliare* L.) Distrito Federal México. Terra Latinoamericana (ed).
- Chaney, K; Swift, RS. 1984. The influence of organic matter on aggregate stability in some British soils. *Journal of Soil Science* (ed) 35, 223-230.
- Cristóbal, D; Alvarez, M; Hernandez, E; Amendola, R. 2011. Concentración de nitrógeno en suelo por efecto de manejo orgánico y convencional. Terra Latinoam (en línea). Consultado 30 jun. 2021. Disponible en http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792011000300325&Ing=es&nrm=iso
- Dávila, J; Olivares, C; Claire, M; Soliz, N. 1962 Mapa Geológico Hoja Rio Mulatos Ae-CG1.6234. 1:100000. Centro de Documentación Servicio Geológico Minero. Publicación Instituto Geográfico Militar. La Paz, Bolivia.
- Delgado, F; Rist, S. 2016. Ciencias, diálogo de saberes y transdisciplinariedad. Aportes teóricos metodológicos para la sustentabilidad alimentaria y del desarrollo. AGRUCO (ed). Cochabamba, Bolivia
- Díaz, G; Ruiz, M; Cabrera, J. 2009. Modificaciones a las propiedades físicas del suelo por la acción de diferentes prácticas productivas para cultivar arroz (*Oryza sativa* L.) (en línea). Consultado 30 jun. 2021. Disponible en http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362009000300007&Ing=es&tIng=es
- Di Rienzo, JA; Casanoves, F; Balzarini, MG; Gonzalez, L; Tablada, M; Robledo, CW. 2020. InfoStat versión 2020. Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina (en línea). Consultado 26 jun. 2021. Disponible en <http://www.infostat.com.ar>
- Dossa, E; Fernandes, E; Reid, W; Ezui, K. 2008. Above- and below-ground biomass, nutrient and carbon stocks contrasting an open-grown and a shaded coffee plantation. *Agrofor Syst* (ed). 72:103-115.
- FAO. 2008. Base referencial mundial del recurso suelo. Un marco conceptual para clasificación correlación y comunicación internacional. Roma Italia: Informe sobre recursos mundiales de los suelos.
- Flores, O; Cazas, A; Choque, J. 2009. Mapa Geológico Hoja Colchani Ae-CGB.6233. Escala 1: 100000 Centro de Documentación Servicio Geológico Minero. Publicación SGTM serie I-CGB-55B. La Paz, Bolivia.
- Follett, RF; Stewart, BA. 1985. Soil Erosion and Crop Productivity. American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin, USA. p. 533.
- Gamarra, C; Díaz, M; Vera, M; Galeano, M; Cabrera, A. 2018. Relación carbono-nitrógeno en suelos de sistemas silvopastoriles del Chaco Paraguayo (en línea). Consultado 23 jun. 2021. Disponible en http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2007-11322018000200004&Ing=es&nrm=iso
- Gandarillas, H. 1982. Informe Anual del Programa de Quinoa. Instituto Boliviano de Tecnología Agropecuaria. La Paz, Bolivia.
- Gómez, N; Villagra, K; Solorzano, M. 2018. La labranza mecanizada y su impacto en la conservación del suelo (revisión literaria). *Tecnología en Marcha* (ed). 31(1):170-180.
- González, L; Espital, E; Pineda, J; Muñoz, E; Irizar, M; Ayala, A. 2020. Potencial de secuestro de carbono orgánico en quinoa simulado con el modelo RothC-26.3. Chapingo México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas* (ed), 789-799 p.
- Healy, RW; Striegl, RG; Russell, TF; Hutchinson, GL; Livingston, GP. 1996. Numerical evaluation of static-chamber measurements of soil-atmosphere gas exchange: Identification of physical processes. *Soil Sci* (ed). 740-747p.
- Hossne, G; Américo, J. 2008. La densidad aparente y sus implicaciones agrícolas en el proceso expansión/contracción del suelo. Terra Latinoam (en línea). Consultado 2 jul. 2021. Disponible en http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792008000300001&Ing=es&nrm=iso
- IBM Corp. 2013. IBM SPSS Statistics para Windows, versión 22.0. Armonk, Nueva York: IBM Corp.
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. 2006. Guidelines for national greenhouse gas inventories. En: Eggleston HS, Buendía HS, Miwa L, Ngara K, Tanabe K. (Ed.). *Agriculture, Forestry and Other Land Use*. (595 p). Hayama: National Greenhouse Gas Inventories Programme. Institute for Global Environmental Strategies (IGES).

- Jaramillo, F. 2002. Introducción a la ciencia del suelo. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. Medellín, Colombia.
- Krüger, H; Zilio, J; Frolla, F. 2013. Secuencias de cultivos, fertilización y COT en semiaridez. Actas Jorn. Nac. Comité Qca. De Suelos. AACs. Bahía Blanca Argentina
- Laban, P; Metternicht, G; Davies, J. 2018. Biodiversidad de suelos y carbono orgánico en suelos: cómo mantener vivas las tierras áridas. Sidney Australia (en línea). Consultado 18 jun. 2021. Disponible en <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/2018-004-Es.pdf>
- López-Hernández, JM; González-Rodríguez, H; Ramírez-Lozano, RG; Cantú-Silva, I; Gómez-Meza, MV; Pando-Moreno, M; Estrada-Castillón, AE. 2013. Producción de hojarasca y retorno potencial de nutrientes en tres sitios del estado de Nuevo León, México. Polibotánica (en línea). Consultado 25 jun. 2021. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-27682013000100003
- Maestre, F. 2016. Respuesta de los microorganismos de los suelos áridos ante el cambio climático. Investigación y Ciencia (ed). Madrid España.
- Magos, C. 2018. La Importancia del carbono en la salud del suelo. Distrito Federal México (en línea). Consultado 29 jun. 2021. Disponible en <https://www.agromarketing.mx/sustentabilidad/la-importancia-del-carbono-para-la-salud-del-suelo/>
- Marulanda, J; Villa, J. 2015. Densidad aparente y concentración de materia orgánica en el suelo de un humedal de alta montaña. Journal of Engineering and Technology (ed).
- Mogollón, JP; Martínez, R; Rivas, W; Maseda, C; Muñoz, B; Marquez, E; Lemus, L; Colmenares, M; Campos, Y. 2015. Carbono orgánico como indicador del proceso de desertificación en suelos agrícolas al Norte de Venezuela (en línea). Consultado 30 jun. 2021. Disponible en http://unicauca.edu.co/revistas/index.php/suelos_ecuadoriales/article/view/11
- Montico, S. 2010. Impacto del cambio climático sobre los suelos. Rosario, Argentina. Publicación cuatrimestral de la Facultad de Ciencias Agrarias Nro. 28. Consultado 29 jun. 2021. Disponible en: <https://fcagr.unr.edu.ar/Extension/Agromensajes/28/10AM28.htm>
- Murillo, J; Rodríguez, G; Roncallo, B; Rojas, L; Bonilla, RR. 2014. Efecto de la aplicación de prácticas sostenibles en las características físicas, químicas y microbiológicas de suelos degradados (en línea). Pastos y Forrajes 37(3): 270-278. Consultado 30 jun. 2021. Disponible en http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03942014000300003&lng=es&tln=es
- Nelson, DW; Sommers, LE. 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. p. 961-1009. In Sparks D.L., and J.M. Bartels (ed.). Methods of Soil Analysis: Chemical Methods. Part 3. SSSA Book Series number 5. Madison, Wisconsin, USA.
- Orsag, V; Castro, E; León, M; Pacosaca, O; Mamani, F. 2011. Evaluación de la fertilidad de los suelos en la zona del Intersalar. Danida. PIEB. UMSA, La Paz, Bolivia. (Serie Investigación Ambiental Nro. 10).
- Orsag, V. 2010. El recurso suelo: principios para su manejo y conservación. Primera edición. La Paz, Bolivia. Zeus (ed). ISBN: 978-99954-732-9-7. 473 p.
- PDM Llica. 2012. Plan de Desarrollo Municipal 2008-2012, Municipio de Llica. Honorable Gobierno Municipal de Llica. Primera Sección, Provincia "Daniel Campos".
- PDM Tomave. 2012. Plan de Desarrollo Municipal 2008-2012, Municipio de Tomave. Honorable Gobierno Municipal de Tomave. Segunda Sección, Provincia "Antonio Quijarro".
- PDM Uyuni. 2012. Plan de Desarrollo Municipal 2008-2012, Municipio de Uyuni. Honorable Gobierno Municipal de Uyuni. Primera Sección, Provincia "Antonio Quijarro".
- Ponce, J; Bustillos, O; Alarcón, H. 1967. Mapa Geológico Hoja Llica Ae-CG1.5934. 1:100000 Centro de Documentación Servicio Geológico Minero. Publicación Instituto Geográfico Militar. La Paz, Bolivia.
- Reicosky, DC. 2002. Effect of Moldboard Plowing on Tillage - Induced CO2 Loss, in J. M. Kimble, R. Lai and R. F. Follet: Agricultural Practices and Policies for Carbon Sequestration in Soil. Lewis Publishers. Papers from symposium held July 1999 at Ohio State University, Columbus, Ohio, 87-96 p.
- Reyes, JL; Martínez, E; Silva, P; Acevedo, E, 2002. Labranza y propiedades de un suelo aluvial de Chile central. Sociedad chilena de la ciencia del suelo y Universidad de Talca. IX Congreso

- nacional de la ciencia del suelo, Talca, Chile. 78-81 p.
- Sá Pereira, E; Minoldo G; Galantini, J. 2015. El Impacto de los Sistemas actuales de cultivo sobre las Propiedades Químicas del Suelo y sus efectos sobre los Balances de Carbono. INTA (ed). Buenos Aires Argentina.
- SENAMHI. 2017. Sistema de procesamiento de datos meteorológicos. Sistema Nacional de Meteorología e Hidrología. La Paz, Bolivia.
- Sipe, J. 2011. Relación carbono: nitrógeno en suelos del altiplano central producto de la aplicación de abonos orgánicos e inorgánicos en el cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.). Tesis Lic, La Paz. Bolivia. Universidad Mayor de San Andres.
- Suarez, C; Rodríguez, A. 1962. Investigaciones sobre erosión y conservación de suelos en Colombia. Chinchiná, FNC. 474p.
- Teomiro, E. 2018. El "boom" de la quinoa. Global Affairs and Strategic Studies. Facultad de Derecho. Universidad de Navarra (en línea). Consultado 28 jun. 2021. Disponible en: <https://www.unav.edu/web/global-affairs/detalle/-/blogs/el-boom-de-la-quinoa>
- Vela, G; López, J; Rodríguez, M. 2012. Niveles de carbono orgánico total en el Suelo de Conservación del Distrito Federal, centro de México (en línea). Investigaciones geográficas 77. Consultado 30 jun. 2021. Disponible en http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112012000100003&lng=es&tlng=es
- Wagner, GH; Wolf, DC. 1998. Carbon transformations and soil organic matter formation. En D.M. Sylvia, J.J. Fuhrmann, P.G. Hartel y D.A. Zuberer: Principles and applications of soil microbiology. Prentice Hall. New Jersey Estados Unidos. 219-258 p
- Zitzer, S; Archer, S; Boutton, T. 1996. Spatial Variability in the Potential for Symbiotic N₂ Fixation by Woody Plants in a Subtropical Savanna Ecosystem. The Journal of Applied Ecology (ed) 33. 1125. 10.2307/2404692.
- ZONISIG. 2001. Zonificación Agroecológica y Socioeconómica - Departamento de Potosí. Documento síntesis. MDSP, Prefectura del Departamento de Potosí, DHV-ITC. Potosí, Bolivia.

Artículo recibido en: 05 de mayo 2021

Aceptado en: 02 de agosto 2021