



Sistemas de labranza y física del suelo en el cultivo de papa en Nariño, Colombia

Tillage Systems and Soil Physics in Potato Cultivation in Nariño, Colombia

Belisario Volverás Mambuscay¹ <https://orcid.org/0000-0002-6571-670X> | bvolveras@agrosavia.co

Eduardo Espitia Malagón² <https://orcid.org/0000-0002-4690-393X> | eespitia@agrosavia.co

José Manuel Campo Quesada³ <https://orcid.org/0000-0001-9927-6629> | jcampoq@agrosavia.co

Juan Fernando López Rendón^{4*} <https://orcid.org/0000-0002-7035-1880>

¹Corporación colombiana de investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), Centro de Investigación Palmira, Palmira, Colombia.

²AGROSAVIA, Centro de Investigación Tibaitata, Mosquera, Colombia

³AGROSAVIA, Centro de Investigación Obonuco, Pasto, Colombia

⁴AGROSAVIA, Centro de Investigación Nus, San Roque, Colombia

*Autor de correspondencia: jflopezr@agrosavia.co

Recibido: 02 de octubre de 2024

Aceptado: 10 de marzo de 2025

Publicado: 28 de mayo de 2025

Resumen

Objetivo. Evaluar el efecto de sistemas de labranza alternativos al sistema de labranza convencional sobre la erosión y propiedades físicas del suelo y el rendimiento de tubérculos en dos épocas de siembra. **Materiales y métodos.** El experimento se realizó en un suelo Pachic Melanudands con dos siembras consecutivas, entre el segundo semestre de 2017 y el primer semestre de 2018 en municipio Túquerres, Nariño, Colombia, a una altitud 2 840 msnm y en una zona de vida de bosque húmedo Montano (bh-M). El diseño experimental fue bloques completos al azar con arreglo factorial 3*2, donde se evaluaron dos factores de variación tres tratamientos de labranza y dos épocas

Abstract

Objective. Evaluate the effect of alternative tillage systems to conventional tillage on soil erosion, soil physical properties and tuber yield in two planting seasons. **Materials and methods.** The experiment was conducted in a Pachic Melanudands soil with two consecutive sowings, between the second semester of 2017 and the first semester of 2018 in Túquerres municipality, Nariño, Colombia, at an altitude 2 840 masl and in a humid Montane forest (bh-M) life zone. The experimental design was randomized complete blocks with a 3*2 factorial arrangement, where two factors of variation, three tillage treatments and two planting seasons (dry and rainy period) and four repli-

de siembra (periodos seco y lluvioso) y cuatro repeticiones. Los tratamientos de labranza hicieron referencia a T1: labranza convencional (LC) con un pase de arado de disco y tres pases de rastrillo pulidor. T2: un pase de arado de disco y dos pases de rastrillo pulidor y T3: labranza vertical con un pase de arado de disco y dos pases de cincel flexible vibratorio. **Resultados.** En comparación con la labranza convencional, la labranza reducida y la labranza vertical redujeron la erosión del suelo en 17 y 33 % respectivamente. No se observó un efecto significativo de los sistemas de la labranza sobre el rendimiento comercial de tubérculos, que alcanzó un promedio de 16.07 t/ha. **Conclusión.** La reducción de la intensidad de la labranza no afectó el rendimiento, pero sí disminuyó la erosión.

Palabras claves

Mecanización, ladera, rendimiento, andisol.

cations were evaluated. The tillage treatments referred to T1: conventional tillage (LC) with one pass of disk plow and three passes of polishing rake. T2: one pass of disk plow and two passes of polishing rake and T3: vertical tillage with one pass of disk plow and two passes of flexible vibratory chisel. **Results.** Compared to conventional tillage, reduced tillage and vertical tillage reduced soil erosion by 17 and 33 %, respectively. No significant effect of tillage systems was observed on commercial tuber yields, which averaged 16.07 t/ha. **Conclusion.** The reduction of tillage intensity did not affect yield, but did reduce erosion.

Keywords

Mechanization, hillside, yield, andisol.

Introducción

En la zona fría de los Andes colombianos, el cultivo de papa es la actividad agrícola más importante (Insuasty *et al.*, 2020; Rosero *et al.*, 2020). En 2019, en el departamento de Nariño se sembraron cerca de 26 324 hectáreas (Red de Información y Comunicación del Sector Agropecuario de Colombia [AGRONET], 2025). Es frecuente el uso de la labranza mecanizada intensiva en la zona de producción que se ubica entre los 2 700 a 3 100 m de altitud, en suelos profundos, con fuertes y largas pendientes (Avendaño y González, 2015), de baja densidad aparente, mediana estabilidad estructural, condiciones frágiles muy susceptibles a la erosión (Sarangi *et al.*, 2021).

La labranza mecanizada intensiva en laderas realizada con implementos pesados causa efectos negativos significativos sobre el suelo. Los implementos rompen terrones y agregados, expone la materia orgánica en la superficie, lo que genera pérdida de la estabilidad estructural, de fauna edáfica y de volumen del suelo (Gómez *et al.*, 2018; Sarangi *et al.*, 2018, Jaleta *et al.*, 2019; Kumar *et al.*, 2021).

La erosión en laderas y la compactación subsuperficial y pérdida de estructura en valles son los factores principales de degradación del suelo en Colombia (García *et al.*, 2020). Las fuerzas degradativas que actúan constantemente sobre el suelo son básicamente naturales y las inducidas de forma antrópica (Dragović y Vulević, 2021).

La degradación natural está representada principalmente por la erosividad de las lluvias, que depende de la intensidad y cantidad de la precipitación y el tamaño y velocidad de las gotas (Pérez *et al.*, 2019) y la degradación antrópica está relacionada fundamentalmente

con el uso indiscriminado, inoportuno e inapropiado de la práctica de labranza (Mancinelli *et al.*, 2020); la alta intensidad de la labranza rompe los agregados a microagregados que sellan el suelo y facilitan su arrastre (Shanshan *et al.*, 2018; Djaman *et al.*, 2022).

Está documentado (Panagos *et al.*, 2015) que, parámetros como la erodabilidad del suelo, la erosividad e intensidad de la lluvia (cantidad y duración) y la energía cinética de las gotas de agua, rompen agregados y generan salpicaduras laterales de hasta de 1.52 m en terrenos planos. Cuando se realiza el aporque al cultivo, se deposita sobre el lomo del surco el suelo suelto que cae al entresurco y se desplaza pendiente a bajo con el agua de escorrentía, proceso favorecido por el surcado en el sentido de la pendiente (Volverás *et al.*, 2021).

Algunos estudios con labranza mecanizada intensiva en la zona alta de Nariño, Colombia, reportaron pérdidas de suelo entre 80 a 100 t/ha/año, desestabilización física al reducirse el volumen del suelo en 28 %, la infiltración en 71 % y la capacidad de aceptación de lluvias con niveles de escorrentía de 95 %, ligeros cambios en la clase textural, disminución de contenidos de Ca, Mg y materia orgánica del 59 % (Volverás *et al.*, 2016; Volverás *et al.*, 2020).

Con la disminución del número de pases y operaciones de los implementos de labranza se reducen los niveles de degradación de los recursos naturales y se mantiene o mejora el rendimiento especialmente en laderas (Jia *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2021; Gura *et al.*, 2022; Pavlu *et al.*, 2022). La labranza de conservación disminuye la erosión y el impedimento mecánico para penetración de raíces (García *et al.*, 2020). Así mismo reduce la escorrentía (Jia *et al.*, 2019), mejora el volumen del suelo, la porosidad total y la distribución del tamaño de poros (Uribe *et al.*, 2018).

En la labranza de conservación y labranza vertical se mejoran la captación y almacenamiento de agua, recurso altamente demandado por el cultivo de papa. Se estima que la papa requiere de 0.35 a 0.80 m³ de agua para producir 1 kg de materia seca de tubérculos. En condiciones de campo, esto se traduce en requerimientos hídricos de 350 a 650 mm durante el período de crecimiento. Para un rendimiento de 11 kg de tubérculo fresco con un 75% de humedad, se requiere un m³ de agua. A su vez se estima que bajo condiciones de estrés hídrico por cada mm que se reduce la precipitación el rendimiento disminuye en 117 kg/ha (Sood y Singh, 2003).

En la zona productora de papa de Nariño es común observar fuertes procesos erosivos asociados principalmente al manejo convencional de la labranza, que conlleva a la pérdida de la capa productiva (Volverás *et al.*, 2021), por lo cual, el objetivo del estudio fue evaluar el efecto de sistemas de labranza sobre la erosión del suelo y el rendimiento de tubérculos.

Materiales y métodos

Localización y épocas de siembra

El trabajo se desarrolló en la región andina, eco región sabana y montaña, en la zona de vida de bosque húmedo montano (bh-M) (Holdridge, 1987), en el departamento de Nariño, municipio Túquerres, vereda La Laguna a 2 840 msnm (latitud N 1° 03' 45.77", longitud O 77° 35' 5.3") con una temperatura promedio de 10 °C, máximas

promedio de 15 °C y mínimas de 5 °C. Los suelos predominantes en la zona de estudio son clasificados como Pachic Melanudands (Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC], 2004), pendiente del terreno de 10 %. En general, son suelos profundos, livianos y de fertilidad media a alta. A continuación, se referencia la precipitación presentada durante el periodo de evaluación, en la cual se observa que en la época 1 (junio a octubre de 2017) de siembra, las precipitaciones fueron menores durante el periodo evaluado respecto a la época 2 (marzo a julio de 2018) de siembra, la cual contó con mayor precipitación (cuadro 1).

Cuadro 1

Precipitación (mm) media mensual durante el periodo de evaluación en el municipio de Tuquerres, Nariño, Colombia, 2017-2018

Mes	Precipitación (mm)	
	2017 Epoca 1	2018 Epoca 2
enero	143	316
febrero	31	93
marzo	107	314
abril	255	153
mayo	129	313
junio	51	96
julio	40	7
agosto	57	23
septiembre	42	32
octubre	202	156
Noviembre	188	187
diciembre	307	204

Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), 2022.

Tratamientos de labranza

Se tomó como referencia la labranza mecanizada tradicional o convencional realizada por los productores y sistemas de labranza orientados hacia la disminución del número de operaciones de los implementos y el rompimiento vertical del suelo. En el momento de la aplicación de los tratamientos, el suelo estaba con pastura compuesta de una mezcla de kikuyo (*Cenchrus clandestinus Hoschst ex Chiov*) y azul orchoro (*Dactylis glomerata* L). Los tratamientos de labranza se aplicaron durante dos épocas de siembra, la primera entre junio y octubre de 2017 y la segunda de marzo a julio de 2018.

- Tratamiento 1(T1). Labranza convencional intensiva (LC) utilizada por los productores, un pase de arado de disco y tres pases de rastrillo pulidor.

- Tratamiento 2 (T2). Un pase de arado de disco y dos pases de rastrillo pulidor.
- Tratamiento 3 (T3). Labranza vertical (LV), un pase de arado de disco y dos pases de cincel flexible vibratorio.

Diseño experimental

Se realizó un diseño experimental en bloques al azar con arreglo factorial 3×2 , con el objetivo de evaluar el efecto de la interacción entre los tratamientos de labranza (T1, T2 y T3) en dos épocas de siembra consecutivas (cuadro 1), siendo una época seca (época 1) y otra húmeda (época 2) con el fin de estudiar la acción de la precipitación sobre las propiedades del suelo según el sistema de labranza. Los bloques hacen referencia a la pendiente del terreno, estableciendo cuatro repeticiones en parcelas de 16.4 m x 15.6 m. La unidad experimental constó de seis surcos de 16.4 m de largo distanciados a 1.3 m (127.92 m²) y 0.4 m entre tubérculos.

VARIABLES EVALUADAS

- *Erosión de suelo.* Las unidades experimentales se aislaron con láminas de zinc y en la parte de abajo se construyeron canaletas recubiertas con plástico donde se recogió el suelo erosionado por la escorrentía de la lluvia y por las labores agrícolas durante todo el ciclo de cultivo.
- *Rendimiento de tubérculo.* En los bordes de la unidad experimental se dejaron dos metros y se cosecharon los cuatro surcos centrales de cada unidad experimental (64.48 m²); se tomó el peso fresco (kg) de cuatro tamaños del tubérculo de papa, tipo cero (diámetro mayor de 90 mm), tipo 1 (de 65 a 90 mm), tipo 2 (de 45 a 64 mm) y tipo 3 (30 a 44 mm), que representan el rendimiento total del cual se determina el rendimiento comercial representado por los tipos cero, uno y dos.
- *Tubérculo de descarte.* Corresponde a los tubérculos tipo 3 y tubérculos dañados por problemas fitosanitarios estimado en porcentaje.

Propiedades físicas - Distribución de agregados en seco

Para estabilidad de agregados en seco se tomaron muestras disturbadas con barreno a 20 cm de profundidad, las cuales se sometieron a un secado a temperatura ambiente por 48 horas y posteriormente, se secaron en estufa a 105 grados por 24 horas. Una vez seca, la muestra se desagregó manualmente con cuidado para evitar la ruptura de los agregados naturales. Luego, se sometió a un proceso de tamizado en seco mediante una serie de tamices con aberturas de diferentes tamaños (6, 4, 2, 1, 0.5 y 0.25 mm) en un agitador mecánico durante cinco minutos. Cada fracción retenida en cada tamiz fue pesada y registrada. Se determinó la proporción de cada fracción con relación al peso total de la muestra inicial. A partir de estos datos, se calculó la distribución de agregados, expresándola en porcentaje de peso respecto al total y el índice diámetro medio ponderado el cual es adimensional (Kemper y Rosenau, 1986).

Propiedades físicas - Estabilidad de agregados en húmedo

Para estabilidad de agregados se tomaron muestras disturbadas con barreno a 20 cm de profundidad, las cuales se sometieron a un secado a temperatura ambiente por 48 horas y, posteriormente, se secaron en estufa a 105 grados por 24 horas. Una vez seca, la muestra se desagregó manualmente con cuidado para evitar la ruptura de los agregados naturales. Luego, se sometió a un proceso de tamizado en seco con el tamiz de 2 mm. Cada fracción tamizadas se dispusieron aproximadamente 25 g de suelo seco, los cuales fueron prehumedecidos por cinco minutos y colocados en un agitador de tamices de Yoder, el cual consta de una serie de tamices con aberturas decrecientes montados en un sistema de oscilación vertical dentro de unos recipientes con agua, se colocaron cuatro a seis tamices con tamaños típicos de 2 mm, 1, 0.5 y 0.25 mm, dentro del soporte del equipo. El movimiento vertical controlado del equipo fue operado a una frecuencia de 30 oscilaciones por minuto durante 10 minutos. Una vez finalizada la agitación, se retiraron los tamices y se recogieron las fracciones retenidas en cada uno. Cada fracción de agregados se secó en estufa a 105 °C durante 24 horas. Posteriormente, se pesaron individualmente para determinar la masa retenida en cada tamiz la cual fue pesada y registrada. Se determinó la proporción de cada fracción en relación con el peso total de la muestra inicial, a partir de estos datos se calculó la distribución de agregados estables, expresándola en porcentaje de peso respecto al total y el índice diámetro medio ponderado el cual es adimensional (Kemper y Rosenau, 1986).

Propiedades físicas - Retención de humedad

Para la determinación de la retención de humedad se utilizaron muestras de suelo inalteradas, recolectadas en anillos de 2.5 cm de diámetro por 5 cm de altura. Durante la preparación, se colocó una tela de velo en la parte inferior de cada muestra y se sometieron a humedecimiento por capilaridad hasta alcanzar la saturación completa. Una vez saturadas, las muestras fueron sometidas a diferentes tensiones: succiones de 0.75 y 100 cm de columna de agua en la mesa de tensión, y presiones de 0.3, 1.0 y 15.0 bares en ollas y platos de presión. En cada punto de equilibrio, las muestras fueron pesadas para registrar la pérdida de humedad. Al finalizar el proceso, las muestras fueron secadas en horno hasta peso constante, permitiendo determinar la humedad gravimétrica y volumétrica en cada nivel de tensión. Finalmente, los valores de humedad obtenidos se graficaron frente a los valores de potencial mátrico en una escala logarítmica, generando la curva de retención de humedad del suelo (Kemper y Rosenau, 1986).

Análisis de datos

La información se analizó mediante el uso del paquete estadístico SAS. Se realizó un procedimiento GLM y un análisis de varianza factorial 3*2 entre los tratamientos de labranza y la época de siembra, con el objetivo de analizar la interacción entre estos dos factores; asimismo, se hicieron las pruebas Tukey (HSD) para comparación de medias en los casos en que se detectaran diferencias estadísticas significativas a un nivel de $\alpha=0.05$.

Manejo agronómico

Se utilizó semilla certificada de papa de la variedad Diacol Capiro (*Solanum tuberosum* sp. Andígena) una de las principal variedad para consumo en fresco y proceso industrial en Colombia, fue sembrada a 1.2 m entre surcos y 0.4 entre plantas; usando tubérculos semilla, cuyo diámetro oscila entre 40-60 mm, tratadas con clorpirifos en el almacenamiento y al momento de la siembra se asperjó con una mezcla de kasugamicina, azoxystrobin y Thiamethoxam antes de talarla; el control fitosanitario se efectuó de manera homogénea en el experimento y se enfocó principalmente para enfermedades como *Phytophthora infestata*, *Rizoctonia solani* y *Alternaria solani* usando rotación de fungicidas (triazoles, estrobolinas, metalaxil, mancozeb) y plagas como *Tecia solanivora* y *Premnotrypes vorax* entre otras con rotación de insecticidas (Thiamethoxam, lamdacihalotrina, acefato). La fertilización se realizó a razón de 200 (N) -300 (P₂O₅) -150 (K₂O) kg/ha, fraccionado en dos momentos, a los 25 y 60 días después de siembra en los momentos del retape y aporque, respectivamente.

Antes del establecimiento del estudio, se realizó una caracterización inicial del suelo a través de la toma de muestras disturbadas y no disturbadas, las cuales fueron enviadas al laboratorio de la corporación colombiana de investigación agropecuaria (AGROSAVIA) en el centro de investigación Tibaitata, para la obtención de algunos indicadores químicos y físicos del suelo. Desde el punto de vista químico, el suelo presenta limitantes, en los primeros 30 cm de profundidad, para la producción de papa por bajos niveles de fósforo, materia orgánica, azufre y contenidos medios de bases como Ca y Mg y de micronutrientes (cuadro 2).

Cuadro 2

Condición química inicial de suelo a dos profundidades para la localidad de estudio, Nariño, Colombia, 2017

Parámetro	Unidades	0-15 cm	15-30 cm	Parámetro	Unidades	0-15 cm	15-30 cm
pH		5.72	5.84	K	cmol/kg	0.71	0.40
CE	ds/m	0.26	0.21	Na	cmol/kg	0.23	0.26
MO	%	3.01	2.55	CICE	cmol/kg	7.62	7.36
P	mg/kg	5.81	46.94	Fe	mg/kg	615.2	369.79
S	mg/kg	2.86	3.39	Mg	cmol/kg	10.24	5.38
Al+H	cmol/kg	0.00	0.00	Zn	mg/kg	2.61	2.22
Al	cmol/kg	0.00	0.00	Cu	mg/kg	1.95	1.80
Ca	cmol/kg	5.69	5.67	B	mg/kg	0.25	0.27

Referente a la fertilidad física, el suelo presenta una estabilidad estructural media, valores de densidad aparente superiores a 1.0 g/cm³, densidad 30 % superior a la densidad natural en la zona y tanto a baja como alta succión, el suelo presenta baja capacidad de retención de humedad especialmente en los primeros 10 cm de profundidad (cuadro 3).

Cuadro 3

Condición física inicial de suelo en la localidad de estudio, Nariño, Colombia, 2017

Profundidad	Densidad aparente g/cc		Retención de humedad bar									
			0.1		0.3		1		3		15	
	Prom	cv	Prom	cv	Prom	cv	Prom	cv	Prom	cv	Prom	cv
0 a 10 cm	1.13	8.44	21.13	3.17	20.73	3.42	20.09	3.70	19.34	4.07	18.84	4.61
10 a 20 cm	1.15	0.87	21.67	10.77	21.18	11.21	20.53	11.39	19.82	11.57	19.56	11.97
20 a 30 cm	1.29	2.80	24.12	8.72	21.87	12.94	21.18	13.52	20.64	12.59	19.86	15.19
Estabilidad de agregados (mm)												
Profundidad	DPM		1.00		2.00		0.50		0.25		<0.2	
	Prom	cv	Prom	cv	Prom	cv	Prom	cv	Prom	cv	Prom	cv
0 a 10 cm	1.26	21.7	12.17	25.1	15.00	21.7	15.09	9.5	17.25	15.7	33.99	21.2

DPM = diámetro medio ponderado (mm).

Resultados

Efecto de la interacción entre la época de siembra y los tratamientos de labranza para la pérdida del suelo y el rendimiento comercial de tubérculos

La interacción entre los tratamientos de labranza de suelo y la época de siembra presentó valores de $Pr(>F)$ 0.0579 y 0.48617 para la pérdida del suelo y el rendimiento comercial, respectivamente. Se evidencia el efecto de la época de siembra en la erosión, con una pérdida superior de suelo en la época 2 respecto a la época 1. En la época 2 se obtuvieron pérdidas entre 49.37 (T1) a 31.30 (T2) t/ha de suelo con diferencias estadísticas entre estos tratamientos, pero sin diferencia con T2 con 39.19 t/ha. Respecto a la época 2 se obtuvieron pérdidas de suelo de 9.32 (T2), 9.24 (T1) y 8.25 (T3) t/ha, sin diferencias estadísticas entre los tratamientos. En cuanto al rendimiento se presentó un rango para la época 1 entre 12.80 T3 y 12.30 T1 t/ha y para la época 2 entre 20.75 T3 y 15.91 T1 t/ha (cuadro 4).

Efecto de la labranza sobre la erosión del suelo y el rendimiento de tubérculo

Hubo efecto significativo ($p < 0.05$) para sistema de labranza sobre la variable erosión del suelo; la labranza convencional del productor presentó la mayor erosión con 29.31 t/ha que disminuyó 17 % al eliminar un pase de rastrillo y 33 % al usar labranza vertical; el rendimiento comercial fluctuó entre 14.11 y 17.33 t/ha y el porcentaje de descarte de tubérculos entre 18 a 21 %, los cuales no presentaron diferencias significativas por efecto de los tratamientos de labranza (cuadro 5).

Cuadro 4

Pérdida de suelo en el cultivo de papa por efecto de la interacción entre tratamiento de labranza y época de siembra en el municipio de Tuquerres, Nariño, Colombia

Época de siembra	Tratamiento de labranza	Pérdida de suelo (t/ha)	Rendimiento comercial (t/ha)
1	T1	9.24 c ± 0.94	12.30 b ± 1.0
1	T2	9.32 c ± 1.40	12.59 b ± 1.2
1	T3	8.25 c ± 0.86	12.80 b ± 1.8
2	T1	49.37 a ± 11.10	15.91 ab ± 2.6
2	T2	39.19 ab ± 4.44	22.09 a ± 2.2
2	T3	31.30 b ± 5.41	20.75 a ± 2.5
Valor P		0.0579	0.48617

T1: labranza convencional intensiva, un pase con arado de disco más tres pases con rastrillo pulidor. T2: un pase con arado de disco más dos pases con rastrillo pulidor. T3: labranza vertical, un pase de arado de disco más dos pases de cincel. Promedios seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes, según prueba múltiple de medias Tukey ($P < 0.05$).

Cuadro 5

Efecto tratamiento de labranza sobre la pérdida de suelo, rendimiento comercial de tubérculo de papa y porcentaje de descarte, Nariño, Colombia

Labranza*	Erosión de suelo (t/ha)	Rendimiento comercial (t/ha)	Descarte (%)
T1	29.31 ± 10.26 a	14.11 ± 1.51 a	21 ± 0.04 a
T2	24.26 ± 7 ab	17.33 ± 2.4 a	18 ± 0.03 a
T3	19.77 ± 5.44 b	16.78 ± 2.2 a	21 ± 0.04 a
Valor P	0.0371	0.40551	0.4777

T1: labranza convencional intensiva (LC), un pase con arado de disco más tres pases con rastrillo pulidor. T2: un pase con arado de disco más dos pases con rastrillo pulidor (LR). T3: labranza vertical, un pase de arado de disco más dos pases de cincel (LV). Promedios seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes, según prueba múltiple de medias Tukey ($P < 0.05$).

Efecto de la época de siembra sobre las variables evaluadas

La época de siembra afectó significativamente ($p < 0.001$) a la erosión del suelo, el rendimiento comercial ($p < 0.01$) y el tubérculo de descarte ($p < 0.001$). En comparación con la época uno, en la época dos la erosión del suelo fue cuatro veces mayor, el rendimiento comercial se incrementó 36 % y presentó el menor porcentaje de tubérculo de descarte con 7 % (cuadro 6).

Cuadro 6

Efecto de la época de siembra sobre la pérdida de suelo, rendimiento comercial de tubérculo de papa y porcentaje de descarte, Nariño, Colombia

Época de siembra	Pérdida de suelo (t/ha)	Rendimiento comercial (t/ha)	Descarte (%)
1	8.94 ± 0.57 b	12.57 ± 1.2 b	33 ± 0.03 a
2	39.95 ± 4.46 a	19.58 ± 1.1 a	7.0 ± 0.01 b
Valor P	1.36e-06	0.00753	5.06e-06

Promedios seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes, según prueba múltiple de medias Tukey (P<0.05).

Propiedades físicas

En general, las propiedades físicas del suelo evaluadas fueron afectadas por la labranza y la época de siembra, a continuación, se describirán los resultados por variable evaluada.

Distribución de agregados en seco

El efecto de la interacción entre los sistemas de labranza evaluados y la época de siembra respecto al diámetro medio ponderado (DMP) y la distribución de agregados en seco no presentó diferencia significativa con un Pr(>F) 0.2126, para DMP. Sólo el T3, labranza vertical el tratamiento, presentó un DMP mayor en la época 2 del estudio con un valor de 1.22 respecto a los demás tratamientos de labranza para las dos épocas de siembra (cuadro 7).

Cuadro 7

Efecto de los sistemas de labranza evaluados y la época de siembra en el diámetro medio ponderado de la distribución de agregados, para el cultivo de papa en el municipio de Túquerres, Nariño, Colombia

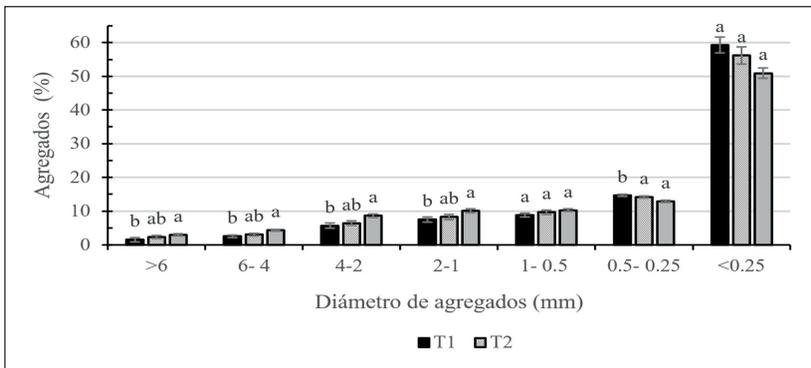
Época de siembra	Tratamientos de labranza	DMP
1	T1	0.71 b (+/- 0.08)
	T2	0.76 b (+/- 0.10)
	T3	0.89 b (+/- 0.05)
2	T1	0.72 b (+/- 0.08)
	T2	0.93 ab (+/- 0.13)
	T3	1.22 a (+/- 0.14)
Valor P		0.2126

T1: labranza convencional intensiva (LC), un pase con arado de disco más tres pases con rastrillo pulidor. T2: un pase con arado de disco más dos pases con rastrillo pulidor (LR). T3: labranza vertical, un pase de arado de disco más dos pases de cincel (LV). Promedios seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes, según prueba múltiple de medias Tukey (P<0.05).

En cuanto a los efectos individuales hubo diferencia significativa ($p < 0.01$) del tratamiento de labranza sobre la distribución de agregados en seco y sobre el índice de diámetro medio ponderado (DMP). El tratamiento con labranza vertical (T3) presentó la mayor proporción de agregados mayores a 1 mm con un total de 26 % respecto al T1, con frecuencia de 17.1 %; el tratamiento T2 con 19% no presentó diferencias significativas respecto a T1 y T3 para estos tamaños de agregados. En cuanto a los tamaños menores de un 1 mm el tratamiento T1 presentó mayor cantidad de agregados entre 0.5 y 0.25 mm de diámetro con 14.7 % respecto a T2 y T3, los cuales no presentaron diferencias entre sí con 14.1 y 12.8 %, respectivamente. Para los agregados menores a 0.25 mm no hubo diferencias entre los tratamientos, obteniéndose valores para T1 (59.3 %), T2 (56.2 %) y T3 (50.9 %) (figura 1).

Figura 1

Distribución de agregados en seco bajo tratamientos de labranza para el cultivo de papa en el municipio de Túquerres, Nariño, Colombia



T1: labranza convencional intensiva (LC), un pase con arado de disco más tres pases con rastrillo pulidor. T2: un pase con arado de disco más dos pases con rastrillo pulidor (LR). T3: labranza vertical, un pase de arado de disco más dos pases de cincel (LV). Promedios seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes, según prueba múltiple de medias Tukey ($P < 0.05$).

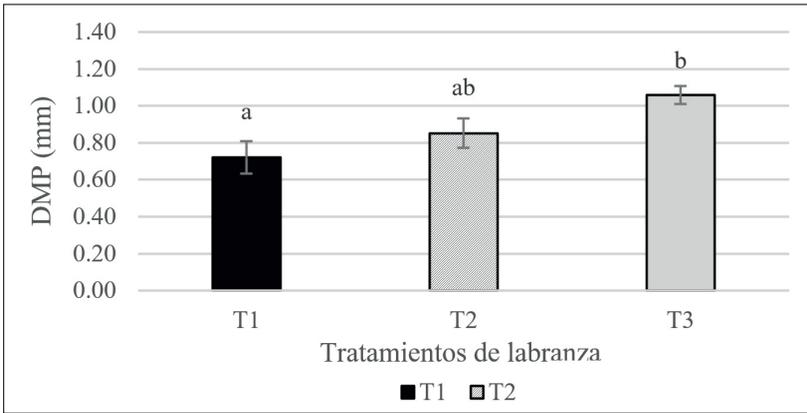
En cuanto al DMP de los agregados en seco, el tratamiento de labranza vertical (T3) presentó el mayor valor de con 1.06 mm respecto a la labranza convencional T1 con 0.72 mm. El tratamiento de labranza reducida T2 no presentó diferencias con T1 y T2, con un DMP de 0.85 mm (figura 2).

Estabilidad estructural

Los agregados estables al agua presentaron diferencias significativas ($p < 0.01$) por efecto de época de siembra; la época 1 presentó la mayor proporción de agregados de 0.25 mm con un acumulado de 23.9 % respecto a 15.2 % de la época 2. En cuanto a los agregados de 2 mm la época 1 presentó mayor porcentaje con 10.6 % *versus* 9.3 % en la época 2 (figura 3).

Figura 2

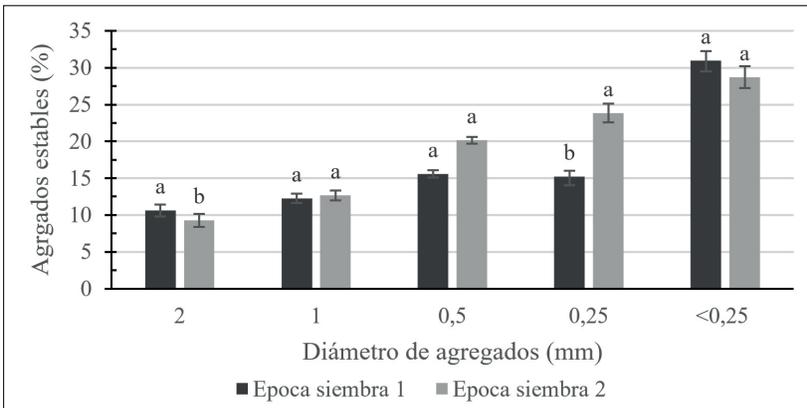
Diámetro medio ponderado (DMP) para distribución de agregados en seco bajo tratamientos de labranza para el cultivo de papa en el municipio de Túquerres, Nariño, Colombia



T1: labranza convencional intensiva (LC), un pase con arado de disco más tres pases con rastrillo pulidor. T2: un pase con arado de disco más dos pases con rastrillo pulidor (LR). T3: labranza vertical, un pase de arado de disco más dos pases de cincel (LV). Promedios seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes, según prueba múltiple de medias Tukey ($P < 0.05$).

Figura 3

Estabilidad de agregados en dos épocas de siembra para el cultivo de papa en el municipio de Túquerres, Nariño, Colombia

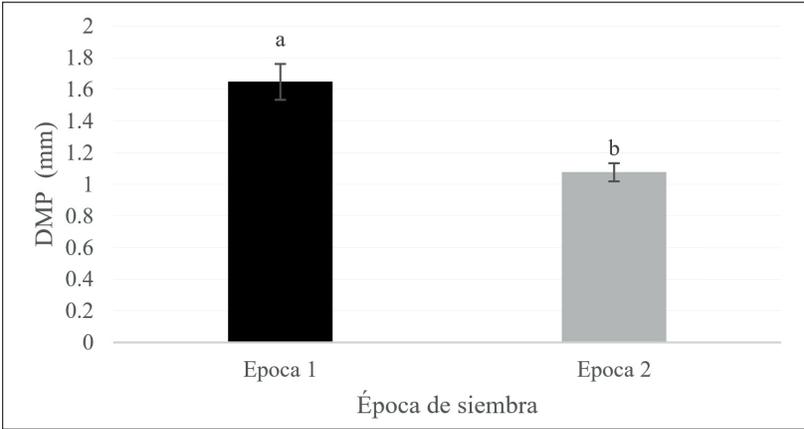


Promedios seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes, según prueba múltiple de medias Tukey ($P < 0.05$).

La estabilidad de agregados a través del DMP mostró diferencias significativas al ($p < 0.01$) entre las épocas de siembra, la época uno presentó un diámetro de 1.65 mm y la época dos valores de 1.07 mm (figura 4).

Figura 4

Diámetro medio ponderado para la estabilidad de agregados en dos épocas de siembra para el cultivo de papa en el municipio de Túquerres, Nariño, Colombia



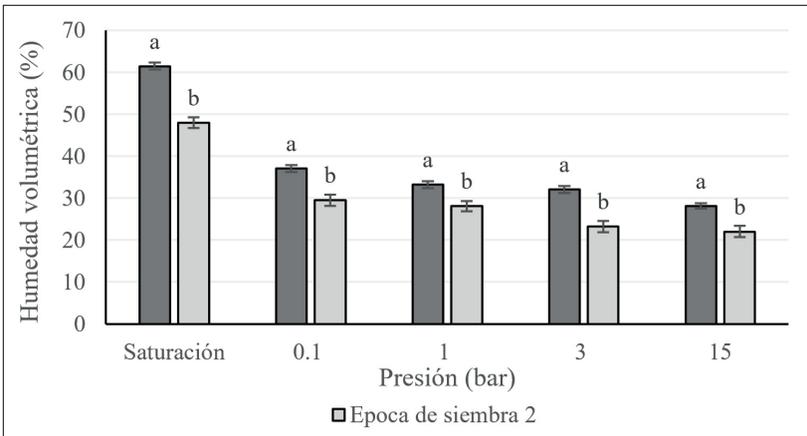
Promedios seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes, según prueba múltiple de medias Tukey ($P < 0.05$).

Retención de humedad

Hubo efecto significativo ($p < 0.01$) de la época de siembra sobre la capacidad de retención de humedad del suelo; tanto a bajas como altas tasas de succión, la siembra uno presentó el mayor contenido de humedad que fluctuó entre 61.47 y 28.16 %, frente a la siembra dos que fluctuó entre 48 y 22% para retención a condiciones de saturación y 15 bares, respectivamente (figura 5).

Figura 5

Retención de humedad volumétrica en dos épocas de siembra para el cultivo de papa en el municipio de Tuquerres, Nariño, Colombia



Discusión

Efecto de la labranza sobre la erosión del suelo y el rendimiento de tubérculo

La erosión del suelo se incrementó al aumentar el nivel de intensificación de la labranza al provocar mayor disgregación de las partículas del suelo; respecto a la labranza convencional intensiva, la erosión fue significativamente menor con labranza vertical, resultados similares a los reportado por Barrera *et al.* (2019); Nyawade *et al.* (2019) y Mancinelli *et al.* (2020).

Estos resultados están relacionados con la disminución del número de operaciones de los implementos y con la labranza vertical que no invierte el suelo. Bajo estas condiciones se obtuvo mayor proporción de agregados grandes, mayor DMP y mejor estabilidad estructural, condición que conlleva a la reducción de la escorrentía y al arrastre de partículas de suelo por el agua y el viento (Drakopoulos *et al.*, 2016; Honkanen *et al.*, 2021).

Los suelos de la zona donde se realizó el estudio han perdido paulatinamente la materia orgánica (cuadro 2) a causa de la labranza mecanizada intensiva. Estrategias como evitar pulverizar el suelo o invertirlo durante la labranza son prácticas que pueden contribuir a recuperar sus niveles. En sistemas de labranza mínima se mantiene buena proporción de la cobertura del suelo que favorece la proliferación de organismos del suelo, condiciones que, en conjunto, propician la agregación de partículas y disminuyen los procesos erosivos (Machado *et al.*, 2010; Seneviratne *et al.*, 2011).

Los tratamientos de labranza no afectaron el rendimiento comercial de tubérculos, resultados similares obtuvieron autores como Dumbuya *et al.* (2016) y Okonkwo *et al.* (2023), quienes reportaron que, al reducir la intensidad de la labranza, el rendimiento se sostuvo. En general, lo que sucede es que después de varios años de uso del suelo con labranza mecanizada intensiva se destruyen agregados, el suelo pierde volumen, condición que restringe el desarrollo de raíces y la retención de agua. La labranza vertical con el cincel, en su lugar rompe el suelo y lo fractura dejando canales y grandes terrones que mejoran la entrada de agua y raíces, lo que a su vez favorece el suministro de agua y nutrientes (Volverás *et al.*, 2020).

El rendimiento similar en los sistemas de labranza vertical tiene importantes implicaciones económicas y ambientales, además permitió demostrar a los productores que la reducción de operaciones de labranza no afectó el rendimiento y que no es necesario pulverizar el suelo para obtener buenos rendimientos, tal como lo reportaron Hou y Li (2015). El rendimiento no comercial o de descarte estuvo dentro del porcentaje que se obtiene a nivel comercial en Colombia, el cual fluctúa entre 20 y 25 %, y fue similar en los tratamientos de labranza debido a que los tratamientos recibieron un manejo agronómico similar y estuvieron bajo las mismas condiciones del entorno biofísico.

Efecto de la época de siembra sobre las variables evaluadas

El incremento de rendimiento de tubérculos del 36 % en la segunda siembra estuvo asociado con una mayor precipitación, cuyo acumulado fue de 882 mm frente a 392 mm en

la primera siembra. El mayor suministro de agua mejora la disponibilidad y la absorción de nutrientes naturales y los aplicados como fertilizante; según Sood y Singh (2003), la papa requiere entre 0.35 y 0.80 m³ de agua para formar 1 kg de biomasa seca de tubérculo bajo condiciones de campo. En cuanto a tubérculos frescos, con cerca de 75 % de humedad, el requerimiento es de 4 a 11 kg/m³ (Quispe *et al.*, 2020). Así mismo, se relacionan con los resultados de los trabajos de Haverkort (1990) y Jerez *et al.* (2000), los cuales reportaron que los cultivares con un ciclo promedio de 135 días, demandan entre 600 y 800 mm de agua para obtener óptimos rendimientos.

La mayor proporción de papa de descarte o no comercial en la primera siembra estuvo relacionada con la escasez de agua en las primeras etapas de desarrollo del cultivo, debido a que sólo tuvo un suministro de la tercera parte del requerimiento teórico; con déficit de agua, la mayoría de tubérculos son de tamaño tipo tercera, que no son comerciales, lo cual concuerdan con lo reportado por Deblonde *et al.* (1999) y Benam y Hassanpanah (2007) y, según los cuales, el déficit de agua reduce el número y tamaño de tubérculos comerciales. Así mismo, las condiciones de verano generaron alta incidencia de algunas plagas, como polilla guatemalteca con grandes pérdidas por el severo deterioro de la calidad del tubérculo (Instituto Colombiano agropecuario [ICA], 2016).

Una erosión 4.5 veces mayor en la segunda siembra se debió al aumento de la precipitación en ese periodo, que generó más arrastre de suelo, favorecido por la disminución de la estabilidad estructural. Durante los tres primeros meses de cultivo, que es la época donde se realizan la mayoría de las labores como control de malezas y aporques, en la primera siembra hubo un acumulado de lluvia de 148 mm frente a 780 mm en la segunda siembra. En ladera, la salpicadura y la intensidad de la lluvia aumentan la energía cinética de las partículas que genera grandes pérdidas de suelo, así sea en suelos con bajo o mínimo nivel de mecanización (Jia *et al.*, 2019).

Para los aporques, el agricultor pica y pulveriza el suelo del entresurco y lo deposita sobre el lomo del surco, el cual alcanza hasta 70 cm de altura de suelo suelto que fácilmente cae a las calles. Bajo estas condiciones, la energía de las gotas de lluvia, su peso y velocidad, de hasta 32 km/h, impactan y separan las partículas del suelo, destruyen los agregados superficiales, material que es transportado por el flujo o escorrentía (Wischmeier y Smith, 1978). Respecto a las propiedades físicas, después de más de un año de uso del suelo en los tratamientos de labranza, se observó claramente el efecto de los arreglos y secuencias de los implementos de mecanización; con el cincel flexible se obtuvo mayor estabilidad estructural que genera mejores condiciones para el desarrollo agronómico del cultivo.

Conclusiones

El estudio demostró que la labranza reducida y la labranza vertical se constituyen en una opción viable para la producción de papa en zonas de ladera, que permitió reducir la erosión del suelo sin afectar el rendimiento y calidad de los tubérculos, lo cual representa una práctica sostenible para el manejo del suelo en cultivo de papa.

El desarrollo de cultivos de papa en épocas con bajas precipitaciones, con la implementación de sistemas de riego que satisfagan las necesidades hídricas del cultivo y su productividad, favorecerán la conservación del suelo al disminuir su tasa de erosión.

Agradecimientos

El trabajo formó parte del proyecto “Estrategias de producción sostenible de papa en el altiplano Cundiboyacense y Nariño, que permitan la obtención de un producto inocuo y de mínimo impacto”, ejecutado por la Corporación Colombiana de investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), financiado por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia.

Literatura citada

- Agronet. (2025). Área cosechada, producción y rendimiento de papa 2006-2018. <https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx> (Consultado 15 enero 2025).
- Barrera-Mosquera, V. H.; Delgado, J. A.; Alwang, J. R.; Escudero-López, L. O.; Cartagena-Ayala, Y. E.; Domínguez-Andrade, J. M. y D'Adamo, R. (2019). La agricultura de conservación aumenta los rendimientos y los beneficios económicos de los sistemas de papa, forraje y cereales de los Andes. *Agronomy Journal*. 111(6): 2747-2753.
- Benam, M. B. K. y Hassanpanah, D. (2007). Evaluation of different potato cultivars at different irrigation periods and different drought stages. *Acta Horticulturae*. 729(28): 183-188.
- Deblonde, P. M. K.; Haverkort, A. J. y Ledent, J. F. (1999). Responses of early and late potato cultivars to moderate drought conditions: agronomic parameters and carbon isotope discrimination. *European Journal of Agronomy*. 11(2): 91-105.
- Djaman, K.; Koudahe, K.; Koubodana, H. D.; Saibou, A. y Essah, S. (2022). Tillage practices in potato (*Solanum tuberosum* L.) production: a review. *American Journal of Potato Research*. 99(1): 1-12.
- Dragović, N. y Vulević, T. (2021). Procesos de degradación del suelo, causas y enfoques de evaluación. En: W. Leal-Filho, A. M. Azul, L. Brandli, A. Lange-Salvia, y T. Wall. (eds.), Vida en la tierra. Enciclopedia de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas Ed. Springer. Switzerland. Pp. 928-939.
- Drakopoulos, D.; Scholberg, J. M. S.; Lantinga, E. y Tittonell, P. A. (2016). Influence of reduced tillage and fertilization regime on crop performance and nitrogen utilization of organic potato. *Organic Agriculture*. 6 (1): 75-87.
- Dumbuya, G.; Sarkodie-Addo, J.; Daramy, M. y Jalloh, M. (2016). Growth and yield response of sweet potato to different tillage methods and phosphorus fertilizer rates in Ghana. *Journal of Experimental Biology and Agricultural Sciences*. 4(1): 475-483.
- García, C. R.; Brown, S.; Krzic, M.; Lavkulich, L. y Roa-García, M. C. (2020). Relationship of soil water retention characteristics and soil properties: a case study from the Colombian Andes. *Canadian Journal of Soil Science*. 101(1): 147-156.
- Gómez-Calderón, N.; Villagra-Mendoza, K. y Solorzano-Quintana, M. (2018). La labranza mecanizada y su impacto en la conservación del suelo (revisión literaria). *Revista Tecnología en Marcha*. 31(1): 167-177.
- Gura, I.; Mnkeni, P. N. S.; Du Preez, C. C. y Barnard, J. H. (2022). Short-term effects of conservation agriculture strategies on the soil quality of a Haplic Plinthosol in Eastern Cape, South Africa. *Soil and Tillage Research*. 220: 105378.
- Haverkort, A. J. (1990) Ecology of Potato Cropping Systems in Relation to Latitude and Altitude. *Agriculture Systems*. 32(3): 251-272.
- Holdridge, L. R. (1987). *Ecología basada en zonas de vida*. IICA. Costa Rica. 159 p.

- Honkanen, H.; Turtola, E.; Lemola, R.; Heikkinen, J.; Nuutinen, V.; Uusitalo, R.; Kaseva, J. y Regina, K. (2021). Response of boreal clay soil properties and erosion to ten years of no-till management. *Soil and Tillage Research*. 212: 105043.
- Hou, X. y Li, R. (2015). Effects of mulching with no-tillage on soil physical properties and potato yield in mountain area of southern Ningxia. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. 31(19): 112-119.
- Instituto colombiano agropecuario [ICA] (2016). <https://www.ica.gov.co/noticias/agricola/2013/ica-condiciones-climaticas-y-falta-de-controles-fi> (Consultado 15 noviembre 2023).
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM] (2022). *Solicitud de información meteorológica*. <http://www.ideam.gov.co/solicitud-de-informacion/> (Consultado 20 marzo 2024).
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2004). *Estudio general de suelos y zonificación de tierras. Departamento de Nariño*. IGAC.
- Insuasty-Córdoba, S. C.; Ramos-Zambrano, H. S.; Marcillo-Paguay, C. A.; López-Peñafiel, H. V.; Mateus-Rodríguez, J. F. y Martínez-Pachón, E. (2020). Diagnóstico financiero y biofísico para la producción de semilla de papa. *Agronomía Mesoamericana*. 31(3): 635-647.
- Jaleta, M.; Baudron, F.; Krivokapic-Skoko, B. y Erenstein, O. (2019). Agricultural mechanization and reduced tillage: antagonism or synergy? *International Journal of Agricultural Sustainability*, 17(3): 219-230.
- Jerez, J. y Simpfendorfer, C. (2000). Efecto del riego en el cultivo de papa. *Especial de riego y drenaje. INIA*. 34: 26-28.
- Jia, L.; Zhao, W.; Fu, B.; Daryanto, S.; Wang, S.; Liu, Y. y Zhai, R. (2019). Effects of minimum soil disturbance practices on controlling water erosion in China's slope farmland: A meta-analysis. *Land Degradation & Development*. 30(6): 706-716.
- Kemper, W. D. y Rosenau, R. C. (1986). Aggregate stability and size distribution. In A. Klute (Ed.), *Methods of soil analysis: Part 1—Physical and mineralogical methods* 2nd ed. American Society of Agronomy. Pp. 425-442.
- Kumar, R.; Sarkar, B.; Bhatt, B. P.; Mali, S. S.; Mondal, S.; Mishra, J. S.; Kumar, J.; Meena, R. S.; Anurag, A. P. y Raman, R. K. (2021). Comparative assessment of energy flow, carbon auditing and eco-efficiency of diverse tillage systems for cleaner and sustainable crop production in eastern India. *Journal of Cleaner Production*. 293: 126162.
- Machado, D.; Sarmiento, L. y González-Prieto, S. (2010). The use of organic substrates with contrasting C/N ratio in the regulation of nitrogen use efficiency and losses in a potato agroecosystem. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 88(3): 411-427.
- Mancinelli, R.; Marinari, S.; Allam, M. y Radicetti, E. (2020). Potential Role of Fertilizer Sources and Soil Tillage Practices to Mitigate Soil CO₂ Emissions in Mediterranean Potato Production Systems. *Sustainability*. 12(20): 8543.
- Nyawade, S.; Gachene, C.; Karanja, N.; Gitari, H.; Schulte-Geldermann, E. y Parker, M. (2019). Controlling soil erosion in smallholder potato farming systems using legume intercrops. *Geoderma Regional*. 17(e00225): 2352-0094.
- Okonkwo, A. E.; Ngonadi, E. S.; Uko, Yo; Onwughalu, J. T. y Izundu, I. A. (2023). Efecto de prácticas de labranza and fertilizantetarifas on crecimiento, and rendimiento de batata (*Ipomea batata*). *Revista de Gestión de Residuos y Biomasa*. 5(2): 36-40.
- Panagos, P.; Meusburger, K.; Ballabio, C.; Borrelli, P.; Beguería, S.; Clich, A.; Rymaszewicz, A.; Michaelides, S.; Olsen, P.; Percec, T.; Aalto, J.; Lakatos, M.; Dumitrescu, A.; Rousseva, S.; Montanarella, L. y Alewell, C. (2015). Reply to the comment on "Rainfall erosivity in Europe" by Auerswald et al. *Science of the Total Environment*. 532(1): 853-857.
- Pavlu, L.; Kodešová, R.; Vašát, R.; Fér, M.; Klement, A.; Nikodem, A. y Kapička, A. (2022). Estimation of the stability of topsoil aggregates in areas affected by water erosion using selected soil and terrain properties. *Soil and Tillage Research*. 219(1): 105348.
- Pérez-Salinas, J. E.; Rodríguez, F. R.; López-Santos, A.; Torres-González, J. A.; de Jesús Meraz-Jiménez, A.; Díaz-Romo, A. y Valdivia-Martínez, O. (2019). Erodabilidad y riesgo de erosión de suelos negros del centro de México: estudio de un Phaozem. *Terra Latinoamericana*. 37(4): 391-400.

- Quispe-Rodriguez, J.; Quispe-Quezada, U. R.; Hinojosa-Benavides, R. A. y Quispe-Medrano, J. A. (2020). Determinación de coeficientes de uso consuntivo (Kc) en cultivo de papa (*Solanum tuberosum*) por el método lisimétrico en el valle del Mantaro. *Puriq*. 2(3): 196-208.
- Rosero-Alpala, M. G.; Tapie, W. A. y Rosero-Alpala, D. A. (2020). Diversidad fenotípica de papas nativas en las comunidades indígenas de la etnia de los Pastos (Nariño, Colombia): Agricultura ecológica para la seguridad alimentaria y el desarrollo rural. *Revista Peruana de Biología*. 27(4): 509-516.
- Sarangi, S. K.; Maji, B.; Digar, S.; Mahanta, K. K.; Sharma, P. C. y Mainuddin, M. (2018). Zero tillage potato cultivation. *Indian Farming*. 68(04): 23-26.
- Sarangi, S. K.; Maji, B.; Sharma, P. C.; Digar, S.; Mahanta, K. K.; Burman, D.; Mandal, U.K.; Mandal, S. y Mainuddin, M. (2021). Potato (*Solanum tuberosum* L.) cultivation by zero tillage and paddy straw mulching in the saline soils of the Ganges Delta. *Potato Research*. 64(1): 277-305.
- Seneviratne, G.; Jayasekara, A. P. D. A.; De Silva, M. S. D. L. y Abeysekera, U. P. (2011). Developed microbial biofilms can restore deteriorated conventional agricultural soils. *Soil Biology and Biochemistry*. 43 (5): 1059-1062.
- Shanshan, W.; Baoyang, S.; Chaodong, L.; Zhanbin, L. y Bo, M. (2018). Runoff and soil erosion on slope Cropland: A Review. *Journal of Resources and Ecology*. 9(5): 461-470.
- Sood, M. C. y Singh, N. (2003). Water management. En: S. M. P. Khurana, J. S. Minhas, S. K. Pandey. (Eds.), *The Potato: Production and utilization in sub-tropics*. Mehta Publishers. Pp. 111-120.
- Uribe, N.; Corzo, G.; Quintero, M.; van Griensven, A. y Solomatine, D. (2018). Impact of conservation tillage on nitrogen and phosphorus runoff losses in a potato crop system in Fuquene watershed, Colombia. *Agricultural Water Management*. 209(1): 62-72.
- Volverás-Mambuscay, B.; Amézquita-Collazos, É. y Campo-Quesada, J. M. (2016). Indicadores de calidad física del suelo de la zona cerealera andina del departamento de Nariño, Colombia. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*. 17(3): 361-377.
- Volverás-Mambuscay, B.; Campo-Quesada, J. M.; Merchancano-Rosero, J. D. y López-Rendón, J. F. (2020). Physical soil fertility in the sowing system in wachado on Nariño, Colombia. *Agronomía Mesoamericana*. 31(3): 743-760.
- Volverás-Mambuscay, B.; Merchancano-Rosero, J. D.; López-Rendón, J. F. y Campo-Quesada, J. M. (2021). Pérdida de suelo en el sistema ancestral wachado en el trópico alto de Nariño, Colombia. *Agronomía Mesoamericana*. 32(1): 120-136.
- Wischmeier, W. H. y Smith, D. (1978). Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. United States Department of Agriculture. file:D:/Descargas/USLE.pdf (Consultado 15 diciembre 2023).
- Xu, S., Zhang, L.; Mclaughlin, N.B.; Mi, J.; Chen, Q.; Liu, J. y Yoder, R.E. (2015). Effect of synthetic and natural water absorbing soil amendment soil physical properties under potato production in a semi-arid region. *Soil and Tillage Research*. 148(1): 31-39.
- Zhang, Q.; Wang, S.; Zhang, Y.; Li, H.; Liu, P.; Wang, R.; Wang, X. y Li, J. (2021). Effects of subsoiling rotational patterns with residue return systems on soil properties, water use and maize yield on the semiarid Loess Plateau. *Soil and Tillage Research*. 214(1): 105186.