

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA  
VICERRECTORÍA DE DOCENCIA  
ESCUELA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



Informe de Trabajo Final de Graduación presentado a la  
Escuela de Ingeniería Agrícola como requisito parcial para  
optar al grado de Licenciado en Ingeniería Agrícola

Evaluación de tres implementos agrícolas a dos velocidades de avance y su impacto en la  
calidad de labranza

Susana Miranda Jiménez

CARTAGO, 2022

Evaluación de tres implementos agrícolas a dos velocidades de avance y su impacto en la calidad de labranza

Susana Miranda Jiménez

Informe de Trabajo Final de Graduación presentado a la  
Escuela de Ingeniería Agrícola como requisito parcial para  
optar al grado de Licenciado en Ingeniería Agrícola

---

Nombre  
Natalia Gómez Calderón  
Asesor - Lector

---

Nombre  
Isabel Guzmán Arias  
Director Escuela  
Ingeniería Agrícola

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

CARTAGO, COSTA RICA

2022



Este obra está bajo una [licencia de  
Creative Commons Reconocimiento-  
NoComercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

## **CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DE TRABAJO DE GRADUACIÓN**

A las 8:00 horas del día 03 del mes de mayo del año 2022 la estudiante:

**Susana Miranda Jiménez**

presenta y defiende su ,presenta y defiende su trabajo de graduación titulado:

Evaluación de tres implementos agrícolas a dos velocidades de avance y su impacto en la calidad de labranza

ante el Tribunal de Evaluación compuesto por los siguientes miembros:

Presidente (a): Laura Segura Serrano

Asesor (a) de la Escuela: Natalia Gómez Calderón

Asesor (a) Externo (a): Yendry Fallas Ruíz

Firman conforme lo dispone el Reglamento de Trabajos Finales de Graduación:

LAURA PATRICIA  
SEGURA SERRANO  
(FIRMA)

Firmado digitalmente por  
LAURA PATRICIA SEGURA  
SERRANO (FIRMA)  
Fecha: 2022.05.06 10:43:17  
-06'00'

NATALIA GOMEZ  
CALDERON (FIRMA)

Firmado digitalmente  
por NATALIA GOMEZ  
CALDERON (FIRMA)  
Fecha: 2022.05.06  
10:42:30 -06'00'

PRESIDENTE (A)

ASESOR (A) DE LA ESCUELA

YENDRI JOHANNA  
FALLAS RUIZ  
(FIRMA)

Firmado digitalmente por  
YENDRI JOHANNA FALLAS  
RUIZ (FIRMA)  
Fecha: 2022.05.06 10:39:30  
-06'00'

Susana Miranda J

ASESOR (A) EXTERNA(A)

ESTUDIANTE

## **DEDICATORIA**

En primer lugar a Dios,  
quien siempre me brindó seguridad y fortaleza para seguir adelante.

A mis padres, Grettel y Deivie,  
por darme la oportunidad de estudiar y ser mi soporte estos años.

A Jose Daniel Mora,  
por el apoyo incondicional y cariño en todos estos años.

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis papás,  
les agradeceré siempre,  
por brindarme todo lo que estuvo al alcance de ellos  
para culminar mis estudios con éxito.

A Jose Daniel Mora,  
quién ha sido mi apoyo incondicional,  
agradezco sus palabras de motivación  
las cuales me permitieron soñar en alcanzar mis metas todos los días.

A mi hermana Stephanie,  
por su gran voluntad de facilitar mis días más cansados.

Agradezco a la Escuela de Ingeniería Agrícola,  
quienes me dieron la oportunidad desde que ingresé,  
a superarme como estudiante y vivir experiencias  
dentro y fuera del país que siempre tendré en mi corazón.

En especial a la profesora Natalia Gómez,  
cuyos consejos me hicieron crecer como estudiante y persona,  
le agradezco enormemente las oportunidades que me brindó durante mi etapa universitaria.

A Guillermo de la Escuela de Ingeniería Agrícola,  
agradezco su disposición para efectuar las tareas en el campo de prácticas  
durante la realización de mi trabajo final.

A mis compañera Valeria Serrano,  
por ser una gran amiga en estos años de estudio.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN .....	vi
ABSTRACT.....	viii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1. OBJETIVOS.....	3
1.1. Objetivo General.....	4
1.2. Objetivos Específicos .....	4
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	5
2.1. Recurso del suelo .....	6
2.2. Siembra directa .....	7
2.3. Elementos operativos.....	8
2.3.1. Velocidad de avance .....	8
2.3.2. Patinaje.....	8
2.3.3. Potencia.....	9
2.4. Características mecánicas del suelo.....	9
2.4.1. Textura .....	9
2.4.2. Consistencia .....	11
2.4.3. Densidad Aparente .....	12
2.4.4. Materia orgánica.....	13
2.4.5. Contenido de humedad.....	14
2.4.6. Resistencia del suelo .....	15
2.4.6.1. Resistencia al corte.....	16
2.4.6.2. Resistencia a la penetración .....	17
2.5. Viabilidad económica .....	18
2.6. Análisis estadístico de los datos.....	18
3. METODOLOGÍA.....	19
3.2. Tractor e implementos .....	21
3.2.1. Arado de cincel .....	22
3.2.2. Palín.....	22
3.2.3. Rotador.....	23
3.3. Variables en estudio.....	23
3.4. Puntos de muestreo .....	24
3.5. Variables operativas.....	26
3.5.1. Velocidad de avance .....	26
3.5.2. Patinaje.....	26
3.5.3. Potencia requerida.....	27
3.6. Propiedades mecánicas .....	28
3.6.1. Resistencia a la penetración .....	28
3.6.2. Resistencia al corte.....	29
3.6.3. Textura .....	29
3.6.4. Consistencia (Adhesividad y Plasticidad).....	30
3.6.5. Densidad aparente .....	30

3.6.6.	Materia Orgánica.....	31
3.6.7.	Humedad volumétrica .....	31
3.7.	Profundidad de labranza .....	32
3.8.	Análisis estadístico de los datos.....	33
3.9.	Análisis económico.....	33
4.	RESULTADOS .....	35
4.1.	Condiciones del terreno .....	36
4.2.	VARIABLES OPERATIVAS.....	36
4.2.1.	Velocidad de avance .....	36
4.2.2.	Patinaje.....	36
4.2.3.	Potencia.....	37
4.3.	Propiedades mecánicas .....	38
4.4.	Textura.....	42
4.5.	Consistencia .....	43
4.6.	Densidad aparente.....	44
4.7.	Materia orgánica .....	45
4.8.	Profundidad de labranza .....	46
4.9.	Análisis económico.....	48
4.10.	Recopilación final.....	49
4.11.	Impacto social, ambiental y político.....	51
5.	CONCLUSIONES.....	52
6.	RECOMENDACIONES .....	55
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	57
8.	ANEXOS.....	63
8.1.	Pendiente del terreno .....	64
8.2.	Patinaje.....	67
8.3.	Potencia.....	67
8.4.	Gráficas de caja RP, RC y HV antes de mecanizar .....	69
8.5.	Gráficas de caja para RP, RC y HV después de mecanizar .....	70
8.6.	Gráficas de caja de RC, RP y HV para la parcela 7.....	76
8.7.	Densidad Aparente.....	78
8.8.	Materia Orgánica .....	79
8.9.	Profundidad de labranza .....	80

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Clasificación de la adhesividad del suelo.....	11
Cuadro 2. Clasificación de la plasticidad del suelo.....	11
Cuadro 3. Condiciones de operación para primera velocidad (baja) de cada parcela.....	21
Cuadro 4. Condiciones de operación para segunda velocidad (alta) de cada parcela.....	22
Cuadro 5. Velocidades de avance promedio utilizadas en los tratamientos de prueba ...	36
Cuadro 6. Valores de patinaje según el tratamiento y velocidad utilizada.....	37
Cuadro 7. Valores promedio y desviación estándar para la potencia según tratamiento	38
Cuadro 8. Valores promedios y desviación estándar para RP, RC y HV en función del tipo tratamiento, antes de mecanizar.....	39
Cuadro 9. Valores promedios y desviación estándar de la RP, RC y HV en función al tratamiento y velocidad de la mecanización.....	40
Cuadro 10. Valores promedios y desviación estándar para RP, RC y HV de la parcela 7 .....	42
Cuadro 11. Fracciones de partículas en muestreos de parcelas.....	43
Cuadro 12. Consistencia del suelo según tratamiento aplicado.....	43
Cuadro 13. Densidad aparente para los tratamientos.....	44
Cuadro 14. Promedio y desviación estándar para MO.....	45
Cuadro 15. Valores promedio y desviación estándar para profundidad del implemento agrícola.....	46
Cuadro 16. Costo por hectárea según tratamiento a utilizar.....	49
Cuadro 17. Recopilación de condiciones favorables según el tratamiento a aplicar.....	50

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama triangular de clasificación de suelos .....	10
Figura 2. Constitución del suelo.....	12
Figura 3. Curvas típicas de niveles de humedad para tres tipos de suelos .....	14
Figura 4. Componentes del estrés resueltos como componentes normales ( $\sigma$ ) y tangenciales ( $\tau$ ). .....	16
Figura 5. Mapa satelital del área experimental parcelado .....	20
Figura 6. Tratamientos en área de estudio por parcela.....	21
Figura 7. Implemento agrícola cincel AST marca TATU Marchesan .....	22
Figura 8. Implemento agrícola Palín marca Vangatrice Selvatici.....	23
Figura 9. Implemento agrícola rotador marca Nardi.....	23
Figura 10. Medición de características mecánicas del suelo en un punto de muestreo ..	25
Figura 11. Distribución de puntos de muestreo semanal en una parcela. ....	25
Figura 12. Penetrologger Eijelkamp en el área experimental .....	28
Figura 13. Veleta de corte en el área experimental .....	29
Figura 14. Prueba de campo de plasticidad y adhesividad.....	30
Figura 15. MiniTrase TDR en el área experimental.....	32
Figura 16. Diagrama de perfilómetro de varillas .....	33
Figura 17. Perfil de labranza con implemento de cincel .....	47
Figura 18. Perfil de labranza con implemento de palín.....	47
Figura 19. Perfil de labranza con implemento de cincel + rotador .....	48
Figura 20. Gráfico de pendiente transversal I .....	64
Figura 21. Gráfico de pendiente transversal II.....	64
Figura 22. Gráfico de pendiente transversal III.....	65
Figura 23. Gráfico de pendiente lateral I.....	65
Figura 24. Gráfico de pendiente lateral II .....	66
Figura 25. Gráfico de pendiente lateral III .....	66
Figura 26. Gráfica de barra para patinaje según el tratamiento.....	67
Figura 27. Gráfica de cajas para la potencia requerida en el tratamiento A.....	67
Figura 28. Gráfica de cajas para la potencia requerida en el tratamiento B.....	68
Figura 29. Gráfica de cajas para la potencia requerida en el tratamiento C.....	68
Figura 30. Gráfica de caja de la resistencia a la penetración antes de mecanizar .....	69
Figura 31. Gráfica de caja para la resistencia al corte antes de mecanizar .....	69
Figura 32. Gráfica de caja para la humedad volumétrica antes de mecanizar .....	70
Figura 33. Gráfica de caja para la resistencia a la penetración, semana 1 .....	70
Figura 34. Gráfica de caja para la resistencia a la penetración, semana 2 .....	71
Figura 35. Gráfica de caja para la resistencia a la penetración, semana 3 .....	71
Figura 36. Gráfica de caja para la resistencia a la penetración, semana 4 .....	72
Figura 37. Gráfica de caja para la resistencia al corte, semana 1 .....	72
Figura 38. Gráfica de caja para la resistencia al corte, semana 2.....	73
Figura 39. Gráfica de caja para la resistencia al corte, semana 3.....	73
Figura 40. Gráfica de caja para la resistencia al corte, semana 4.....	74
Figura 41. Gráfica de caja para la humedad volumétrica, semana 1 .....	74
Figura 42. Gráfica de caja para la humedad volumétrica, semana 2.....	75

Figura 43. Gráfica de caja para la humedad volumétrica, semana 3.....	75
Figura 44. Gráfica de caja para la humedad volumétrica, semana 4.....	76
Figura 45. Gráfica de caja para la resistencia a la penetración de la parcela 7 .....	76
Figura 46. Gráfica de caja para la resistencia al corte de la parcela 7.....	77
Figura 47. Gráfica de caja para la humedad volumétrica de la parcela 7.....	77
Figura 48. Gráfica de caja para la densidad aparente, antes de mecanizar .....	78
Figura 49. Gráfica de caja para la densidad aparente, después de mecanizar .....	78
Figura 50. Gráfica de cajas para MO, antes de mecanizar .....	79
Figura 51. Gráfica de cajas para MO, después de mecanizar.....	79
Figura 52. Gráfica de cajas para la profundidad de labranza del tratamiento A .....	80
Figura 53. Gráfica de cajas para la profundidad de labranza del tratamiento B .....	80
Figura 54. Gráfica de cajas para la profundidad de labranza del tratamiento C .....	81

## **RESUMEN**

La producción agrícola es cada vez más demandante, por lo que el recurso del suelo es fundamental para la generación de alimentos. El objetivo de esta investigación es evaluar la calidad de la labranza por medio de variables operativas y características mecánicas del suelo. Se realizó un estudio con tres implementos diferentes a dos velocidades de avance. Mediante análisis estadísticos se determinó que a velocidades bajas con el implemento de cincel, los valores de la resistencia a la penetración presentan valores mínimos de 0.58 MPa, beneficiando el crecimiento de las raíces de cultivos, además de un 92% de uniformidad en el perfil del suelo luego de realizada la mecanización. El uso del palín a velocidad alta o baja presenta beneficios muy similares, a diferencia del tratamiento de mecanización con cincel más rotador, que a mayor velocidad presenta una menor resistencia a la penetración y una mayor retención de humedad (hasta un 70%), cabe destacar que su costo por hora en estas condiciones es mayor. Por lo cual, se concluye que los tratamientos presentan generalmente, mayores beneficios al ser aplicados en velocidades de operación bajas, a pesar del mayor tiempo de mecanización que implica esta implementación en los campos agrícolas.

**Palabras Clave:** textura del suelo, maquinaria agrícola, preparación del suelo, resistencia del suelo

## **ABSTRACT**

Agricultural production is increasingly demanding, so the soil resource is essential for food production. The objective of this research is to evaluate the quality of tillage by means of operational variables and soil mechanical characteristics. A study was conducted with three different implements at two forward speeds. Through statistical analysis it was determined that at low speeds with the chisel implement, the penetration resistance values present minimum values of 0.58 MPa, benefiting the growth of crop roots, in addition to a 92% uniformity in the soil profile after mechanization. The use of the trowel at high or low speed presents very similar benefits, unlike the mechanization treatment with chisel plus rotator, which at higher speed presents a lower resistance to penetration and greater moisture retention (up to 70%), it should be noted that its cost per hour under these conditions is higher. Therefore, it is concluded that the treatments present greater benefits when applied at low operating speeds, despite the longer mechanization time that this implementation implies in agricultural fields.

**Key Words:** agricultural machinery, soil preparation, soil strength, soil texture

# **1. INTRODUCCIÓN**

Hoy en día la producción agrícola presenta un auge como nunca antes visto, esto implica factores en los que la ingeniería agrícola y sus numerosas ramas de estudio son fundamentales en el impulso del desarrollo agrícola. Cuando se habla de agricultura es inevitable no pensar en el proceso que lleva esta actividad, entre estos pasos se encuentra la labranza, cuya práctica adecuada es de gran importancia para una producción exitosa; esta, ha evolucionado de manera que se persigan rendimientos superiores por la alta demanda que se tiene cada año que transcurre, sin embargo, existen aspectos para una producción más sostenible que pueden considerarse y que no precisamente se toman en cuenta en los terrenos productores.

De esta manera, varios estudios enfatizan que el sistema actual de producción de alimentos necesita cambiar radicalmente para producir más alimentos de manera sustentable. Se afirma que, para poder alimentar a nueve mil millones de personas en el año 2050, será necesario adoptar sistemas agrícolas más eficientes y recomiendan un cambio fundamental hacia la agroecología como una forma de impulsar la producción de alimentos (Pérez Vázquez et al., 2018). A la vez, como Gómez-Calderón, Villagra-Mendoza, & Solorzano-Quintana (2018) mencionan, la labranza convencional tiende a aumentar el desplazamiento y densidad de los suelos, induciendo a la compactación, desestructuración y aumento de la erodabilidad. Por consiguiente, se presenta en este documento, el estudio con tres tratamientos diferentes bajo dos velocidades de avance, con el objetivo de determinar las condiciones favorables del suelo, después de la labranza, considerando variables operativas y mecánicas para finalmente analizar de manera estadística el comportamiento de las mismas desde un enfoque científico y económicamente beneficioso para los productores.

Entre los parámetros incluidos en la investigación se encuentra la resistencia a la penetración, resistencia al corte, humedad volumétrica, consistencia del suelo, materia orgánica, densidad aparente, patinaje agrícola, potencia, velocidad de avance, profundidad de labranza y costo económico por hectárea. La mayoría de parámetros se obtuvieron mediante pruebas en el campo y de ahí se realizó una recopilación semanal que permitió generar análisis estadísticos (ANOVA) para la comparación de los datos obtenidos y generación de conclusiones y recomendaciones para futuras implementaciones en condiciones similares.

## **1. OBJETIVOS**

## **1.1. Objetivo General**

Evaluar la calidad de la labranza por medio de variables operativas y características mecánicas del suelo, en el campo de prácticas agrícolas de la Escuela de Ingeniería Agrícola, Cartago, Costa Rica.

## **1.2. Objetivos Específicos**

1. Estudiar los parámetros que benefician la calidad de labranza por medio de variables operativas del equipo utilizado en el terreno de estudio.
2. Analizar el comportamiento de las características mecánicas del suelo en las parcelas de estudio según el tratamiento realizado en cada una.
3. Analizar desde un punto de vista económico, el panorama con un mayor rendimiento para una futura implementación en prácticas agrícolas eficientes dirigida hacia los productores y operarios.

## **2. REVISIÓN DE LITERATURA**

Los conceptos que se abarcan a continuación tienen gran relevancia en la evaluación que se realizó tanto en el área experimental de este trabajo, como en cualquier área de producción agrícola, debido al papel que juega cada variable operativa y características del suelo en la mecanización agrícola. Con estos parámetros definidos de manera puntual, es posible determinar cómo benefician en una calidad superior en futuras prácticas agrícolas, mayores rendimientos, impacto económico y sobre todo la conservación del recurso del suelo para futuras generaciones, de manera que se tome en cuenta cómo afecta la manera de realizar la labranza en los terrenos.

### **2.1.Recurso del suelo**

Hoy en día, existe una gran preocupación por la seguridad alimentaria y la conservación del medio ambiente, ya que se prevé que la producción de alimentos debería aumentar al menos un 70% antes de 2050 para sustentar a la población mundial (Martins et al., 2021).

Adicionalmente, existe una necesidad urgente de hacer coincidir la producción de alimentos con el aumento de la población mundial mediante la identificación de estrategias de gestión sostenible de la tierra. Sin embargo, la lucha por lograr la seguridad alimentaria debe llevarse a cabo teniendo en cuenta el suelo donde se cultivan los cultivos y el entorno en el que sobreviven los seres vivos (Busari, Kukal, Kaur, Bhatt, & Dulazi, 2015).

Por otro lado, relacionado con el suelo se encuentra el concepto de la labranza, de acuerdo con Busari et al., (2015), la labranza se define como la manipulación mecánica del suelo con el propósito de producir un cultivo que afecta significativamente las características del suelo como la conservación del agua del suelo, la temperatura del suelo, los procesos de infiltración y evaporación; esto sugiere que la labranza ejerce un impacto en el suelo intencionalmente para producir cultivos y, en consecuencia, afecta el medio ambiente. A medida que aumenta la población mundial, también aumenta la demanda de alimentos y, como tal, surge la necesidad de abrir más tierras para la producción de cultivos. El anhelo de aumentar el rendimiento para satisfacer la creciente demanda debe realizarse de manera que la degradación del suelo sea mínima y el suelo esté preparado para servir como sumidero en lugar de fuente de contaminantes atmosféricos. Sin embargo, Wolschick, Bertol, Barbosa, Bagio, & Biasiolo (2021) detallan que la labranza del suelo afecta la disposición de los residuos vegetales en la superficie y expone el

suelo a la acción del clima, especialmente la temperatura y la lluvia, además, fracciona los agregados del suelo, dejándolo físicamente degradado. Además, Rangeon, Aciar, Osinaga, Arzeno, & Sánchez (2008) mencionan que las labranzas provocan continuos cambios en las propiedades físicas de los suelos, que afectan al desarrollo de los cultivos e influyen en la densidad de los suelos, infiltración, humedad y en el desarrollo radicular, estos pueden ser evaluados por distintos indicadores de calidad de suelo, como por ejemplo mediante la resistencia a la penetración y su relación con el contenido de humedad, los cuales se detallan más adelante.

## **2.2.Siembra directa**

La siembra directa es el elemento central en lo que hoy en día se denomina agricultura de conservación; algunas de las principales características de la siembra directa y ventajas mencionadas por FAO (2009) son:

- a. Los residuos de los cultivos son distribuidos de forma uniforme y dejados en la superficie del suelo
- b. No se utiliza ningún implemento para voltear el suelo
- c. La erosión del suelo se reduce en aproximadamente 90% y la actividad biológica y biodiversidad se ven maximizadas.

Por otro lado, la agricultura de conservación, en particular, el uso de la labranza cero o siembra directa (SD), surgió como respuesta a los problemas de degradación de los suelos ocasionados por la expansión e intensificación agrícola. La SD combinada con la rotación de cultivos se presenta como un sistema de manejo agrícola muy promisorio y sustentable, además, la calidad del suelo puede ser estimada y cuantificada a través de la evaluación de parámetros físicos, químicos, bioquímicos y biológicos. Entre los parámetros biológicos, los microorganismos del suelo y sus funciones han sido reconocidos como componentes integrales de la calidad del suelo, dado que están involucrados en procesos claves que permiten mantener las funciones del suelo, como la formación de la estructura, la descomposición de la materia orgánica, el ciclado de nutrientes y la degradación de contaminantes (Morales, Iocoli, Villamil, & Zabaloy, 2021).

## **2.3.Elementos operativos**

La operación de un tractor agrícola debe hacerse de la forma más eficiente posible, ejecutada en el menor tiempo, con un mínimo consumo de combustible, entre otras variables que intervienen mencionadas a continuación.

### **2.3.1. Velocidad de avance**

La preparación del campo es una de las operaciones más importantes y costosas en la producción de cultivos, de ahí, la calidad del suelo después de la labranza está influenciada principalmente por la condición del suelo, el tipo de suelo y los parámetros de operación de la labranza, incluidos los implementos, la velocidad de avance, la profundidad y las herramientas. Por lo tanto, el uso de un implemento de labranza combinado y la reducción del número de pasadas está ganando popularidad debido a sus efectos positivos en el tiempo, la eficiencia y los costos, de manera que las herramientas de labranza a menudo están diseñadas para minimizar la fuerza de tiro y los requisitos de potencia (Bögel, Osinenko, & Herlitzius, 2016). Cuando se utiliza un implemento agrícola, la velocidad juega un papel fundamental, de ella va a depender en parte, el tiempo en la que se finalice una labor, el consumo de combustible y finalmente el resultado de la labranza en el perfil del suelo; de aquí, se puede determinar mediante estudios, si una velocidad rápida o lenta en un terreno determinado, trae mayores beneficios en la producción agrícola.

### **2.3.2. Patinaje**

El patinaje se puede definir como el resbalamiento de las ruedas motrices del tractor por falta de adherencia en el suelo; para que el tractor obtenga un máximo aprovechamiento de la potencia disponible, el patinaje deberá estar entre un 10 y 15% en trabajos de labranza sobre suelo firme. En las operaciones que exijan más fuerza de tracción el peso debe ser mayor ya que el patinaje tiende a aumentar, lo que trae como consecuencia aumento de combustible, mayor desgaste en los neumáticos, piezas mecánicas y un menor rendimiento operativo (Pérez Alvarado & Campos, 2015).

### **2.3.3. Potencia**

La potencia de un tractor debe de ser suficiente para superar las malas condiciones del terreno y los cambios topográficos del suelo, permitir incrementos en la velocidad por ejemplo en paradas repentinas en caso de mal tiempo, además de realizar labores combinadas con varios implementos. Por otro lado, la selección de un tractor de potencia considerablemente mayor que la requerida ocasiona pérdidas de combustible, aumento en costos de operación, depreciación e incluso baja calidad de los trabajos al utilizar una velocidad excesiva (Guerrero, Restrepo, Rincón, & Camacho, 1981).

### **2.4. Características mecánicas del suelo**

En todo el mundo, los agricultores, los profesionales de la agricultura y los investigadores están adoptando el concepto de salud del suelo, que se ha definido como "la capacidad del suelo para funcionar como un ecosistema vivo vital que sustenta a las plantas, los animales y los seres humanos" (USDA-NRCS, 2019). Además, según Bünemann et al. (2018) comenta, este interés tiene sus raíces en el creciente reconocimiento de que la biología del suelo, la física y química del mismo, deben considerarse de manera integral para gestionar de manera sostenible los recursos del suelo. De acuerdo con lo anterior, la estructura del suelo muestra grandes variabilidades espaciales y temporales debido a factores internos por ejemplo: contenido de agua, agregación y fuerzas externas como las gotas de lluvia y perturbaciones mecánicas (Zhang, Lu, Heitman, Horton, & Ren, 2017).

#### **2.4.1. Textura**

La textura del suelo es la proporción numérica (porcentaje en peso) de arena, limo y arcilla en la fracción de tierra fina (2 mm). Mediante el método de Bouyoucos, el contenido de arena, limo y arcilla se estima y luego se coloca dentro del triángulo textural para determinar la clase de textura. La distribución granulométrica o clase de textura es una de las primeras cosas que se determinan cuando se examina un suelo.

Está relacionado con la intemperie y el material parental, las diferencias de textura entre horizontes pueden estar relacionadas con factores como el movimiento de materiales finos, la

destrucción u otra pérdida de minerales, y la formación de minerales secundarios y sustancias no cristalinas (USDA, 2014).

El método de Bouyoucos es una técnica sencilla que no requiere pretratamiento; el hidrómetro mide la densidad del medio, que varía directamente con la cantidad de partículas en la suspensión; tiene una dispersión química con hexametafosfato de sodio y una dispersión física mediante agitación mecánica; la separación de los grupos de partículas se fundamenta en la distinta velocidad de caída que tienen las partículas en un fluido (columna de agua); así, se tiene un triángulo equilátero, que tiene un lado que corresponde a la arcilla, el otro al limo y por último la arena, cada lado graduado en una escala de 0 a 100 en intervalos de 10 en 10; el interior de dicho triángulo está dividido en casillas, de manera que cada una representa una tipología granulométrica del suelo caracterizado por las porciones de suelos dominantes (Guerra Torralbo, 2018); este triángulo se muestra a continuación en la Figura 1.

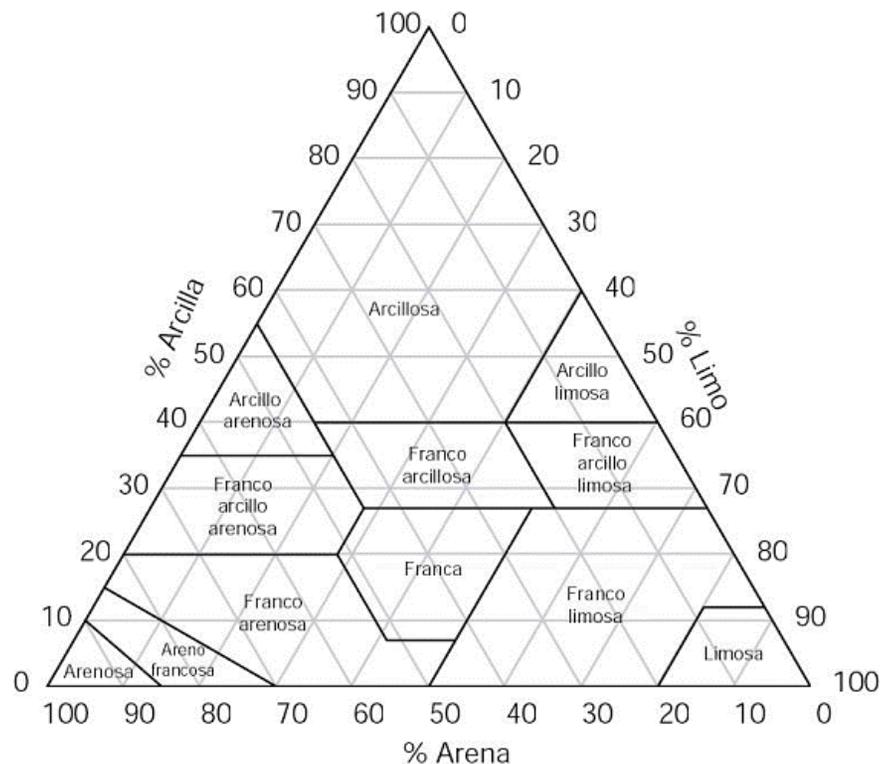


Figura 1. Diagrama triangular de clasificación de suelos

Fuente: (USDA, 2014)

### 2.4.2. Consistencia

La consistencia se refiere al grado de cohesión o adhesión de la masa del suelo, esta incluye las propiedades del suelo como la friabilidad, plasticidad, adhesividad, y resistencia a la compresión. Este concepto depende en gran medida de la cantidad y tipo de arcilla, materia orgánica y contenido de humedad del suelo (FAO, 2009); para esta investigación se clasificaron las propiedades de adhesividad y plasticidad utilizadas en las pruebas de campo con el cuadro 1 y 2.

Cuadro 1. Clasificación de la adhesividad del suelo.

<b>Código</b>	<b>Condición del suelo</b>	<b>Prueba de campo</b>
NST	No adherente	Después de liberar la presión, prácticamente el suelo no se adhiere a los dedos.
SST	Ligeramente adherente	Luego de la presión, el material de suelo se adhiere a los dedos pero se desprende completamente de cualquiera de las partes. No se extiende apreciablemente cuando los dedos se separan.
ST	Adherente	Luego de la presión, el material de suelo se adhiere a los dedos y tiende a extenderse bastante cuando se separa los dedos.
VST	Muy adherente	Luego de la presión, el material de suelo se adhiere fuertemente a los dedos y es decididamente extensible cuando estos se separan.

Cuadro 2. Clasificación de la plasticidad del suelo.

<b>Código</b>	<b>Condición del suelo</b>	<b>Prueba de campo</b>
NPL	No plástico	No se forma el cordón.
SPL	Ligeramente plástico	Se forma el cordón pero se rompe inmediatamente si se le curva en forma de aro; la masa de suelo se deforma por una ligera fuerza.
PL	Plástico	Se forma el cordón pero se rompe al doblarlo en forma de aro; se requiere una fuerza ligera a moderada para deformar la masa de suelo.
VPL	Muy plástico	Se forma el cordón y se puede doblar en forma de aro; se requiere una fuerza moderadamente fuerte a muy fuerte para deformar la masa de suelo.

### 2.4.3. Densidad Aparente

La densidad aparente se define como masa por unidad de volumen, este volumen total incluye tanto el volumen de sólidos como el espacio de poros, por lo que, este concepto se distingue del concepto de densidad de partículas, que es la masa por unidad de volumen de sólo la fase sólida. Dado que la densidad aparente ( $D_a$ ) suele indicarse para el tejido de suelo  $<2$  mm, la masa y el volumen de los fragmentos de roca se restan de la masa y el volumen total (USDA, 2014).

Cabe mencionar, que en el suelo se distingue tres fases constituyentes, sólida líquida y gaseosa; la fase sólida: está formada por las partículas minerales del suelo; la fase líquida: por agua (aunque pueden existir otros líquidos) y por último la fase gaseosa: sobre todo aire (pueden estar presentes otros gases como anhídrido carbónico, vapores sulfurosos, entre otros.) Las fases líquidas y gaseosas del suelo suelen comprenderse en el volumen de vacíos huecos, mientras que la fase sólida constituye el volumen de sólidos o de partículas sólidas (Guerra Torralbo, 2018), esto se muestra a continuación en la Figura 2.

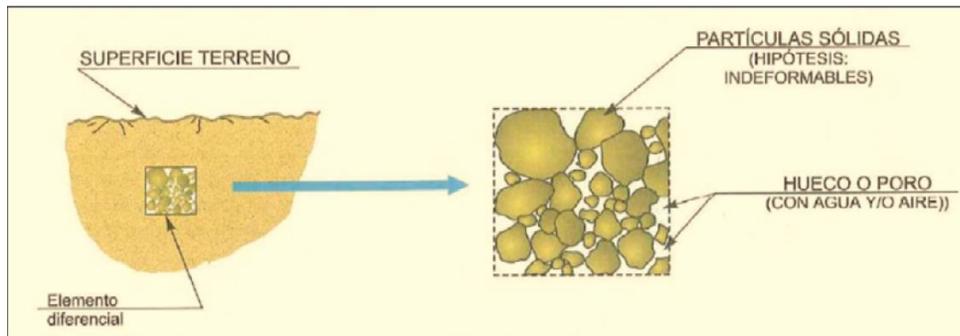


Figura 2. Constitución del suelo

Fuente: (Guerra Torralbo, 2018)

Por otro lado, la compactación causada por maquinaria agrícola modifica propiedades físicas del suelo, tales como la densidad aparente, el tipo de estructura, la resistencia a la penetración, el volumen total de poros, distribución del tamaño de los poros, conductividad hidráulica y la permeabilidad al aire. Como resultado de la alteración del sistema poroso, se modifica la disponibilidad de aire, agua y nutrientes, las cuales son propiedades que influyen directamente el crecimiento de las raíces, afectando negativamente el nivel de producción de los

cultivos (Masola, 2020). Además, las raíces también modifican el espacio poroso y densidad aparente del suelo mediante la reorientación de las partículas del suelo, la obstrucción de los poros, el agrietamiento de macro agregados, la amalgama de micro agregados, la penetración, expansión y contracción de las raíces (Lu et al., 2020).

Según Rubio & Sevilla (2010), la prueba para medir la densidad aparente se hace retirando del campo una muestra de suelo de volumen conocido y se seca en el horno a 105 °C durante 24 horas hasta que alcanza un peso constante. Los valores pueden llegar a ser inferiores a 0,25g/cm<sup>3</sup> en suelos turbosos y superiores a 1,90g/cm<sup>3</sup> en suelos muy compactados. En suelos minerales volcánicos los valores se aproximan a 0,85g/cm<sup>3</sup>.

#### **2.4.4. Materia orgánica**

La actividad antrópica del hombre en la producción agropecuaria ha conducido no solamente a la explotación de áreas agrícolas, sino también al empleo de suelos vírgenes y terrenos vacíos, en los cuales ha utilizado de forma intensiva recursos técnicos, tales como la mecanización, el riego y uso de químicos. Además, por el desconocimiento y la necesidad social, se ha propiciado el aumento de la degradación del suelo en más del 20 % de las tierras agrícolas, el 30 % de los bosques y el 10 % de los pastizales, lo que dificulta la adaptación y mitigación al cambio climático, ya que por la pérdida de biomasa y materia orgánica (MO) del suelo se desprende carbono a la atmósfera, lo que afecta la calidad del suelo y su capacidad de mantener el agua y los nutrientes (Sociedad et al., 2020).

Por ello, la materia orgánica del suelo es un factor en la evaluación de la calidad del suelo y un componente esencial de su fertilidad, contribuyendo fuertemente al crecimiento y productividad de los cultivos. Teniendo esto en cuenta, para preservar este atributo, las prácticas agrícolas sostenibles son fundamentales para mantener su contenido a diferentes profundidades, ayudando así con diferentes propiedades del suelo a lo largo del perfil (Reis et al., 2021).

Además, los suelos cumplen numerosas funciones en los ecosistemas terrestres y en beneficio del bienestar humano como lo es la retención y filtración de agua, el ciclo de nutrientes, la producción de biomasa y el secuestro de carbono (C); muchos de ellos están relacionados con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU para apoyar la seguridad alimentaria, el agua limpia, la vida en la tierra o la acción climática (Lal, 2016) de

ahí, la materia orgánica del suelo y con ella el carbono orgánico del suelo juegan un papel central para cumplir muchas de estas funciones.

#### 2.4.5. Contenido de humedad

El contenido de humedad es el porcentaje entre la masa (peso) de agua y la masa (peso) de la partícula de suelo en una muestra; este contenido cambia continuamente con el tiempo y la temperatura ambiental. (Ding et al., 2021). Cuando el perfil del suelo está lleno de agua y alcanza lo que se llama capacidad de campo (CC), se dice que el perfil está al 100% de su contenido de humedad disponible, además, la tensión es una medida que determina la fuerza con la que las partículas del suelo retienen a las moléculas de agua: a mayor retención de humedad, más alta es la tensión.

La Figura 3 muestra tres curvas típicas para suelos arenosos, arcillosos y francos. Como se muestra a continuación las plantas utilizan el agua del suelo hasta que el nivel de humedad alcanza el punto de marchitamiento permanente (PMP). De la misma manera, una vez que el suelo se seca hasta llegar al PMP, las plantas ya no pueden seguir extrayendo agua del suelo y mueren de sed. Aunque por debajo del PMP todavía hay un poco de humedad, esta agua está retenida tan fuertemente por las partículas del suelo que las raíces de la planta no pueden extraerla y dependiendo del tipo de planta y del tipo de suelo, el PMP ocurre a diferentes niveles de humedad (Martin & Munoz, 2021).

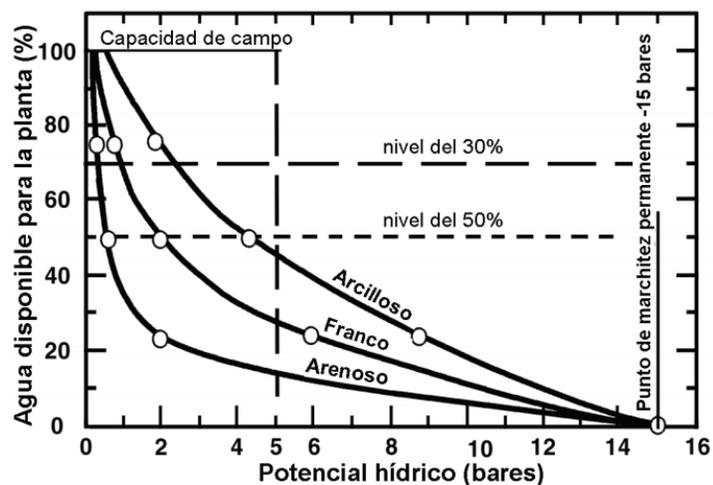


Figura 3. Curvas típicas de niveles de humedad para tres tipos de suelos

Fuente: (Martin & Munoz, 2021)

#### **2.4.6. Resistencia del suelo**

El fenómeno de compactación reduce la porosidad del suelo, aumenta la resistencia del mismo y, por lo tanto, impide la exploración de las raíces del perfil, también, reduce significativamente la eficiencia del uso de fertilizantes y agua (riego y lluvia), aumenta el riesgo de escorrentía, erosión y, por lo tanto, la contaminación de los cursos de agua. La mayor parte de la compactación es producto de la resistencia al movimiento del tráfico de campo, una ineficiencia sustancial que afecta los requisitos de energía de todas las operaciones de campo, particularmente aquellas en suelos blandos y cultivados (Bluett, Tullberg, McPhee, & Antille, 2019). Por otro lado, Keller, Sandin, Colombi, Horn, & Or (2019) agregan que la compactación del suelo causada por el tráfico vehicular afecta negativamente las funciones clave del suelo, incluido el flujo y la aireación del agua, el ciclo de nutrientes, la producción agrícola y forestal y los hábitats de los organismos del suelo.

De igual manera, el suelo posee un comportamiento mecánico del suelo y este se puede describir por las fuerzas que actúan sobre él, considerándolo como un cuerpo tridimensional. Toda fuerza aplicada sobre el suelo debe ser relacionada a un área para que provea información respecto al proceso de deformación como se muestra en la Figura 4. Así, la fuerza aplicada al suelo por unidad de área se denomina estrés; la aplicación de un estrés puede transmitirse hacia el interior del suelo generando una formación tridimensional de su volumen, teniendo en cuenta que el suelo es un cuerpo tridimensional (Masola, 2020). Para propósitos del estudio, al suelo se le aplicaran fuerzas verticales y tangenciales que serán desarrolladas mas adelante.

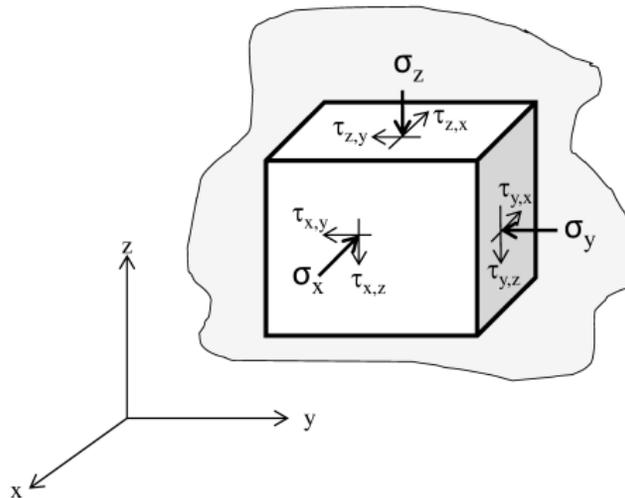


Figura 4. Componentes del estrés resueltos como componentes normales ( $\sigma$ ) y tangenciales ( $\tau$ ).

Fuente: (Masola, 2020).

#### 2.4.6.1. Resistencia al corte

Como se mencionó anteriormente, fuerzas tangenciales como la resistencia al corte, son de gran valor en estudios mencionados más adelante. La resistencia al corte se refiere al máximo estrés que se le puede aplicar al suelo (o la ladera) antes de que cause alguna deformación física (en alguna forma de erosión evidente), su importancia radica en el apoyo a explicaciones de conceptos como lo son el crecimiento radicular, estabilidad de agregados, erodabilidad, estabilidad de laderas, entre otros. Los parámetros de resistencia al corte se utilizan ampliamente en varios diseños en sectores ambientales y estructuras relacionadas, incluyendo pendiente, capacidad de carga del suelo, terraplenes y muros de contención. Esta resistencia se ve afectada por varios factores como el contenido de humedad, el límite líquido, el índice de plástico, el contenido de arcilla, etc., además, la resistencia es una constante matemática que determina la relación lineal entre la resistencia al corte y el esfuerzo normal efectivo en el suelo; estos parámetros dependen de la forma, estructura, densidad, contenido de humedad del suelo y la condición de carga (Ding et al., 2021). Por otro lado, una manera de medición consiste en la veleta de corte, formada por una cruceta metálica de dimensiones estandarizadas que se inserta en el suelo a analizar. Una vez colocada, se aplica un torque sobre el sistema de barras con el

fin de movilizar una superficie de falla cilíndrica (Olguín & Ortúzar, 2015). Las ventajas de los valores altos de resistencia al corte radican en la resistencia que pueden tener los suelos a la compactación y fuerzas erosivas. Asimismo, valores altos de resistencia al corte pueden tener algunas desventajas, como mayores requerimientos en la potencia de los tractores, pobre crecimiento radicular y por lo tanto pobre capacidad de sostén de los cultivos (Gómez Calderón, Solórzano Quintana, & Villagra Mendoza, 2017).

#### **2.4.6.2. Resistencia a la penetración**

Como fuerza vertical o normal, la resistencia a la penetración del suelo es la propiedad principal del suelo que regula el alargamiento de las raíces y la accesibilidad al agua (Colombi, Torres, Walter, & Keller, 2018). Además, es una de las evaluaciones más utilizadas para monitorear la compactación del suelo. A partir de los valores de este atributo, se pueden definir límites críticos para cada cultivo y sistema de producción con el fin de indicar un mejor tipo de operación (Oliveira, Sato, Lima, Rodrigues, & Silva, 2016). Adicionalmente, Filho et al. (2015) menciona que, con el uso de geo tecnologías, se pueden definir áreas de manejo específico mediante mapas temáticos según la resistencia a la penetración, reduciendo el tiempo dedicado a la operación agrícola y, en consecuencia, el consumo de combustible, uso de mano de obra, y emisión de CO<sub>2</sub> de la operación. Por otra parte, Benevenuto et al. (2020) demuestra que la determinación de la resistencia a la penetración utilizando el penetrómetro de impacto o el penetrómetro de campo ha demostrado ser una herramienta importante y práctica para predecir la compactación.

Entonces, Gómez-Calderón, Villagra-Mendoza, & Solorzano-Quintana (2018) mencionan, en una reciente recopilación realizada sobre labranza mecanizada y el impacto en la conservación del suelo mencionan que valores de resistencia a la penetración de 1,5 MPa pueden reducir el crecimiento de las raíces de un cultivo, mientras que valores superiores a 2,1 MPa lo limitan.

## 2.5. Viabilidad económica

La disminución de los rendimientos en los cultivos es cada vez mayor por la degradación del suelo, debido a la sobreexplotación, los altos índices de deforestación, la eliminación de la cobertura vegetal y el exceso de laboreo del suelo. Una explotación eficiente del suelo en la producción de cultivos debe considerar los principios básicos de sustentabilidad, que se traducen en procesos productivos ecológicamente sanos, económicamente viables, socialmente justos, humanos y adaptables, con la aplicación adecuada de los adelantos e innovaciones de la ciencia y la tecnología (Bravo et al., 2000).

## 2.6. Análisis estadístico de los datos

La comparación de tratamientos en cuanto a sus medias poblacionales es de gran interés para el experimentador, sin olvidar que también es importante compararlos con respecto a sus varianzas. Por lo tanto, desde el punto de vista estadístico la hipótesis fundamental a probar cuando se comparan varios tratamientos tomada de Gutiérrez & Salazar (2008), es la siguiente:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k = \mu \quad (1)$$

$$H_A: \mu_i \neq \mu_j \text{ para algún } i \neq j \quad (2)$$

Con lo cual se quiere decidir si los tratamientos son iguales estadísticamente en cuanto a sus medias, frente a la alternativa de que al menos dos de ellas son diferentes. Las hipótesis brindadas previamente se prueban con un análisis de varianza, cuyos cálculos pueden ser manuales pero siempre es más práctico con un software estadístico que proporciona más opciones gráficas y no solo el ANOVA. Al comparar ciertos tratamientos o estudiar el efecto de un factor, es deseable que las posibles diferencias se deban principalmente al factor de interés y no a otros factores que no se consideran en el estudio. Cuando esto ocurre y existen otros factores que no se controlan o nulifican para hacer la comparación, las conclusiones podrían ser afectadas sensiblemente.

### **3. METODOLOGÍA**

El estudio se realizó en el campo de prácticas de la Escuela de Ingeniería Agrícola, ubicado en Cartago, Costa Rica; para ello se llevó a cabo un levantamiento topográfico utilizando un RTK marca Geo Max GNSS; la información recolectada se procesó con la herramienta de sistema de información geográfica QGIS versión 3.4.15, cuyo mapa del área experimental parcelado se muestra a continuación en la Figura 5.

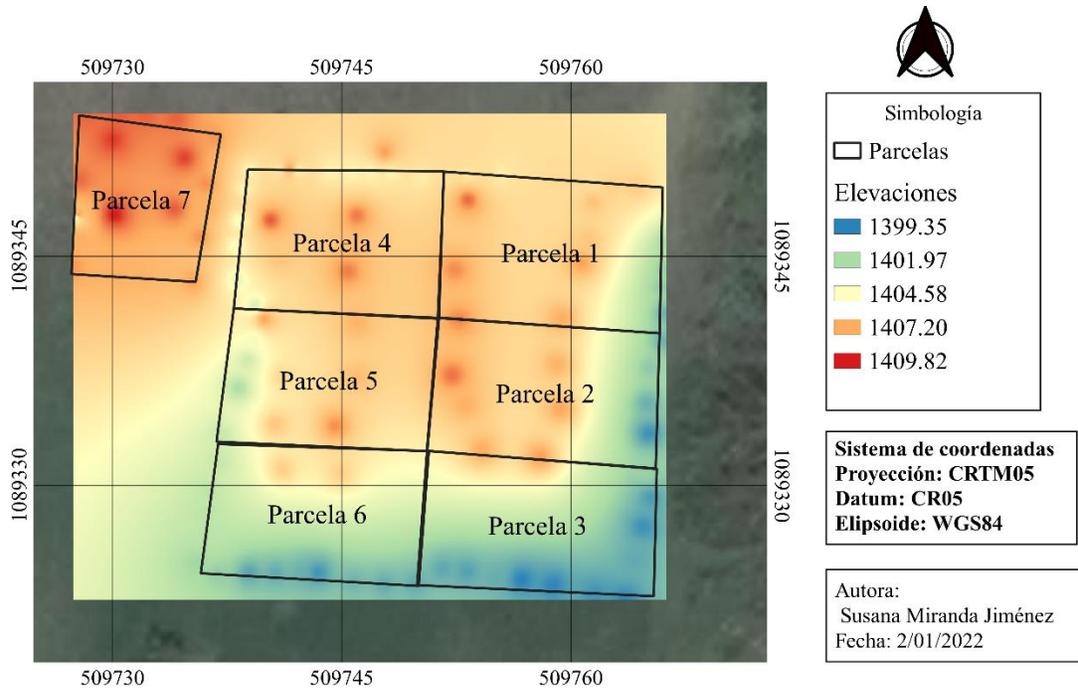


Figura 5. Mapa satelital del área experimental parcelado

### 3.1. Tratamientos

En el área de prácticas agrícolas se realizó una subdivisión en la cual se contó con siete parcelas experimentales de dimensiones de 8x10m, seis se mecanizaron con tres implementos diferentes correspondientes a tres tratamientos A (cincel), B (Palín) y C (Cincel + rotador) a dos velocidades de avance diferentes (alta y baja), además de conservar una séptima parcela sin tratamiento (D), con el fin de comparar su comportamiento a través del experimento, esto se muestra en la Figura 6.

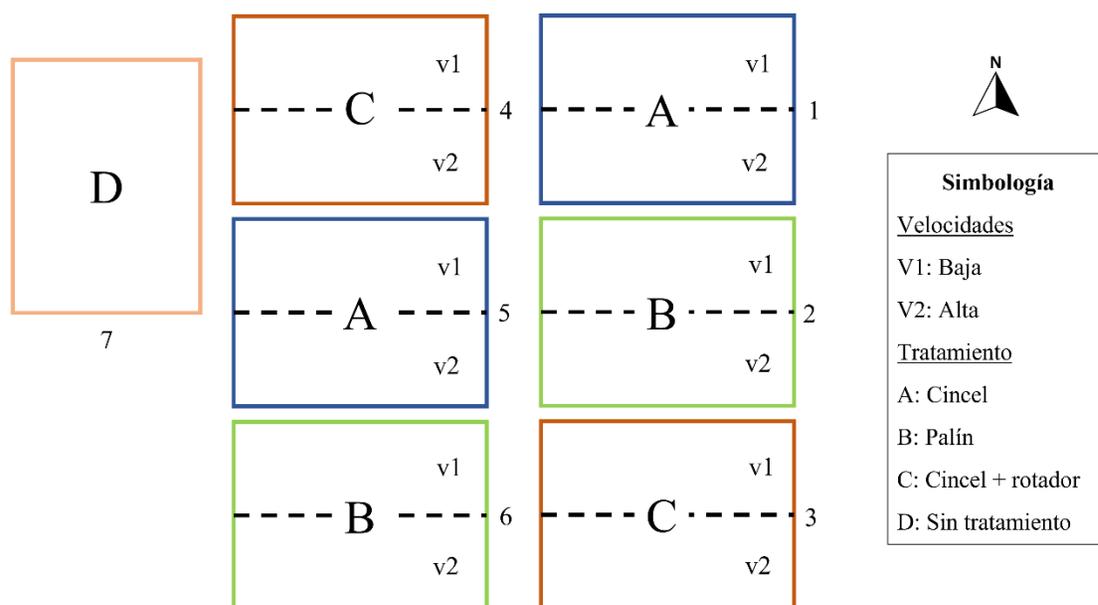


Figura 6. Tratamientos en área de estudio por parcela

### 3.2. Tractor e implementos

Para el estudio se utilizó un tractor marca New Holland modelo 60 66 DT, año 1998, el cual posee un ancho de trocha y distancia entre ejes de 2.14m y 2.17m respectivamente obtenidos en el campo; la información de las condiciones de operación se anotó en el campo y la velocidad promedio recomendada a una marcha determinada se obtuvo del manual de usuario del tractor, dicha información se muestra a continuación en los Cuadros 3 y 4.

Cuadro 3. Condiciones de operación para primera velocidad (baja) de cada parcela

Parcela	Implemento	Marcha	Gama	Tractor (rpm)	Implemento (rpm)	Velocidad (km/h)
1 y 5	Cincel	1	1	2150	N/A	1.6
2 y 6	Palín	1	1	2150	540	1.6
3 y 4	Cincel + Rotador	1	1	2150	540	1.6

Cuadro 4. Condiciones de operación para segunda velocidad (alta) de cada parcela

Parcela	Implemento	Marcha	Gama	Tractor (rpm)	Implemento (rpm)	Velocidad (km/h)
1 y 5	Cinzel	3	1	2150	N/A	3.0
2 y 6	Palín	2	1	2150	540	2.5
3 y 4	Cinzel + Rotador	2	1	2150	540	2.5

### 3.2.1. Arado de cinzel

Este implemento posee enganche en los tres puntos del tractor, fue especialmente proyectado para eliminar las capas compactadas del subsuelo hasta 45 cm de profundidad, o superficialmente, realizando la escarificación del suelo. En la Figura 7 se muestra el arado de cinzel y la prueba de campo realizada. El ancho de trabajo se obtuvo mediante la medición en el campo la cual fue de 98.5cm y la profundidad de trabajo utilizada de 22cm.



Figura 7. Implemento agrícola cinzel AST marca TATU Marchesan

### 3.2.2. Palín

El implemento Palín posee enganche a los tres puntos del tractor, para estas pruebas se utilizó uno marca Vangatrice Selvatici, modelo 150 75; el cual posee una profundidad de trabajo entre 10cm y 32cm. Para efectos de las pruebas se trabajó con una profundidad correspondiente a 22cm.; además, este palín posee un ancho de trabajo de 1.94m con nueve azadas individuales. En la Figura 8 se muestra el palín utilizado y la operación en campo.



Figura 8. Implemento agrícola Palín marca Vangatrice Selvatici

### 3.2.3. Rotador

El implemento rotador se engancha a los tres puntos del tractor y para este estudio se utilizó uno de marca Nardi, modelo 130. Para las pruebas se mecanizó a una profundidad de 0.1m, además, posee un ancho de trabajo de 1.5m. El implemento de rotador se muestra en la Figura 9, así como en las pruebas de campo realizadas.



Figura 9. Implemento agrícola rotador marca Nardi.

### 3.3. Variables en estudio

Antes de la prueba de mecanización en cada parcela, se procedió a tomar una serie de muestreos que permitieron analizar las características mecánicas del suelo, estas incluyeron prueba textural, prueba de adhesividad y plasticidad, resistencia a la penetración (RP), resistencia al corte (RC) y contenido de humedad (HV).

Además, se tomaron dos veces (al inicio y final del estudio) muestreos en 4 puntos distribuidos en cada una de las parcelas para lo que corresponde la obtención de densidad aparente y materia orgánica para su respectiva comparación en el tiempo.

De este modo, se realizó una pasada del equipo agrícola por cada subdivisión de parcela con las dos velocidades de avance. Durante la realización de las pruebas se midieron variables operativas del equipo, estas incluyeron la velocidad de avance con cada implemento acoplado al tractor y la potencia utilizada para el tratamiento. Una vez finalizadas las pruebas en cada subdivisión de parcela, se realizaron nuevamente mediciones en cada una de características mecánicas del suelo así como la medición del perfil de la profundidad de la labranza obtenido después del tratamiento.

Finalmente, se realizó un procesamiento de datos de manera semanal para generar un análisis estadístico de los parámetros (ANOVA), a su vez, se determinó el costo-beneficio que implicaría el uso de un implemento a determinadas condiciones gracias a la información obtenida durante los muestreos del campo a lo largo de la investigación.

### **3.4.Puntos de muestreo**

Se realizaron 8 puntos de muestreo para las variables en estudio en las pruebas que se realizaron semanalmente en un mismo punto, estas se componen por resistencia a la penetración, resistencia al corte y contenido de humedad; dichos instrumentos se muestran en la Figura 10, los cuales se describirán más adelante.



Figura 10. Medición de características mecánicas del suelo en un punto de muestreo

La distribución de muestreo en cada parcela se muestra a continuación en la Figura 11, en donde se generó un total de 56 puntos de muestreo semanales para cada prueba.

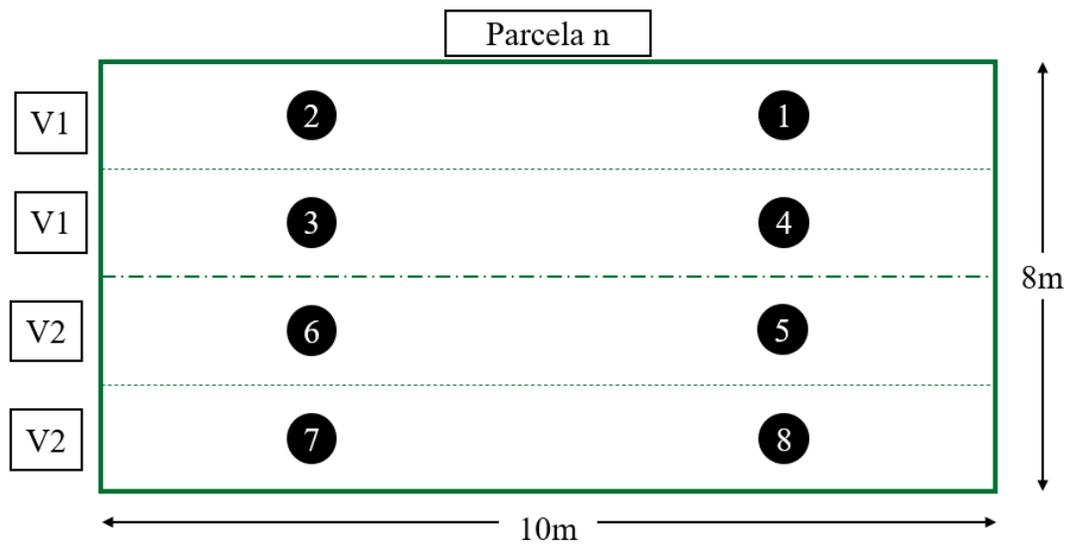


Figura 11. Distribución de puntos de muestreo semanal en una parcela.

### 3.5. Variables operativas

De igual importancia, las variables operativas fueron determinadas de la mano con las pruebas realizadas en campo, esto se muestra en las secciones a continuación.

#### 3.5.1. Velocidad de avance

Para ello se realizaron las pruebas de mecanización en un tramo de 10m, colocando estacas; dicho tramo comienza en la mitad del eje trasero del tractor y termina al momento que la misma mitad cruce la estaca colocada a 10m, esto se logra visualizar mediante un video capturado al momento de la prueba. Otra variable que juega un papel importante es el tiempo que dura el recorrido el cual se obtiene mediante el uso de un cronómetro.

Para obtener la velocidad media a la que el tractor viajó se utiliza la siguiente fórmula que menciona (Perez, 2015):

$$v = \frac{d}{t} \quad (3)$$

**Donde:**

v: velocidad de avance (m/s)

d: distancia recorrida (m)

t: tiempo (s)

#### 3.5.2. Patinaje

Durante la mecanización con los tres implementos, se midió la distancia de 10m que realizó el recorrido de ambos ejes lo cual está relacionado con el diámetro externo y las vueltas que dan en la prueba.

Se calculó el patinaje con la siguiente fórmula (Villagra, Gómez, & Arrazate, 2016):

$$\%P = 100 \left( 1 - \frac{L}{R} \right) \quad (4)$$

**Donde:**

P: patinaje (%)

L: longitud de la prueba (m)

R: recorrido de la llanta (m)

Para obtener R se utilizó:

$$R = 2\pi rn \quad (5)$$

**Donde:**

R: recorrido de la llanta (m)

r: radio externo de llanta evaluada (m)

n: cantidad de vueltas de la llanta evaluada

### 3.5.3. Potencia requerida

La potencia requerida para operar diversas herramientas es variable y depende de muchos factores, entre ellos, los efectos de la textura, humedad del suelo, naturaleza del material de la herramienta deslizante, la velocidad y profundidad de trabajo. Este valor se estima a partir de la fuerza de corte en cada tratamiento con las siguientes expresiones que indica (Ashburner & Sims, 1984):

$$P = F_{corte} \cdot V \quad (6)$$

$$F_{corte} = \sigma \cdot A_{corte} \quad (7)$$

$$A_{corte} = Ancho \cdot Profundidad_{corte} \quad (8)$$

**Donde:**

P: Potencia del tractor requerida para mecanizar el suelo (W)

$F_{corte}$ : Fuerza de corte (N)

V: Velocidad de avance del tractor (m/s)

$\sigma$ : Resistencia al corte (Pa)

$A_{corte}$ : Área de corte (m<sup>2</sup>)

$Profundidad_{corte}$ : Profundidad de labranza según tratamiento (m)

Ancho: Ancho de trabajo según tratamiento (m)

### **3.6. Propiedades mecánicas**

Como parte del análisis se consideraron las características mecánicas, las cuales se obtuvieron mediante el muestreo semanal previamente comentado y procesamiento digital para el posterior estudio.

#### **3.6.1. Resistencia a la penetración**

El parámetro de resistencia a la penetración se determinó con un penetrológico digital marca Eijelkamp, se utilizó tanto el cono número 1 como el número 2, este equipo se muestra en la Figura 12. Al determinar la resistencia a la penetración, es esencial tener en cuenta la variabilidad espacial de los suelos, ya que las diferencias en textura, estructura y contenido de materia orgánica pueden variar considerablemente de una parcela a otra.

Como todos estos factores afectan la resistencia a la penetración, es necesario realizar mediciones repetidas para obtener valores representativos (Royal Eijelkamp, 2012); como limitaciones en el equipo se detecta una penetración máxima de 1000N y un registro máximo de profundidad de 80cm.



Figura 12. Penetrologger Eijelkamp en el área experimental

### 3.6.2. Resistencia al corte

Se utilizó una veleta de corte número 2 la cual se muestra en la Figura 13, a una profundidad de 15cm, la cual al ingresarla se gira en sentido horario aplicando un torque para recolectar en el rodamiento graduado en kPa, el dato correspondiente. Se identificó como limitación principal en el equipo, una graduación máxima de 130kPa.



Figura 13. Veleta de corte en el área experimental

### 3.6.3. Textura

La obtención de la textura predominante del terreno en estudio (una única vez al inicio del estudio), se realizó por medio del método de Bouyoucos cuyo procedimiento se basó en el manual de (USDA, 2014). Los porcentajes de fracción de partícula fueron determinados por las siguientes ecuaciones:

$$\text{Material en suspensión: } \frac{\text{lectura corregida del hidrómetro (40s)}}{\text{Peso de muestra}} \times 100 \quad (9)$$

$$\text{Arena: } 100 - \text{material en suspensión} \quad (10)$$

$$\text{Arcilla: } \frac{\text{lectura corregida del hidrómetro (2h)}}{\text{Peso de muestra}} \times 100 \quad (11)$$

$$\text{Limo: } 100 - (\text{Arena} + \text{Arcilla}) \quad (12)$$

**Donde:**

Material en suspensión: (%)

Arena, arcilla y limo: (%)

Peso de muestra: (g)

**3.6.4. Consistencia (Adhesividad y Plasticidad)**

Ambas pruebas se realizaron en campo como se especifica en el manual de la (FAO, 2009), en la cual se sigue el procedimiento tomando muestras en cada parcela para su debida clasificación, estas pruebas se realizaron antes e inmediatamente después de mecanizar. En la Figura 14, se muestra de manera ilustrativa el procedimiento que se llevó a cabo para la prueba de campo de plasticidad; en cada punto de muestreo en donde se extrajo una pequeña muestra de suelo para la formación del cordón y su posible ruptura al doblarlo.



Figura 14. Prueba de campo de plasticidad y adhesividad

**3.6.5. Densidad aparente**

Para determinar la densidad aparente se realizaron muestreos en cilindros metálicos en el área de estudio, estas fueron secadas en el horno a 105°C por 24 horas, posteriormente fueron pesadas y volumen del cilindro que contenía la muestra fue calculado. Seguidamente

se obtuvo el valor con la siguiente fórmula obtenida de (Villalobos-Barquero & Meza-Montoya, 2019):

$$Dap = \frac{Pss}{V} \quad (13)$$

**Donde:**

Dap: Densidad aparente (g/cm<sup>3</sup>)

Pss: Peso del suelo seco (g)

V: Volumen del cilindro (cm<sup>3</sup>)

### 3.6.6. Materia Orgánica

El valor correspondiente a la materia orgánica se obtuvo mediante un muestreo representativo de cada parcela según su tratamiento, estas muestras disturbadas fueron secadas al horno a 105°C por 24 horas, posteriormente se macera la muestra de suelo y en un crisol previamente pesado en el cual se colocaron muestras de 40g (3 repeticiones para cada punto). Finalmente, las muestras se calientan en una estufa en un promedio de 450°C por 4 horas para ser pesadas y obtener el valor con la siguiente ecuación:

$$MO = \left( \frac{P_{105} - P_{450}}{P_{450} - P_{crisol}} \right) \cdot 100 \quad (14)$$

Donde:

MO: Materia orgánica (%)

P<sub>105</sub>: Peso de muestra de suelo secada a 105°C (g)

P<sub>450</sub>: Peso de muestra de suelo secada a 450°C (g)

P<sub>crisol</sub>: Peso del crisol (g)

### 3.6.7. Humedad volumétrica

La capacidad de campo se determinó utilizando ollas de presión en el Laboratorio de Suelos de la Escuela de Ingeniería Agrícola a partir de muestreos previos a la mecanización. Para determinar la humedad volumétrica contenida en el suelo se realizaron pruebas

simultáneas durante la medición de valores tales como resistencia a la penetración y resistencia al corte; estas se efectuaron mediante el uso de un equipo llamado MiniTrase el cual utiliza la reflectometría en el dominio del tiempo (TDR) para medir el contenido volumétrico de agua de los suelos y otros húmedos. El MiniTrase TDR cuenta con una sonda enterrable la cual permite enviar los datos recolectados a un dispositivo Android para ser posteriormente analizados. Como limitaciones se identificaron el funcionamiento con un único sistema operativo, en este caso con sistemas Android y la duración de la batería, ya que debe ser cargado nuevamente después de cada uso o de otra forma genera errores en la medición. Este equipo se muestra a continuación en la Figura 15:



Figura 15. MiniTrase TDR en el área experimental

Cabe mencionar, que el equipo fue calibrado de acuerdo con el suelo del terreno en estudio, para ello se tomó simultáneamente lecturas con el MiniTrase y muestras de suelo para determinar la humedad gravimétrica en el laboratorio de suelos con el fin de elaborar una curva de mejor ajuste que correlacione ambos datos y realizar la corrección de los suministrados por el equipo.

### **3.7. Profundidad de labranza**

La profundidad de labranza se determinó directamente en el área experimental; el proceso consistió en introducir un perfilómetro construido de 23 varillas las cuales se insertaron en sectores de la parcela una vez finalizada la mecanización y así medir la distancia en la que profundizó el implemento; finalmente se generó un perfil comparativo

entre velocidades bajo el mismo tratamiento, el diagrama del perfilómetro se muestra en la Figura 16.

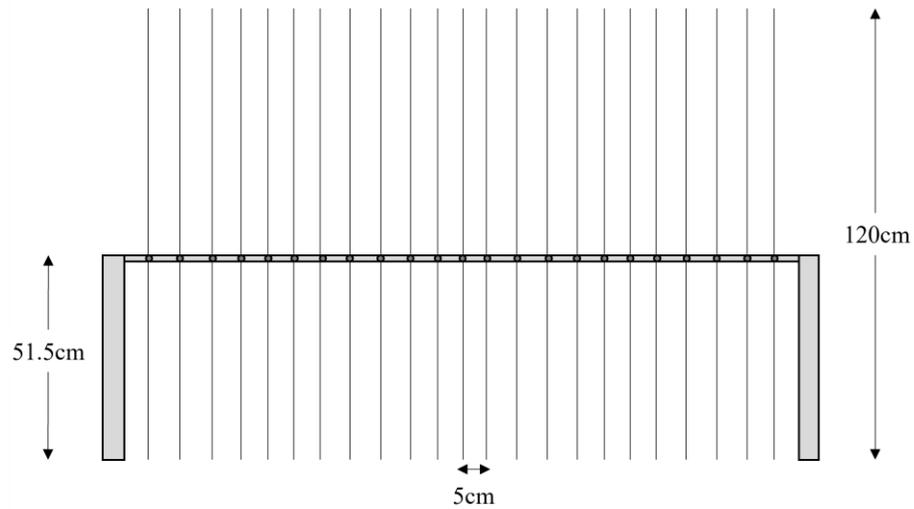


Figura 16. Diagrama de perfilómetro de varillas

### 3.8. Análisis estadístico de los datos

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de uno y dos factores con un  $\alpha=0.05$  es decir 95% de confianza en el programa de herramientas estadísticas Minitab, para cada análisis se especificaron los factores, en el caso del análisis de un factor (parcela) y para el análisis de dos factores (velocidad alta o baja y tratamiento realizado). Para concluir, con los datos arrojados por la aplicación se determinó si existían diferencias significativas entre las variables de respuesta y los factores involucrados en el experimento para finalmente analizar cuál tratamiento posee beneficios en la calidad de labranza.

### 3.9. Análisis económico

Se determinó el costo que incurre la utilización de cada tratamiento en el área de una hectárea; con información brindada de parte del Centro Agrícola Cantonal de Oreamuno, se realizó un cuadro comparativo del costo que incurriría el uso de la maquinaria agrícola según el tratamiento aplicado. El costo de la maquinaria agrícola para enero del año 2022 es de ₡14.000,00 la hora, equivalente a 21.83 USD, el cual incluye el tractor, el operario y el

implemento requerido. Se calculó la velocidad de laboreo a partir de la velocidad de avance del tractor con la siguiente ecuación:

$$V_{labranza} = \frac{(V * Ancho) * 3600}{10000} \quad (15)$$

Donde:

$V_{labranza}$ : Velocidad de laboreo (ha/h)

V: velocidad de avance del tractor (m/s)

Ancho: Ancho de trabajo del implemento (m)

Finalmente con la velocidad de laboreo es posible determinar las horas que se consumen en una hectárea con el equipo agrícola y por ende su costo monetario por tratamiento.

## **4. RESULTADOS**

#### 4.1. Condiciones del terreno

Con la herramienta “Terrain Profile” se determinó la pendiente promedio de tres secciones tanto transversal como longitudinal del terreno en estudio. La pendiente transversal del terreno es de 10.75% y el valor longitudinal corresponde a 18.25%. Los gráficos arrojados por la herramienta de sistema de información geográfica QGIS se muestran en la sección 8.1 de Anexos de la Figura 20 a la 25.

#### 4.2. Variables operativas

Una vez procesados los datos del campo se logró determinar las condiciones en las que se operó cada tratamiento agrícola, estos datos se muestran a continuación.

##### 4.2.1. Velocidad de avance

Se determinó el promedio y desviación estándar de la velocidad de avance del tractor agrícola con el implemento respectivo para cada tratamiento, esto se muestra en el Cuadro 5. Con respecto a la velocidad indicada en el manual de operación, todos los tratamientos se encuentran ligeramente por debajo a la velocidad recomendada.

Cuadro 5. Velocidades de avance promedio utilizadas en los tratamientos de prueba

Tratamiento	Velocidad baja (km/h)	Velocidad alta (km/h)
A	1.04 ± 0.08	1.34 ± 0.11
B	0.23 ± 0.00	0.35 ± 0.01
C	1.34 ± 0.05	2.02 ± 0.10

##### 4.2.2. Patinaje

Durante las pruebas realizadas se determinó el patinaje para cada tratamiento a dos velocidades, esto se resume en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Valores de patinaje según el tratamiento y velocidad utilizada

Tratamiento	Velocidad	Patinaje llanta trasera [%]	Patinaje llanta delantera [%]
A	Baja	10.96	15.96
		24.66	25.85
	Alta	24.66	36.97
		34.71	45.19
B	Baja	-8.82	-5.05
		-8.82	-5.05
	Alta	-8.82	-5.05
		-8.82	-5.05
C	Baja	-8.82	-5.05
		-8.82	-5.05
	Alta	-8.82	3.03
		-8.82	3.03
C	Baja	-8.82	-5.05
		-8.82	3.03
	Alta	-8.82	3.03
		-8.82	3.03
A	Baja	24.66	25.85
		10.96	25.85
	Alta	42.39	36.97
		24.66	39.97
B	Baja	-8.82	3.03
		-8.82	-5.05
	Alta	-8.82	-5.05
		-8.82	-5.05

Se observa un comportamiento de patinaje superior en las pruebas que se aplicó el tratamiento A, especialmente a velocidad alta superando el 15% de valor máximo mencionado en la literatura. Por otro lado, tanto los tratamientos B como C, tienen mayormente derrape o patinaje con valores menores al 5%. De una manera visual, el Anexo 8.2 en la Figura 26, se observa un gráfico de barras con los valores respectivos.

#### 4.2.3. Potencia

De acuerdo con los datos recolectados en el campo, fue posible determinar la potencia promedio necesaria para romper el suelo en el momento que ingresa el implemento, esto se muestra en el Cuadro 7. Se determinó una mayor potencia en el tratamiento C en ambas

condiciones de velocidad, mientras que el tratamiento B fue el tratamiento con menor demanda.

Cuadro 7. Valores promedio y desviación estándar para la potencia según tratamiento

Velocidad	Tratamiento	Potencia (kW)
Baja	A	4.42 ± 2.25 <sup>A</sup>
	B	1.17 ± 0.69 <sup>A</sup>
	C	5.87 ± 2.76 <sup>A</sup>
Alta	A	8.49 ± 4.16 <sup>B</sup>
	B	1.75 ± 0.92 <sup>B</sup>
	C	9.94 ± 3.33 <sup>B</sup>

\*Para cada tratamiento, letras iguales no presentan diferencias estadísticamente significativas

Según los resultados del ANOVA, se tienen diferencias significativas entre las medias de los tres tratamientos, para cada uno a velocidades altas, la demanda de potencia siempre es mayor; en el Anexo 8.3 se muestra en las Figura 27, 28 y 29, información adicional sobre los valores de potencia requerida.

#### 4.3. Propiedades mecánicas

Como resultado de las mediciones de las características mecánicas del suelo antes de realizar la mecanización, se obtienen la medias y desviación estándar respectiva de la resistencia a la penetración, resistencia al corte y humedad volumétrica en cada parcela, mostradas en el Cuadro 8.

Cuadro 8. Valores promedios y desviación estándar para RP, RC y HV en función del tipo tratamiento, antes de mecanizar

Parcela	RP* (MPa)	RC* (kPa)	HV* (%)
1	1.22 ± 0.48 <sup>B</sup>	0.09 ± 0.03 <sup>A</sup>	31.89 ± 11.13 <sup>C</sup>
2	1.08 ± 0.17 <sup>B</sup>	0.09 ± 0.05 <sup>A</sup>	49.83 ± 12.48 <sup>BC</sup>
3	0.87 ± 0.28 <sup>B</sup>	0.05 ± 0.02 <sup>A</sup>	48.27 ± 10.12 <sup>BC</sup>
4	1.11 ± 0.43 <sup>B</sup>	0.07 ± 0.06 <sup>A</sup>	42.86 ± 12.32 <sup>BC</sup>
5	1.09 ± 0.34 <sup>B</sup>	0.06 ± 0.03 <sup>A</sup>	37.33 ± 12.11 <sup>C</sup>
6	1.06 ± 0.48 <sup>B</sup>	0.07 ± 0.04 <sup>A</sup>	60.55 ± 5.71 <sup>AB</sup>
7	1.96 ± 0.47 <sup>A</sup>	0.10 ± 0.04 <sup>A</sup>	70.81 ± 13.34 <sup>A</sup>

\*Para cada propiedad, letras iguales no presentan diferencias estadísticamente significativas

Como parte de los resultados del ANOVA, se muestran gráficas de caja para la resistencia a la penetración, resistencia al corte y humedad volumétrica antes de mecanizar en la sección 8.4 de Anexos, Figuras 30, 31 y 32.

Con respecto a RP, la parcela 7 presenta diferencias significativas entre las medias de los valores con respecto al resto de parcelas. Por otro lado, para el parámetro de RC no se presentan diferencias significativas entre parcelas; finalmente HV presenta diferencias significativas entre parcelas, esto se debe a que las condiciones iniciales del terreno, había sectores en los que la cobertura vegetal era mayor, por lo tanto se presentó una mayor retención de humedad en ciertos puntos de muestreo.

Después de mecanizar, se determinan los valores de resistencia a la penetración, resistencia al corte y humedad volumétrica para cada parcela, esta vez con su tratamiento respectivo y velocidad utilizada, como parte de los resultados del ANOVA se muestran gráficas de caja en el Anexo 8.5 de la Figura 33 a la Figura 44.

Los valores promedio y desviación estándar respectiva en un periodo de cuatro semanas de muestreo se muestran a continuación en el Cuadro 9.

Cuadro 9. Valores promedios y desviación estándar de la RP, RC y HV en función al tratamiento y velocidad de la mecanización

Semana	Tratamiento	Velocidad	RP (MPa)	RC (kPa)	HV (%)
1	A	Baja	0.58 ± 0.35	0.03 ± 0.02	34.39 ± 17.17
	A	Alta	0.75 ± 0.29	0.05 ± 0.01	58.54 ± 15.49
	B	Baja	0.50 ± 0.37	0.03 ± 0.02	38.09 ± 17.08
	B	Alta	0.37 ± 0.20	0.03 ± 0.02	35.29 ± 15.08
	C	Baja	0.89 ± 0.57	0.05 ± 0.03	21.57 ± 12.10
	C	Alta	0.99 ± 0.53	0.06 ± 0.02	52.59 ± 18.19
2	A	Baja	1.07 ± 0.43	0.05 ± 0.01	51.48 ± 25.69
	A	Alta	0.97 ± 0.53	0.06 ± 0.02	59.18 ± 21.53
	B	Baja	0.57 ± 0.16	0.03 ± 0.02	39.87 ± 18.57
	B	Alta	0.56 ± 0.20	0.03 ± 0.02	39.83 ± 22.17
	C	Baja	1.26 ± 0.80	0.05 ± 0.03	47.27 ± 22.58
	C	Alta	0.94 ± 0.52	0.06 ± 0.02	70.13 ± 15.00
3	A	Baja	1.12 ± 0.25	0.05 ± 0.02	37.31 ± 22.73
	A	Alta	1.47 ± 0.62	0.05 ± 0.03	48.95 ± 25.93
	B	Baja	0.74 ± 0.38	0.03 ± 0.02	40.57 ± 20.18
	B	Alta	0.61 ± 0.35	0.04 ± 0.02	44.27 ± 9.99
	C	Baja	1.76 ± 0.40	0.05 ± 0.02	27.84 ± 15.50
	C	Alta	0.93 ± 0.56	0.06 ± 0.03	57.72 ± 17.45
4	A	Baja	1.44 ± 0.53	0.03 ± 0.02	13.22 ± 2.52
	A	Alta	1.81 ± 0.50	0.07 ± 0.05	27.26 ± 15.13
	B	Baja	1.14 ± 0.63	0.03 ± 0.02	27.19 ± 9.68
	B	Alta	1.25 ± 0.41	0.03 ± 0.01	27.55 ± 13.97
	C	Baja	1.29 ± 0.65	0.05 ± 0.02	20.11 ± 12.66
	C	Alta	1.34 ± 0.34	0.06 ± 0.01	23.46 ± 13.33

La RP en la primera semana de recolección de datos no presenta diferencias significativas en las medias entre las velocidades utilizadas. Sin embargo, si existen diferencias significativas entre las medias de RP entre tratamientos, específicamente a velocidades altas entre el tratamiento B y C.

Para la segunda semana, el comportamiento de las medias de RP no posee diferencias significativas entre parcelas con respecto a la velocidad de prueba. Por otro lado, se siguen presentando diferencias significativas entre las medias de RP entre tratamientos, específicamente entre A y B a velocidades bajas.

En la tercera semana las medias de RP no presentan diferencias significativas entre las velocidades utilizadas en la mecanización. Por otra parte, las medias de RP entre las parcelas si presentan diferencias significativas, específicamente entre los tratamientos B y C, A y C a velocidades bajas, y en velocidades altas entre los tratamientos A y B.

Para la última y cuarta semana de medición no se detectaron diferencias significativas tanto como en las velocidades utilizadas y los tratamientos entre parcelas para los valores obtenidos de RP.

De igual manera, RC fue determinada por un periodo de 4 semanas luego de haber realizado la mecanización agrícola en cada parcela. En la primera semana, se determinaron diferencias significativas en las medias de los valores de RC entre las velocidades utilizadas específicamente en las parcelas donde se aplicó el tratamiento A, en el cual a velocidades altas, RC tiende a ser más alta que con velocidades bajas. De igual manera, existen diferencias significativas en las medias entre los tratamientos B y C a velocidades altas.

Para la segunda semana después de haber realizado la mecanización, no se detectan diferencias significativas entre las medias de RC con respecto a las velocidades de prueba; para los tratamientos si existen diferencias significativas a velocidades bajas entre los tratamientos A y B.

Seguidamente, el comportamiento de las medias de la tercera semana para RC es de igual manera, sin diferencias significativas entre las velocidades utilizadas pero con diferencias entre los tratamientos B y C para velocidades bajas. Finalmente para la última semana de prueba, no existen diferencias significativas entre las velocidades utilizadas y tampoco entre tratamientos.

El último y tercer parámetro determinado en el campo junto a RP y RC, corresponde a HV; cabe mencionar que junto a las pruebas de capacidad de campo en el terreno se determinó que la mecanización se realizó dentro del rango friable.

La primera de cuatro semanas de medición presenta diferencias significativas entre las medias HV con respecto a las velocidades utilizadas, específicamente el tratamiento C presenta valores más altos en el sector donde se mecanizó a velocidad alta. Para la siguiente semana, las medias de HV no presentan diferencias con respecto a la velocidad utilizada, sin

embargo si se presentan diferencias entre los tratamientos, específicamente a velocidades altas entre el tratamiento B y C, siendo este último con un promedio de valores más alto.

Para la tercera semana se presentan nuevamente diferencias significativas entre las medias de HV con respecto a la velocidad utilizada, específicamente el tratamiento C que corresponde al tratamiento con el promedio más elevado; no se presentan diferencias significativas entre tratamientos. Finalmente, la cuarta semana presenta diferencias significativas en las medias HV tanto en las velocidades utilizadas (tratamiento A) y los tratamientos (a velocidades lentas entre A y B).

Por otra parte, la parcela 7 correspondiente al tratamiento D, cuyo comportamiento se muestra en el Cuadro 10.

Cuadro 10. Valores promedios y desviación estándar para RP, RC y HV de la parcela 7

Mecanización	Tratamiento	RP (MPa)	RC (kPa)	HV (%)
Antes	D	1.20 ± 0.49 <sup>A</sup>	0.08 ± 0.04 <sup>A</sup>	48.79 ± 16.31 <sup>A</sup>
Después	D	2.21 ± 1.10 <sup>B</sup>	0.11 ± 0.02 <sup>B</sup>	33.98 ± 16.50 <sup>B</sup>

\*Para cada propiedad, letras iguales no presentan diferencias estadísticamente significativas

Según los resultados del ANOVA, se determinaron diferencias significativas para la resistencia a la penetración, resistencia al corte y humedad volumétrica entre el periodo de antes y después de mecanizar para las parcela 7 con un aumento visible para los tres parámetros, a pesar de que no hubo mecanización en esta parcela y su estado permaneció igual a lo largo de la prueba. Como parte de los resultados, se obtuvo gráficas de caja y se muestran en el Anexo 8.6 con las Figuras 45, 46 y 47.

#### 4.4. Textura

De acuerdo con el triángulo textural y muestras recolectadas procesadas en el Laboratorio de Suelos de la Escuela de Ingeniería Agrícola, el área experimental de prácticas posee una textura promedio arcillosa, los valores obtenidos se muestran en el Cuadro 11.

Cuadro 11. Fracciones de partículas en muestreos de parcelas

Nº Parcela	Arena (%)	Arcilla (%)	Limo (%)	Textura
1	24.26	48.24	27.50	Arcilloso
2	14.26	70.74	15.00	Arcilloso
3	11.76	68.24	20.00	Arcilloso
4	39.26	38.24	22.50	Franco-Arcilloso
5	28.36	45.74	25.90	Arcilloso
6	34.26	43.24	22.50	Arcilloso
7	24.26	53.24	22.50	Arcilloso

#### 4.5. Consistencia

De acuerdo con las pruebas manuales realizadas en campo, las parcelas que presentaron mayor adherencia entre las partículas de suelo corresponden a la 3, 5 y 6, correspondientes a los tratamientos C, A y B. Por otro lado, la parcela 3 a una velocidad alta presenta una condición del suelo muy plástica según la literatura mencionada, mientras que parcelas como la 1, 4, 6 y 7 presentan una condición no plástica. El resumen de esta prueba se muestra a continuación en el Cuadro 12.

Cuadro 12. Consistencia del suelo según tratamiento aplicado

Parcela	Tratamiento	Velocidad	Adhesividad	Plasticidad
1	A	Baja	NST	NPL
		Alta	SST	SPL
2	B	Baja	SST	PL
		Alta	SST	SPL
3	C	Baja	SST	PL
		Alta	ST	VPL
4	C	Baja	NST	NPL
		Alta	SST	NPL
5	A	Baja	ST	PL
		Alta	SST	SPL
6	B	Baja	NST	NPL
		Alta	VST	PL
7	D	N/A	NST	NPL
		N/A	NST	NPL

#### 4.6.Densidad aparente

Según los resultados del ANOVA, la densidad aparente en el área experimental se mantiene entre los valores menores a 1.3 g/cm<sup>3</sup> que se traducen a un sistema poroso favorable para las raíces de las plantas. En el Cuadro 13 se muestra el promedio con su desviación estándar respectiva para cada parcela antes de realizarse la mecanización.

Cuadro 13. Densidad aparente para los tratamientos

Mecanización	Parcela	Tratamiento	Da (g/cm <sup>3</sup> )
Antes	1	A	0.94 ± 0.06 <sup>A</sup>
	2	B	0.94 ± 0.09 <sup>A</sup>
	3	C	0.96 ± 0.10 <sup>A</sup>
	4	C	0.92 ± 0.08 <sup>A</sup>
	5	A	0.71 ± 0.14 <sup>A</sup>
	6	B	0.77 ± 0.26 <sup>A</sup>
	7	D	0.94 ± 0.14 <sup>A</sup>
Después	1	A	0.99 ± 0.06 <sup>A</sup>
	2	B	0.72 ± 0.11 <sup>C</sup>
	3	C	0.79 ± 0.11 <sup>ABC</sup>
	4	C	0.86 ± 0.06 <sup>ABC</sup>
	5	A	0.76 ± 0.14 <sup>BC</sup>
	6	B	0.85 ± 0.06 <sup>ABC</sup>
	7	D	0.96 ± 0.10 <sup>AB</sup>

\*Para cada propiedad, letras iguales no presentan diferencias estadísticamente significativas

No se determinaron diferencias significativas entre parcelas para las medias de la densidad aparente antes de mecanizar. Por otro lado, la densidad aparente después de haber realizado la mecanización si posee diferencias significativas entre las medias de las parcelas, sin embargo las parcelas 3, 4 y 6 tienen un comportamiento similar en sus medias, las cuales corresponden a los tratamientos B y C. Como parte de los resultados, se obtuvieron gráficas de caja mostradas en el Anexo 8.7 con las figuras 48 y 49.

#### 4.7.Materia orgánica

Con respecto a la propiedad de materia orgánica, se determinaron los valores promedios y desviaciones estándar respectivas, las cuales se muestran en el Cuadro 14.

Cuadro 14. Promedio y desviación estándar para MO

Mecanización	Parcela	Tratamiento	MO (%)
Antes	1	A	14.14 ± 2.74 <sup>A</sup>
	2	B	13.06 ± 4.44 <sup>A</sup>
	3	C	14.35 ± 0.51 <sup>A</sup>
	4	C	14.50 ± 0.75 <sup>B</sup>
	5	A	22.28 ± 1.64 <sup>B</sup>
	6	B	21.34 ± 0.34 <sup>B</sup>
	7	D	27.61 ± 3.10 <sup>B</sup>
Después	1	A	11.56 ± 0.37 <sup>A</sup>
	2	B	12.96 ± 2.83 <sup>B</sup>
	3	C	13.10 ± 1.45 <sup>B</sup>
	4	C	13.15 ± 1.57 <sup>BC</sup>
	5	A	18.45 ± 0.29 <sup>BC</sup>
	6	B	17.82 ± 0.99 <sup>BC</sup>
	7	D	29.23 ± 0.69 <sup>C</sup>

\*Para cada propiedad, letras iguales no presentan diferencias estadísticamente significativas

Según los resultados del ANOVA, antes de mecanizar no se determinan diferencias significativas entre las parcelas 1, 2 y 3 las cuales corresponden a los tratamientos por aplicar A, B y C, sin embargo si presentan diferencias significativas con respecto al resto de las parcelas. Una vez finalizado el proceso de mecanización, se determinaron nuevamente los valores de materia orgánica, en donde se pueden observar diferencias significativas más variables entre tratamientos. Otro aspecto a tomar en cuenta es que el valor promedio de la materia orgánica descendió después de realizar la mecanización, a excepción de la parcela 7, correspondiente al tratamiento D, que aumentó ligeramente. Los rangos de esta propiedad se visualizan en el Anexo 8.8, correspondiente a la Figuras 50 y 51.

#### 4.8. Profundidad de labranza

De acuerdo con el perfilómetro se determinaron valores promedio de la profundidad que alcanzó el implemento según el tratamiento y velocidad utilizada, estos se muestran visualmente en el Anexo 8.9 correspondiente a las Figuras 52, 53 y 54, además es posible determinar el coeficiente de uniformidad que se obtuvo en las secciones analizadas, esto se muestra a continuación en el Cuadro 15.

Cuadro 15. Valores promedio y desviación estándar para profundidad del implemento agrícola

Tratamiento	Velocidad	Profundidad (cm)	Coefficiente de uniformidad
A	Baja	$29.92 \pm 2.34^A$	0.92
	Alta	$29.95 \pm 3.21^A$	0.89
B	Baja	$33.90 \pm 3.01^A$	0.80
	Alta	$37.58 \pm 3.49^B$	0.89
C	Baja	$29.40 \pm 2.61^A$	0.91
	Alta	$22.77 \pm 5.90^B$	0.90

\*Para cada propiedad, letras iguales no presentan diferencias estadísticamente significativas

Según los resultados del ANOVA, el tratamiento A no presenta diferencias significativas entre las medias de la profundidad alcanzada por el implemento cuya uniformidad varía entre el 89% y 92% según la velocidad. Por otro lado, el tratamiento B, presenta diferencias significativas entre las medias de profundidad según la velocidad utilizada, también, se presenta un coeficiente de uniformidad en el perfil, mayor para una velocidad alta. Por último, se presentan diferencias significativas en el tratamiento C entre las medias de la profundidad, sin embargo, los coeficientes de uniformidad son cercanos ya que tienen 1% de diferencia, siendo mayor al aplicar una velocidad baja.

En la Figura 17, se puede observar el perfil generado por el tratamiento A que corresponde al implemento de cincel, a dos velocidades, cuyos valores son cercanos a la profundidad máxima a la que puede operar pero nunca superándola.

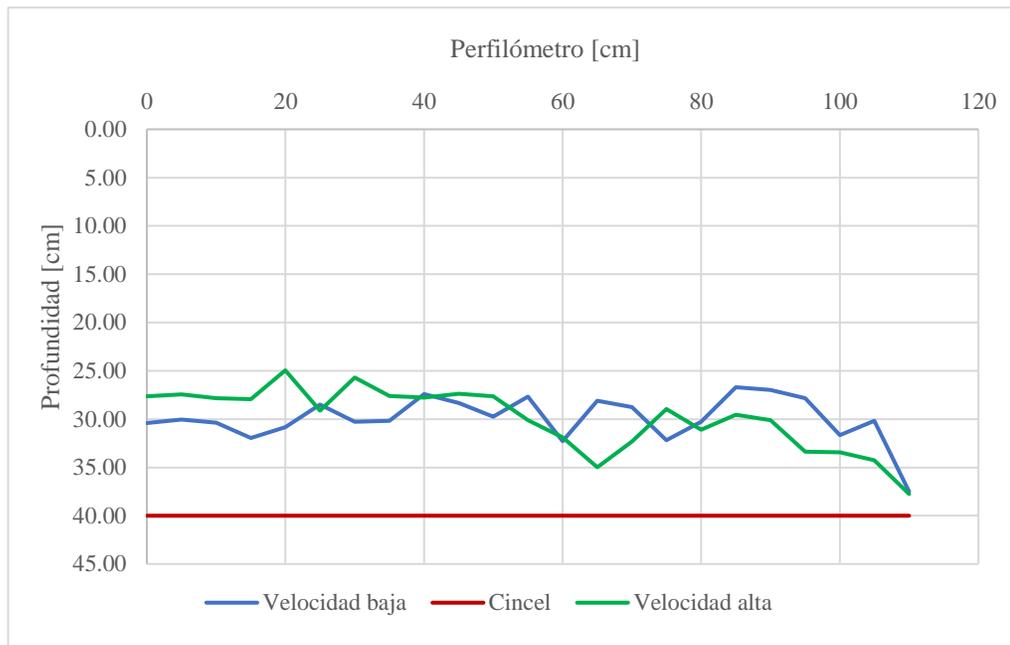


Figura 17. Perfil de labranza con implemento de cinzel

Seguidamente, en la Figura 18, el perfil correspondiente al tratamiento B (palín), muestra que el implemento profundizó más de lo que el implemento opera normalmente, superando este valor de 30cm la mayoría del tiempo.

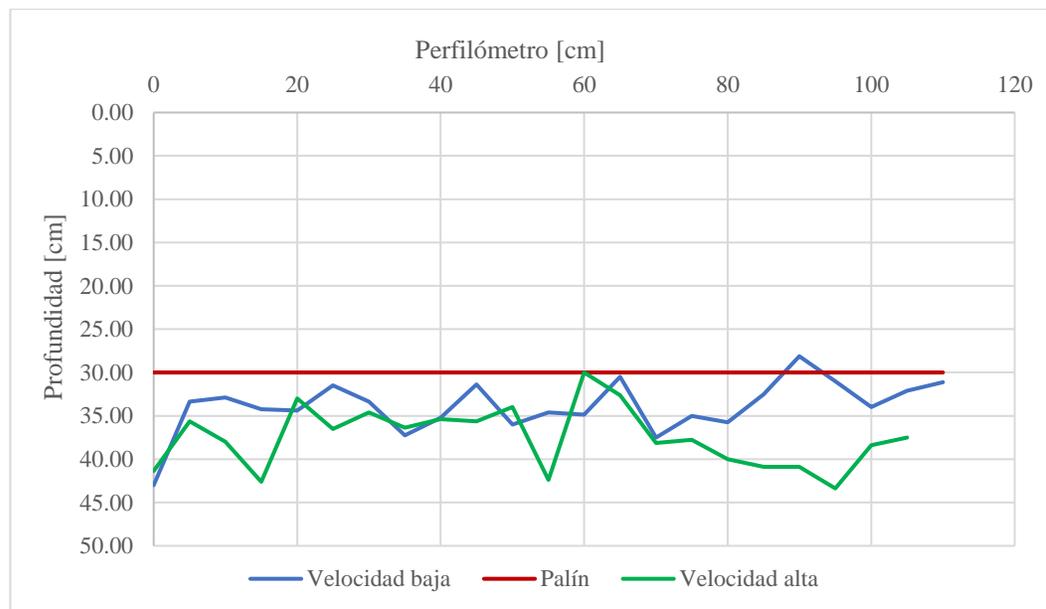


Figura 18. Perfil de labranza con implemento de palín

Finalmente, se muestra el perfil de labranza correspondiente al tratamiento C (cincel + rotador) en la Figura 19, cuyo comportamiento se asemeja al tratamiento B, ya que la mayoría de secciones traspasa el valor al que el implemento opera (20cm).

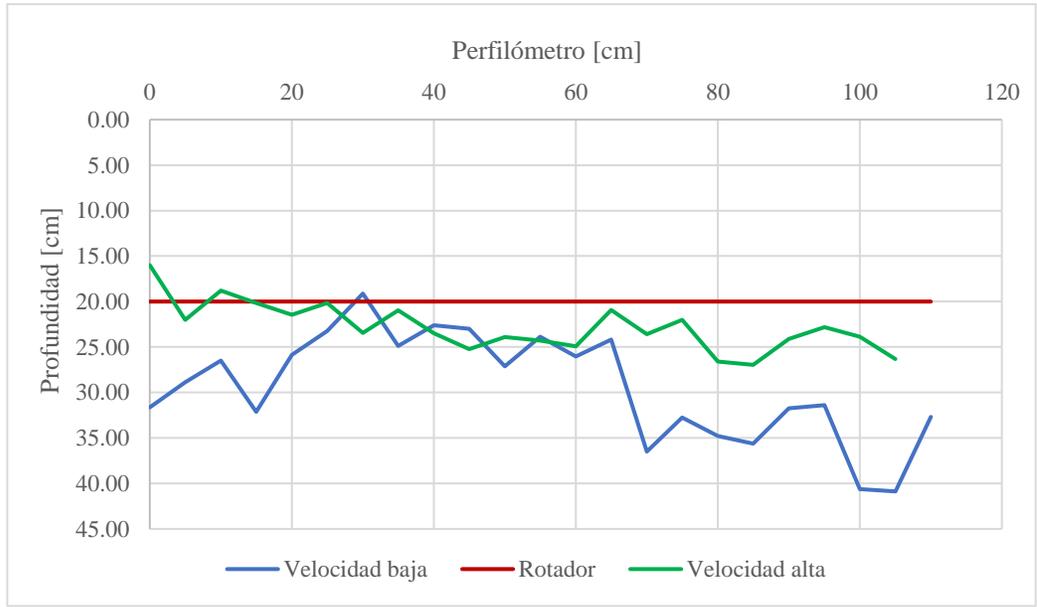


Figura 19. Perfil de labranza con implemento de cincel + rotador

#### 4.9. Análisis económico

En el Cuadro 16, se muestra el costo total obtenido por hectárea según el tratamiento que se le aplique y su duración a velocidad baja y alta. El costo se expresa en dólares (USD), utilizando un tipo de cambio de 641.33 colones/USD.

Cuadro 16. Costo por hectárea según tratamiento a utilizar

Parcela	Tratamiento	Horas de mecanización por ha a velocidad baja (h/ha)	Costo por ha en velocidad baja	Horas de mecanización por ha a velocidad alta (h/ha)	Costo por ha en velocidad alta
1	A	10.22	\$223.20	7.29	\$159.15
2	B	21.63	\$472.18	14.89	\$325.04
3	C	14.54	\$317.41	10.83	\$236.34
4	C	14.87	\$324.57	11.00	\$240.21
5	A	9.26	\$202.13	7.94	\$173.28
6	B	22.25	\$485.80	14.81	\$323.29

Se determinó un mayor tiempo de mecanización en el tratamiento B, por ende un mayor costo monetario. Además, el tratamiento más económico por hectárea y con menor tiempo de mecanización corresponde a el tratamiento A.

#### 4.10. Recopilación final

En el cuadro 17, se muestra una comparación final de los tratamientos según la velocidad utilizada y los beneficios que presentan para cada variable operativa y característica mecánica del suelo, esta recopilación final se presenta en una escala del 1 al 3, siendo 1 un beneficio menor y 3 un beneficio mayor.

Cuadro 17. Recopilación de condiciones favorables según el tratamiento a aplicar

Variable / Tratamiento		Velocidad Baja			Velocidad Alta		
		A	B	C	A	B	C
Operativas	Patinaje	2	1	1	1	1	1
	Potencia	2	3	1	1	3	2
Mecánicas del suelo	RP (MPa)	2	3	1	1	3	2
	RC (kPa)	2	3	1	1	2	1
	HV (%)	2	2	2	3	2	3
	Da (g/cm <sup>3</sup> )	1	3	2	1	3	2
	MO (%)	3	3	3	3	3	3
Perfil del labranza	Uniformidad	3	1	3	2	2	3
Costo de operación	Hora por hectárea	2	1	2	3	2	2
Sumatoria total		19	20	16	16	21	19

La sumatoria total indica los puntos asignados para cada tratamiento según la velocidad aplicada, para el tratamiento A la velocidad baja presenta mayores beneficios en operación como lo es el patinaje y menor demanda de potencia; en variables mecánicas del suelo la resistencia del suelo es menor y también presenta una mayor uniformidad de labranza con un costo monetario menor.

Por otro lado, el tratamiento B, ya sea en condiciones de velocidad alta o baja, los beneficios son muy similares, la diferencia radica principalmente en un perfil de labranza más uniforme a velocidades altas y un costo monetario menor.

Finalmente, el tratamiento C, presenta el beneficio de una menor resistencia a la penetración y mayor retención de humedad si su operación es a una mayor velocidad, sin

embargo, la demanda de potencia es mayor, finalmente, las demás variables se comportan de manera similar en los dos escenarios.

#### **4.11. Impacto social, ambiental y político**

El trabajo de investigación presenta un gran impacto en diversas áreas de manera que se convierte en un aporte a la comunidad científica que abren el paso a futuras investigaciones con objetivos similares y así desarrollar información que contribuya a una mejor conservación de los suelos, uso eficiente de la maquinaria agrícola, reducción de costos y mayor producción de alimentos según la problemática que se mencionó anteriormente. De esta manera, el impacto que se da es positivo en todos los aspectos, ya que permite continuar trabajando para ampliar la investigación en la Ingeniería Agrícola y todas sus ramas, mediante la representación de la institución a nivel educativo, además de beneficiar a la comunidad productora con nuevas recomendaciones y al medio ambiente por un trabajo mecanizado sustentable.

## **5. CONCLUSIONES**

Se determinaron beneficios en la calidad de labranza con respecto a las variables operativas, como lo es el patinaje agrícola, donde para velocidades bajas, el tratamiento agrícola con cincel presenta valores cercanos al rango permisible, sin embargo para el tratamiento de palín aun siendo utilizado en velocidades bajas presenta derrape, que según las pruebas de consistencia al suelo la adherencia baja, por último el tratamiento agrícola de cincel más rotador al utilizar velocidades altas, el derrape disminuye en el eje delantero. Además, se determinó que la demanda de potencia siempre aumenta en condiciones de velocidad alta independientemente del tratamiento agrícola que se utilice.

Considerando las características mecánicas, la resistencia a la penetración, en el tratamiento de mecanización con palín tiene un comportamiento de valores inferiores a los otros tratamientos sin importar la velocidad que se utilice, esto se traduce en un beneficio en futuras implementaciones de cultivos debido a la facilidad de crecimiento de raíces por su mayor grado de aireación.

La resistencia al corte presenta un comportamiento beneficioso para el tratamiento de mecanización con palín, ya que a velocidad alta o baja sus valores son bajos, lo que indica una menor resistencia para romper el suelo de parte de la maquinaria agrícola, por lo tanto una menor demanda de potencia; esto respalda los valores obtenidos de potencia requerida, siendo el tratamiento de mecanización de palín con menor demanda y el tratamiento de cincel más rotador, con mayor.

La densidad aparente después de la mecanización se comporta de manera favorable en las parcelas 2, 5 y 3 que corresponden a los tratamientos agrícolas de palín, cincel y cincel más rotador respectivamente, esto quiere decir que existe una porosidad superior en el suelo, sin embargo para las parcelas 1 y 7 los valores promedio son los más elevados lo que indica que pueden presentar eventualmente algún grado de compactación y desfavorecer al crecimiento radicular de los cultivos.

Además, se determinó que la humedad volumétrica en el tratamiento de palín posee valores similares ya sea en velocidad alta o baja lo que indica un mayor contenido de humedad, mayor retención y eficiencia en caso de necesitar la incorporación de riego.

A lo largo del experimento se identificó que la parcela sin tratamiento agrícola incrementó poco a poco la resistencia tanto a la penetración como de corte, mientras que la

humedad volumétrica disminuyó ligeramente; a pesar de no tener intervención por ningún tratamiento, se puede concluir que el fenómeno de incremento de variables se asemeja a el concepto que se conoce como siembra directa, cuyas características se mencionan en la literatura y provocan incrementos naturales en estos valores.

Se determinó que los valores elevados que se presentan en la materia orgánica tanto antes como después de la mecanización son por las condiciones iniciales del terreno, en donde nunca antes se ha hecho mecanización agrícola, desechos orgánicos han sido depositados en el área experimental por varios años y gran cantidad de flora yacía al inicio del estudio.

La profundidad de labranza presentó una uniformidad promedio mayor al 89% según la velocidad aplicada, sin embargo para el tratamiento de mecanización con cincel, se utilice velocidad alta o baja la diferencia en la uniformidad es imperceptible.

Según el interés del productor y la variable que considere de mayor importancia presente en el área agrícola, así será su costo, el tratamiento de mecanización con cincel, presenta en general un menor tiempo de mecanización por hectárea, por lo tanto un menor costo, por otro lado, el tratamiento con palín en el cual se mencionan numerosos beneficios es el tratamiento con mayor costo económico por hectárea sea a velocidad alta o baja.

## **6. RECOMENDACIONES**

Se recomienda una velocidad de operación alta si se desea obtener una mayor uniformidad en la profundidad de labranza, esto para los tratamientos con implementos agrícolas de palín y cincel más rotador, sin embargo, a velocidades bajas, los valores siguen siendo beneficiosos, por otro lado, el tratamiento con el implemento de cincel presenta grandes similitudes en el perfil, sin importar su velocidad de operación.

La velocidad de operación baja es recomendable si se busca obtener índices menores en variables como lo son la resistencia a la penetración y al corte, esto en tratamientos agrícolas con implementos de cincel y cincel más rotador. Al contrario, el tratamiento con palín presenta valores óptimos ya sea mecanizada el área a velocidad alta o baja.

Si se busca una mayor retención de humedad que favorezca áreas agrícolas con necesidades hídricas en épocas específicas, la mecanización a velocidad alta en los tratamientos de mecanización con cincel y cincel más rotador es recomendable, ya que permiten aumentar los valores de humedad volumétrica en el terreno, sin embargo, la demanda de potencia incrementa así como su costo por hectárea y para el caso del tratamiento de mecanización con cincel, el patinaje tendrá valores por encima de los permisibles.

El tratamiento de mecanización con palín al ser aplicado en velocidades altas trae disminución en los índices de resistencia a la penetración, resistencia al corte y humedad volumétrica, sin embargo, estas condiciones provocan un mayor derrape y mayor costo monetario por hectárea mecanizada.

## **7. BIBLIOGRAFÍA**

- Ashburner, J., & Sims, B. (1984). *Elementos del diseño del tractor y herramientas de labranza*. San Jose, Costa Rica: Centro Interamericano de Documentación e Información Agrícola.
- Benevenuto, P. A. N., de Moraes, E. G., Souza, A. A., Vasques, I. C. F., Cardoso, D. P., Sales, F. R., ... Silva, B. M. (2020). Penetration resistance: An effective indicator for monitoring soil compaction in pastures. *Ecological Indicators*, *117*, 106647. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2020.106647>
- Bluett, C., Tullberg, J. N., McPhee, J. E., & Antille, D. L. (2019). Soil and Tillage Research: Why still focus on soil compaction? *Soil and Tillage Research*, *194*(January), 104282. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.05.028>
- Bögel, T., Osinenko, P., & Herlitzius, T. (2016). Assessment of soil roughness after tillage using spectral analysis. *Soil and Tillage Research*, *159*, 73–82. <https://doi.org/10.1016/J.STILL.2016.02.004>
- Bravo, N., Sandoval, F., Chaparro, O., Víctor, M., Cossio, G., & Félix, V. (2000). Efecto de la labranza sobre la estructura del suelo, la germinación y el desarrollo del maíz y frijol. *Terra Latinoamericana*, *18*(1), 61–69.
- Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R. E., De Deyn, G., de Goede, R., ... Brussaard, L. (2018). Soil quality – A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, *120*, 105–125. <https://doi.org/10.1016/J.SOILBIO.2018.01.030>
- Busari, M. A., Kukal, S. S., Kaur, A., Bhatt, R., & Dulazi, A. A. (2015). Conservation tillage impacts on soil, crop and the environment. *International Soil and Water Conservation Research*, *3*(2), 119–129. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2015.05.002>
- Colombi, T., Torres, L. C., Walter, A., & Keller, T. (2018). Feedbacks between soil penetration resistance, root architecture and water uptake limit water accessibility and crop growth – A vicious circle. *Science of The Total Environment*, *626*, 1026–1035. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2018.01.129>
- Ding, W., Nguyen, M. D., Salih Mohammed, A., Armaghani, D. J., Hasanipanah, M., Bui, L. Van, & Pham, B. T. (2021). A new development of ANFIS-Based Henry gas solubility optimization technique for prediction of soil shear strength. *Transportation Geotechnics*, *29*, 100579. <https://doi.org/10.1016/J.TRGEO.2021.100579>
- FAO. (2009). Guía para la descripción de suelos. *Organización de Las Naciones Unidas Para*

- La Agricultura y La Alimentación*, 3(4), 100. Retrieved from file:///C:/Users/Alina Belen Ortiz/Downloads/a0541s00 (1).pdf
- Filho, F. X. de O., Miranda, N. de O., Medeiros, J. F. de, Silva, P. C. M. da, Mesquita, F. O., & Costa, T. K. G. (2015). Management zones for subsoiling of a sugarcane field/ Zona de manejo para preparo do solo na cultura da cana-de-acucar. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 19(2), 186–194. Retrieved from <https://go.gale.com/ps/i.do?p=AONE&sw=w&issn=14154366&v=2.1&it=r&id=GALE%7CA442286367&sid=googleScholar&linkaccess=fulltext>
- Gómez-Calderón, N., Villagra-Mendoza, K., & Solorzano-Quintana, M. (2018). La labranza mecanizada y su impacto en la conservación del suelo (revisión literaria) Soil tillage and its impact on soil conservation (review). *Tecnología En Marcha*, 31(1), 170–180. <https://doi.org/10.18845/tm.v31i1.3506>
- Gómez Calderón, N., Solórzano Quintana, M., & Villagra Mendoza, K. (2017). Cuantificación de la Erosión Hídrica en Función de Diferentes Técnicas de Mecanización para Minimizar la Contaminación del Agua por Sedimentos en la Parte Alta de la Cuenca del Río Reventazón. *RepositorioTEC*, 115. Retrieved from <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/9164>
- Guerra Torralbo, J. C. (2018). *Mecánica de suelos: conceptos básicos y aplicaciones*. España.
- Guerrero, L., Restrepo, L., Rincón, C., & Camacho, H. (1981). Potencia y tracción en los tractores agrícolas. In *Instituto Colombiano Agropecuario*. Retrieved from <https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/23807>
- Gutiérrez, H., & Salazar, R. (2008). *Análisis y diseño de experimentos* (Segunda Ed). México: McGraw-Hill.
- Keller, T., Sandin, M., Colombi, T., Horn, R., & Or, D. (2019). Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. *Soil and Tillage Research*, 194(January), 104293. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104293>
- Lal, R. (2016). Soil health and carbon management. *Food and Energy Security*, 5(4), 212–222. <https://doi.org/10.1002/FES3.96>
- Lu, J., Zhang, Q., Werner, A. D., Li, Y., Jiang, S., & Tan, Z. (2020). Root-induced changes of soil hydraulic properties – A review. *Journal of Hydrology*, 589(May), 125203.

<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125203>

- Martin, E. C. ;, & Munoz, C. (2021). *Métodos para Medir la Humedad del Suelo para la Programación del Riego ¿Cuándo? Item Type text; Book*. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10150/625275>
- Martins, R. N., Fagundes Portes, M., Fialho e Moraes, H. M., Ribeiro Furtado Junior, M., Fim Rosas, J. T., & Orlando Junior, W. de A. (2021). Influence of tillage systems on soil physical properties, spectral response and yield of the bean crop. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 22, 100517. <https://doi.org/10.1016/J.RSASE.2021.100517>
- Masola, M. (2020). *Propagación lateral de la compactación por tránsito de la maquinaria agrícola: ¿Afecta la calidad del suelo, el intercambio gaseoso y la productividad de los cultivos?* 53(9), 148. Retrieved from <https://bibliotecavirtual.unl.edu.ar:8443/handle/11185/5650>
- Morales, M. E., Iocoli, G. A., Villamil, M. B., & Zabaloy, M. C. (2021). Efecto de los cultivos de cobertura invernales sobre el microbioma del suelo: revisión sistemática de la literatura. *Revista Argentina de Microbiología*. <https://doi.org/10.1016/J.RAM.2021.02.008>
- Olgún, R., & Ortúzar, M. (2015). Desarrollo e implementación de una veleta de corte a alta revolución para sondajes. *Obras y Proyectos*, (17), 89–95. <https://doi.org/10.4067/S0718-28132015000100011>
- Oliveira, P. D. De, Sato, M. K., Lima, H. V. de, Rodrigues, S., & Silva, A. P. da. (2016). Critical limits of the degree of compactness and soil penetration resistance for the soybean crop in N Brazil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 179(1), 78–87. <https://doi.org/10.1002/JPLN.201400315>
- Pérez Alvarado, T., & Campos. (2015). *Desarrollo de un Sistema de Medición de Patinaje del Tractor en la Evaluación de Implementos de Labranza*. Retrieved from <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/handle/123456789/6635>
- Perez, H. (2015). *Física General. Bachillerato*. México: GRUPO EDITORIAL PATRIA CULTURAL DE C.V.
- Pérez Vázquez, A., Leyva Trinidad, D. A., Gómez Merino, F. C., Pérez Vázquez, A., Leyva Trinidad, D. A., & Gómez Merino, F. C. (2018). Desafíos y propuestas para lograr la

- seguridad alimentaria hacia el año 2050. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(1), 175–189. <https://doi.org/10.29312/REMEXCA.V9I1.857>
- Rangeon, N., Aciar, L., Osinaga, R., Arzeno, J., & Sánchez, C. (2008). Análisis de la resistencia a la penetración y humedad de suelo como indicadores de calidad en distintos sistemas de labranza. *XXI Congreso Argentino de La Ciencia Del Suelo. Semiárido: Un Desafío Para La Ciencia Del Suelo*.
- Reis, A. S., Rodrigues, M., Alemparte Abrantes dos Santos, G. L., Mayara de Oliveira, K., Furlanetto, R. H., Teixeira Crusiol, L. G., ... Nanni, M. R. (2021). Detection of soil organic matter using hyperspectral imaging sensor combined with multivariate regression modeling procedures. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 22, 100492. <https://doi.org/10.1016/J.RSASE.2021.100492>
- Royal Eijkelpamp. (2012). ===== *User Manual User Manual*. 3304(January), 1–148.
- Rubio, A. M., & Sevilla, G. (2010). *LA DENSIDAD APARENTE EN SUELOS FORESTALES DEL PARQUE NATURAL LOS ALCORNOCALES Proyecto fin de carrera*.
- Sociedad, U. Y., Físicas, E. P., Químicas, Y., Suelo, D., Diferen-, E. N., Delgado, I. R., ... Mosquera, Q. (2020). Efecto del manejo agrícola en propiedades físicas y químicas del suelo en diferentes agroecosistemas. *Universidad y Sociedad*, 12(5), 389–398. Retrieved from <https://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus/article/view/1724>
- USDA-NRCS. (2019). Soil Health | NRCS Soils. *USDA-Natural Resources Conservation Service*. Retrieved from <https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/main/soils/health/>
- USDA. (2014). Soil Survey Field and Laboratory Methods Manual. *United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service*, (Soil Survey Investigations Report No. 51, Version 2.0), 487. Retrieved from [https://www.nrcs.usda.gov/wps/PA\\_NRCSConsumption/download?cid=stelprdb1244466&ext=pdf](https://www.nrcs.usda.gov/wps/PA_NRCSConsumption/download?cid=stelprdb1244466&ext=pdf)
- Villagra, K., Gómez, N., & Arrazate, B. (2016). COMPARACIÓN DE PATINAJE BAJO DIFERENTES TIPOS DE LABRANZA DEL SUELO - TIRE SLIP COMPARATING UNDER DIFFERENT TYPES OF SOIL XII Congreso Latinoamericano y del Caribe de Ingeniería Agrícola. *Congreso Latinoamericano y Del Caribe de Ingeniería Agrícola CLIA*, (May).

- Villalobos-Barquero, V., & Meza-Montoya, A. (2019). Impacto en la densidad aparente del suelo provocado por el tránsito de búfalos (*Bubalus bubalis*) en arrastre de madera. *Revista de Ciencias Ambientales*, 53(2), 147–155. <https://doi.org/10.15359/rca.53-2.8>
- Wolschick, N. H., Bertol, I., Barbosa, F. T., Bagio, B., & Biasiolo, L. A. (2021). Remaining effect of long-term soil tillage on plant biomass yield and water erosion in a Cambisol after transition to no-tillage. *Soil and Tillage Research*, 213, 105149. <https://doi.org/10.1016/J.STILL.2021.105149>
- Zhang, M., Lu, Y., Heitman, J., Horton, R., & Ren, T. (2017). Temporal Changes of Soil Water Retention Behavior as Affected by Wetting and Drying Following Tillage. *Soil Science Society of America Journal*, 81(6), 1288–1295. <https://doi.org/10.2136/SSSAJ2017.01.0038>

## **8. ANEXOS**

**8.1.Pendiente del terreno**

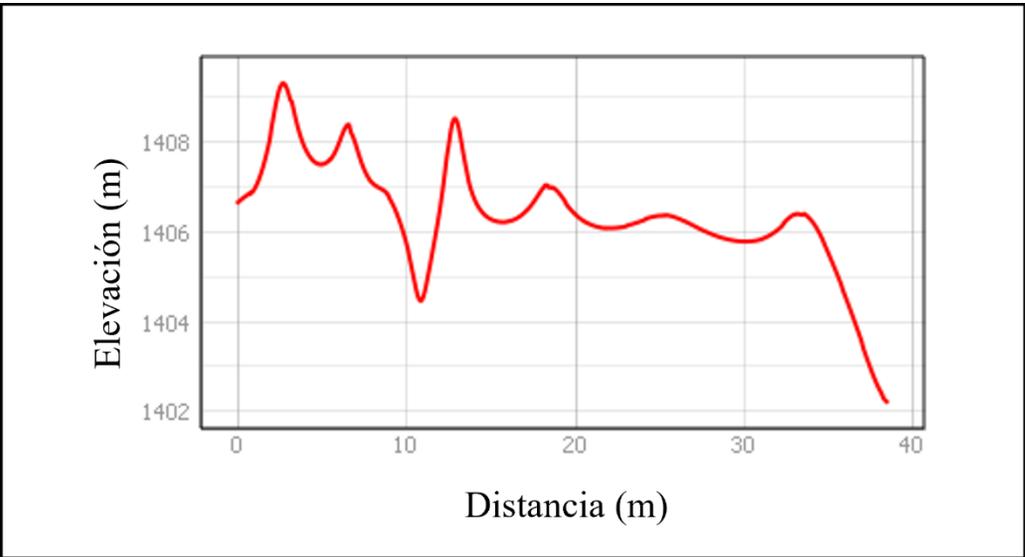


Figura 20. Gráfico de pendiente transversal I

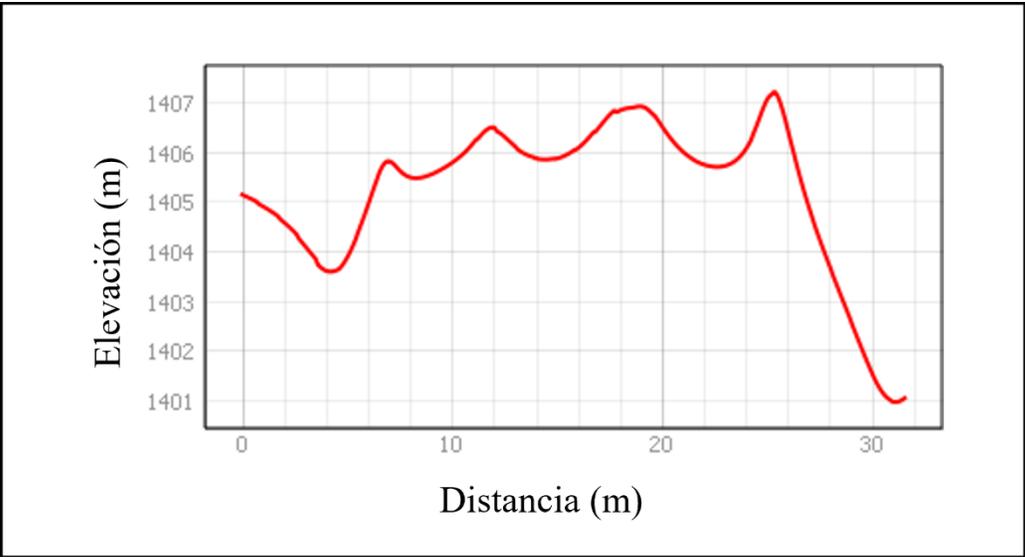


Figura 21. Gráfico de pendiente transversal II

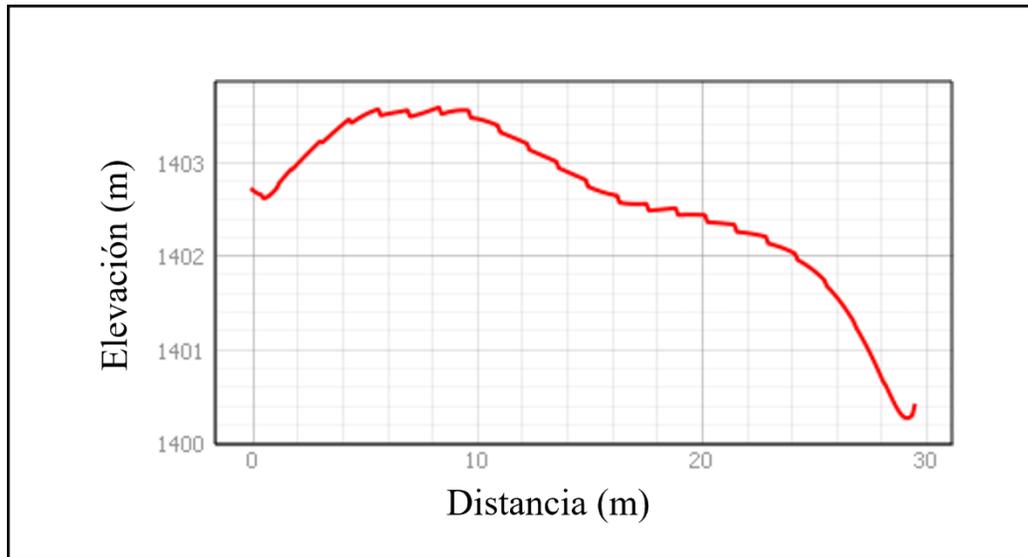


Figura 22. Gráfico de pendiente transversal III

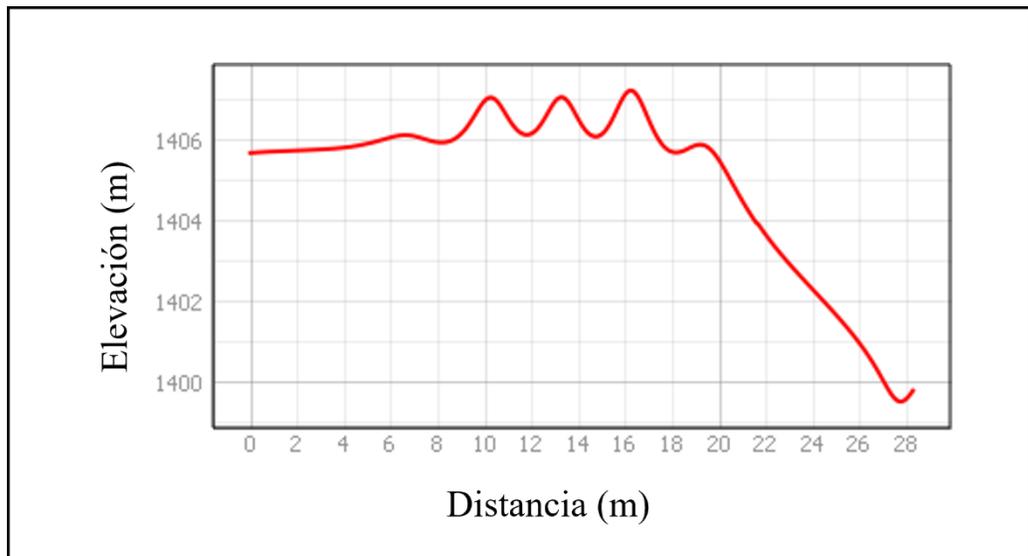


Figura 23. Gráfico de pendiente lateral I

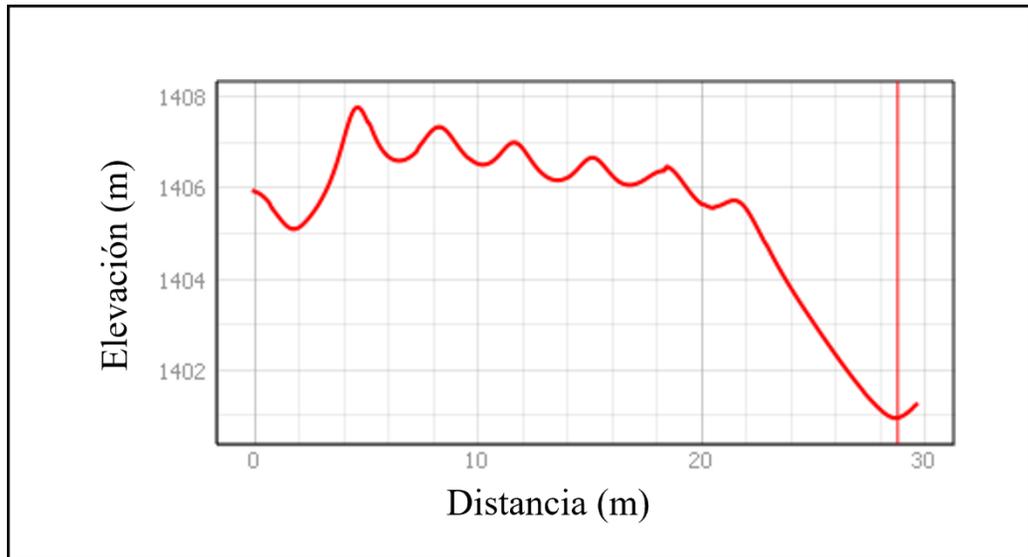


Figura 24. Gráfico de pendiente lateral II

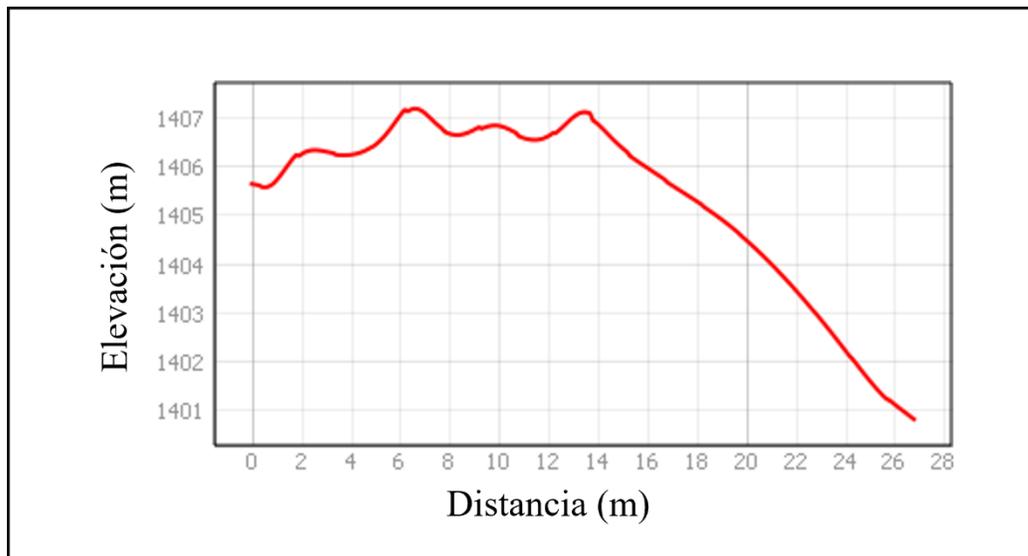


Figura 25. Gráfico de pendiente lateral III

### 8.2.Patinaje

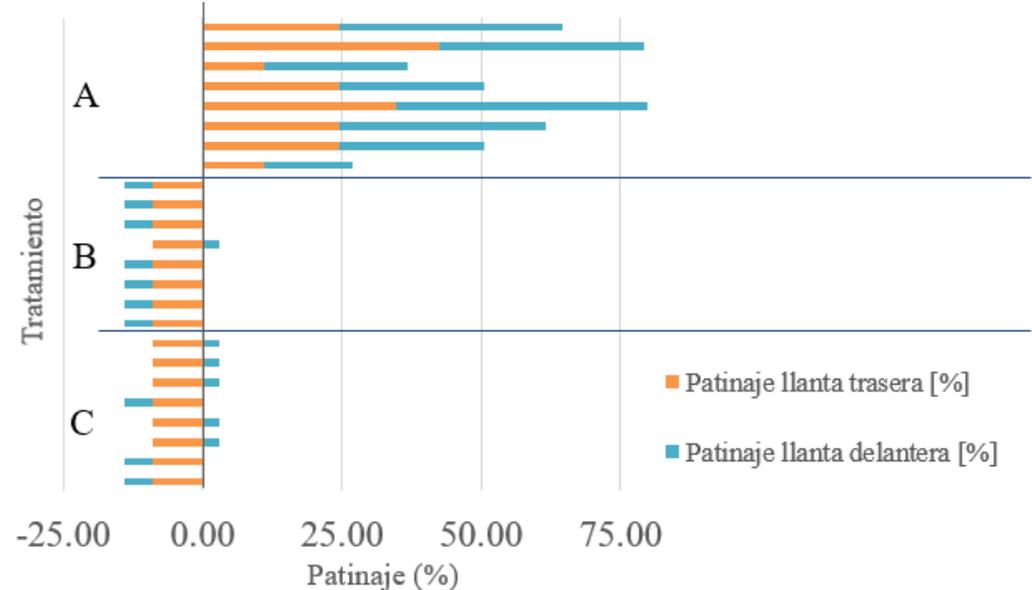


Figura 26. Gráfica de barra para patinaje según el tratamiento

### 8.3.Potencia

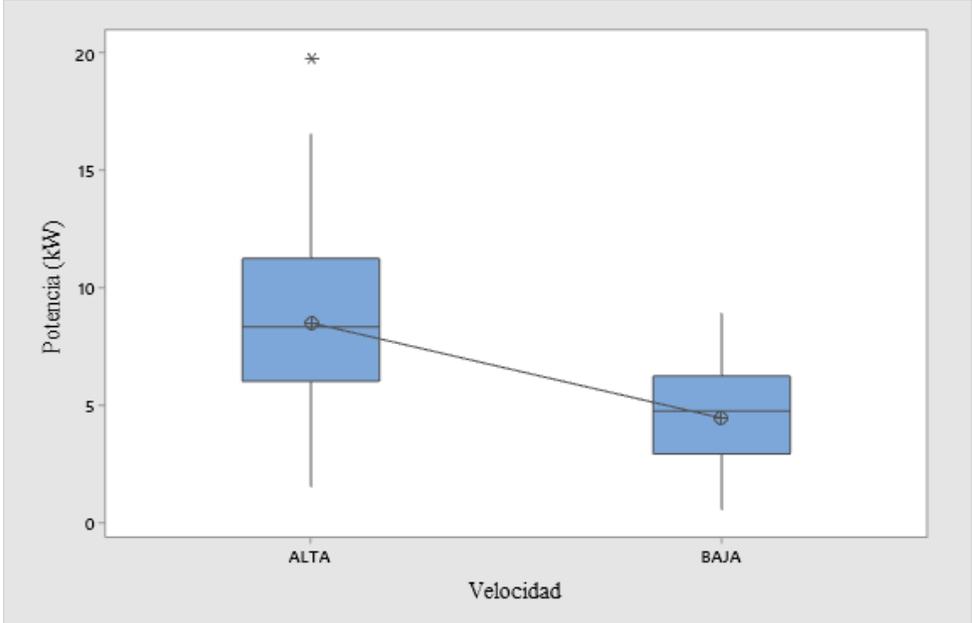


Figura 27. Gráfica de cajas para la potencia requerida en el tratamiento A

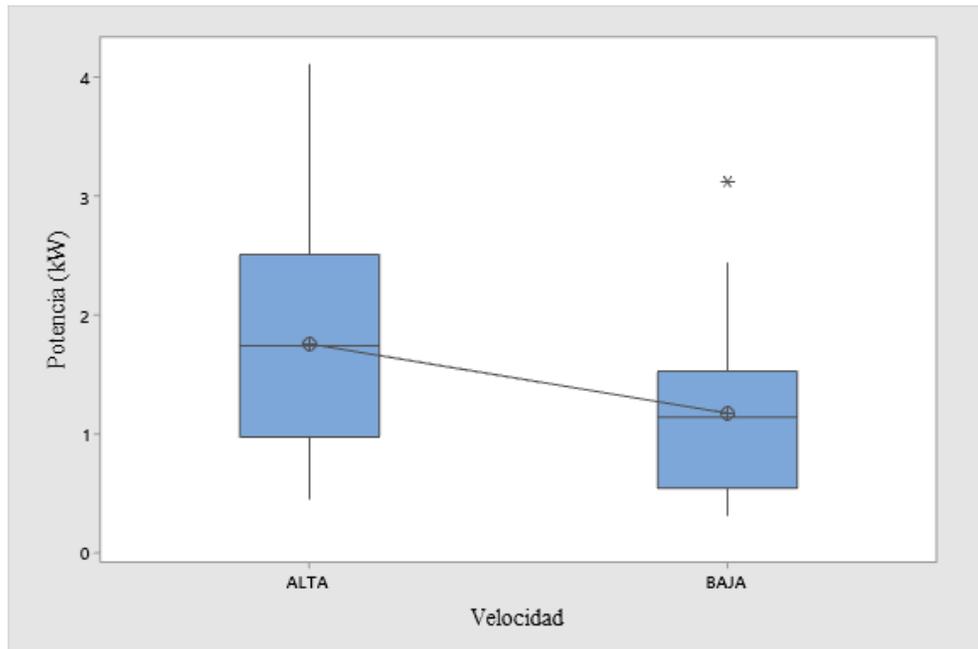


Figura 28. Gráfica de cajas para la potencia requerida en el tratamiento B

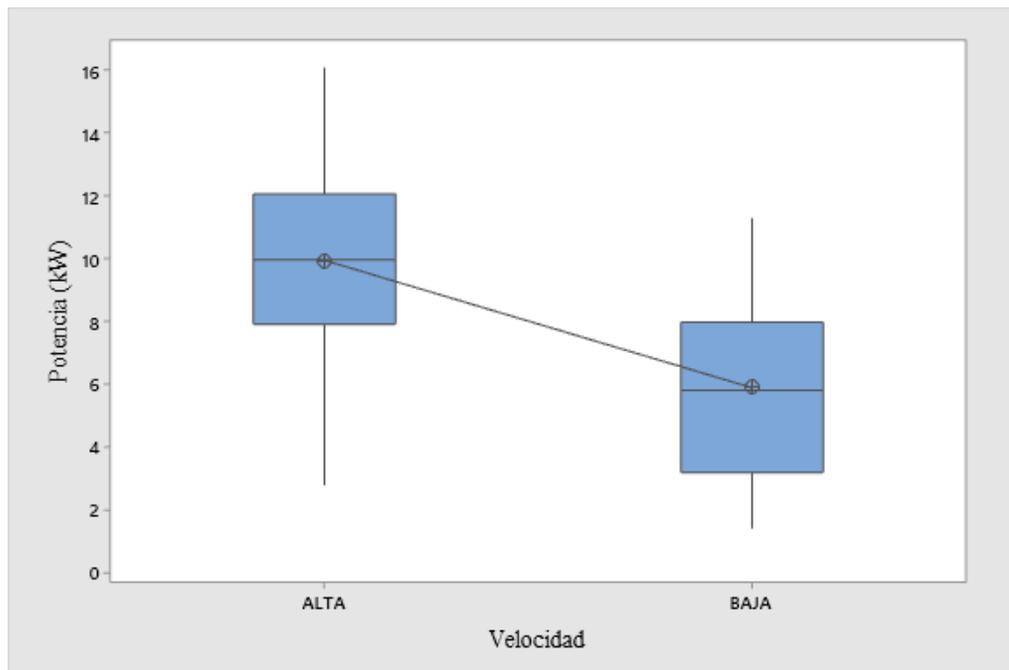


Figura 29. Gráfica de cajas para la potencia requerida en el tratamiento C

#### 8.4. Gráficas de caja de resistencia RP, RC y HV antes de mecanizar

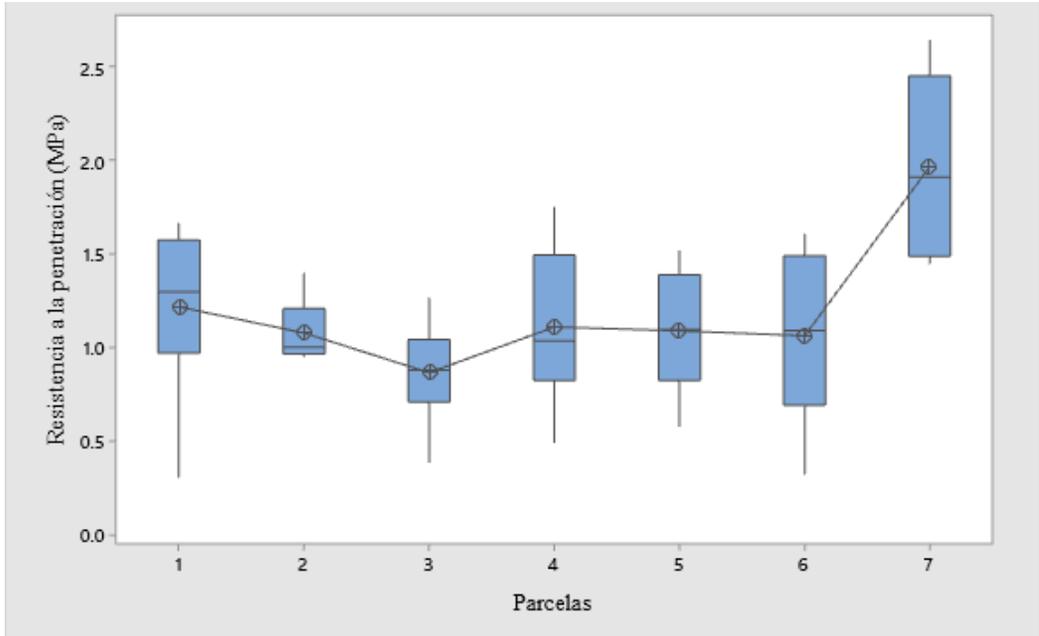


Figura 30. Gráfica de caja de la resistencia a la penetración antes de mecanizar

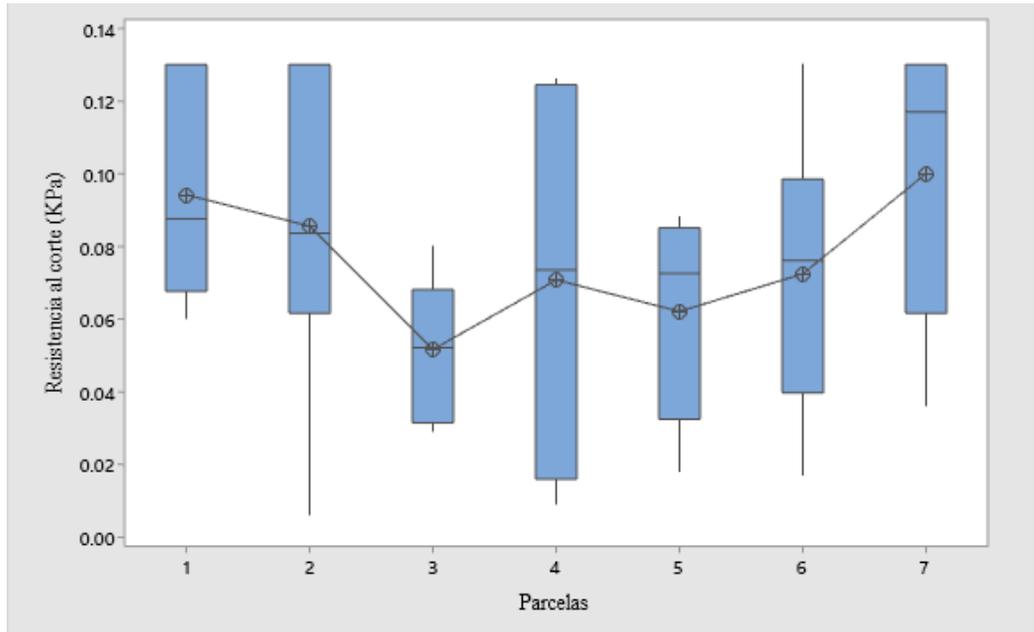


Figura 31. Gráfica de caja para la resistencia al corte antes de mecanizar

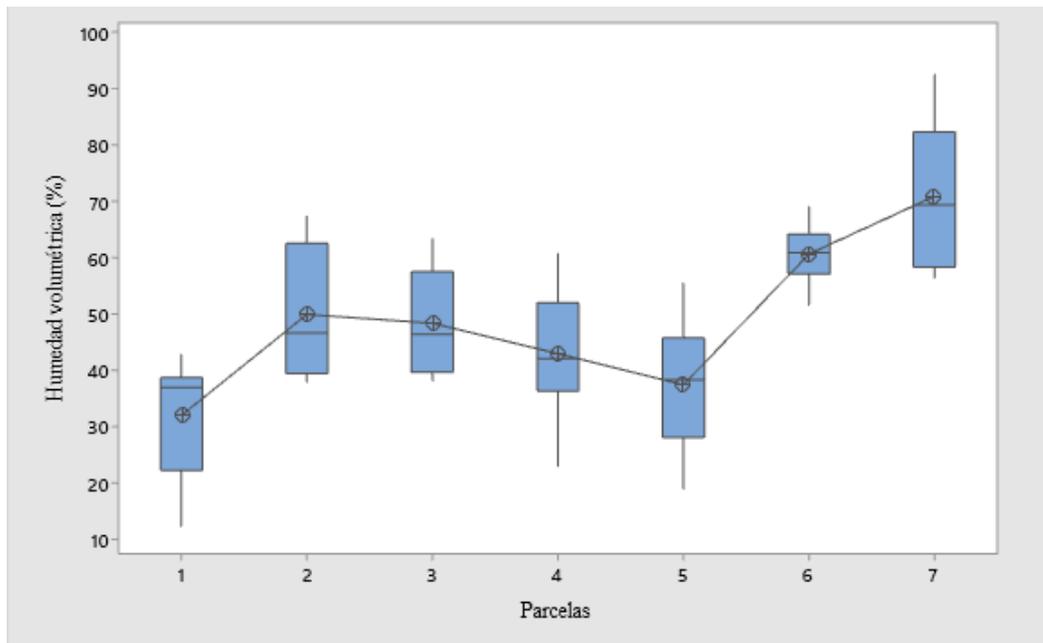


Figura 32. Gráfica de caja para la humedad volumétrica antes de mecanizar

### 8.5. Gráficas de caja para RP, RC y HV después de mecanizar

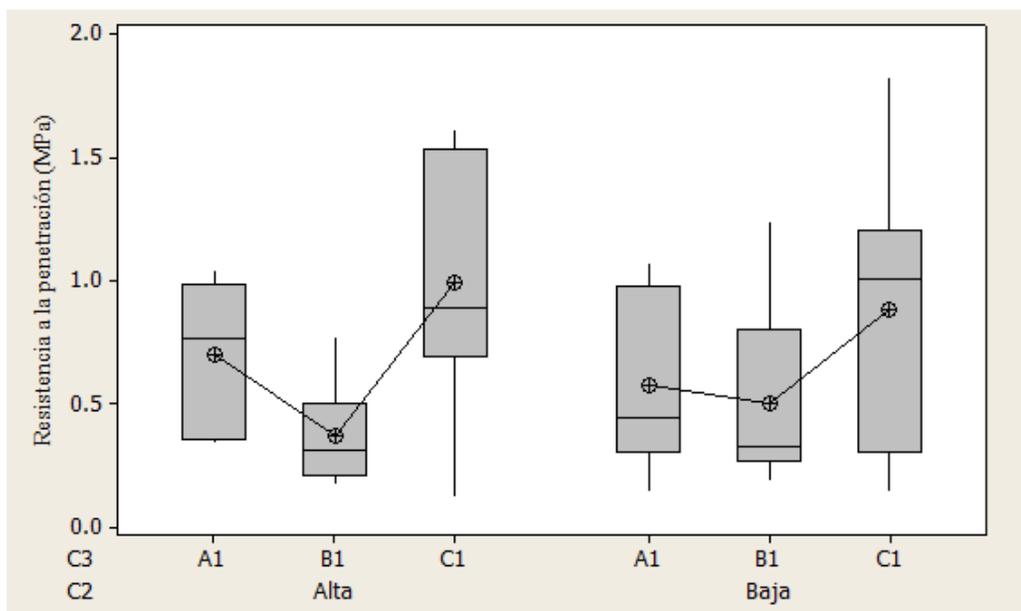


Figura 33. Gráfica de caja para la resistencia a la penetración, semana 1

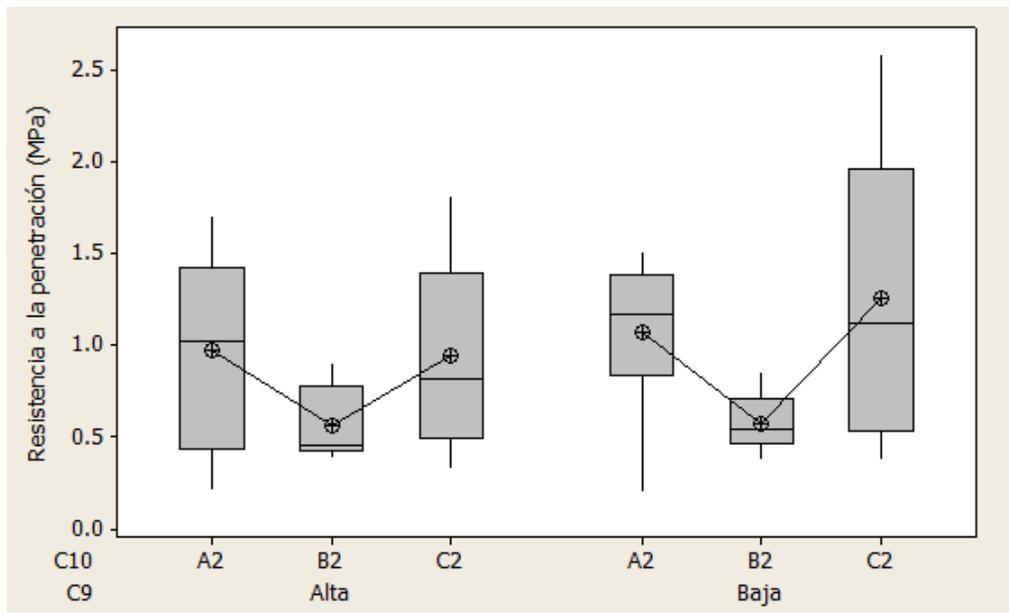


Figura 34. Gráfica de caja para la resistencia a la penetración, semana 2

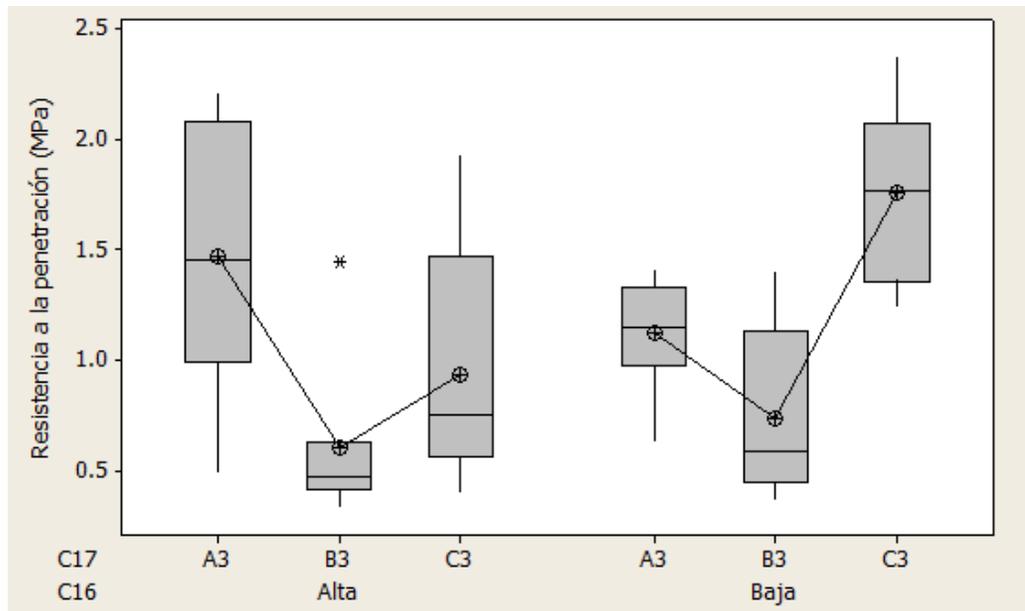


Figura 35. Gráfica de caja para la resistencia a la penetración, semana 3

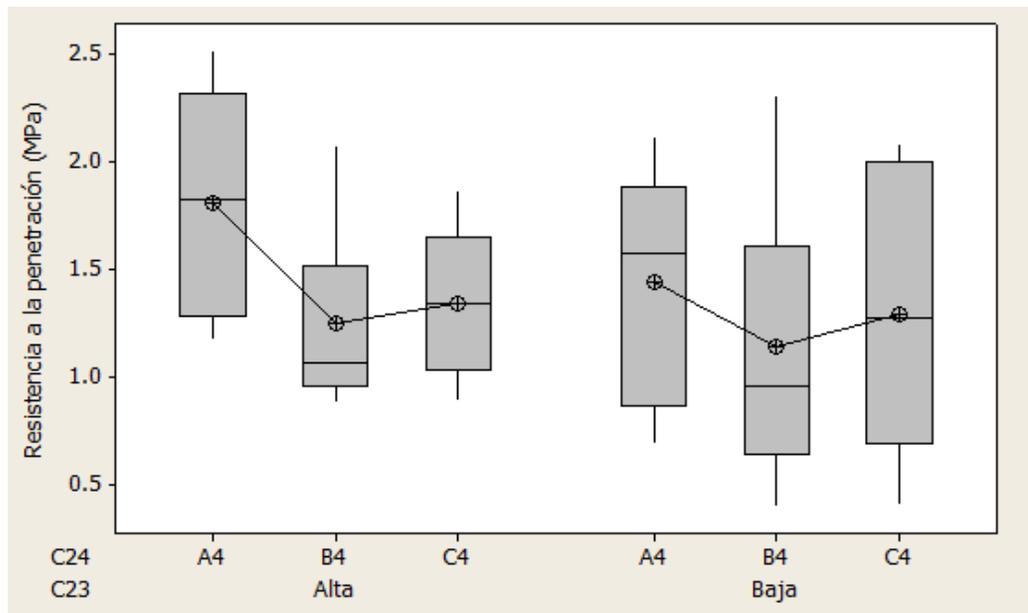


Figura 36. Gráfica de caja para la resistencia a la penetración, semana 4

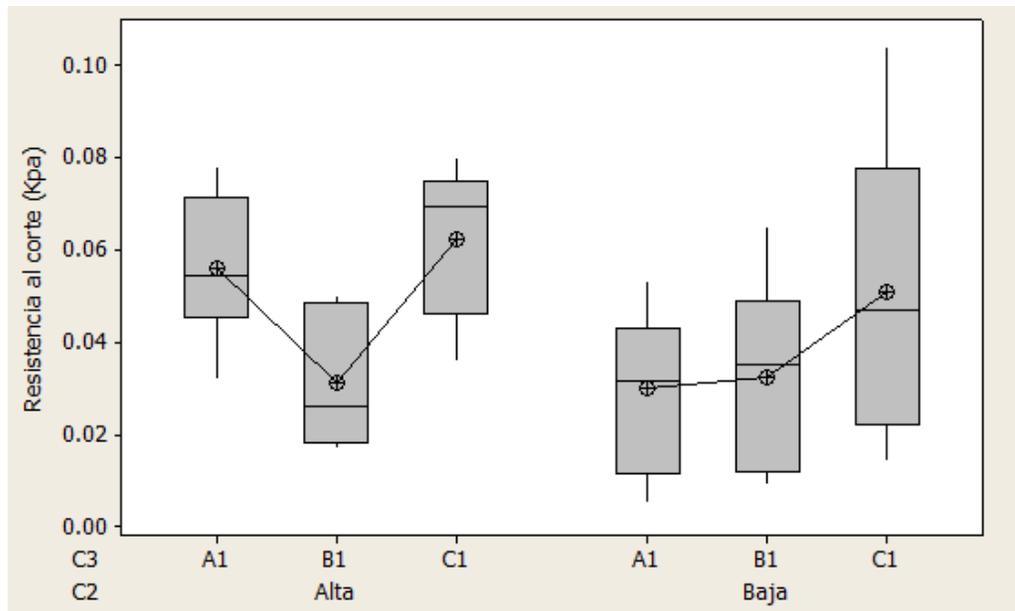


Figura 37. Gráfica de caja para la resistencia al corte, semana 1

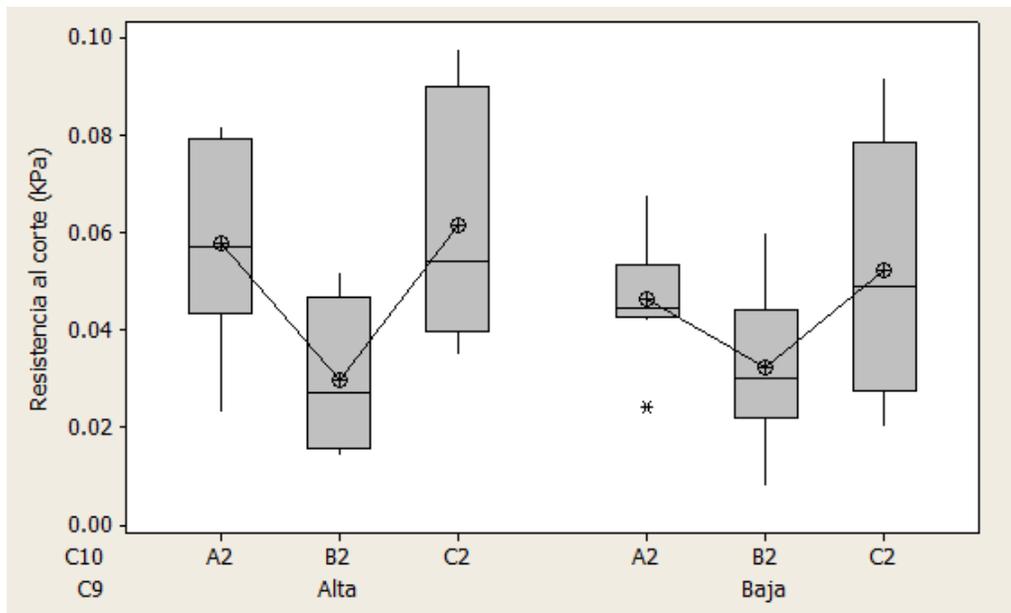


Figura 38. Gráfica de caja para la resistencia al corte, semana 2

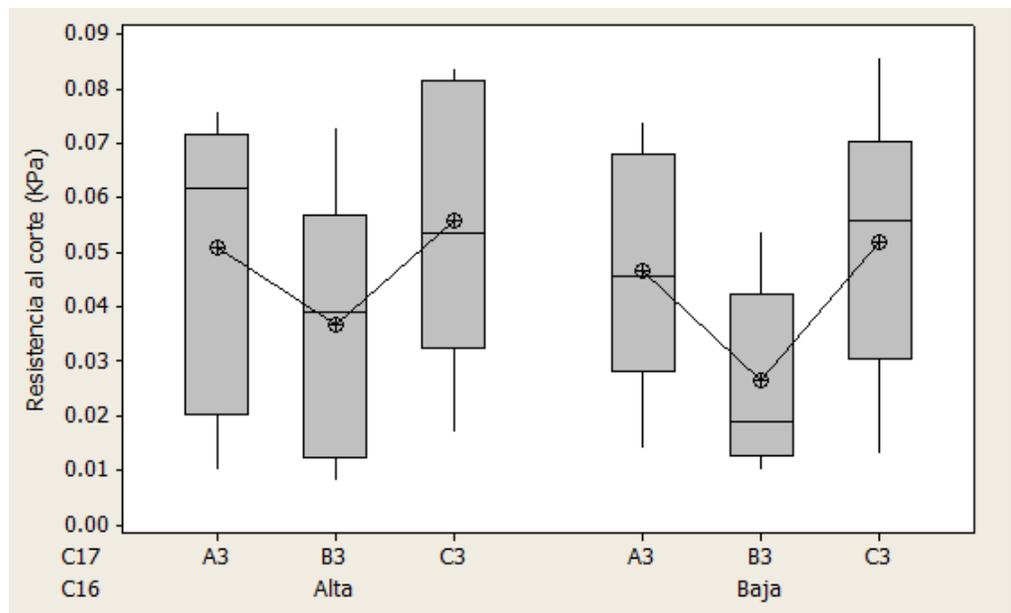


Figura 39. Gráfica de caja para la resistencia al corte, semana 3

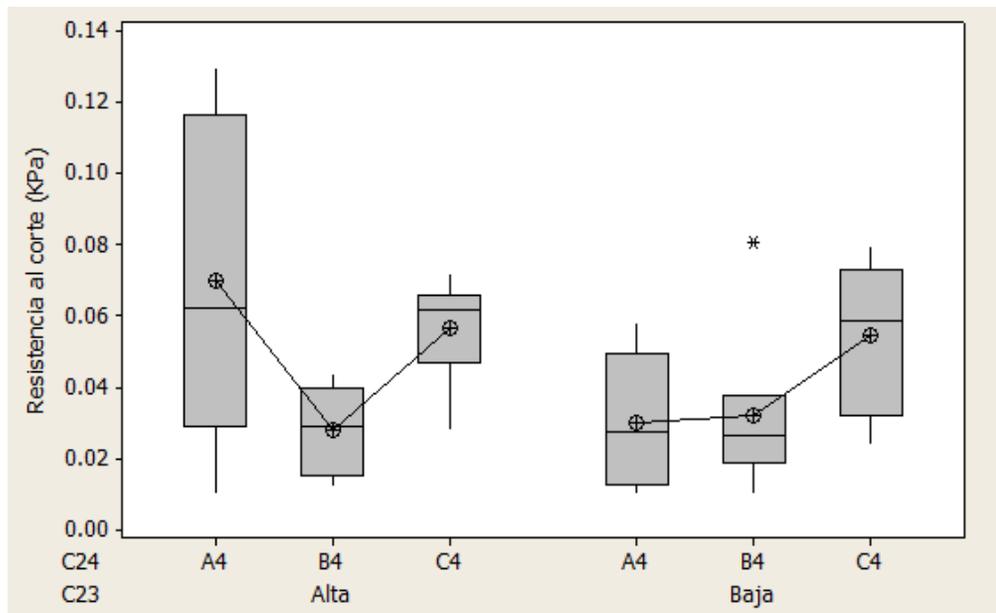


Figura 40. Gráfica de caja para la resistencia al corte, semana 4

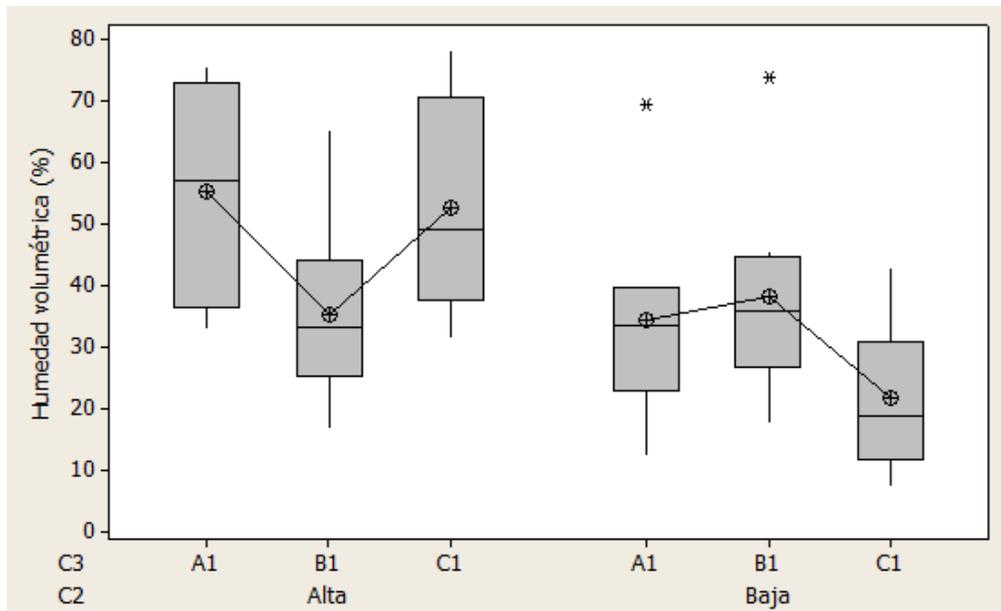


Figura 41. Gráfica de caja para la humedad volumétrica, semana 1

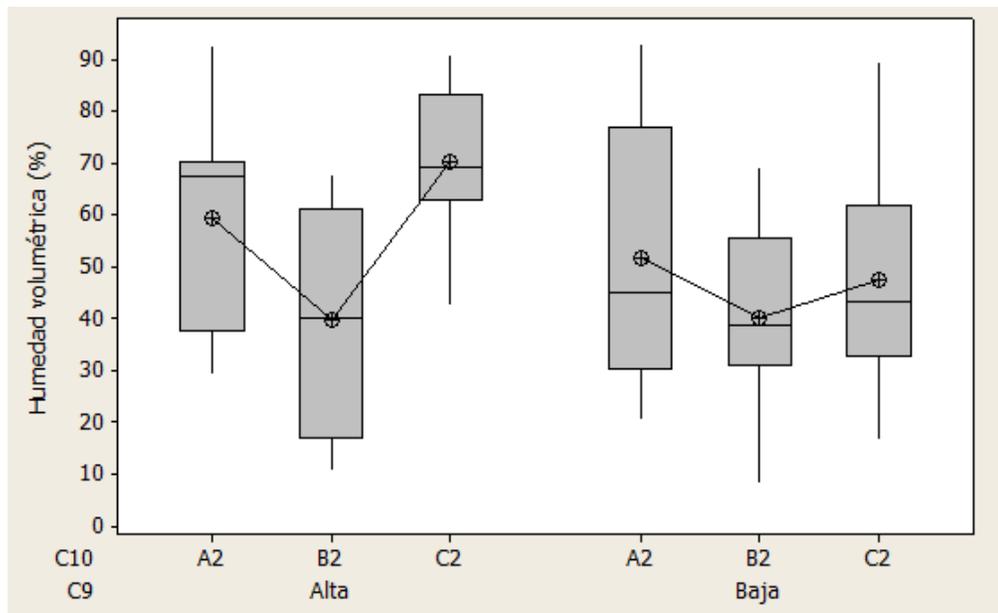


Figura 42. Gráfica de caja para la humedad volumétrica, semana 2

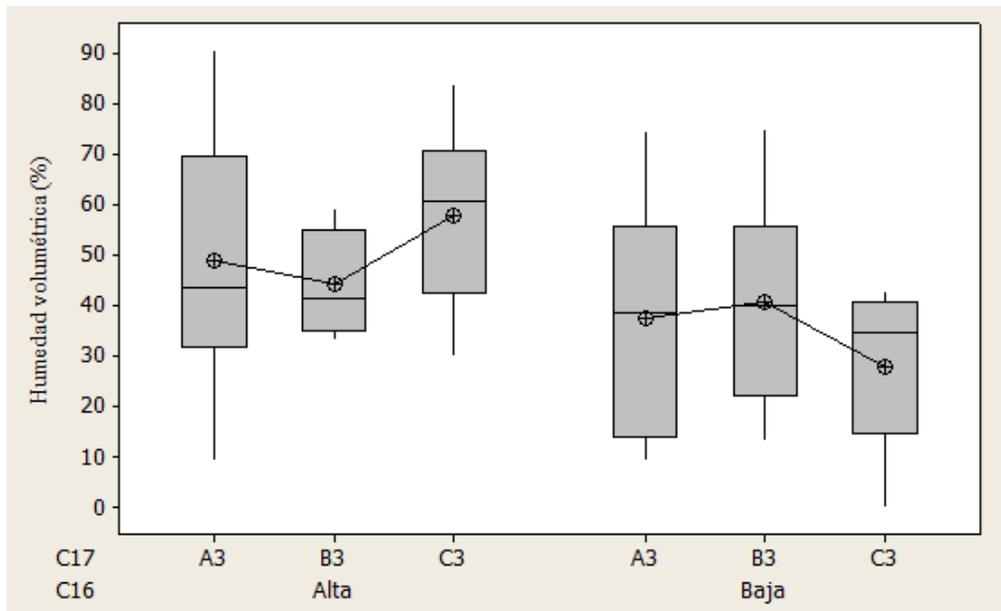


Figura 43. Gráfica de caja para la humedad volumétrica, semana 3

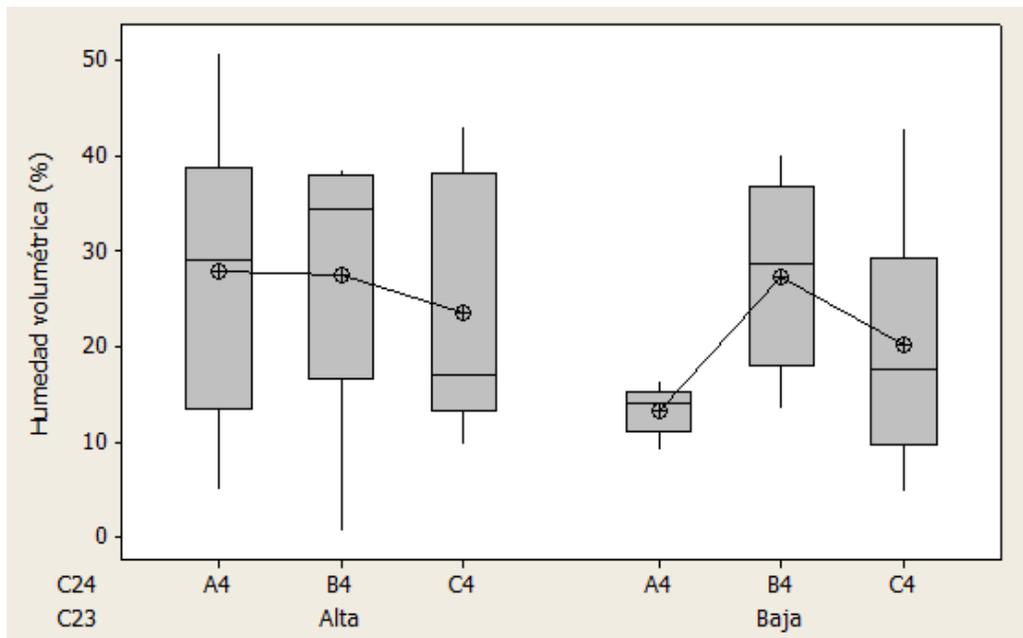


Figura 44. Gráfica de caja para la humedad volumétrica, semana 4

### 8.6. Gráficas de caja de RC, RP y HV para la parcela 7

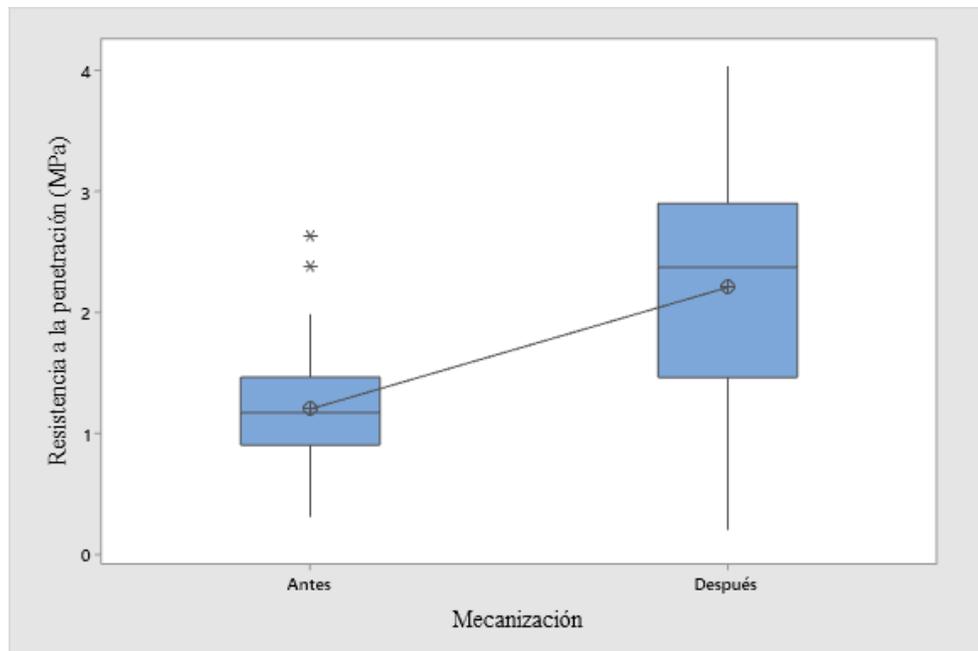


Figura 45. Gráfica de caja para la resistencia a la penetración de la parcela 7

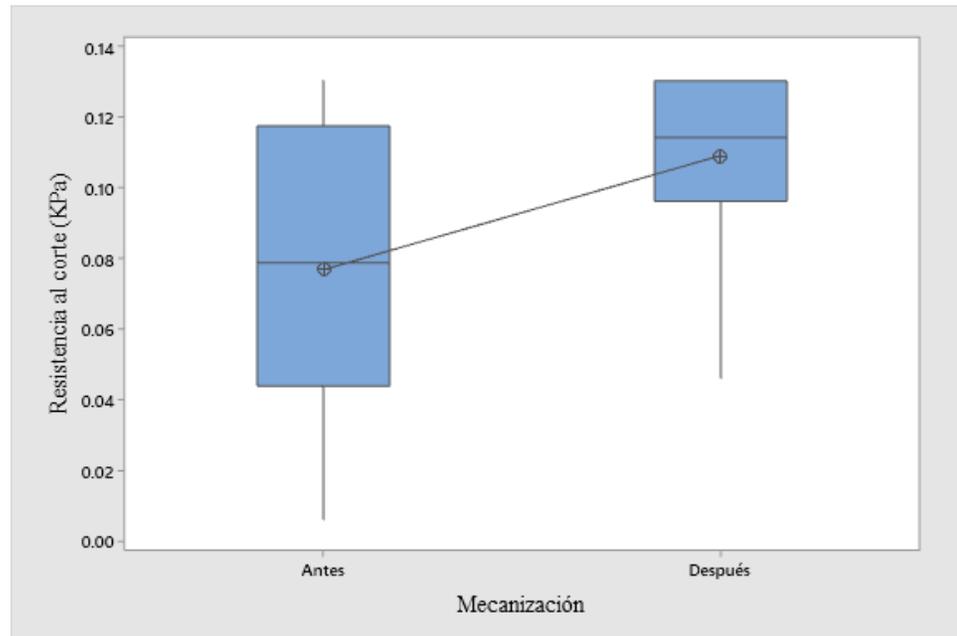


Figura 46. Gráfica de caja para la resistencia al corte de la parcela 7

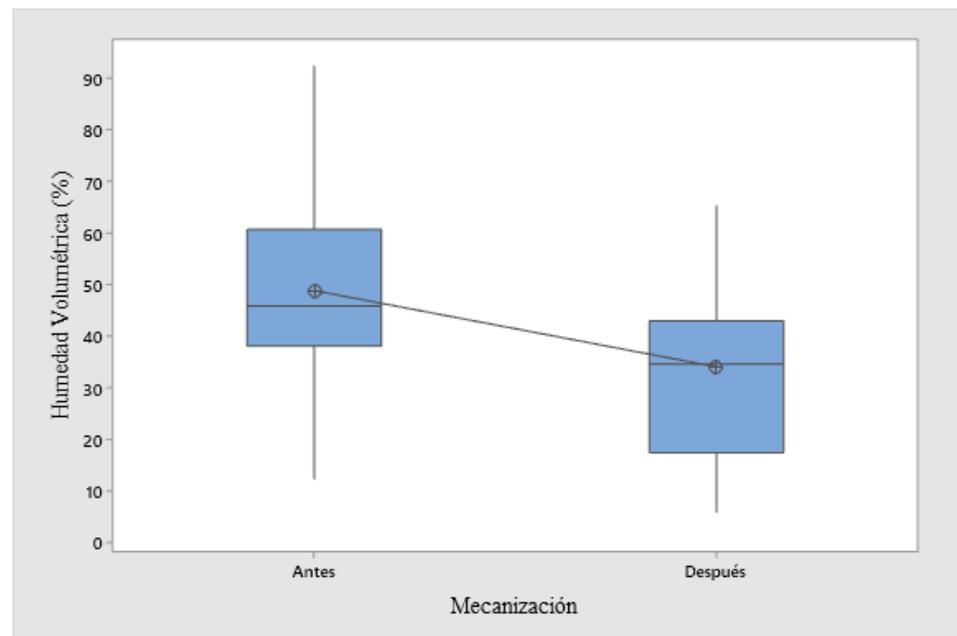


Figura 47. Gráfica de caja para la humedad volumétrica de la parcela 7

### 8.7.Densidad Aparente

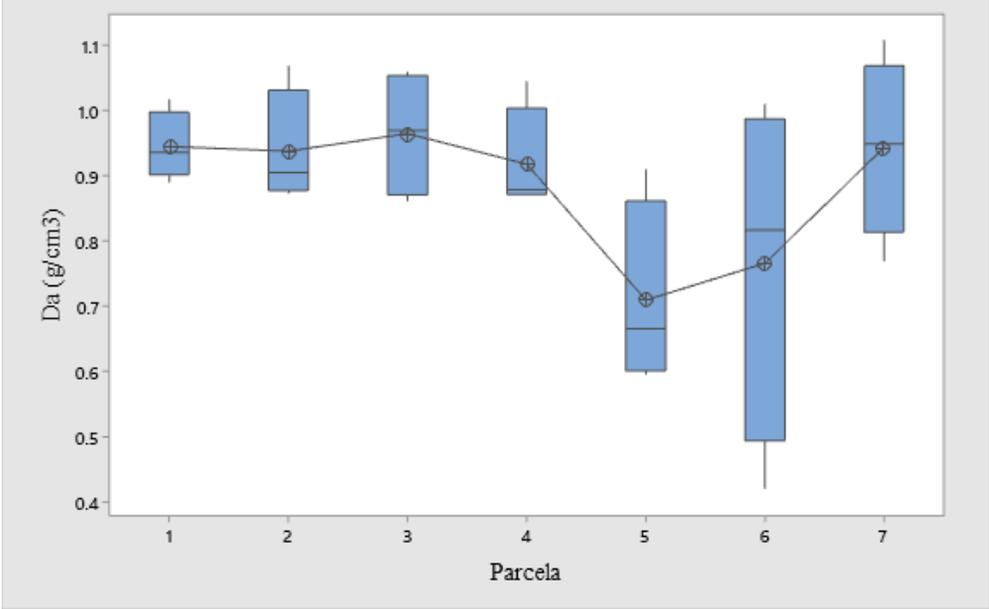


Figura 48. Gráfica de caja para la densidad aparente, antes de mecanizar

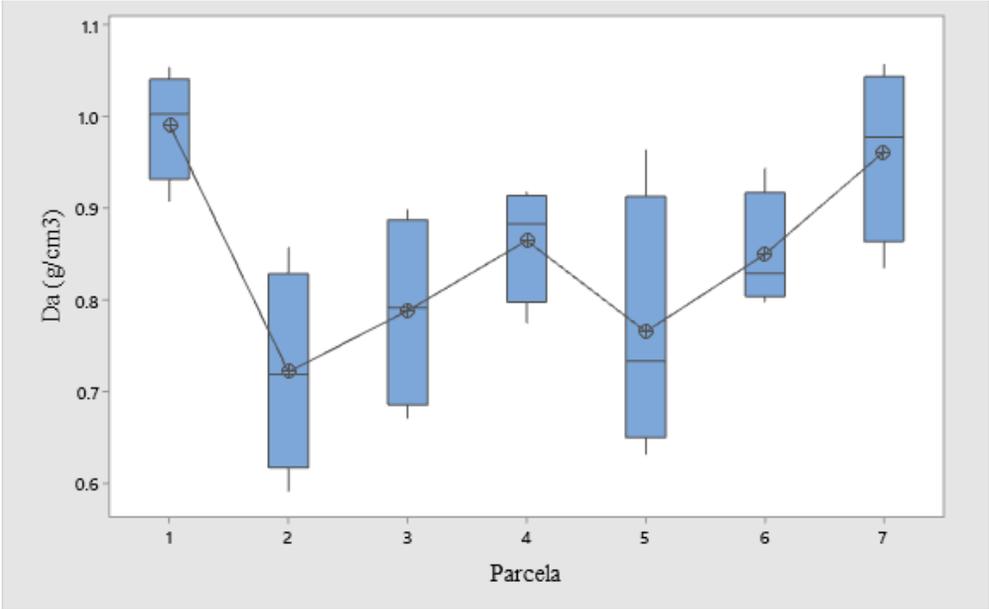


Figura 49. Gráfica de caja para la densidad aparente, después de mecanizar

8.8.Materia Orgánica

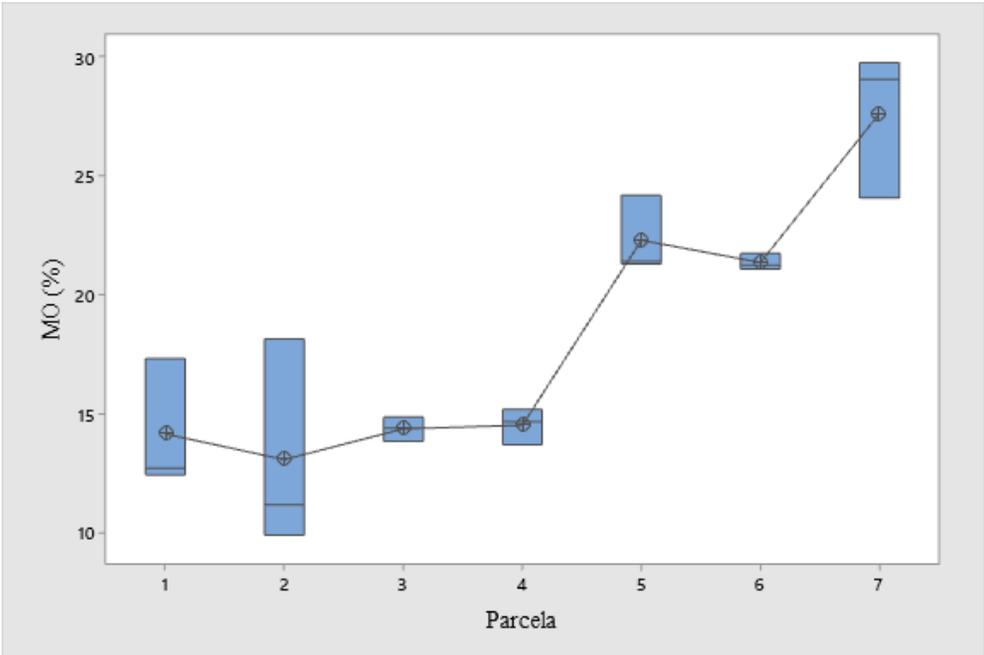


Figura 50. Gráfica de cajas para MO, antes de mecanizar

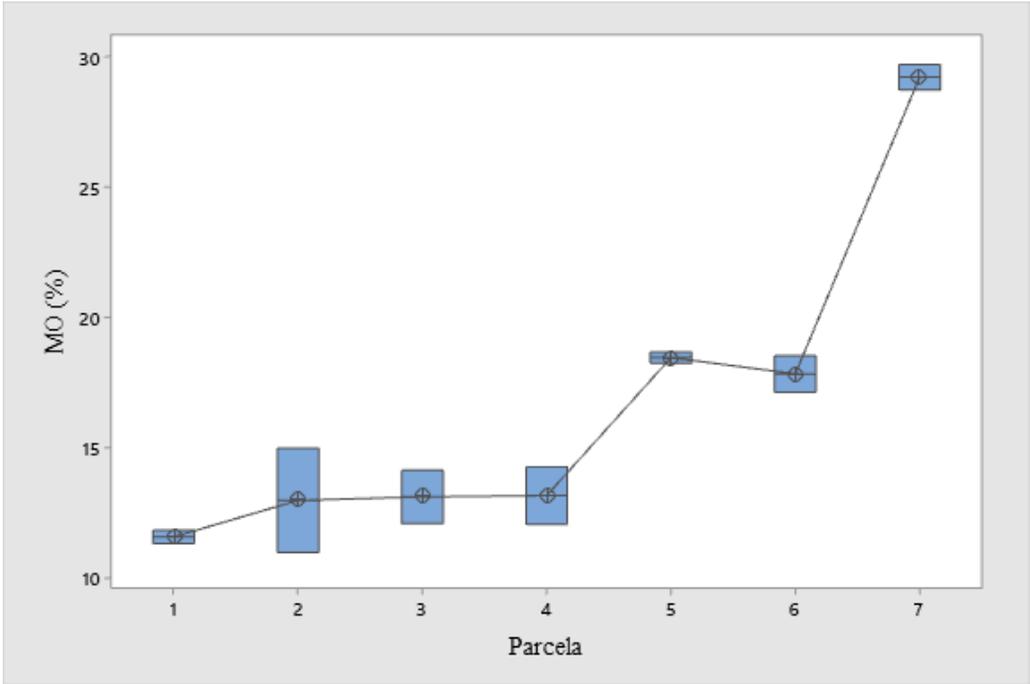


Figura 51. Gráfica de cajas para MO, después de mecanizar

**8.9. Profundidad de labranza**

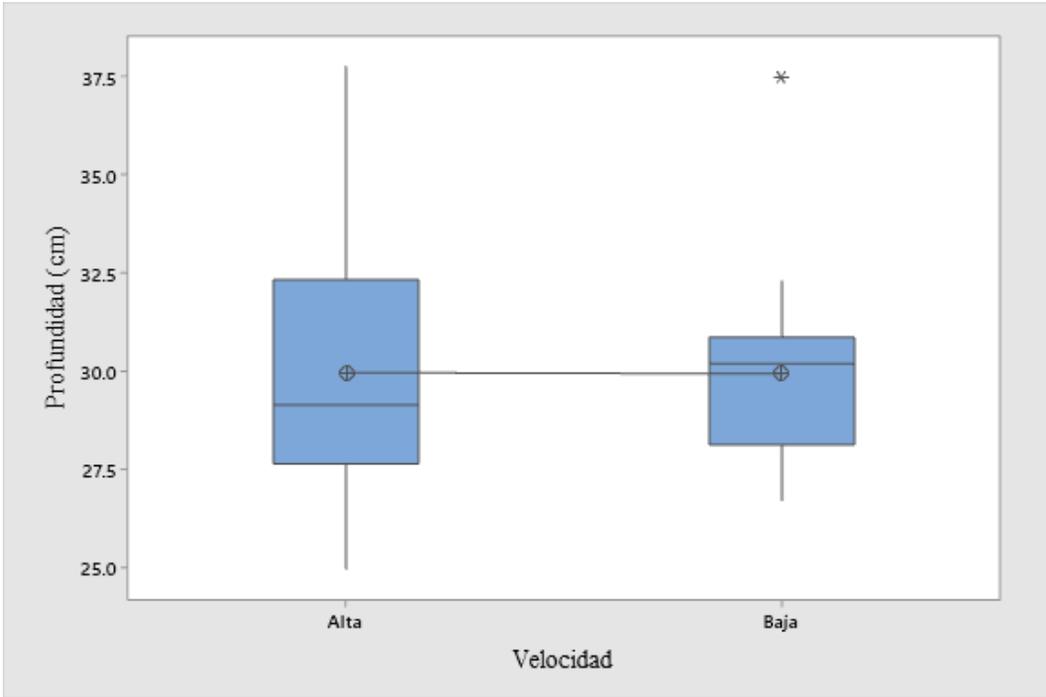


Figura 52. Gráfica de cajas para la profundidad de labranza del tratamiento A

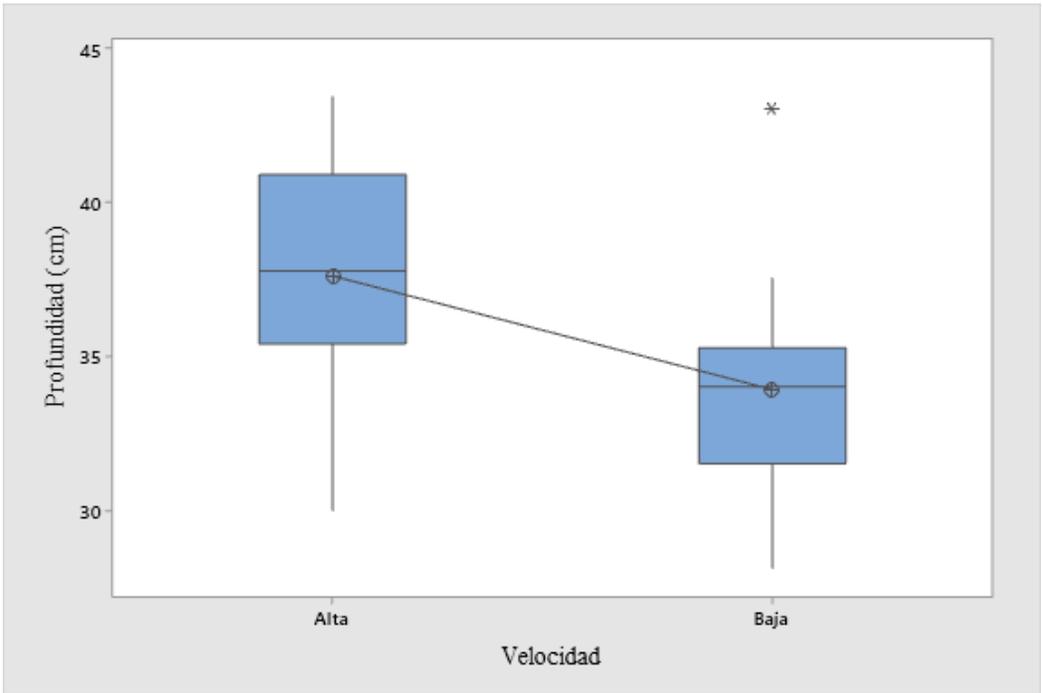


Figura 53. Gráfica de cajas para la profundidad de labranza del tratamiento B

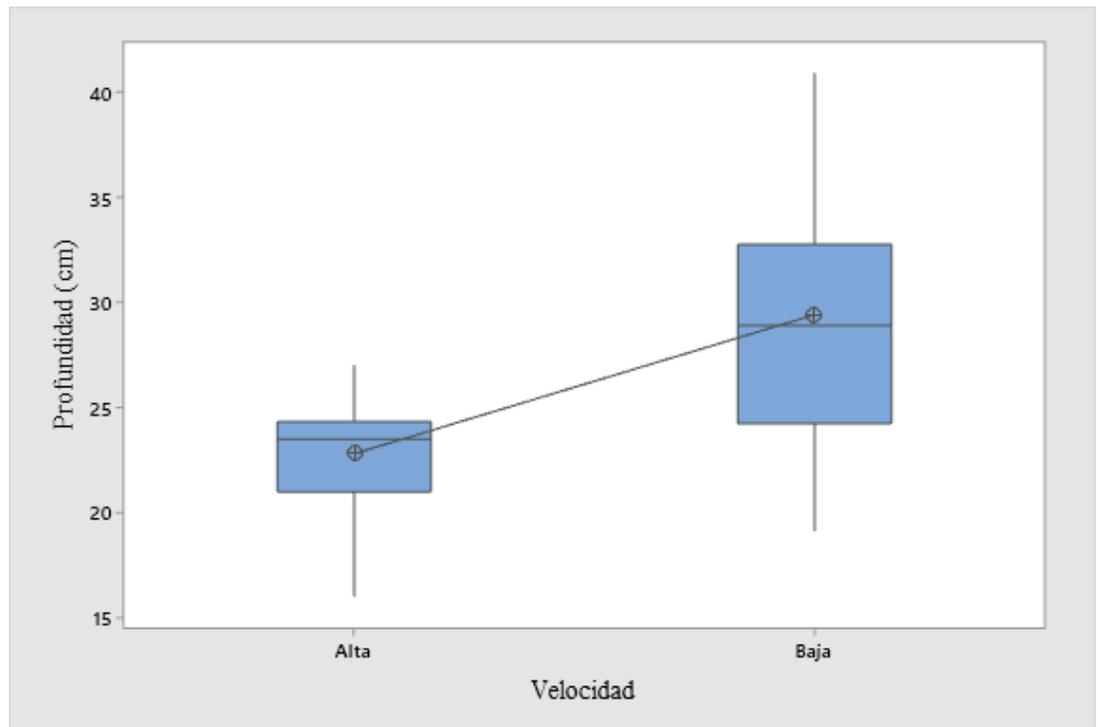


Figura 54. Gráfica de cajas para la profundidad de labranza del tratamiento C