

CONTRIBUCION DE LA LABRANZA DE CONSERVACION A LA PRODUCCION SOSTENIBLE DEL CULTIVO DE PAPA (*Solanum tuberosum*) EN LA REGION CENTRAL ANDINA

Contribution of conservation tillage to sustainability of potato crop (*Solanum tuberosum*) production in Central Andean Region

Fabio Rodrigo Leiva¹, Ana Delia Bejarano², Wilson González² y Laureano Guerrero³

RESUMEN

Una causa importante de degradación de suelos en la región Andina colombiana es el uso de prácticas inadecuadas de labranza que conducen a erosión, daño estructural y compactación. La situación es crítica por la cantidad de minifundistas que producen cultivos de papa, en altas pendientes y con tecnologías inapropiadas.

La Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional de Colombia ha generado información valiosa sobre efectos ambientales y económicos de sistemas de labranza de conservación (LC) en este cultivo, mediante investigaciones que evalúan integralmente cambios en condiciones físicas del suelo, desarrollo y rendimiento del cultivo y comportamiento financiero. Se reportan dos experimentos en los cuales se compararon sistemas de labranza convencional basados en arados de discos y rotatorio, frente a sistemas de LC para la ladera y el altiplano, incluyendo tracción mecánica y animal. Los resultados muestran que en siembra directa (SD) la estabilidad estructural del suelo se mantuvo constante, el contenido promedio de humedad aumentó entre 2% y 5% frente a los demás tratamientos de labranza y la compactación del suelo (relativamente alta, pero con baja variabilidad) no evidenció efectos nocivos para el cultivo. SD redujo costos de mecanización, e incrementó los rendimientos entre 3% y 34% y la rentabilidad entre 2% y 14% frente al sistema convencional (comúnmente usado por el productor). Esto confirma que los sistemas de LC, adaptados a las diferentes condiciones agroecológicas, son opciones técnicamente viables que posibilitan la sostenibilidad ambiental y económica de la producción agrícola en la región.

Palabras clave: mecanización, labranza cero, conservación de agua y suelos, conservación ambiental, cultivos andinos

SUMMARY

A major cause of land degradation at the Colombian Central Andean region is using inadequate tillage practices that lead to soil erosion, structural damage and com-

paction. This is critical because of the high proportion of small farmers who grow clean crops such as potato with poor technology in high slopes. Research by Faculty of Agronomy, National University of Colombia, has generated worthwhile information on environmental and economic consequences from using different conservation tillage systems (CT) on potato crops in the region. The approach includes integral assessment of changes on soil physical conditions, on crop development and yield, and on financial performance under different tillage practices. This paper reports two experiments in which current tillage systems used by farmers were compared against CT systems for both steep and plane lands.

Results show that direct drilling (DD) kept soil structural stability, increased average soil moisture content between 2% and 5% compared to other tillage treatments and led to reduced mechanization costs. Though soil compaction under DD remained comparatively high (with relatively low variability) not evidence was found of unfavourable conditions for crop development. Thus DD exhibited increases between 3% and 34% in crop yield and between 2% and 14% in profitability where compared to conventional tillage (current system in the region). This confirms that using CT adapted to site specific conditions is a technical option that may contribute to environmental and economic sustainability of farming in the region.

Key words: mechanization, zero tillage, soil and water conservation, environmental conservation, Andean crops

INTRODUCCION

En Colombia, la labranza del cultivo de papa se basa en el uso de arados de discos, rotovator (arado rotatorio) o rastrillo de discos, en la agricultura mecanizada, y de implementos de tracción animal como arado de vertedera o de chuzo, en la agricultura tradicional. La utilización inapropiada e intensiva de esos equipos ha inducido daños graves al suelo (pérdida de estabilidad estructural, compactación y erosión), altas exigencias de energía e incremento en el costo de mecanización y mano de obra, comprometiendo la sostenibilidad de la producción agrí-

- Fecha de recepción 10 de junio de 2002
- Aceptado para publicación 16 de diciembre de 2002.

¹ Profesor Asociado. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia (UNC), Bogotá. frleiva@yahoo.es.

² Facultad de Agronomía, UNC, Bogotá.

³ Profesor Asistente. Facultad de Agronomía, UNC, Bogotá.

cola en el largo plazo. Frente a esta situación, es necesario buscar soluciones técnica y económicamente factibles para el agricultor en un marco de manejo racional de los recursos naturales.

El concepto de agricultura sostenible busca demostrar que es posible producir alimentos y otros productos vegetales en armonía con la preservación de los recursos naturales (Leiva, 1998b). La labranza de conservación (LC) incluye la labranza reducida y la siembra directa o labranza cero, y es una práctica que puede mejorar la sostenibilidad de la producción de cultivos. En la labranza reducida se disminuye la intensidad de la preparación mecánica del suelo con respecto a la labranza convencional; mientras que en la siembra directa (SD) se eliminan las operaciones con arados y rastrillos y se siembra la semilla directamente manteniendo la cobertura vegetal del suelo (Leiva, 1998a).

LC es una alternativa para mitigar el impacto negativo de la labranza convencional: contribuye a la conservación del suelo y conduce a un mayor contenido de humedad (CH), debido parcialmente al manejo de los residuos superficiales. La estructura del suelo tiende a ser más estable bajo LC, pero la densidad aparente, particularmente en SD, mantiene valores elevados por la menor alteración mecánica del suelo (Ortiz, 1994). Con LC comúnmente se obtienen rendimientos de cultivos (t/ha) similares a los reportados con labranza convencional. Sin embargo, se han obtenido aumentos en rendimiento en cultivos de papa bajo LC, particularmente en temporadas secas, posiblemente por la mayor humedad del suelo (Guerrero, 1990).

La conservación del suelo y su humedad, el ahorro en tiempo, los mayores rendimientos (en algunos casos) y los menores costos de mecanización son aspectos importantes a considerar para justificar la utilización de LC. La extrapolación de resultados, sin embargo, puede conducir a problemas técnicos, ambientales y financieros. Así, se requiere investigar acerca de los sistemas de labranza más recomendados a las condiciones específicas de cada región agroecológica y cultivo (Leiva y Guerrero, 2000). La difusión de resultados y la masificación del uso de LC requieren una labor coordinada de entidades públicas y privadas de investigación, de extensión y de soporte a la producción; de esta manera se contribuirá a superar los graves problemas generados por sistemas inadecuados de mecanización del suelo (Leiva, 2001).

La investigación "Mecanización para el desarrollo de agricultura sostenible" en la Facultad de Agronomía, UNC, Bogotá, tiene entre sus objetivos evaluar, adaptar y recomendar sistemas de LC. El renglón productivo papa es uno de los escogidos para la investigación, debido a su importancia socio-económica en la región y al impacto ambiental negativo de las prácticas actuales de labranza en este cultivo. El presente artículo presenta avances de esa investigación, con respecto al aporte de LC a la conservación de agua y suelo, al desarrollo y rendimiento del cultivo y al comportamiento financiero, como contribución a la producción sostenible del cultivo de papa (*Solanum tuberosum*) en la región central Andina.

MATERIALES Y METODOS

Se reportan resultados de dos experimentos adelantados en la región Central Andina, altura de 2800 a 3200 msnm, temperatura promedio de 12°C a 15°C, en suelos de origen volcánico con altos contenidos de materia orgánica (Cuadros 1 y 2).

Experimento 1

El experimento 1 se adelantó en un inceptisol de textura franca (Cuadro 2). El lote estuvo en descanso (barbecho) durante los tres años previos al experimento (González, 1994).

Considerando la topografía del lote, predominante en pendiente con valores hasta de 50%, se usó un diseño de bloques al azar, con tres repeticiones, usando parcelas experimentales de 200 m² y ubicando los bloques en distintos grados de pendiente. La siembra se realizó a 0,9 m entre hileras y 0,4 m entre plantas. Los tratamientos se seleccionaron con base en alternativas de labranza para la ladera, incluyendo tracción mecánica y animal (Cuadro 3). Para el análisis se utilizó el procedimiento GLM, ANAVA y pruebas de Tukey.

Las labores posteriores a la labranza y siembra fueron similares para todos los tratamientos. La fertilización se realizó a partir del análisis de suelos y fue equivalente a 1.500 kg/ha de 10-30-10.

Experimento 2

El experimento 2 se realizó en un suelo franco arcilloso, de un lote que se ha mantenido en rotación papa - arveja aproximadamente por 8 años, con preparación del suelo de manera convencional, usando arados de discos y rotovator. Durante el año inmediatamente anterior a la realización del estudio el lote permaneció en descanso (Bejarano, 2000).

El lote tiene una topografía relativamente plana, con pendientes inferiores a 10%. El diseño estadístico utilizado fue completamente al azar, usando parcelas experimentales de 950m² cada una. Los tratamientos se seleccionaron con base en alternativas de labranza con tracción mecánica para el altiplano (Cuadro 3). Para el análisis, se utilizó el procedimiento GLM, ANAVA y pruebas de Duncan.

Las labores posteriores a la labranza y siembra fueron similares para todos los tratamientos (Cuadro 1). La fertilización se realizó a partir del análisis de suelos (Cuadro 2) y fue equivalente a una dosis por hectárea de 750 kg de 10-30-10, 50 kg de K₂SO₄, 250 kg de MgO y 500 kg de superfosfato triple.

En el Cuadro 4 se describen los métodos utilizados para evaluar variables de suelo y de cultivo y para el análisis beneficio-costos de los sistemas de labranza en los dos experimentos.

Cuadro 1. Características principales de los experimentos de labranza en cultivos de papa.

Item	Experimento 1 (ladera)	Experimento 2 (lote plano ondulado)
Localización y clima	Centro de Investigación San Jorge (Soacha), 2.800 - 3.200 msnm, pluviosidad media 776 mm/año.	Finca de pequeño agricultor, Los Soches (Usme), 3.200 msnm, pluviosidad media 1.200 mm/año.
Material vegetal	Variedad parda pastusa.	Variedad parda pastusa.
Maquinaria e implementos	Tractor Fiat, 4WD, 60 HP; arado rotovator (1,4 m, profundidad 0,2 m); yunta de bueyes; arado de vertedera reversible ICA, tracción animal (0,25 m, profundidad 0,20 m); rastrillo de cuerpos rígidos ICA, tracción animal (1,25 m); azadón manual.	Tractor Ford 6900, 60 HP; arado rotovator (1,4 m, profundidad 0,2 m); arado de 3 discos (profundidad 0,26 m); arado de cincel vibratorio, 5 ganchos (profundidad 0,18 m); azadón manual.
Equipos de medición en campo	Penetrómetro de cono digital Bush recording; barrenos y anillos para muestreo de suelo; estacas, balanza, cinta métrica; medidor electrónico de área foliar.	Penetrómetro de cono, fabricación nacional; barrenos para muestreo de suelo; estacas, balanza, cinta métrica; medidor electrónico de área foliar.
Diseño estadístico	Bloques completos al azar.	Completamente al azar.
Manejo del cultivo	Fertilización, atierre (30 días después de siembra), aporque (70 días después de siembra) y control sanitario similar para todos los tratamientos. Surcada con azadón manual (excepto labranza cero), siembra manual. Control de "gota" (<i>Phytophthora infestans</i>) con mancozeb. Control de gusano blanco con carbofuran. Control de pulguilla (<i>Epirix</i> sp) con methamidophos.	Fertilización, atierre (35 días después de siembra), aporque (70 días después de siembra) y control sanitario similar para todos los tratamientos. Surcada con azadón manual (excepto labranza cero), siembra manual. Control de "gota" (<i>Phytophthora infestans</i>) con mancozeb y metalaxyl. Control de gusano blanco con carbofuran. Control de babosas con pellets de metaldehído.

Cuadro 2. Resultados de los análisis de suelos para los experimentos de labranza en cultivos de papa

Experimento 1 (González, 1994)

Textura: F		pH : 5,5		Materia orgánica (%): 15			
P ppm		Ca meq/100g		Mg meq/100g		K meq/100g	
35,1		3,0		0,4		0,2	

Experimento 2 (Bejarano, 2000)

Textura: F Ar			pH: 5,5			CIC meq/100g: 30,2			Materia orgánica (%): 14			
C %	N %	P ppm	Ca meq /100g	Mg meq /100g	K meq /100g	Na meq /100g	Al meq /100g	Mn ppm	Fe ppm	Zn ppm	Cu ppm	
8,1	0,7	18	4,0	0,0	0,4	0,08	0,5	7,0	242	6,3	4,8	

Cuadro 3. Tratamientos utilizados en los dos experimentos de labranza en cultivos de papa

Tratamientos	Experimento 1 (ladera)	Experimento 2 (lote plano ondulado)
1	Labranza convencional con tractor: 1 pase de rotovator.	Labranza convencional con tractor: 1 pase de arado de discos + 2 pases de rotovator.
2	Labranza convencional con tracción animal: 1 pase de arado de vertedera reversible + 1 pase de rastrillo de cuerpos rígidos	Labranza reducida con cincel: 2 pases de cincel. Este tratamiento requirió un pase extra con azadón manual previo a siembra y una aplicación de paraquat (2 l/ha) después de siembra.
3	Labranza reducida con tracción animal: 1 pase de arado de vertedera reversible	Labranza alternativa con rotovator: aplicación previa de glifosato (4 l/ha) + 1 pase de rotovator
4	Labranza cero: aplicación previa de glifosato (4 l/ha) + siembra directa en hoyos (aproximadamente 30 cm de diámetro y 20 cm de profundidad) hechos con azadón manual, colocando el fertilizante y la semilla, sin surcar.	Labranza cero: aplicación previa de glifosato (4 l/ha) + siembra directa en hoyos (aproximadamente 30 cm de diámetro y 20 cm de profundidad) hechos con azadón manual, colocando el fertilizante y la semilla, sin surcar.

Cuadro 4. Métodos de campo y de laboratorio utilizados para evaluar sistemas de labranza en cultivos de papa

Característica	Experimento 1	Experimento 2
Medición de variables del suelo		
• Contenido de humedad (CH)	• 0-20 y 20-40 cm, cada 15 días - Secado en estufa a 105°C.	• 15-20cm, antes de tratamientos, al atierre y a cosecha - Secado en estufa a 105°C.
• Densidad Aparente (d.a.)	• 0-20 y 20-40 cm, cada 15 días - Método de volumen conocido.	• 15-20cm, periodicidad mensual - Método del terrón parafinado.
• Porosidad	• -0-	• porosidad = $(1 - d.a./densidad\ real) \times 100$
• Resistencia a la penetración	• Penetrómetro de cono digital (0 a 50 cm, intervalos de 3,5 cm de profundidad), cada 15 días.	• Penetrómetro de cono (0 a 50 cm, intervalos de 10 cm de profundidad), periodicidad mensual.
• Estabilidad estructural	• -0-	• Método de Yóder, antes de tratamientos, al atierre y a cosecha.
Medición de variables del cultivo		
• Altura de plantas	• 3 plantas por parcela, muestreo al azar.	• 5 plantas por parcela, muestreo al azar.
• Área foliar	• Medidor electrónico durante la floración.	• Medidor electrónico durante la floración.
• Densidad de tallos	• Metodología CIP (Wiersema, 1981) durante floración.	• Metodología CIP (Wiersema, 1981) durante floración.
• Producción de tubérculos (t/ha)	• Recolección de tubérculos en los surcos centrales de cada parcela.	• Recolección de tubérculos en los surcos centrales de cada parcela, y de la parcela total.
• Calidad de tubérculo	• Evaluación de daño por gusano blanco en 10% de cosecha, muestreo al azar.	• Calidades según peso (escala comercial).
Análisis financiero (ambos experimentos)		
• Análisis de Costos totales, Ingresos Netos, Rentabilidad.	• Costo Total: Incluye Mano de obra + insumos + transporte.	• Ingreso Total: Rendimiento x Precio de venta de cosecha (\$340.000 por tonelada).
	• Ingreso Neto: Ingreso total - Costo Total.	• Rentabilidad: $\frac{\text{Ingreso neto} \times 100}{\text{Ingreso Total}}$
Nota: Los costos fueron actualizados a valor presente usando una tasa del 12% anual.		

RESULTADOS Y DISCUSION

Efectos de la labranza sobre el suelo

Estabilidad estructural del suelo

La estructura afecta directamente la capacidad de almacenamiento de fluidos y su movimiento dentro del suelo. Por su parte, la estabilidad estructural del suelo indica la capacidad de los agregados para mantener su forma cuando son sometidos a esfuerzos. El tránsito de maquinaria y la labranza están íntimamente relacionados, y pueden modificar el tamaño de los agregados, compactando el suelo y reduciendo su estabilidad estructural (Watts *et al.*, 1996).

En el experimento 2, el suelo con una estructura ligeramente estable (índice de estabilidad estructural entre 0,7 y 0,9) sufrió un descenso importante en la estabilidad estructural después de aplicar los tratamientos de labranza (Figura 1). En particular, en labranza convencional (LConv-meca) y en labranza alternativa con rotovator (LA-rot) se observó un posible efecto de este último implemento, el cual cuando es usado intensiva-

mente tiende a desagregar la estructura del suelo (Leiva, 1998a). Incluso en LConv-meca este índice continuó descendiendo hasta el momento de la cosecha, confirmado la agresividad del tratamiento. El índice de estabilidad permaneció constante en siembra directa (SD), mostrando que la baja alteración mecánica tiende a preservar este parámetro básico en la conservación de suelos.

Contenido de humedad del suelo (CH)

La humedad afecta el contenido y el movimiento de gases en el suelo y el propio desarrollo de los cultivos. Es necesario tener presente que la labranza altera las condiciones para la escorrentía, la infiltración, la evaporación, el drenaje y la percolación (Lal, 1994). Así, se requiere utilizar sistemas de labranza que favorezcan el manejo eficiente y la conservación del agua del suelo.

En ambos experimentos se evidenció una alta correlación entre los contenidos de humedad del suelo (CH) y el régimen de lluvias. Sin embargo, se presentaron diferencias significativas entre tratamientos en favor de SD, con ganancias en CH entre 2% y 5% frente a los demás sistemas (Cuadro 5). Este comportamiento puede estar asociado con disminución en evaporación debido al manejo de la cobertura vege-

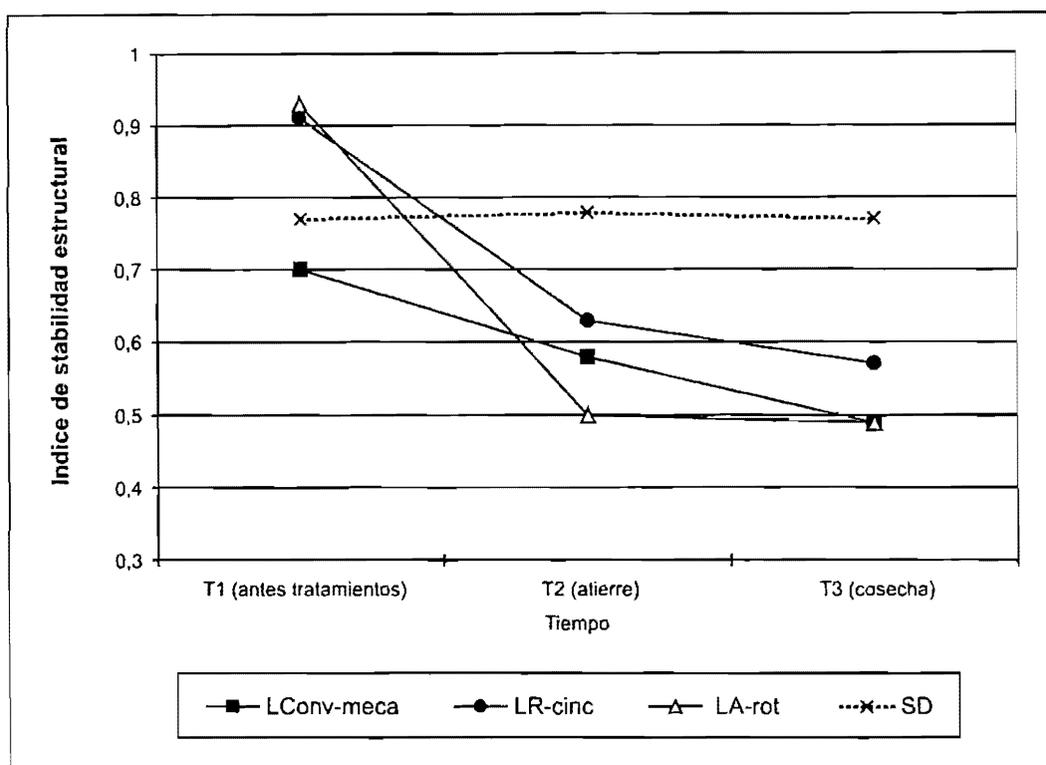


Figura 1. Variación de la estabilidad estructural en el tiempo para el experimento 2

tal y a la mayor estabilidad estructural del suelo. En los dos experimentos, los valores promedio de CH fueron similares entre sí para los demás tratamientos.

En el Experimento 1, se evaluaron humedades a dos profundidades (0 a 20 cm y 20 a 40 cm), pero no se

encontraron diferencias estadísticas significativas entre las dos profundidades. En cambio se encontraron diferencias altamente significativas entre tiempos (Figura 2). Los tratamientos en los cuales se usó el arado de vertedera de tracción animal (LConv-anim y LR-anim) y el rotovator (LA-rot) mostraron bajos CH en periodo seco

Cuadro 5. Valores promedio de humedad (%) para diferentes sistemas de labranza en cultivos de papa.

Experimento 1 *		Experimento 2 **	
Tratamiento	Promedios*	Tratamiento	Promedios**
SD	34,13 a	SD	54,32 a
Lconv-meca	32,18 b	Lconv-meca	49,59 ab
Lconv-anim	31,47 b	LR-cinc	45,69 b
LR-anim	31,23 b	LA-rot	45,41 b

* Profundidad de 0 a 40 cm. Prueba de significancia de Tukey

** Profundidad de 15 a 20 cm. Prueba de significancia de Duncan

(tiempo 7, 4º mes del cultivo). En general, los mayores CH, aún en periodo seco, se presentaron en SD.

En el experimento 2, se hallaron diferencias altamente significativas entre tiempos. A pesar de la alta pluviosidad durante el desarrollo del cultivo, se presentaron diferencias en CH entre tratamientos, a favor de SD durante todo el experimento (Figura 2). LConv-meca reportó un CH inferior a SD, pero superior al de los tratamientos de labranza reducida.

Resulta ventajoso el comportamiento de SD al mantener mayores promedios de CH en los dos experimentos, incluso en periodos secos, dado que la humedad del suelo favorece el crecimiento y desarrollo de la planta y la producción y calidad de tubérculos, particularmente en las etapas de formación y engrosamiento de éstos (Valbuena, 2000).

Densidad aparente (d.a.) y porosidad total

La densidad aparente (d.a.) es un indicador de la porosidad, del estado de compactación del suelo y de la

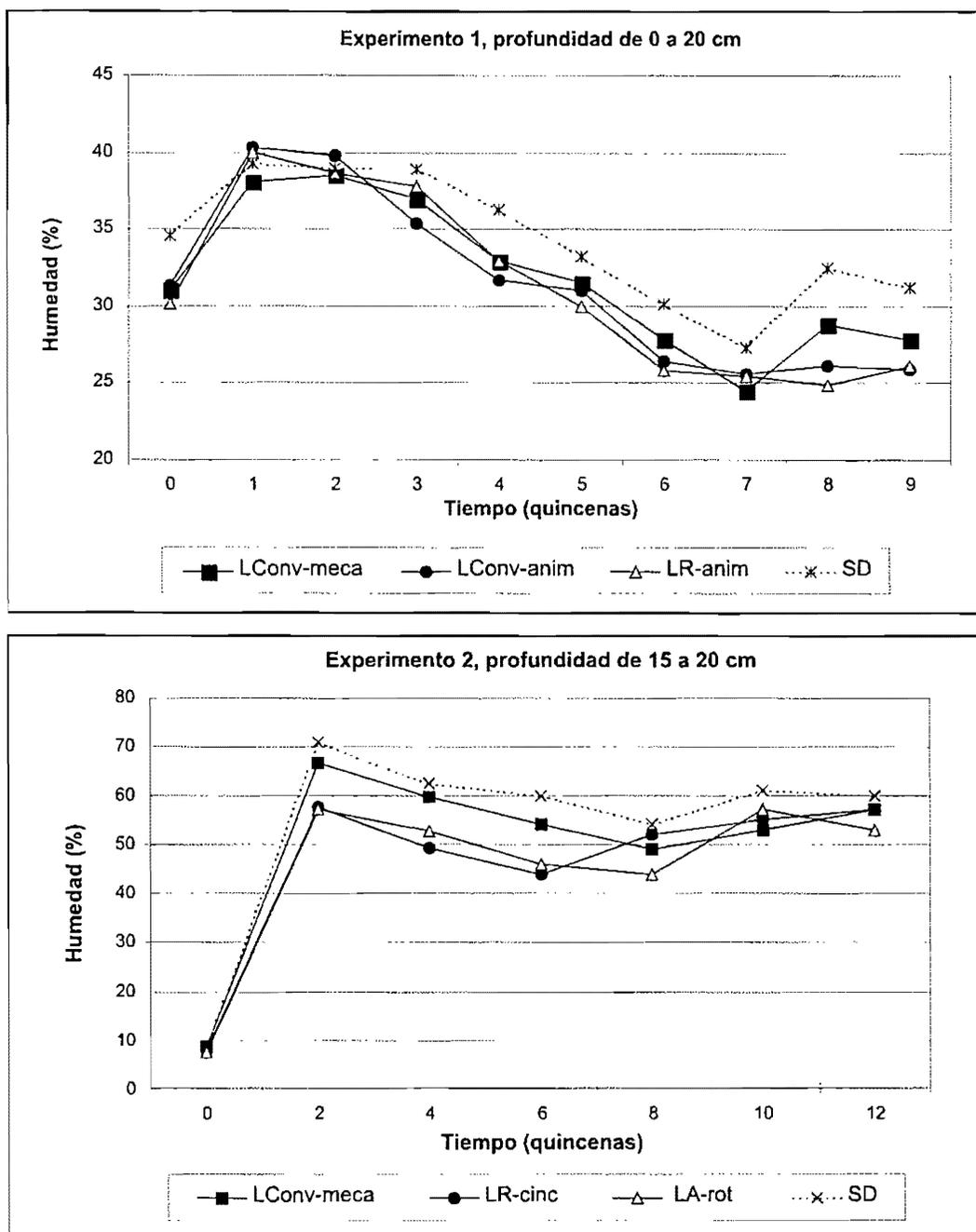


Figura 2. Variación del contenido de humedad gravimétrico para experimentos de labranza en cultivos de papa.

resistencia a la penetración radical (Soane, 1983). Con la labranza se pretende incrementar la porosidad. Sin embargo, ese efecto es efímero: después del aumento inicial en porosidad, en la época de cosecha, el suelo puede alcanzar estados de compactación similares, e incluso superiores, a los existentes antes de la labranza (Ortiz, 1994). La medición de d.a. durante el desarrollo del cultivo permite determinar la “residualidad” de la labranza.

A pesar de que SD presentó los mayores promedios de d.a. en ninguno de los experimentos se encontraron diferencias estadísticas entre tratamientos (Cuadro 6). Frente a las diferencias entre los valores del experimento 1 y los

del Experimento 2, es importante tener presente que en el primero la d.a. se determinó por el método de volumen conocido, mientras que en el segundo se usó el método del terrón parafinado (no incluye porosidad entre terrones).

En el experimento 1 se evaluó d.a. a dos profundidades (0 a 20 cm y de 20 a 40 cm), pero no se encontraron diferencias estadísticas significativas entre las dos profundidades. En los dos experimentos, para todos los tratamientos, fue evidente el efecto descompactador de la labranza, el atierre y el aporque (1° y 2° mes del cultivo). Sin embargo, el suelo sufrió asentamiento en un lapso de 15 a 30 días después de estas labores (Figura 3).

Cuadro 6. Valores promedio de densidad aparente y de porosidad total para diferentes sistemas de labranza en cultivos de papa

Experimento 1 *		Experimento 2 **		
Tratamientos	Densidad aparente(t/m3)	Tratamientos	Densidad aparente (t/m3)	Porosidad total (%)
Lconv-meca	0,91 a	SD	1,16 a	43 a
Lconv-anim	0,93 a	LA-rot	1,15 a	43 a
LR-anim	0,93 a	LR-cin	1,13 a	44 a
SD	0,95 a	Lconv-meca	1,13 a	45 a

* Profundidad de 0 a 40 cm. Prueba de significancia de Tukey

** Profundidad de 15 a 20 cm. Prueba de significancia de Duncan

Después de aplicados los tratamientos de labranza convencional (LConv-meca), en los dos experimentos, se encontró una reducción importante en d.a. Sin embargo, estos tratamientos exhibieron la mayor recompactación durante el

desarrollo del cultivo, alcanzando al momento de la cosecha valores de d.a. considerablemente superiores a los obtenidos antes de aplicar los tratamientos: Esto indica baja "residualidad" del efecto positivo de la labranza.

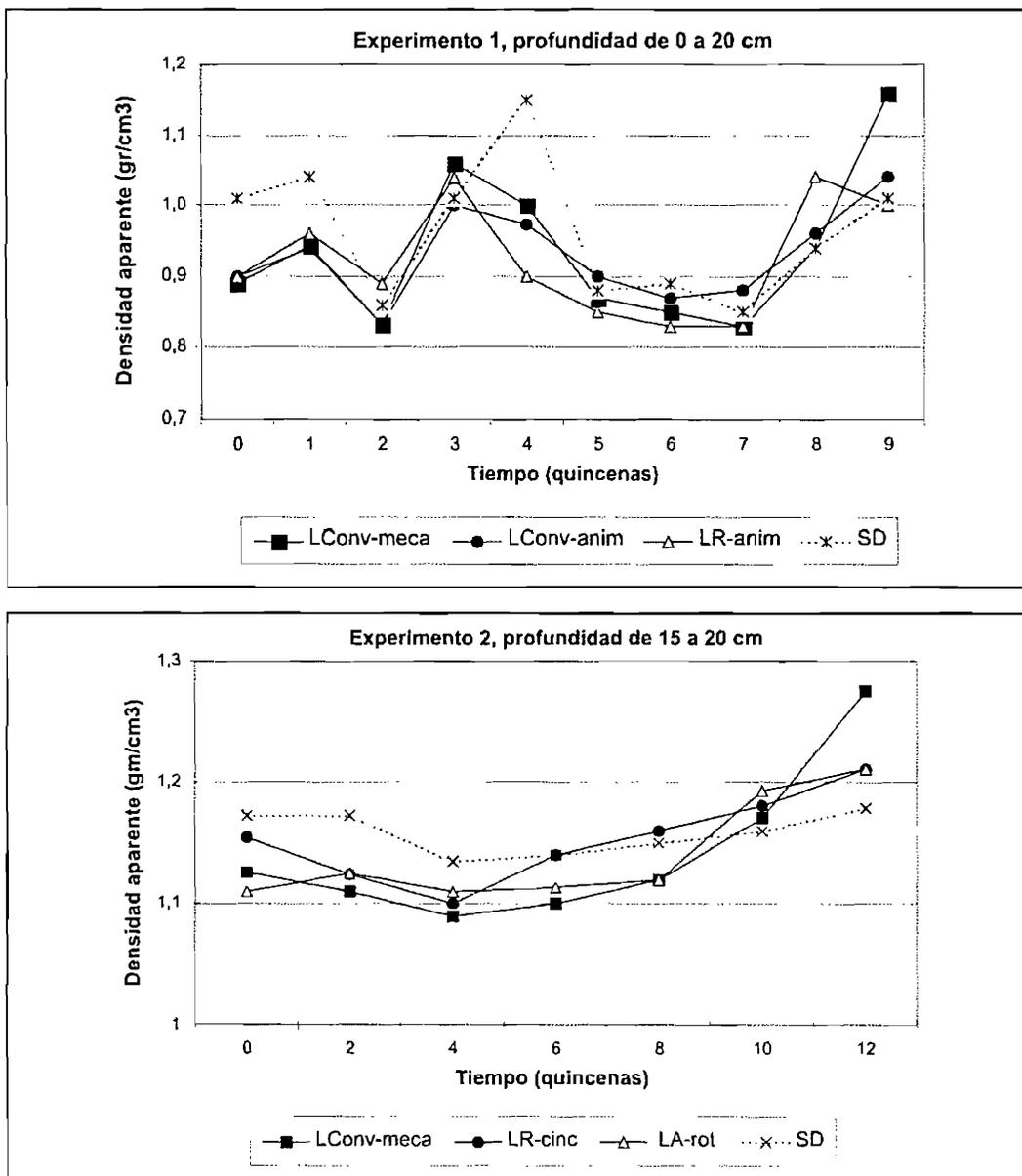


Figura 3. Variación de la densidad aparente en el tiempo para experimentos de labranza en cultivos de papa.

El tratamiento convencional con tracción animal (Lconv-anim) y los tratamientos de labranza reducida o alternativa (LR-anim del Experimento 1, y LR-cinc y LA-rot del Experimento 2) presentaron al final del cultivo valores de d.a. ligeramente superiores a los encontrados antes de aplicar los tratamientos. Es importante destacar que SD, a pesar de presentar valores promedios ligeramente superiores, mantuvo un comportamiento uniforme durante los experimentos, mostrando claras ventajas de la baja alteración mecánica del suelo.

Resistencia a la penetración (r.p.)

La resistencia a la penetración (r.p.), medida con un penetrómetro de cono, es un indicador del grado de compactación y de la resistencia del suelo al desarrollo de raíces. Valores elevados de r.p. conducen a efectos negativos sobre el desarrollo y rendimiento del cultivo (Soane, 1983).

La labranza, el atierre y el aporque inicialmente causaron un importante descenso en r.p. (Figuras 4 y 5). Sin embargo, 15 a 30 días después de estas labores se comprobó considerable compactación en los primeros 30 cm, particularmente en los tratamientos más agresivos con el suelo, como fueron los que usaron rotovator (LConv-meca y LA-rot) y arado de vertedera (LConv-anim y LR-anim). En general, los valores reportados de r.p. en SD tuvieron una menor variabilidad en el tiempo durante todo el desarrollo del cultivo en los dos experimentos.

Experimento 1: el análisis estadístico mostró diferencias significativas en el tiempo para la variable r.p. y en la interacción tratamiento por tiempo. Inmediatamente después de aplicados los tratamientos (tiempo 1, Figura 4), fue evidente el efecto descompactador con LConv-anim hasta una profundidad de 20 cm. y con LConv-meca y LR-anim hasta aproximadamente 30 cm. El ahoyado que se realizó en SD igualmente mostró un cierto efecto descompactador en el suelo.

En el tiempo 2 (15 días después de aplicados los tratamientos de labranza) se presentó un aumento notorio en la compactación de los primeros 30 cm. en los tratamientos que utilizaron arado de vertedera (LConv-anim y LR-anim). Por su parte, LConv-meca mostró una mayor residualidad, manteniendo para ese tiempo valores bajos de r.p. y similares a los reportados por SD.

Los tiempos 3 (después de atierre) y 6 (después de aporque) muestran el efecto descompactador del atierre y del aporque en los primeros 7 cm. (Figura 4). Sin embargo, de 15 a 20 días después de cada una de estas labores, el suelo presentó evidencias de recompactación (tiempos 4 y 7). A partir del tiempo 8 y hasta el final del experimento LConv-anim mostró la mayor compactación entre todos los tratamientos.

De acuerdo con la fisiología del cultivo, el desarrollo de raíces se prolongó hasta el tiempo 8; mientras que la formación de tubérculos ocurrió entre los tiempos 5 y 7. Un

efecto negativo previsible, se relaciona con la alta variabilidad del estado de compactación que ocurrió con los tratamientos que causaron notoria alteración mecánica el suelo. Por el contrario, se pudiera pensar que el cultivo se benefició de una menor variación en r.p. en el sistema de SD.

Experimento 2: en el experimento 2, un mes después de aplicados los tratamientos (tiempo 1), se observaron valores de r.p. inferiores a los presentados antes de aplicar los tratamientos con LA-rot en los primeros 30 cm. de profundidad y con LConv-meca en los primeros 20 cm., indicando cierta residualidad del efecto de la labranza. LR-cinc y SD reportaron valores de r.p. similares entre sí y superiores a los presentados por los otros dos tratamientos (Figura 5).

Para el tiempo 2 (segundo mes de cultivo), únicamente en LR-cinc se halló descompactación en los primeros 10 cm por efecto residual del "atierre". Desde esa profundidad y hasta los 30 cm se registró un alto grado de compactación para los tratamientos que usaron rotovator (LConv-meca y LA-rot) SD mantuvo valores similares a los del tiempo 1.

Para el tercer mes de cultivo (tiempo 3), r.p. mostró valores bajos en los primeros 20 cm para todos los tratamientos, indicando efecto residual del aporque. Sin embargo, se evidenció compactación del suelo a 30 cm. de profundidad, particularmente en LConv-meca, LR-cinc y LA-rot.

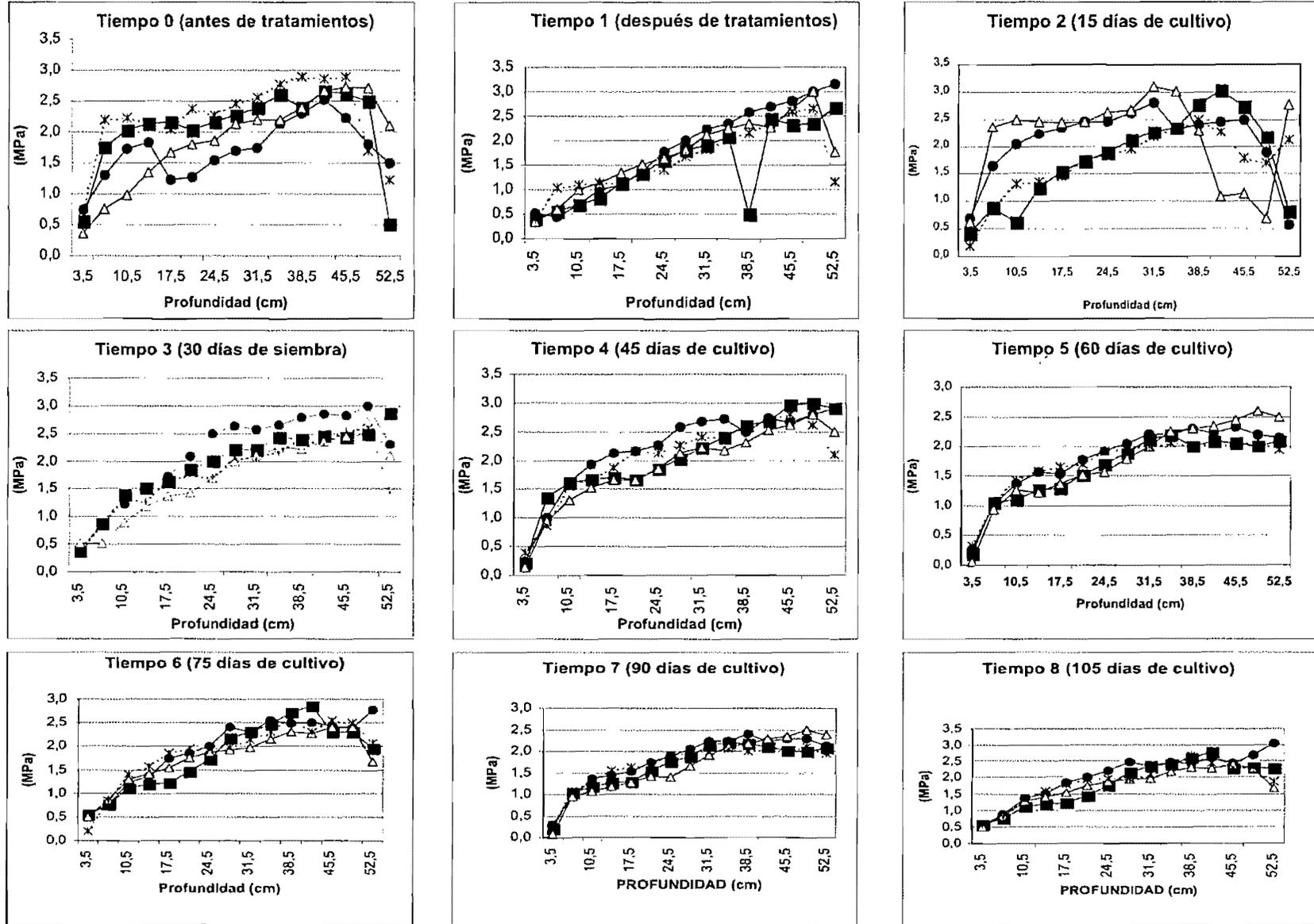
A partir del cuarto mes del cultivo (tiempo 4) y hasta la cosecha (tiempo 6), LConv-meca y LA-rot mostraron los mayores valores de r.p., mientras que SD conservó los menores valores y relativamente baja variabilidad en profundidad.

Estos resultados coinciden con el comportamiento de la d.a. reportada anteriormente.

Para los tiempos 2, 3, y 4, periodo en que se presenta activo crecimiento radical, engrosamiento y diferenciación del tubérculo, LConv-meca registró valores altos de compactación. Esta situación pudo incidir negativamente en el rendimiento del cultivo. Por su parte, los resultados sugieren que SD pudo favorecer el crecimiento radical y el desarrollo de tubérculos, en comparación con los otros tratamientos, debido a las menores variaciones en el estado de compactación del suelo.

Variables de crecimiento y desarrollo

El crecimiento vegetal conlleva un aumento de tamaño y peso seco de la planta, y ocurre por la combinación de factores genéticos y ambientales. Las variables altura de planta, área foliar y densidad de tallos posibilitan cuantificar el crecimiento y desarrollo del cultivo de papa, y son indicadores del rendimiento comercial. Por su parte, la producción de materia seca se relaciona estrechamente con la eficiencia fotosintética y ésta a su vez depende del área foliar. La densidad de tallos afecta la producción, el tamaño del tubérculo y la tasa de multiplicación (número



LConv-meca —■— LConv-anim —●— LR-anim —△— SD —*—

Figura 4. Variación de la resistencia a la penetración (MPa) en el tiempo en el Experimento 1

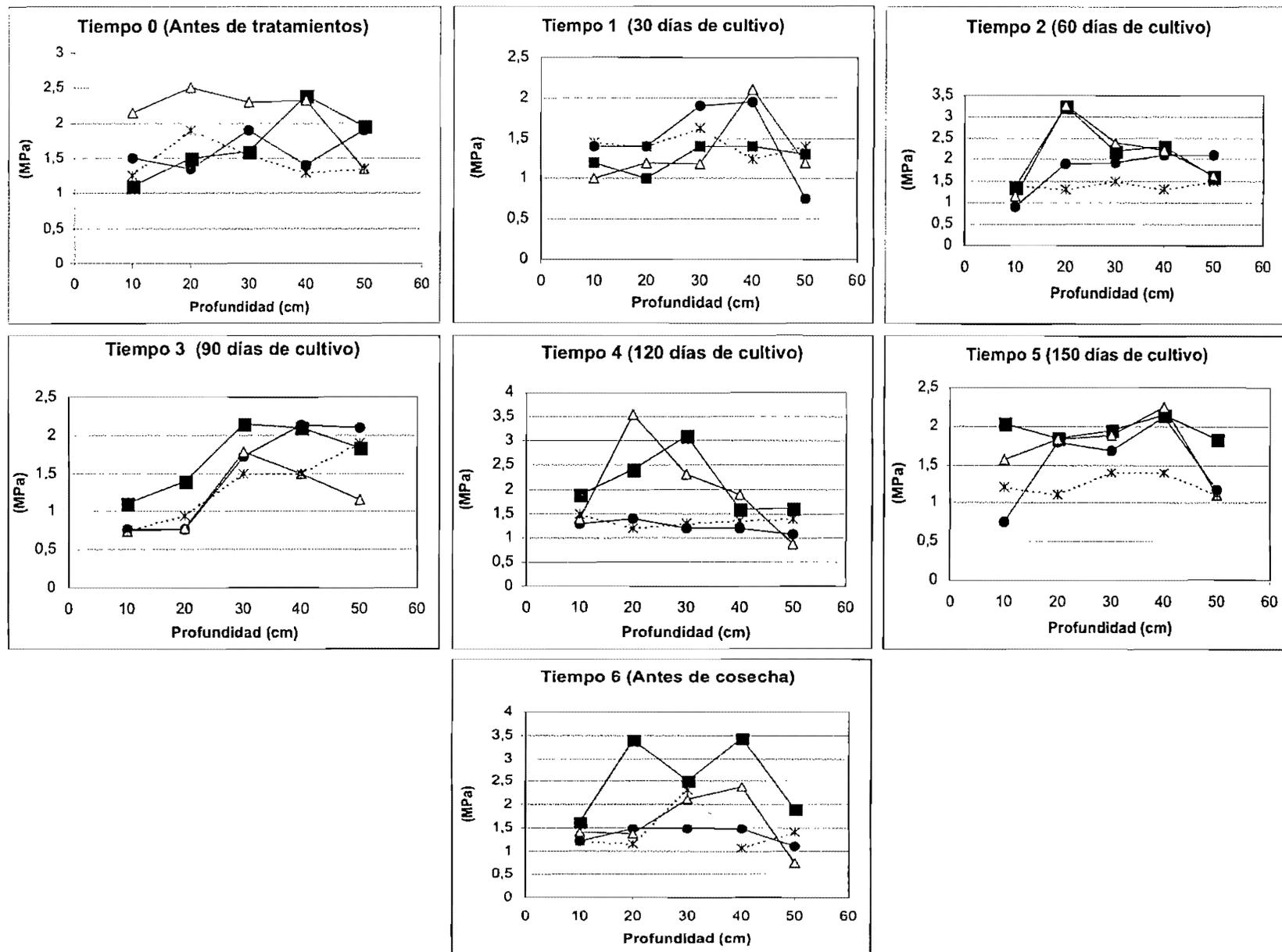


Figura 5. Variación de la resistencia a la penetración (MPa) en el tiempo en el Experimento 2.

de tubérculos por planta), lo que definirá el rendimiento del cultivo (Valbuena, 2000).

En los dos primeros meses se presentó una tasa de crecimiento similar para todos los tratamientos en los dos experimentos (Figura 6).

Posteriormente y hasta el cuarto mes (floración), el crecimiento se incrementó considerablemente en SD, alcanzando la mayor altura al final del experimento. Este resultado está acorde con el comportamiento satisfactorio

obtenido en las variables de suelo con este tratamiento. En el experimento 2, LA-rot alcanzó una altura de planta inferior a la alcanzada por SD, pero superior a la de los demás tratamientos.

Experimento 1

En este experimento, el mayor valor de área foliar se presentó en LConv-anim, mientras que LConv-meca reportó los más bajos valores (Cuadro 7). Con respecto a densidad de tallos, SD mostró el valor más alto, signifi-

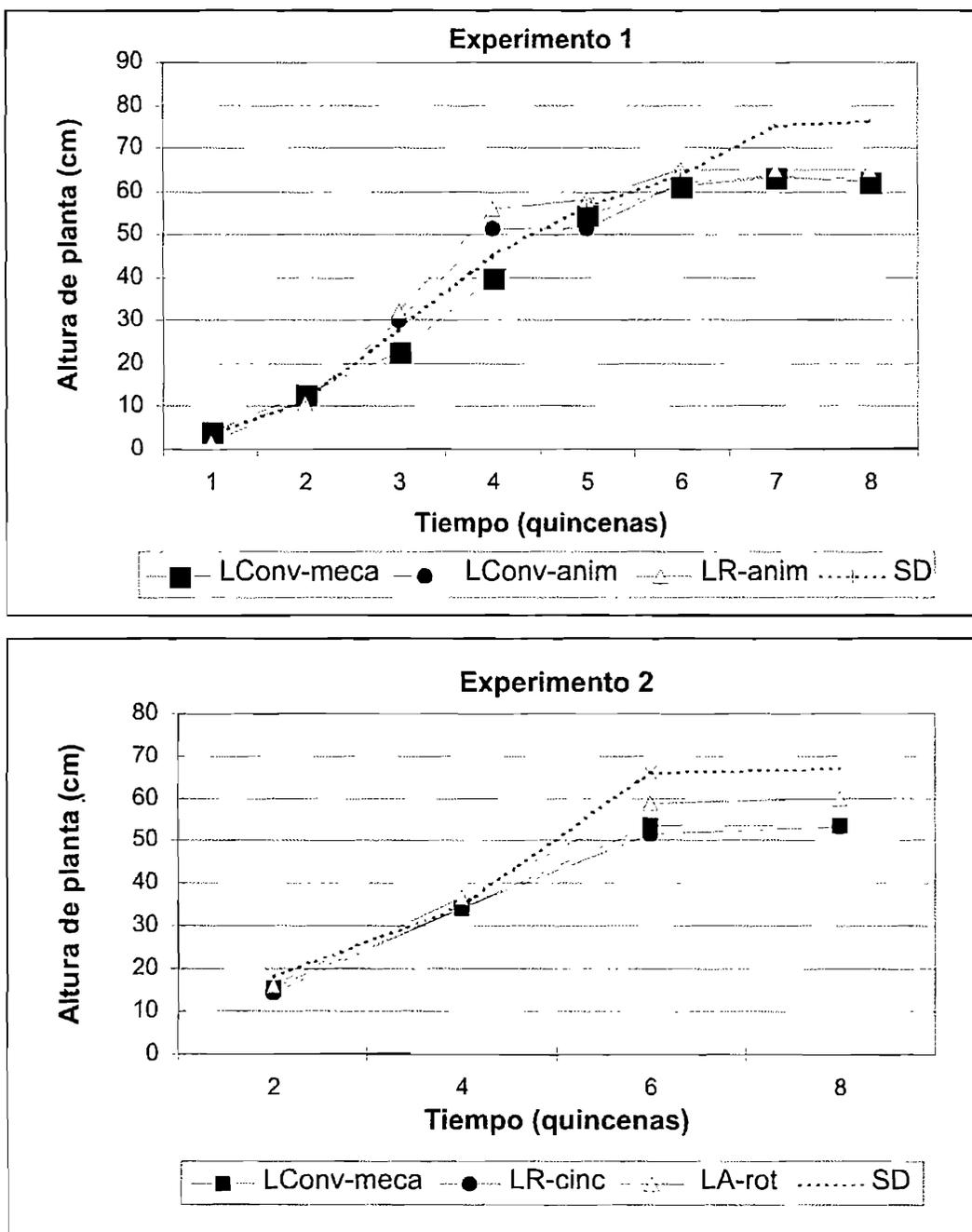


Figura 6. Variación de la altura de planta en el tiempo para experimentos de labranza en cultivos de papa

Cuadro 7. Valores de área foliar, densidad de tallos y rendimiento para diferentes tratamientos de labranza en cultivos de papa

Variable	Área foliar (a floración, dm ²)		Densidad de tallos (a floración, (tallos/m ²))		Rendimiento (t/ha)	
	Experimento 1*	Experimento 2	Experimento 1*	Experimento 2	Experimento 1*	Experimento 2
LConv-meca	254,5 b		13,5 b		20,4 ab	
LConv-anim	299,0 a		14,3 ab		22,8 ab	
LR-anim	284,3 ab		12,2 b		13,3 b	
SD	286,0 ab		17,7 a		27,3 a	
LConv-meca		363,9		17,1		30,1
LR-cinc		345,3		16,5		26,0
LA-rot		377,0		17,3		32,0
SD		372,3		17,1		30,9

*Prueba de significancia de Tukey

cativamente superior a los reportados por LConv-meca y LR-anim., presentando correspondencia con el comportamiento de altura de planta. Los rendimientos del cultivo correlacionaron particularmente con altura de planta y con densidad de tallos. Así, SD reportó los mayores rendimientos, mientras que LR-anim los más bajos, produciendo apenas un 50% del rendimiento obtenido con SD. Los dos sistemas de labranza convencional presentaron rendimientos considerablemente inferiores a los encontrados en SD. Estos resultados guardan correlación con los resultados de las variables de suelo.

Con respecto a daños causados a tubérculo por gusano blanco (*Premnotripex vorax*), el mayor porcentaje de daño se encontró en LConv-meca y el menor en SD (Cuadro 8). Sin embargo, no se reportaron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos. Este resultado llama la atención sobre la importancia de investigar los efectos de la labranza sobre las plagas del suelo.

Cuadro 8. Valores promedios de daño a tubérculos causado por gusano blanco (*Premnotripex vorax*) para diferentes sistemas de labranza en el Experimento 1

Tratamiento	Daño en producción (%)
LConv-meca	30,2 a
LConv-anim	28,8 a
LR-anim	26,6 a
SD	17,7 a

Experimento 2

En este experimento se encontró una alta correlación positiva entre las variables de crecimiento y el rendimiento cultivo. Así, los mayores valores de altura de planta, área foliar, densidad de tallos y rendimientos se

reportaron en los tratamientos LA-rot y SD (Cuadro 7). El comportamiento más pobre se presentó en LR-cinc.

La variedad parda pastusa está destinada al consumo en fresco y se prefieren las calidades (por tamaño) primera y segunda. LA-rot y SD presentaron altos porcentajes de calidad primera y segunda (83 y 90% respectivamente), lo cual favorece los ingresos del productor (Cuadro 9).

Contrariamente, LR-cinc y LConv-meca mostraron porcentajes considerables de calidad cero (no deseable para esta variedad) y papa de tercera, sin valor comercial.

En general, para los dos experimentos los resultados con las variables de desarrollo y rendimiento del cultivo coincidieron con los resultados de los parámetros de suelo evaluados.

Esto confirma que la evaluación de las variables físicas de suelo, de desarrollo del cultivo y sus interacciones, es apropiada para entender los efectos de la labranza en la producción agrícola sostenible.

Análisis beneficio-costo

En los dos experimentos, se presentaron diferencias importantes entre tratamientos en el comportamiento financiero según con los índices evaluados (Cuadro 10).

Experimento 1

A pesar de presentar unos costos de producción relativamente elevados, debido principalmente al incremento en el rubro de empaques y transporte de cosecha, SD reportó la mayor rentabilidad (superior al 50%), coin-

Cuadro 9. Distribución porcentual de la producción de calidades de papa para diferentes sistemas de labranza en el Experimento 2.

Tamaño	LConv-meca	LR-cinc	LA-rot	SD
Cero > 80 gr.	12 %	18 %	10 %	6 %
Primera 60 - 80 gr.	45 %	43 %	48 %	52 %
Segunda 30 - 60 gr.	33 %	26 %	35 %	38 %
Tercera (riche) < 30 gr.	10 %	13 %	7 %	4 %

ciendo con el buen comportamiento de las variables físicas del suelo y de componentes de crecimiento y desarrollo del cultivo. De esta manera, SD se destaca como una opción viable para el manejo mecanizado de la ladera en la Región Central Andina. El comportamiento más pobre se presentó en labranza reducida con tracción animal (LR-anim), con una rentabilidad del 10%. Los sistemas convencionales con tracción animal (LConv-anim) y con tracción mecánica (LConv-meca) presentaron comportamientos intermedios entre SD y LR-anim.

Experimento 2

La labranza alternativa con rotovator (LA-rot) a pesar de presentar los mayores costos de producción, mostró el mayor beneficio económico, con una rentabilidad del 52,3%. En los costos de este tratamiento se destacó el rubro de empaques y transporte por el mayor rendimiento obtenido (Cuadro 10). LA-rot mostró resultados satisfactorios en aspectos financieros y del cultivo, pero

desfavorables en términos de conservación del suelo, confirmando que el rotovator es un equipo que se debe utilizar con precaución.

El menor beneficio financiero se presentó con labranza reducida con cincel (LR-cinc) correspondiendo con el pobre comportamiento de las variables de suelo y del cultivo. Estos resultados sugieren que la falta de capacitación del tractorista en el uso del cincel impidió aprovechar su potencial para labranza de conservación.

LConv-meca mostró un comportamiento inferior al presentado con LA-rot y SD, tanto en aspectos de conservación de suelos, como de índices financieros. Así, se concluye que la labranza convencional (sistema comúnmente usado por el agricultor), basada en el uso intensivo de arado de discos y rotovator, dista de ser el sistema de manejo de suelos más adecuado para garantizar la sostenibilidad de la producción de papa en la región.

La siembra directa (SD) presentó alta rentabilidad y los menores costos de producción, debido principal-

Cuadro 10. Costos, ingresos y rentabilidad por tratamiento para diferentes tratamientos de labranza en cultivos de papa

Experimento 1

Tratamiento	Costos totales (\$/ha)	Ingresos totales (\$/ha)	Ingreso neto (\$/ha)	Rentabilidad (%)
LConv-meca	4.295.816	6.936.000	2.640.184	38,1
LConv-anim	4.328.102	7.752.000	3.423.898	44,2
LR-anim	4.067.631	4.522.000	454.369	10,0
SD	4.425.685	9.282.000	4.856.315	52,3

Experimento 2

Tratamiento	Costos totales (\$/ha)	Ingresos totales (\$/ha)	Ingreso neto (\$/ha)	Rentabilidad (%)
LConv-meca	5.156.720	10.234.000	5.077.280	49,6
LR-cinc	5.119.284	8.840.000	3.720.716	42,1
LA-rot	5.184.480	10.880.000	5.695.520	52,3
SD	5.060.736	10.506.000	5.445.264	51,8

mente a la considerable disminución en costos (cercano a \$100.000 por hectárea frente al sistema convencional).

Igualmente, mostró ventajas frente a los demás tratamientos en aspectos técnicos y en la conservación y mejora de los recursos suelo y agua. Esto indica que este sistema, con un plan adecuado de transferencia de tecnología, puede ser incluido dentro de un programa de producción sostenible del cultivo de papa en la región bajo estudio.

Los resultados del presente estudio destacan la necesidad de una labranza adecuada para poder desarrollar una producción sostenible de cultivos transitorios en la Región Central Andina. La evaluación integral de las variables físicas de suelo, de los componentes de rendimiento del cultivo y el análisis beneficio-coste demostró ser una metodología apropiada para estos estudios.

Se recomienda continuar estas investigaciones en fincas de agricultores con el fin de adaptar sistemas de labranza de conservación a las condiciones particulares de las diferentes regiones agroecológicas y promover procesos de transición hacia sistemas productivos sostenibles.

LITERATURA CITADA

BEJARANO, A. D. 2000. Evaluación de diferentes sistemas de labranza como contribución al desarrollo de la producción sostenible de papa (*Solanum tuberosum*) en la localidad de Usme. Trabajo de grado Ingeniero Agrónomo. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional, Bogotá.

- GONZALEZ, W. 1994. Influencia de cuatro sistemas de labranza sobre algunas propiedades físicas del suelo y la producción del cultivo de la papa (*Solanum tuberosum*) Trabajo de grado Ingeniero Agrónomo. Facultad Agronomía. Universidad Nacional, Bogotá.
- GUERRERO, L. 1990. Las propiedades físicas de los suelos colombianos y su relación con labores de labranza. En: Montenegro, H. & Malagón, D. Propiedades físicas de los suelos. IGAC. Bogotá: 698-728.
- LAL, R. 1994. Water management in various crop production systems related to soil tillage. *Soil and Tillage Res.* 30: 169-185.
- LEIVA, F. R. 1998. Manejo sostenible de suelos agrícolas. Convenio SENA - SAC- FENALCE. Producciones. Bogotá.
- LEIVA, F. R. 1998. Sostenibilidad de sistemas agrícolas. *Agronomía Colombiana* 15 (2-3): 181-193.
- LEIVA, F. R. 2001. Adoption of practices to foster sustainable arable production in Colombia. In: Proceedings of the course Sustainable agriculture in an environmental perspective. Svalov, Suecia.
- LEIVA, F. R., GUERRERO, L. 2000. Achievements and drawbacks of soil tillage research for agricultural sustainability in Colombia. Proceedings ISTRO Conference. Texas, USA.
- ORTIZ, C. 1994. Comparación de cinco sistemas de labranza en relación con algunas características del suelo y la producción de arveja (*Pisum sativum*) Trabajo de grado Ingeniero Agrónomo. Facultad Agronomía. Universidad Nacional, Bogotá.
- SOANE, B D. 1983. Compaction by agricultural vehicles: a review. SIAE technical Report. Scotland.
- VALBUENA, I. 2000. Aspectos ecofisiológicos básicos sobre el crecimiento y desarrollo del cultivo de papa. En: Manejo integrado del cultivo de papa. Manual Técnico. Corpoica. 39-50.
- WATTS, C W, DEXTER, A R, DUMITRU, E, ARVIDSON, J. 1996. An assessment of the vulnerability of soil structure to destabilisation during tillage. Part 1. A laboratory test. In: *Soil and Tillage Res.* 37 (2-3): 161-174.
- WIERSEMA, S. 1981. Efecto de la densidad de tallos en la producción de papa. CIP. Boletín de información técnica 1. Lima, Perú.