

Importancia de los coeficientes de uniformidad en las operaciones agrícolas asistidas por maquinaria (Nota técnica)

Importance of uniformity coefficients in machine-assisted agricultural operations (technical note)

Natalia Gomez-Calderón¹, Fernando Watson-Hernández², Milton Solórzano-Quintana³

Fecha de recepción: 23 de noviembre, 2021
Fecha de aprobación: 2 de abril, 2022

Gomez-Calderón, N., Watson-Hernández, F., Solórzano-Quintana, M. Nota técnica: importancia de los coeficientes de uniformidad en las operaciones agrícolas asistidas por maquinaria. *Tecnología en Marcha*. Vol. 36, N° 1. Enero-Marzo, 2023. Pág. 163-177.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i1.6005>

- 1 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
Correo electrónico: ngomez@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-7961-7529>
- 2 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
Correo electrónico: fwatson@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-8258-4668>
- 3 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
Correo electrónico: msolorzano@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0003-2137-0003>

Palabras clave

Maquinaria agrícola; coeficientes de uniformidad; labranza; sembradora; pulverizadora.

Resumen

La eficiencia de las labores agrícolas mecanizadas incide en el rendimiento general de los cultivos y en la uniformidad de la producción, variables determinantes en la definición adecuada de las zonas de manejo diferenciado. Las pruebas de uniformidad de los implementos repercuten en la toma de decisiones para adquirir implementos y la administración de ellos. El objetivo de este trabajo es promover el uso eficiente de la maquinaria agrícola en el campo y evaluar las operaciones agrícolas para el uso adecuado de los recursos de producción. Se determinaron coeficientes de uniformidad del trabajo realizado con cada uno de los implementos probados, además otras variables operativas que influyen en el desempeño de ellas. Las labores más uniformes son las realizadas con implementos de labranza vertical (CU > 80%), aunque se conoce que demandan mayor potencia para romper la estructura del suelo, la sembradora volumétrica es más uniforme a velocidades de avance bajas (CU = 86,73%) y la pulverizadora presentó aplicaciones más homogéneas a bajas presiones de operación (CU = 98%). Las mediciones de uniformidad y actividades de calibración de los implementos permitieron identificar puntos críticos en la maquinaria, y fundamentar la importancia de determinarlos para la mejora continua de las operaciones agrícolas tendientes a lograr rendimientos del cultivo homogéneos.

Keywords

Agricultural machinery; uniformity coefficients; tillage; seeder; sprayer.

Abstract

The efficiency of mechanized agricultural work affects the general yield of crops and the uniformity of production, determining variables in the adequate definition of differentiated management areas. Implement consistency tests impact implement purchasing and implement management decisions. The objective of this work is to promote the efficient use of agricultural machinery in the field and to evaluate agricultural operations for the proper use of production resources. Uniformity coefficients of the work carried out with each of the implements tested were determined, as well as other operative variables that influence their performance. The most uniform tasks are those carried out with vertical tillage implements (CU > 80%), although they demand more power to break the soil structure, the volumetric seeder is more uniform at low speeds (CU = 86.73%) and the sprayer presented more homogeneous applications at low operating pressures (CU = 98%). The uniformity measurements and calibration activities of the implements allowed identifying critical points in the machinery, and substantiating the importance of determining them for the continuous improvement of agricultural operations aimed at achieving homogeneous crop yields.

Introducción

La mecanización agrícola se considera la columna vertebral de la producción agrícola. La mayoría de operaciones agrícolas mecanizadas contribuyen directamente a la preparación del suelo, el establecimiento de un semillero adecuado, el mantenimiento y la cosecha del cultivo [1]. La eficiencia de las labores incide en el rendimiento general de los cultivos y en la uniformidad de la producción, variables determinantes en la definición adecuada de las zonas de manejo

diferenciado [2]. La eficiencia de la maquinaria utilizada en las labores debe ser evaluada en el campo, con el fin de detectar puntos críticos o mejoras inherentes a su capacidad de trabajo. La uniformidad de distribución de la semilla, pulverización y de la profundidad de labranza, se relacionan con la velocidad de avance de los equipos utilizados en las labores y las condiciones generales del terreno [3].

Las pruebas de uniformidad de los implementos repercuten en la toma de decisiones para adquirir implementos y la administración de ellos [4], [5]. La velocidad de trabajo es una variable que incide directamente en el rendimiento operativo y demanda energética para el funcionamiento de la maquinaria agrícola, e incluso en algunos implementos, su ancho de trabajo influye en la capacidad de trabajo debido a la demanda de potencia para romper el suelo [5] o la fuerza de tiro requerida cuando se opera a capacidad máxima (sembradoras y pulverizadoras), por lo que son parámetros a considerar cuando se mide la uniformidad del trabajo. En el caso de implementos de labranza primaria, las uniformidades de profundidad de labranza son menores a las teóricas debido a que el suelo presenta altas resistencias, situación en la que también influye el diseño de las herramientas [6] y las condiciones de resistencia de la rodadura de los tractores que tiran [7].

Determinar la uniformidad del trabajo, también facilita la investigación en la perturbación del terreno producto de la interacción entre el suelo y los implementos, y proporciona una base para mejorar el efecto de la labranza e incluso para determinar el distanciamiento entre las herramientas de trabajo de los aperos cuando se realiza la preparación del suelo [8]. En el caso de las pulverizadoras, la evaluación técnica de uniformidad de aplicación de las boquillas bajo factores climáticos y de operación específica para cada cultivo, permite obtener beneficios económicos y técnicos. Al mejorar la calidad del asperjado, se disminuye el número de aplicaciones y la incidencia de plagas y enfermedades [9]. Operativamente, medir la uniformidad de trabajo de los implementos también permite la intervención de las máquinas ante desperfectos que estén influyendo en la eficiencia de los trabajos, tales como desgastes de elementos y mecanismos que intervienen en la calibración adecuada de los aperos. En cuanto al uso correcto de los equipos, una nivelación incorrecta transmite esfuerzos innecesarios al tren trasero del tractor y en el caso de las sembradoras, no permite el trabajo correcto de carga de los dosificadores ocasionando una distribución de semilla no uniforme [10].

El coeficiente de uniformidad se basa en el coeficiente de variación estadística, considerando la dispersión de las medidas con respecto a la media de los datos utilizados [11], [12]. El presente trabajo fue realizado a partir de las mediciones y los resultados obtenidos de las prácticas del curso de Laboratorio de Tractores y Mecanización Agrícola de la Escuela de Ingeniería Agrícola. Esta nota técnica pretende ser un insumo didáctico para el grado de licenciatura de dicha carrera y de apoyo para profesionales de ingeniería agrícola a cargo de la toma de decisiones en las operaciones mecanizadas, automatizadas o digitalizadas de diferentes cultivos. El objetivo es promover la aplicación eficiente de la maquinaria agrícola en el campo y evaluar las operaciones agrícolas con miras a una mejora continua en el uso de los recursos de producción, por medio de la determinación de coeficientes de uniformidad de arados subsoladores, sembradoras volumétricas (de chorro) y pulverizadoras.

Metodología

Se determinaron los coeficientes de uniformidad de trabajo de los siguientes implementos; arado subsolador, arado excavador (palín), arado rotativo, sembradora volumétrica y pulverizadora integral. Las pruebas de uniformidad de profundidad de labranza del suelo (arado subsolador, arado excavador, arado rotativo) y pulverización se establecieron en el campo de prácticas de la Escuela de Ingeniería Agrícola del Instituto Tecnológico de Costa Rica, donde las

condiciones del suelo fueron las mismas para las labores de labranza, con una pendiente del 6%, suelo de textura Arcillosa y contenido de humedad de 34%, cercano al punto friable del terreno. Las pruebas de uniformidad en sembradora volumétrica se realizaron en una empresa productora de arroz colaboradora de la institución, ubicada en el Pacífico Central de Costa Rica. Las pruebas realizadas con la pulverizadora y la sembradora se hicieron en superficies planas, homogéneas y cementadas.

Resumen de las pruebas realizadas

Con el fin de evaluar la eficiencia de la maquinaria agrícola utilizada en las pruebas, se determinaron coeficientes de uniformidad del trabajo realizado con cada una, además de contemplar variables operativas que influyen en el desempeño de ellas. Se realizaron las siguientes actividades para la recolección de la información:

- Para las labores de labranza, con cada uno de los equipos se realizó dos pases de la maquinaria a una velocidad lenta y dos pases de maquinaria a una velocidad mayor. En el caso del arado rotativo, se incluyó levantar la tapa del implemento o dejarla cerrada, se midió la profundidad de trabajo de los implementos, las velocidades de avance y la resistencia al corte del suelo para relacionarla con la demanda de potencia necesaria para romper la estructura del terreno.
- Para la sembradora volumétrica, se realizó la prueba de descarga de semilla en cada chorro, pesando la semilla dispensada en cada salida mientras el implemento estaba estático y cuando avanzó a dos velocidades diferentes.
- Para la fumigadora, se colectó el volumen que asperja cada boquilla, cuando la maquinaria trabajó a velocidades de avance iguales en cuatro pruebas diferentes de presiones de operación de la bomba (30, 40, 60 y 100 kg/cm²).

En la figura 1, se muestra el terreno en el que se realizaron las prácticas de labranza de suelos, después de los pases de los implementos probados.



Figura 1. Establecimiento de los experimentos con pases de equipos de labranza a diferentes velocidades de avance

En el cuadro 1, se muestra un resumen y la descripción de los equipos utilizados en las pruebas realizadas.

Cuadro 1. Características de los equipos agrícolas utilizados en las pruebas.

Labor	Tractor utilizado	Implemento evaluado	Descripción del implemento
Labranza del suelo	Massey Ferguson 6066	Arado subsolador TATU AST	Implemento Integral de tres picos Capacidad de profundidad de trabajo: 0,75 - 1 m Ancho de trabajo: 1,45 m Sin topes ni aletas en las herramientas Velocidad máxima recomendada por el fabricante: 15 km/h
	Massey Ferguson 6066	Arado excavador (palín) Selvatici Serie 150-75	Implemento Integral de 8 azadones Capacidad de profundidad de trabajo: 0,2 – 0,5 m Ancho de trabajo: 1,8 m Velocidad máxima recomendada por el fabricante: Debe ser utilizado a velocidad reducida (transmisión super reductora) no superior a los 6 km/h
	Massey Ferguson 60-66 DT	Arado rotativo Nardi	Implemento Integral de 6 cuchillas Capacidad de profundidad de trabajo: 0,2 – 0,45 m Ancho de trabajo: 1,1 m Velocidad máxima recomendada por el fabricante: 15 km/h
Siembra de arroz	John Deere 7515	Sembradora volumétrica Baldán SPD4000	Implemento de tiro 20 chorros espaciados cada 0,17 m Barra de calibración: 10,5 cm Diámetro de llanta: 1,2 m Ancho de trabajo: 3,2 m Velocidad máxima recomendada por el fabricante: 20 km/h
Fumigación	Massey Ferguson 6066	Pulverizadora Montana 400 TLP	Implemento integral 20 boquillas Magnum 11003-BD, espaciadas cada 0,5 m Velocidad máxima recomendada por el fabricante: 15 km/h

Coeficiente de uniformidad y velocidad de avance

El coeficiente de uniformidad para cada labor, se basa en el coeficiente de variación estadística, considerando la dispersión de las medidas obtenidas en las diferentes pruebas de los implementos con respecto a una media de los datos obtenidos para cada condición evaluada, la ecuación 1 lo describe:

$$\%CU = 100 * \left(1 - \frac{\sigma}{\bar{x}}\right) \quad (\text{ecuación 1})$$

Donde, %CU es el porcentaje de uniformidad de la prueba realizada, σ es la desviación estándar de los datos y \bar{x} es la media de los datos.

La velocidad de avance de los equipos agrícolas, se determinó tomando el tiempo de desplazamiento en una distancia conocida en el sitio de las prácticas, para lo que se utilizaron estacas y cintas métricas de 50 m de largo. Se conoce aplicando la ecuación 2.

$$v = \frac{d}{t} * (3,6) \quad (\text{ecuación 2})$$

Donde, v es la velocidad de avance (km/h), d es la distancia recorrida (m) y t es el tiempo del recorrido (s).

Determinación de los coeficientes de uniformidad

Determinación del coeficiente de uniformidad de la profundidad de labranza del suelo

Para la determinación de la uniformidad de la profundidad de la labranza, se realizó la calibración previa de cada uno de los implementos, así como la medición del ángulo de incidencia de las herramientas con respecto al nivel de referencia del suelo para asegurar que en todos los pases fuese el mismo. Utilizando dos velocidades diferentes dentro del rango de velocidad recomendado por el fabricante, se realizaron dos pases de cada tipo de arado: subsolador, excavador y rotativo. Para el arado rotativo además se midió una variable operativa adicional, con la tapa del implemento levantada y con la tapa del implemento cerrada, con el fin de probar las diferentes condiciones de operación que utilizan los productores. En distancias de 50 m de largo, se tomó el tiempo del recorrido, paralelamente a la medición del patinaje de los rodamientos delanteros y traseros del tractor. Aunque la resistencia a la rodadura no es analizada en este documento, es recomendable realizar la medición como insumo en las tomas de decisiones operativas de la maquinaria.

Una vez completados los pases, se utilizó un perfilómetro con 20 varillas de medición distanciadas 0,05 m cada una, con el fin de hacer 3 mediciones parciales del perfil del terreno labrado de un metro de largo de cada pase lineal de la maquinaria de forma aleatoria. Se coloca sobre el suelo en la línea de trabajo del implemento y se deja penetrar la varilla hasta el piso de la labranza, tomando la medida de la varilla que sobre sale del bastidor del perfilómetro (figuras 2 y 3).

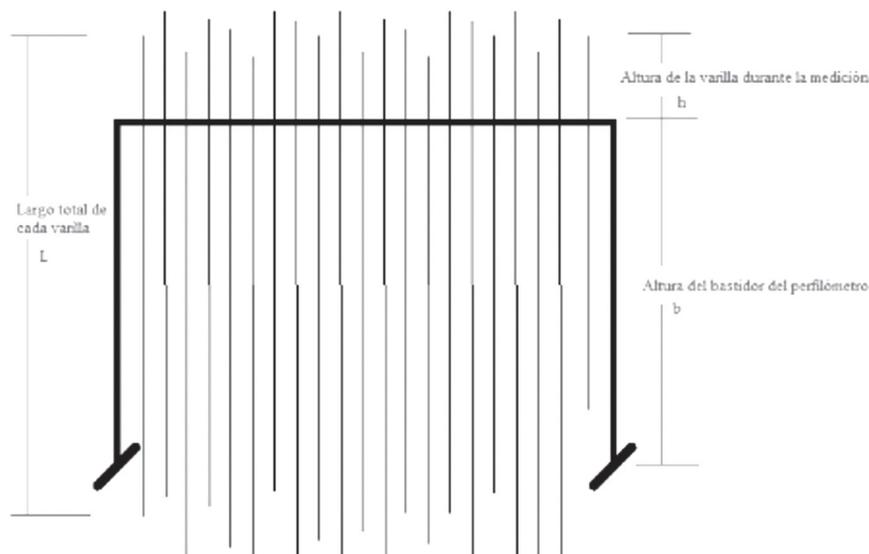


Figura 2. Detalle del perfilómetro.

La profundidad de labranza para cada implemento a cada velocidad, medida con el perfilómetro, permite obtener un perfil del suelo trabajado con su respectiva dispersión de los datos para calcular el coeficiente de uniformidad y graficar el perfil del suelo referenciado con la profundidad teórica de trabajo del implemento. La profundidad de labranza en cada varilla del perfilómetro, se obtiene de la ecuación 3.

$$\text{Profundidad de labranza} = L - (b + h) \quad (\text{ecuación 3})$$

Donde L es la longitud de las varillas (todas son iguales), b es la altura del bastidor del perfilómetro y h es la altura sobresaliente de la varilla cuando se mide profundidad.

De la información obtenida para cada implemento de labranza de suelos, se tabula la velocidad de avance, el coeficiente de uniformidad y se grafica el perfil de profundidad de labrado.



Figura 3. Medición de la profundidad de labranza y velocidad de avance.

La eficiencia de labranza, se calculó a partir del porcentaje que representa la profundidad promedio lograda en el campo con relación a la profundidad teórica a la que trabaja cada implemento según el fabricante. Para obtenerla se utilizó la ecuación 4.

$$\text{Eficiencia de labranza (\%)} = 100 * \frac{\text{Profundidad de labranza promedio (cm)}}{\text{Profundidad de labranza teorica (cm)}} \quad \text{ecuación 4}$$

Otra medición realizada para evaluar la operación de labranza, fue la potencia requerida para romper el suelo a partir de la resistencia al corte (RC) del suelo (esfuerzo cortante). Inmediatamente después del trabajo de labranza, se midió RC con una veleta Eijkelkamp N°2, a 15 cm de profundidad en el perfil debido a que son implementos utilizados en horticultura, para determinar la potencia requerida en función del área de corte tangencial del implemento su profundidad teórica de trabajo (ecuación 5).

$$P = \frac{RC * A * PT * v}{1000} \quad \text{ecuación 5}$$

Donde P es la potencia requerida para romper el suelo después del pase del implemento (kW), RC es la resistencia al corte (Pa), A es el ancho de trabajo del implemento de labranza (m), PT es la profundidad de trabajo teórica del implemento (m) y v es la velocidad de avance del implemento durante la prueba (m/s).

Determinación del coeficiente de uniformidad de distribución de semilla de arroz con sembradora de chorro

Para la determinación de la uniformidad en la distribución de las semillas de arroz en la sembradora de chorro, primero se verificó que la barra de calibración estuviera en la misma posición y mantuviera las mismas condiciones de operación para todas las pruebas. Se realizó la prueba estática del implemento y luego se repitió a dos velocidades de avance diferente. Para cada prueba se colocó un recolector en cada chorro de la sembradora, con el fin de pesar la semilla dispensada en el trayecto de la longitud de la prueba en cada salida (figura 4). El pesado de la semilla se hizo en una balanza analítica graduada en gramos con precisión de $\pm 0,05$ g. La sembradora tiene dos compartimentos contenedores de semilla independientes, por lo que las mediciones se reflejan para ambos, tanto izquierdo como derecho.



Figura 4. Medición de la cantidad de semilla por cada chorro de la sembradora en estudio.

Los resultados obtenidos para cada una de las pruebas se presentan de forma gráfica, simulando una siembra con un viaje de ida y vuelta en un terreno de 100 metros de largo. A cada una de las pruebas simuladas se le calcula el %CU de la densidad de siembra y se compara con el %CU de dispensa de semilla de la sembradora.

Determinación del coeficiente de uniformidad de la aplicación con pulverizadora

Para la determinación de la uniformidad en el asperjado de la pulverizadora en estudio, primero se verificó que el implemento estuviese nivelado y que las tuberías y sujeciones estuviesen en buen estado. Se realizó la prueba con cuatro presiones de operación de la bomba del implemento, midiendo el tiempo de avance en longitudes de 50 m para cada prueba y colocando un recolector en cada boquilla de la fumigadora para cada prueba, con el fin de conocer el volumen de líquido dispensado en cada salida (figura 5), medido en una probeta de 1 L de capacidad con incertidumbre de ± 5 ml.



Figura 5. Recolección de volumen de cada boquilla de la pulverizadora en estudio.

Análisis de datos

Los datos obtenidos se promedian por cada implemento y velocidad o presión aplicada y se calculó la desviación estándar para obtener el coeficiente de uniformidad de cada labor. Los resultados serán comparados por medio de un análisis de varianzas para verificar si hay diferencias destacables para la formulación de las conclusiones y recomendaciones de la operación, utilizando RStudio 4.1.

Resultados y discusión

Labranza de suelos

En la figura 6 y el cuadro 2, se muestran los resultados de las mediciones inmediatamente después de aplicar los implementos en el suelo. La labor del subsolado obtuvo el único coeficiente de uniformidad aceptable de profundidad de labranza entre los implementos estudiados, a una velocidad de avance promedio de 15,84 km/h. Debido a que el terreno para todas las pruebas fue el mismo y se utilizó el mismo tractor, se considera que, si es posible lograr coeficientes de uniformidad altos variando la velocidad de avance de los equipos, y considerando el patinaje durante la operación. Para el palín, las profundidades fueron significativamente diferentes con un aumento del 17,23% de la uniformidad cuando se aumentó la velocidad de avance, dentro del rango permitido por el fabricante. Cuando la velocidad fue menor, no hubo diferencia con el arado rotador, independientemente del uso o no de la tapa de este implemento en ninguna de las velocidades de avance probadas. Los coeficientes de uniformidad mayores corresponden a implementos de labranza vertical primaria, sin embargo, son los implementos que, al no desestructurar el suelo, requieren de mayor potencia para los tratamientos de labranza secundaria.

En la figura 6, se observa gráficamente los límites de profundidad teórica de los implementos (línea roja punteada). Las mejores eficiencias de la labranza se alcanzaron con el arado rotativo, pues fueron las profundidades más cercanas a las profundidades teóricas de los implementos según los fabricantes. Las pruebas corresponden a las indicadas en el cuadro 2.

Cuadro 2. Profundidad de labranza promedio y desviación estándar, velocidad de avance y coeficiente de uniformidad para los implementos de labranza evaluados

Prueba	Implemento	Velocidad de avance (km/h)	Profundidad promedio de labranza (cm)*	Desviación estándar (cm)	% CU	% Eficiencia	Potencia (kW)
1	Subsolador	15,84	24,06 ^c	4,73	80,35	60,14	16,33
2	Subsolador	10,44	20,71 ^b	4,89	76,39	51,79	8,91
1	Palín	3,53	25,68 ^c	6,31	75,43	73,38	1,97
1	Rotador (sin tapa)	11,52	20,64 ^{ab}	5,43	73,66	82,55	3,84
2	Rotador (con tapa)	23,04	19,77 ^{ab}	6,75	65,84	79,09	5,16
3	Rotador (sin tapa)	19,08	17,32 ^a	6,10	64,76	69,27	6,12
4	Rotador (con tapa)	14,76	18,16 ^{ab}	6,53	64,02	72,64	1,95
2	Palín	2,38	19,14 ^{ab}	8,00	58,20	54,68	0,40

*Las letras iguales no representan diferencias significativas según Tukey $p < 0,05$

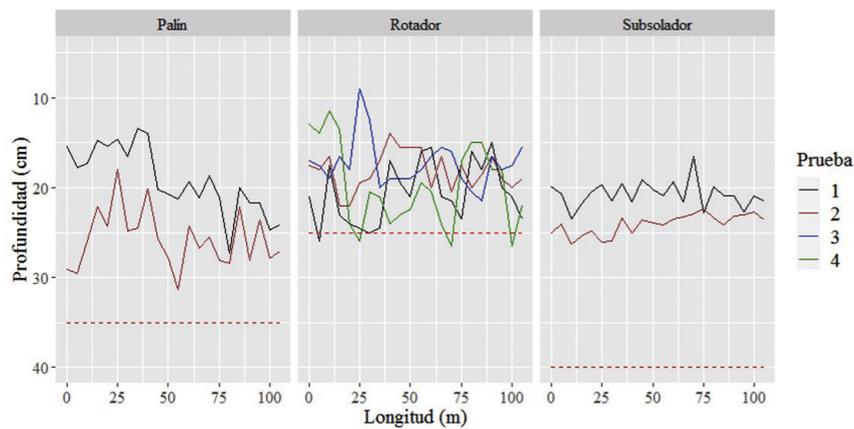


Figura 6. Perfiles de labranza obtenidos para cada velocidad de avance y profundidad teórica del implemento.

Siembra

En el cuadro 3 se muestran los resultados de las mediciones de salida de semillas en cada chorro de la sembradora en estudio en las tres condiciones de velocidad. La prueba estática es útil para verificar que el implemento esté trabajando en buena forma, pero es significativamente diferente a la salida de semilla en operación a diferentes velocidades de avance, por lo que se recomienda hacer las calibraciones de las sembradores en condiciones de operación similares al campo, tomando en cuenta que la velocidad mayor fue la menos uniforme, lo que puede reflejarse en un comportamiento no homogéneo del rendimiento debido a falta de uniformidad en la densidad de siembra.

Cuadro 3. Resumen de la cantidad de semilla dispensada por la sembradora de chorro.

Prueba	Velocidad de avance (km/h)	Promedio de Peso de semilla recolectada por chorro (g)*	Desviación del Peso (g)	Semilla total distribuida (kg/ha)	% CU	Marcha / rpm del tractor
1	NA	183,99 ^a	21,9	152,52	88,1	Estática
2	6,67	124,25 ^b	16,78	155,31	86,49	C1 @ 1800
3	12,53	128,71 ^b	37,21	154,7	71,09	C4 @ 2000

*Las letras iguales no representan diferencias significativas según Tukey $p < 0,05$

En la figura 7 se muestra la distribución de la salida de semilla por cada chorro de cada contenedor del implemento para las diferentes velocidades de las pruebas, diez salidas de cada lado. La importancia de esta medición radica en la detección de puntos críticos de la sembradora que pueden ser corregidos antes de la siembra en el campo que estén alterando la uniformidad de la distribución de la semilla, así como de acciones de mantenimiento correctivo que deben ser realizadas en elementos y mecanismos específicos del equipo. Por el ejemplo, deben ser revisadas las salidas 1 y 9 del contenedor izquierdo y las salidas 4 y 8 del contenedor derecho de la sembradora, según los picos observados en el gráfico para cada contenedor, además de verificar las salidas de mayor variación de cantidad de semilla con respecto a la media en las mediciones de la sembradora en el campo.

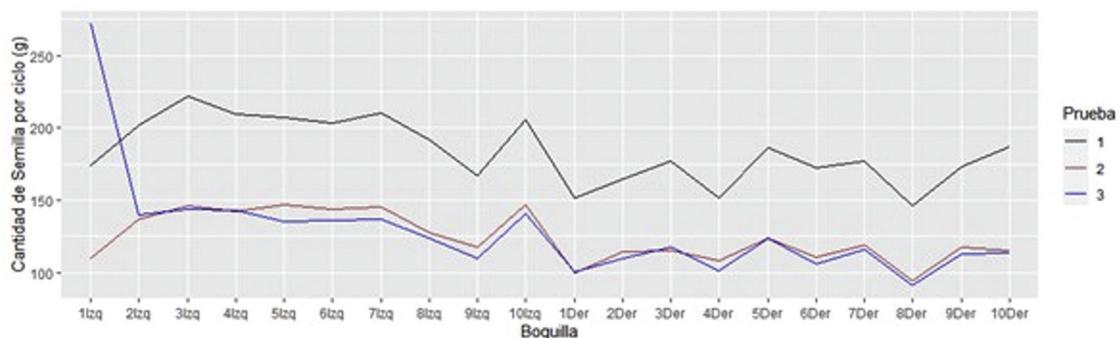


Figura 7. Cantidad de semilla para las salidas de cada contenedor de la sembradora en estudio

En caso de no realizarse correcciones sobre las salidas en donde se observen medidas anómalas, se generarán líneas de cultivo con diferentes densidades de siembra (figura 8). Esta variación en la densidad de cultivo entre líneas producirá que las aplicaciones de fertilizantes calculadas para valores teóricos sean ineficientes, lo cual, se reflejará en áreas con rendimientos productivos desuniformes.

En la figura 8 se realiza una visualización grafica para cada una de las pruebas, en un escenario de ida y vuelta del equipo en una longitud de 100 m. En condiciones ideales, el coeficiente de uniformidad de la sembradora y el de la uniformidad de la densidad de siembra simulado, serán el mismo (Prueba1 = 88,41, Prueba2 = 86,73, Prueba3 = 71,91). Sin embargo, en condiciones reales existirán variables como patinaje y topografía o inclusive defectos de conformación del terreno que podrían hacer que el %CU de la densidad de siembra disminuya con respecto al %CU de la sembradora.

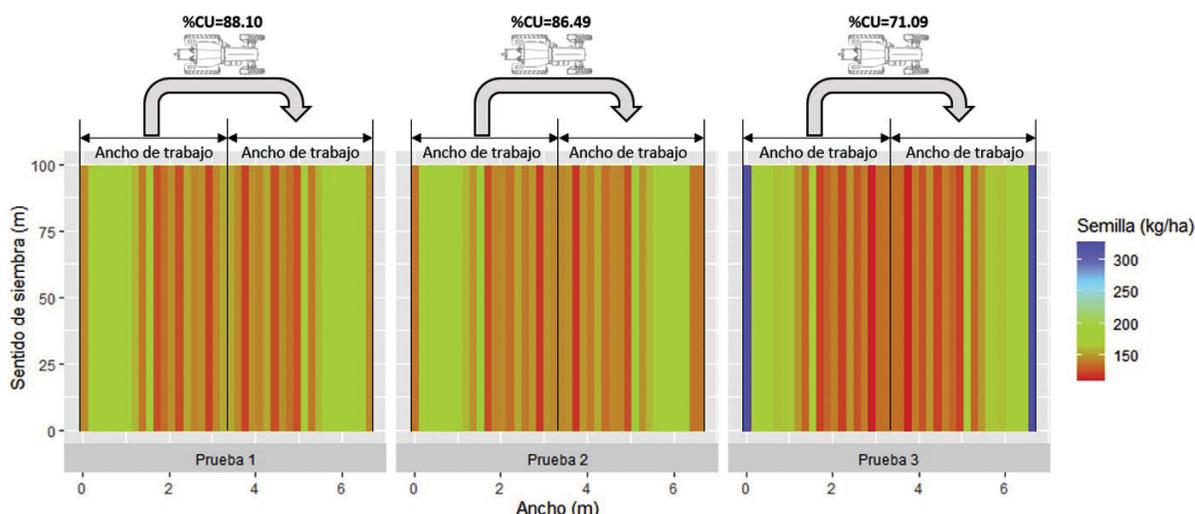


Figura 8: Visualización espacial de la distribución de semilla por hectárea en función del coeficiente de uniformidad de la sembradora.

Según Arias-Badilla et al. (2020), los agricultores en Costa Rica tradicionalmente han empleado densidades de siembra en arroz que están entre 350 y 400 kilogramos por hectárea (kg/ha); sin embargo, esta práctica generalmente propicia el desarrollo de plantas más delgadas y débiles. Las variedades Palmar 18, Lazzarroz FL y principalmente NayuribeB FL, a densidades entre 250 y 337 kilogramos por hectárea, propician una mejor respuesta a la fertilización. Según la referencia anterior, la calibración realizada al implemento estaría entregando menos semilla de lo recomendado.

Pulverización

En el cuadro 4 se muestran los resultados de las mediciones de las salidas de las boquillas de pulverizadora en estudio. Desde el inicio de las pruebas se descartó la medición de la boquilla en la posición 16 de izquierda a derecha del implemento, debido a que fugaba excesivamente el líquido, lo cual demuestra que hacer las pruebas brinda la ventaja de detectar posibles puntos críticos antes de la operación en el campo. Los mejores coeficientes de uniformidad se presentan a las menores presiones de operación de la bomba, por lo que para este caso se recomendaría hacer las dosificaciones que correspondan para los volúmenes de aplicación cuando el equipo opere a 30 o 40 kg/cm² para garantizar una aplicación homogénea al cultivo respectivo.

Cuadro 4. Resumen de las pruebas de la pulverizadora con diferentes presiones de operación.

Prueba	Promedio de volumen por salida (ml)	Desviación estándar del volumen por salida (ml)	% CU	Presión (kg/cm ²)	Velocidad (km/h)
Prueba 1	1216,84	62,48	94,87	100,00	1,20
Prueba 2	670,53	67,92	89,87	60,00	1,03
Prueba 3	539,84	9,03	98,33	40,00	1,00
Prueba 4	515,79	8,86	98,28	30,00	1,00

*Las letras iguales no representan diferencias significativas según Tukey $p > 0,05$

En la figura 9 se muestra la distribución de las salidas de cada boquilla. Las boquillas numeradas a 1 a 10 corresponden al brazo de fumigación izquierdo, el cual debe ser revisado debido a la variabilidad cuando opera a 100 kg/m², además de sustituir la boquilla 16 que presentó desgaste excesivo de la cerámica de la salida (figura 10), al igual que las boquillas 8 y 19 que a las presiones mas altas presentan diferencias de volumen con respecto a las otras.

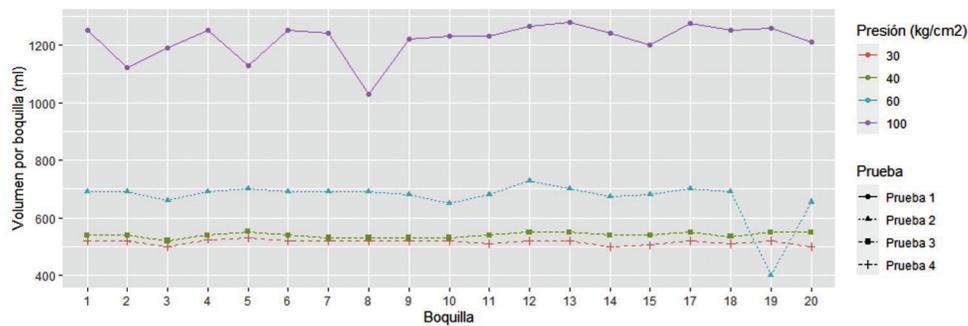


Figura 9. Volumen de salida de cada boquilla de la pulverizadora en estudio



Figura 10. Boquilla número 16 del equipo en estudio sustituida por desgaste excesivo

Conclusiones y recomendaciones

Para la labranza de suelos, los coeficientes de uniformidad mas altos los mostraron los implementos de labranza vertical, aunque el suelo después de preparado presentaría mayor demanda de potencia para trabajos posteriores a ellos. Además, en las condiciones de las pruebas, no alcanzan las profundidades de trabajo teóricas señaladas por el fabricante.

Para el arado rotador, no hay diferencias en cuanto a profundidad de labranza ni uniformidad cuando la tapa del implemento está cerrada o abierta. Este implemento es el que más se acerca a la profundiza en el perfil a la longitud que indica el fabricante, aunque con porcentajes de uniformidad bajos. El arado excavador presentó mejores uniformidades de profundidad de

labranza a velocidades de avance cercanas a las recomendadas por el fabricante. En todos los casos se recomienda en análisis de la resistencia a la rodadura, para mejorar el desempeño de la maquinaria mejorando el balanceo estático del tractor si fuese necesario.

La sembradora no tiene diferencias significativas de cantidad de semilla distribuida por cada chorro, sin embargo, a mayores velocidades disminuyó la uniformidad de las salidas de la semilla. Se recomienda verificar en el campo otras velocidades de avance que mantengan la uniformidad en la salida de las semillas en cada chorro y capacitar a quienes operen los equipos para que mantengan velocidades adecuadas para la labor.

Para la fumigadora, se determinó coeficientes de uniformidad aceptables para las presiones de operación mas bajas (30 y 40 kg/cm²), por lo que se recomienda calcular las dosificaciones con base en estas presiones de trabajo del sistema en estudio y verificar el estado general del equipo, especialmente en el brazo de fumigación izquierdo que presenta las mayores variaciones a presiones de 60 y 100 kg/cm².

Durante el proceso de determinación del coeficiente de uniformidad, es posible detectar puntos críticos específicos en la operación de los implementos en el campo, tales como desgastes de boquillas o salidas de semillas defectuosas, por lo que se recomiendan mediciones periódicas para garantizar homogeneidad del trabajo y ejecutar acciones preventivas que garanticen el buen funcionamiento de las máquinas. Las labores mecanizadas homogéneas permiten alcanzar rendimientos de producción mejores y establecer zonas de manejo diferenciado con mejor criterio cuando las máquinas no sean los factores de las variaciones en el campo.

Se recomienda considerar parámetros operativos como la resistencia a la rodadura y características físicas del suelo sobre el que trabajan los implementos evaluados para posibilitar la mejora continua de las operaciones agrícola mecanizadas. Altos coeficientes de uniformidad permiten obtener cosechas homogéneas, y la evaluación de las operaciones apoyadas con maquinaria facilitan el uso eficiente de los recursos de producción.

Las labores estudiadas, corresponden a operaciones comunes antes de la cosecha de los cultivos, sea preparación de suelos, siembra y mantenimiento de la plantación, por lo que el efecto acumulativo de los coeficientes de uniformidad se reflejará en el rendimiento de la producción. Los porcentajes de los CU de las diferentes prácticas, repercuten sobre la uniformidad del rendimiento del cultivo.

Agradecimientos:

A la Vicerrectoría de Docencia del TEC por facilitar los medios para hacer las mediciones dentro del curso “Laboratorio de Tractores” del segundo semestre del año 2021, a los estudiantes que realizaron las mediciones y procesaron los datos y al Sr. Guillermo Navarro, asistente académico del curso.

Referencias

- [1] J. Hikmat Namiq Al-Talabani and M. Ahmed Jalal Al-Sammaraie, “THE EFFECT OF PLOWING AND PULVERIZATION SYSTEMS ON SOME PLANT INDICATORS OF ONION,” *PLANT Arch.*, vol. 21, no. Suppliment-1, pp. 851–853, Jan. 2021, doi: 10.51470/PLANTARCHIVES.2021.v21.S1.129.
- [2] E. M. Albornoz, A. C. Kemerer, R. Galarza, N. Mastaglia, R. Melchiori, and C. E. Martínez, “Development and evaluation of an automatic software for management zone delineation,” *Precis. Agric.*, vol. 19, no. 3, pp. 463–476, 2018, doi: 10.1007/s11119-017-9530-9.
- [3] E. Soza, E. Pezzoni, G. Botta, M. Tourn, and D. Agnes, “Eficiencia de implantación de trigo con labranza en franjas a distintas velocidades de avance,” *Rev. la Fac. Agron.*, vol. 25, no. 2, pp. 121–127, 2005.

- [4] A. Rodríguez *et al.*, "Implications of crop model ensemble size and composition for estimates of adaptation effects and agreement of recommendations," *Agric. For. Meteorol.*, vol. 264, pp. 351–362, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.agrformet.2018.09.018.
- [5] E. S. Osuna-Ceja, F. Garibaldi Márquez, and R. V. García Hernández, "Desempeño de un subsolador integral biomimético para laboreo sustentable de suelos agrícolas," *Acta Univ.*, vol. 29, pp. 1–14, 2019, doi: 10.15174/au.2019.1968.
- [6] N. Rangeon, L. Aciar, R. Osinaga, J. Arzeno, and C. Sánchez, "Análisis de la resistencia a la penetración y humedad de suelo como indicadores de calidad en distintos sistemas de labranza," *XXI Congr. Argentino la Cienc. del suelo. Semiáridoun desafío para la Cienc. del Suelo*, 2008.
- [7] Arrazate-Oropeza, Gómez-Calderón, and Villagra-Mendoza, "Comparación de patinaje bajo diferentes tipos de labranza de suelo," in *XII Congreso Latinoamericano y del Caribe de Ingeniería Agrícola*, 2016, p. 649.
- [8] Hang, Huang, and Zhu, "Analysis of the movement behaviour of soil between subsoilers based on the discrete element method," *J. Terramechanics*, vol. 74, pp. 35–43, 2017, doi: 10.1016/j.jterra.2017.10.002.
- [9] G. Bernal, M. Posada, and V. Piedrahíta, "Evaluación Técnica de Tres Tipos de Micronairs que se Utilizan en la Fumigación Aérea del Banano.," *Rev. Fac. Nac. Agron. Medellín*, vol. 51, no. 1, pp. 237–252, 1998.
- [10] F. Manqui, J. Riquelme, and A. Villablanca, "Sembradoras de granos," *NFORMATIVO INIA N°69*, 2012. [Online]. Available: <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/123456789/4699/NR40613.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. [Accessed: 15-Nov-2021].
- [11] M. Villón, *Hidrología estadística*. Editorial Tecnológica de Costa Rica, 2006.
- [12] G. V. Cormack and M. R. Grossman, "Quantifying bias and variance of system rankings," *SIGIR 2019 - Proc. 42nd Int. ACM SIGIR Conf. Res. Dev. Inf. Retr.*, pp. 1089–1092, 2019, doi: 10.1145/3331184.3331356.
- [13] J. G. Arias-Badilla, E. A. Esquivel-Segura, and R. Campos-Rodríguez, "Evaluación de la densidad de siembra y nivel de fertilización en arroz, para las variedades Palmar-18, Lazarroz FL y NayuribeB FL, en Parrita (Pacífico Central), Costa Rica," *Rev. Technol. en Marcha*, Jul. 2020, doi: 10.18845/tm.v33i3.4363.