



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

Evaluación de sistemas de control de pulverización en aplicaciones de herbicida en silvicultura

Carlos Alexander PERDOMO DA ROSA

Maestría en Ciencias Agrarias
opción Ciencias del Suelo

Abril de 2021

Tesis aprobada por el tribunal integrado por Ing. Agr. (Dra.) Juana Villalba, Dr. João Paulo Rodrigues Da Cunha, y Ing. Agr. (PhD.) Alejandro Olivera, el 17 de diciembre de 2020. Autor: Ing. Agr. Carlos Perdomo. Director: Ing. Agr. (Dr.) Juan José Olivet.

AGRADECIMIENTOS

A la empresa UPM por el apoyo en la realización de este estudio financiando la compra del sistema de control electrónico proporcional a la velocidad de avance evaluado, facilitando el uso de maquinaria, acceso a operaciones e instalaciones, en especial a Ricardo Buzzo, Mario Neves y Camilo De Mattos por el tiempo y esfuerzo dedicados.

A Federico Peña por el apoyo en el acceso y manejo de datos de seguimiento del sistema Magna.

A mi tutor Juan Olivet, por los conocimientos compartidos, las horas de discusión y su espíritu crítico, pero en especial por su amistad y aporte constante a mi crecimiento profesional y personal.

A mi familia por apoyarme e incentivar me en el desarrollo de mi carrera. En especial a mi esposa e hija por todo el amor y el invaluable apoyo durante este camino, mis logros son por y para ustedes.

TABLA DE CONTENIDOS

PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS	III
RESUMEN	VII
SUMMARY	VIII
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
2. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	9
2.1. EVALUACIÓN DE VELOCIDAD DE AVANCE A CAMPO	9
2.1.1. <u>Operaciones forestales evaluadas</u>	9
2.1.2. <u>Sistema de monitoreo remoto Actualred®</u>	10
2.1.3. <u>Obtención y análisis de datos</u>	11
2.2. EXPERIMENTOS ESTÁTICOS DE SISTEMAS DE CONTROL	12
2.2.1. <u>Experimento estático de desvío de tasa de aplicación en sistemas CC y</u> <u>CPM</u>	13
2.2.1.1. Banco de prueba.....	13
2.2.1.2. Comandos evaluados.....	14
2.2.1.3. Obtención y registro de datos	16
2.2.1.4. Procesamiento de datos	18
2.2.1.5. Diseño experimental.....	19
2.2.1.6. Análisis estadístico.....	19
2.2.2. <u>Experimento estático de desvío de tasa de aplicación y tiempo de</u> <u>estabilización en sistemas CC, CPM y CPA</u>	20
2.2.2.1. Banco de prueba.....	20
2.2.2.2. Comandos evaluados.....	21
2.2.2.3. Procedimiento de calibración y registro de datos.....	22
2.2.2.4. Diseño experimental y variables evaluadas	24
2.2.2.5. Análisis estadístico.....	25
2.3. EXPERIMENTO A CAMPO DE EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE CONTROL	26

2.3.1.	<u>Condiciones ambientales previas y volumen de residuos de cosecha</u>	27
2.3.2.	<u>Maquinaria utilizada</u>	27
2.3.3.	<u>Comando de pulverización</u>	28
2.3.3.1.	Sistema proporcional a la velocidad de avance (CPA)	28
2.3.3.2.	Sistema proporcional al régimen del motor (CPM).....	29
2.3.3.3.	Sistema de caudal constante (CC)	29
2.3.3.4.	Sistema de obtención de datos	30
2.3.4.	<u>Procesamiento de datos</u>	30
2.3.5.	<u>Diseño experimental</u>	32
2.3.6.	<u>Análisis estadístico</u>	32
3.	<u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	33
3.1.	VELOCIDAD DE AVANCE EN OPERACIONES A CAMPO	33
3.1.1.	<u>Operaciones de control de malezas en reforestación</u>	33
3.1.2.	<u>Operaciones de control de malezas en campos nuevos</u>	33
3.1.3.	<u>Distribución espacial de la velocidad de avance en reforestación y campos nuevos</u>	34
3.2.	EXPERIMENTOS ESTÁTICOS DE SISTEMAS DE CONTROL	36
3.2.1.	<u>Experimento estático de desvío de tasa de aplicación en sistemas CC y CPM</u>	36
3.2.2.	<u>Experimento estático de desvío de tasa de aplicación y tiempo de estabilización en sistemas CC, CPM y CPA</u>	38
3.2.2.1.	Tiempo de estabilización	38
3.2.2.2.	Desvío de la tasa de aplicación objetivo.....	40
3.2.2.3.	Comportamiento de los sistemas CC evaluados	44
3.3.	EXPERIMENTO A CAMPO DE EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE CONTROL	45
3.3.1.	<u>Variación de velocidad de avance</u>	45
3.3.1.1.	Frecuencia de cambios de velocidad.....	46
3.3.2.	<u>Desvío de la tasa de aplicación objetivo</u>	47
3.3.2.1.	Distribución espacial de la tasa de aplicación	48

3.3.3. <u>Efecto de los cambios de velocidad en la tasa de aplicación</u>	51
4. <u>CONCLUSIONES</u>	54
5. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	56
6. <u>ANEXO: Desempeño de sistemas de control de pulverización para aplicación de herbicidas en silvicultura</u>	61

RESUMEN

La actividad forestal en Uruguay ha aumentado en los últimos años incrementando la superficie plantada, esto provoca mayor actividad de la fase silvícola en tareas como preparación de sitio, plantación, control de hormigas y control de malezas. Esta última es un punto clave para la supervivencia y crecimiento inicial de las plantaciones. Es fundamental que la aplicación de fitosanitarios se realice de forma precisa. Las pulverizadoras hidráulicas equipadas con alguno de los siguientes sistemas buscan asegurar una tasa de aplicación uniforme ($l\ ha^{-1}$), sistemas de caudal constante (CC), sistemas de caudal proporcional al motor (CPM) y sistemas de caudal proporcional al avance (CPA). El objetivo general de este trabajo fue evaluar el desempeño de tres tipos de sistemas de control de tasa de aplicación, sistema CC, CPM y CPA. Los objetivos específicos fueron: (1) determinar las variaciones de velocidad en operaciones a campo, (2) evaluar el desempeño de los sistemas CC, CPM y CPA en experimentos estáticos en banco de prueba y, (3) evaluar los desvíos de tasa de aplicación de los sistemas CC, CPM y CPA en aplicación de herbicidas en plantaciones forestales. La velocidad de avance de operación presentó desvíos en un rango de $\pm 40\%$ de la velocidad de regulación con una alta frecuencia de variación. En los experimentos estáticos el sistema CPM presentó desvíos promedio de tasa de aplicación de 2,7-3 % frente al sistema CC con 5-9 % y el sistema CPA con 9 %, para variaciones de velocidad de $\pm 40\%$ de la velocidad objetivo. El tiempo promedio de estabilización de presión del sistema CPA fue 3,86 s, el sistema CPM 0,61 s y CC 0,46 s. En el experimento a campo el sistema CPM tuvo 7,8 % de desvío de tasa de aplicación pulverizando el 72 % del área con desvíos de tasa menores a $\pm 10\%$. Los sistemas CC y CPA tuvieron desvíos de 12,3 % y 16,2 % pulverizando el 53 % y el 46 % del área con desvíos menores a $\pm 10\%$ respectivamente.

Palabras clave: aplicación de herbicidas, forestación de precisión, tasa de aplicación, tiempo de estabilización

SUMMARY

EVALUATION OF SPRAY CONTROL SYSTEMS IN HERBICIDE APPLICATIONS IN FORESTRY

Forestry activity in Uruguay has increased in recent years increasing the planted area, this causes greater activity in the silvicultural phase in tasks such as site preparation, planting, ant control and undergrowth control. The latter is a key point for the survival and initial growth of the plantations. It is essential that the application of phytosanitary products is carried out accurately. Hydraulic sprayers equipped with any of the following systems seek to ensure a uniform application rate ($l\ ha^{-1}$), constant flow systems (CC), motor proportional flow systems (CPM) and advance proportional flow systems (CPA). The general objective of this work was to evaluate the performance of three types of application rate control systems, CC system, CPM and CPA. The specific objectives were: (1) to determine the speed variations in field operations, (2) to evaluate the performance of the CC, CPM and CPA systems in static tests on the test bench and, (3) to evaluate the deviations of the rate of application of CC, CPM and CPA systems in the application of herbicides in forest plantations. The operating advance speed presented deviations in a range of $\pm 40\%$ of the regulation speed with a high frequency of variation. In the static tests, the CPM system presented average application rate deviations of 2.7-3 % compared to the CC system with 5-9 % and the CPA system with 9 %, for speed variations of $\pm 40\%$ of the target speed. The mean pressure stabilization time of the CPA system was 3.86 s, the CPM system 0.61 s and CC 0.46 s. In the field trial, the CPM system had a 7.8 % deviation in the application rate, spraying 72 % of the area with rate deviations less than $\pm 10\%$. The CC and CPA systems had deviations of 12.3 % and 16.2 %, spraying 53 % and 46 % of the area with deviations less than $\pm 10\%$ respectively.

Keywords: pesticide application, precision forestry, application rate, settling time

1. INTRODUCCIÓN

La forestación en Uruguay se desarrolló como resultado de la interacción de varios factores enmarcados en la existencia de condiciones edafoclimáticas de aptitud forestal y una política de estado que generó un marco legal que incentivó la realización de inversiones. La Ley Forestal, la Ley de Zonas Francas y la Ley de Promoción y Protección de Inversiones estimularon y dinamizaron las inversiones en la cadena productiva (Tommasino, 2013).

La actividad forestal en el país ha aumentado significativamente con un crecimiento económico anual sostenido; el 24 % de las exportaciones de bienes del país corresponden a este rubro. Se encuentra en construcción la tercera planta de celulosa del país, esto consolidará a la celulosa como el principal producto de exportación del país, y a Uruguay como el segundo exportador mundial de celulosa de fibra corta (Uruguay XXI, 2019).

En 2018 la superficie afectada por plantaciones comerciales alcanzó 1.243.000 ha. Ese mismo año se plantaron alrededor de 75.000 ha, donde 60.000 ha correspondieron a plantación de áreas cosechadas y/o conversión de especies (reforestación) y 15.000 ha a nuevas áreas forestadas (DIEA, 2019). Esto demanda actividades en la fase silvícola como control de hormigas, preparación de sitio, plantación y control de malezas.

El adecuado control de malezas es un punto clave para el establecimiento de las plantaciones forestales, asegurando una baja competencia por agua, luz y nutrientes. El banco de semilla del suelo, especies de malezas presentes, las condiciones post-plantación e historia del sitio de plantación influyen en el enmalezamiento inicial y definen la problemática de malezas (Seifert et al. 2007, Villalba 2010).

Diversos trabajos destacan la importancia del control de malezas y su efecto positivo en el incremento del diámetro, altura y volumen de diversas especies de plantaciones comerciales (Duplissis 1998, Eyles et al. 2012, Osiecka y Minogue 2013, Peligrinotti et al. 2009, Sánchez 1997, Seifert et al. 2007, Seifert y Woeste 2002, Silva et al. 2012, Villalba 2010).

Sánchez (1997) detectó efectos significativos de la presencia de malezas sobre el crecimiento de las plantaciones, reportando disminuciones de 29 a 77 %; el control de malezas produjo incrementos de un 14 % en el diámetro basal de *Eucalyptus globulus* spp. a los 11 meses post plantación (Eyles et al., 2012). La aplicación de herbicida en un ancho de fila de 100 a 150 cm asegura la mínima interferencia de las malezas en el desarrollo de *Eucalyptus* spp. (Silva et al. 2012, Toledo et al. 2003). En nuestro país, experimentos de aplicación de premergentes en la fila pre-plantación reportan incrementos de 40 – 50 % en altura de *Eucalyptus* spp. a los 160 días post-plantación (Villalba, 2010).

La necesidad de una gestión forestal sostenible, unido a la búsqueda por reducir costos de operación hace fundamental que la aplicación de fitosanitarios sea precisa asegurando que se apliquen las dosis óptimas (Sharda et al. 2010, UNIT 1152:2020). Con este fin resulta vital la calibración y mantenimiento de los equipos, lo que en ocasiones es un punto débil en las empresas dedicadas a dar servicio de aplicación. Dornelles et al. (2011) inspeccionaron un total de 85 equipos agrícolas de pulverización terrestre en Brasil de los que solamente 4 obtuvieron la categoría de aprobación para operar. Bentancur (2017) relevó 70 equipos de pulverización terrestre que realizaban servicio de aplicación agrícola en Uruguay, el 20 % no efectuaba chequeos de desgaste de las boquillas utilizadas y solo un tercio lo verificaba con medición de caudal por boquilla. El 18 % de los equipos presentó boquillas con desgaste excesivo (caudal con desvío mayor a 15 % del caudal nominal) y solo el 10 % utilizaba boquillas antideriva.

El uso de tecnologías de agricultura de precisión como mapas de prescripción, control electrónico de secciones de la barra de pulverización o de tasa de aplicación han tenido gran difusión en el medio agrícola en los últimos 20 años (Luck et al., 2011a). Estas tecnologías pueden encontrar aplicación en el control de malezas en plantaciones forestales. Reguladores de caudal proporcionales a la velocidad de avance, mapas de distribución espacial de malezas o sistemas de detección de malezas en tiempo real, podrían disminuir el gasto de herbicidas con el inherente beneficio económico y medioambiental (Christensen et al. 2009, Luck et al. 2011a) manteniendo u optimizando la eficacia en el control de malezas.

Los pulverizadores hidráulicos pueden estar equipados con diferentes sistemas que permiten regular la presión de trabajo y asegurar una tasa de aplicación uniforme (Di Prinzio et al. 2010, García 2007, Gil et al. 2010, Olivet 2001). En este sentido podemos encontrar equipos con sistemas de caudal constante, sistemas de caudal proporcional al motor y sistemas de caudal proporcional al avance.

Los sistemas de caudal constante (CC), mantienen estable la presión de trabajo y, de esta forma, el caudal de las boquillas independientemente del caudal erogado por la bomba o el número de secciones activas. Constan de una válvula accionada por un resorte que mantiene estable la presión de trabajo controlando el flujo de caldo a través de un retorno al depósito. Cuando la presión de trabajo sobrepasa la regulada por el resorte, la válvula se abre y deja pasar el caldo a través del retorno. Al mantener constante el caudal pulverizado, la tasa de aplicación se mantendrá estable siempre que la velocidad de avance no varíe. (Di Prinzio et al. 2010, García 2007, Gil et al. 2010).

Al contrario de los sistemas CC, los sistemas de caudal proporcional al motor (CPM) y de caudal proporcional al avance (CPA) permiten aplicar a tasa constante con cierta independencia de la velocidad de avance.

Los sistemas CPM constan de un comando de pulverización con válvula reguladora de presión de apertura progresiva con derivación a un retorno conectado al depósito de la pulverizadora. La presión de trabajo se regula ajustando esta válvula, la cual queda fija en la posición de regulación manteniendo así una determinada apertura del retorno. Las variaciones de velocidad ocurridas por variación del régimen del motor, siempre que la bomba sea accionada por toma de fuerza, se traducirán en variaciones proporcionales del caudal erogado por esta y, en consecuencia, se compensarán las variaciones de velocidad con variaciones en el caudal pulverizado, manteniendo así una tasa de aplicación uniforme. Estos comandos presentan retornos ajustables para cada sección de la barra de pulverización, esto permite que el cierre de secciones no modifique la presión de trabajo y de esa forma no varíe el caudal de las secciones abiertas. Una limitante de este sistema es que al basarse la regulación en el régimen del motor en caso de que el tractor patine no habrá corrección por la pérdida de velocidad (ARAG 2016, Di Prinzio et al. 2010, García 2007, Gil et al. 2010, Grisso et al. 2011).

Los sistemas CPA constan de una válvula controlada por computadora que ajusta automáticamente la presión de trabajo en función de variaciones en la velocidad de avance. A partir de datos del caudal de boquillas, obtenidos con un caudalímetro instalado en el comando de pulverización, y de velocidad de avance, obtenidos con sensor magnético de rueda, radar o sistema GPS, el sistema informático calcula la tasa de aplicación real. En caso de haber discrepancias con la tasa objetivo de aplicación, seteada en la computadora, esta actuará sobre la presión de trabajo para realizar las correcciones necesarias (Di Prinzio et al. 2010, García 2007, Gil et al. 2010, Grisso et al. 2011).

Maroni (2007) realizó un experimento estático comparativo entre válvulas reguladoras de presión utilizadas en sistemas CC y sistemas CPM en el que simuló variaciones de velocidad de avance al variar el régimen de la toma de fuerza. Ante

aumentos y disminuciones en la velocidad de 15 % los sistemas CC presentaron desvíos de 19 % y -12 % respectivamente en la tasa de aplicación. Las válvulas de sistemas CPM lograron ajustar la tasa de aplicación ante variaciones de velocidad de la misma magnitud que CC con oscilaciones de 1,7 a 3 % de la tasa de aplicación.

Diversos autores evaluaron la capacidad de respuesta de sistemas CPA para minimizar los posibles errores de tasa de aplicación, con resultados similares entre sí.

Según Luck et al. (2011a) y Al-Gaadi y Ayers (1994) los errores de la tasa de aplicación se pueden definir como errores en la dosis de fitosanitarios aplicados en una porción del área tratada. Estos errores se pueden producir por cambios de velocidad debido al terreno o a cambios de dirección del equipo (lo que afecta la velocidad relativa de la barra de pulverización), variaciones de presión a lo largo de la barra o variaciones en la distancia de aplicación causadas por microrelieve que afectan el patrón de solapamiento óptimo.

Rietz et al. (1997) evaluaron múltiples marcas de sistemas CPA y encontraron que la mayoría de los sistemas lograron alcanzar la tasa de aplicación objetivo pasados 5 s después de variadas las condiciones de velocidad o el número de secciones activas.

Luck et al. (2011a) mediante experimentos a campo con dos pulverizadores autopropulsados provistos de sistemas CPA en tres chacras de diferentes características encontraron que para una tasa de aplicación objetivo de 93,5 l ha⁻¹ solamente entre el 25 % y el 36 % (dependiendo del campo) del área aplicada recibió una tasa de aplicación de ± 10 % de la tasa objetivo mientras que la mayoría del área recibió tasas de aplicación menores al objetivo. Una causa potencial de estos desvíos en la tasa de aplicación es la capacidad de respuesta a los cambios de velocidad de los controladores electrónicos de pulverización.

Luck et al. (2011b) en otro experimento a campo sobre diez chacras de diferente superficie y forma identificó que entre el 6,5 y el 23,8 % del área tratada con sistema CPA tuvo errores mayores a ± 10 % de la tasa de aplicación objetivo. Las mayores áreas con error se correspondieron con chacras en las que su forma característica implicaba realizar muchos movimientos de giro durante la aplicación.

Sharda et al. (2013) obtuvieron en simulación estática, desvíos de la tasa de aplicación de entre 7,8 y 7,4 % para aceleración y entre 7,5 y 37,2 % para desaceleración en pulverizadores autopropulsados con sistema CPA. Observaron que el tiempo de respuesta del sistema de control se vio afectado por la magnitud requerida del ajuste de caudal (dependiente de la magnitud del cambio de velocidad) y si el cambio de velocidad se dio en forma de aceleración o desaceleración. El tiempo de estabilización del caudal fue en todos los casos superior a 5,6 s (con un máximo de 20,8 s), lo que indica que aceleraciones o desaceleraciones frecuentes pueden resultar en errores de tasa de aplicación.

Al-Gaadi y Ayers (1994) encontraron desvíos de la tasa objetivo de aplicación de -18 % a 5 % para una pulverizadora con sistema CPA desactivado (actuando como sistema CPM) y entre -7 % y 1 % para la misma pulverizadora con el sistema CPA activado, dichos resultados fueron obtenidos con variaciones de velocidad de avance de -7 % a 4 % de la velocidad de regulación.

Luck et al. (2010) observaron una reducción en el porcentaje del área con aplicación fuera de la tasa objetivo de 12,4 % a 6,2 % al utilizar sistemas CPA con corte por secciones frente a sistemas manuales de corte de sección.

Sharda et al. (2014) simularon variaciones de velocidad de diferentes escenarios típicos de aplicación agrícola con una pulverizadora dotada de sistema CPA. El tiempo de estabilización de la presión de boquillas para mantener la tasa de aplicación

constante varió entre 5,6 s y 8,3 s en desaceleración y entre 9,7 s y 13,3 s en aceleración. Los mejores resultados de tiempo de estabilización estuvieron directamente correlacionados a la magnitud de la aceleración o desaceleración sufrida por la pulverizadora, siendo mejores los tiempos de respuesta cuando la aceleración se dio de manera más progresiva ($\pm 0,4 \text{ m s}^{-2}$ frente a $\pm 0,7 \text{ m s}^{-2}$) hasta alcanzar la velocidad objetivo de trabajo.

Diversos trabajos demuestran que los sistemas de información geográfica son una excelente herramienta para el análisis de datos geoespaciales generados por computadoras de control de tasa de aplicación, logrando una representación precisa de la variabilidad de aplicación en campo. Esto permite utilizarlas en control de calidad de operaciones y en evaluaciones de desempeño de diversos sistemas (Giles y Downey 2003, Lawrence y Yule 2007, Luck et al. 2010).

Los estudios de capacidad de respuesta y adaptación del caudal a variaciones de velocidad en equipos de pulverización con sistemas CPA, se enfocan en ambientes agrícolas. Existe conocimiento limitado sobre el desempeño de sistemas CC y CPM. En nuestro país desde del año 2016 se ha comenzado a sustituir sistemas CC y CPM por sistemas CPA en operaciones de control de malezas en silvicultura, con la finalidad de mejorar la calidad de la distribución de herbicidas en aplicaciones pre y pos-plantación. Este tipo de sistemas tiene una mayor complejidad tecnológica, componentes que pueden ser dañados en aplicaciones sobre residuos de la cosecha y un costo de adquisición muy superior al de sistemas CC y CPM. El 80 % de la superficie plantada anualmente corresponde a plantación de áreas cosechadas (DIEA, 2019). En estas condiciones, las operaciones de control de malezas son realizadas a velocidades de avance entre 4 km h^{-1} y 5 km h^{-1} con visibles variaciones a lo largo de la aplicación debido a la presencia de residuos forestales. Esta situación genera incertidumbre acerca de la calidad de aplicación obtenida al emplear sistemas CPA.

El objetivo general de este trabajo fue:

Evaluar el desempeño de tres tipos de sistemas de control de tasa de aplicación, sistema de caudal constante (CC), sistema proporcional al régimen del motor (CPM) y sistema electrónico de control proporcional a la velocidad de avance (CPA).

Los objetivos específicos fueron:

1. Determinar las variaciones de velocidad en operaciones a campo.
2. Evaluar el desempeño de los sistemas CC, CPM y CPA en experimentos estáticos en banco de prueba.
3. Evaluar los desvíos de tasa de aplicación de los sistemas CC, CPM y CPA en aplicación de herbicidas en plantaciones forestales.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Este trabajo fue llevado a cabo durante los años 2019 y 2020, durante este período se realizaron las actividades necesarias para cumplir con los objetivos propuestos.

Se evaluó la velocidad de avance en operaciones forestales comerciales para determinar las variaciones de velocidad a las que son sometidos los sistemas de control de tasa de aplicación. Se caracterizó mediante experimentos estáticos el desempeño de los sistemas CC, CPM y CPA. Se evaluaron los sistemas CC, CPM y CPA en experimento a campo sobre residuos de cosecha forestal.

Las evaluaciones de velocidad de avance y el experimento a campo fueron realizados en plantaciones de la empresa Forestal Oriental S.A.

2.1. EVALUACIÓN DE VELOCIDAD DE AVANCE A CAMPO

2.1.1. Operaciones forestales evaluadas

Se estudió la velocidad de avance en operaciones de control de malezas pre y posplantación en campos reforestados, con residuos de la cosecha, y en campos nuevos con historia agrícola y ganadera.

En general las operaciones de control de malezas preplantación son realizadas con herbicidas pre y postemergentes en la fila o en área total, en tratamientos posplantación generalmente se opta por aplicar herbicidas pre y postemergentes selectivos en la fila de plantación.

En tratamientos de área total, se utilizan pulverizadoras de enganche integral de 8 a 12 metros de ancho operativo o de tiro con anchos operativos de hasta 18 m,

priorizándose el uso de equipos anchos en campos sin residuos de cosecha forestal. La aplicación de herbicidas en la fila de plantación se realiza con pulverizadoras de enganche integral de 2 a 3 metros de ancho operativo.

La velocidad de avance en reforestación se evaluó durante aplicación de herbicidas selectivos posplantación en la fila, en una superficie total de 200 ha. La velocidad objetivo de regulación de la pulverizadora fue de 4,4 km h⁻¹ con una tasa de aplicación objetivo de 100 l ha⁻¹ utilizando boquillas TTI 110 015 VP (Teejet®, IL, EE.UU.). Las condiciones de terreno y concentración de residuos forestales fueron similares en todos los rodales.

Las operaciones de aplicación de herbicidas evaluadas en rodales de campos nuevos correspondieron aproximadamente a 1.100 ha. La aplicación de herbicidas en estas condiciones tuvo una velocidad objetivo de regulación de 5,2 km h⁻¹ manteniendo la tasa de aplicación en 100 l ha⁻¹ utilizando boquillas TTI 110 02 VP (Teejet®, IL, EE.UU.).

2.1.2. Sistema de monitoreo remoto Actualred®

Actualred es una empresa que se especializa en sistemas de gestión de producción industrial y agroindustrial. Entre sus productos, dispone de un sistema de control de producción y mantenimiento industrial denominado Magna. Mediante instalación de una central con antena GPS y conectividad GSM en tractores (Figura 1) registra, almacena y transmite datos a una aplicación web centralizada que consolida y gestiona la información recibida y genera indicadores de avance de tareas.



Figura 1. Consola de registro, almacenamiento y transmisión de datos geoespaciales instalada en cabina de tractor agrícola adaptado al medio forestal.

2.1.3. Obtención y análisis de datos

El sistema de monitoreo transmite datos con una frecuencia de entre 0,2 y 1 Hz al servidor en formato .txt que la empresa posteriormente analiza. Se obtuvo de los servidores los archivos .txt correspondientes al contratista forestal con el que se realizaron los experimentos. Estos archivos están compuestos por un número identificador del tractor en seguimiento, una estampa de tiempo correlacionada con datos geoespaciales de posición y velocidad instantánea y la descripción de la tarea que el equipo se encontraba realizando, cuando el operador selecciona dicha tarea por medio del selector dispuesto en la consola (Figura 1).

Se trabajó sobre una base de datos de aproximadamente 2.300.000 puntos GPS, correspondientes aproximadamente a 1900 h de trabajo, compuestos por una estampa de tiempo (formato: dd/mm/aa hh:mm:ss) y latitud y longitud como valor decimal.

Debido a que el sistema de GPS instalado genera datos de la variable velocidad de avance como valores enteros, se calculó la velocidad de avance como la distancia

entre coordenadas GPS sucesivas, calculada con la fórmula del semiverseno (Kifana y Abdurrohman, 2012), dividido entre el tiempo transcurrido entre las estampas de tiempo correspondientes.

Se cargó la totalidad de puntos en el software de sistema de información geográfica Qgis®, se seleccionaron y eliminaron manualmente los puntos que no correspondían a aplicación de herbicidas dentro de cuadros (transporte en caminos, movimientos en cabeceras, recarga de agua y productos, cambios de cuadro, etc.). Se generaron capas de puntos clasificadas por situación forestal basadas en la ubicación en el mapa e información recolectada en recorridos a campo (campos nuevos con historia agrícola o ganadera y campos de reforestación con residuos de cosecha). Se construyeron mapas de desvío de velocidad de operación respecto a la velocidad objetivo de trabajo correspondiente a cada situación forestal. Se determinaron las frecuencias absolutas y relativas de la variable velocidad respecto a clases establecidas en función de desvíos de la velocidad objetivo de regulación para cada operación (ancho de clase de 10 %). Se obtuvieron indicadores estadísticos descriptivos de la variable velocidad mediante el uso de software estadístico InfoStat®.

2.2. EXPERIMENTOS ESTÁTICOS DE SISTEMAS DE CONTROL

Se caracterizó en experimentos estáticos el desempeño de los sistemas CC, CPM y CPA mediante simulación de variaciones en la velocidad de avance.

Se realizaron dos experimentos estáticos de evaluación de sistemas de control de pulverización. En el primer experimento se estudió el efecto de la variación de velocidad en los desvíos de tasa de aplicación en sistemas CC y CPM.

En el segundo experimento se perfeccionó el banco de pruebas, dotándolo de sensor electrónico de presión, data logger y un nuevo sistema de simulación de velocidad de avance. Esto permitió estudiar el efecto de la variación de velocidad en el desvío de la tasa de aplicación objetivo y el tiempo de estabilización de presión en sistemas CC, CPM, CPA.

2.2.1. Experimento estático de desvío de tasa de aplicación en sistemas CC y CPM

2.2.1.1. Banco de prueba

Se usó una pulverizadora para cultivos hortícolas (Lasta S.A, Canelones, Uruguay) como base para la fabricación del banco de prueba, de la cual se mantuvo el chasis, tren de rodaje y depósito de 140 l. Se adicionó una bomba hidráulica centrífuga modelo 2CP 25/16A (Pedrollo S.p.A., San Bonifacio, Italia) de 2,2 kW de potencia nominal con caudal máximo de 160 l min^{-1} a 3,7 bar de presión y 20 l min^{-1} a 6,7 bar de presión. Se creó un circuito hidráulico de similares características que en una pulverizadora convencional y una barra de pulverización con 6 boquillas TTI 110 015 VP (Teejet®, IL, EE.UU.), mismo tipo y número de boquillas utilizado para aplicación de herbicidas en la fila de plantación.

Se instaló un retorno regulable en la tubería de entrada al comando de pulverización que permitió variar el caudal de entrada al mismo. Estas variaciones en el caudal de entrada se asumieron como las variaciones ocurridas en el caudal erogado por una bomba volumétrica de una pulverizadora convencional accionada por toma de fuerza, por lo que dichas variaciones simulaban variaciones en la velocidad de avance del tractor debido a variaciones en el régimen del motor.

Se adicionó un caudalímetro de área variable Flowtech modelo Z-5032 (Nitro Instruments Co. Ltd., Japón) con escala de $10\text{-}100 \text{ l min}^{-1}$, para obtener lecturas

rápidas de la variación del caudal de entrada al comando de pulverización durante el proceso de simulación de variación de velocidad. Se utilizó un manómetro modelo 232.50 (Instrumentos WIKA S.A.U., Barcelona, España) con escala de 0-6 bar y clase 1.0 instalado en la barra de pulverización para registro de presión de trabajo (Figura 2). La precisión de este se verificó antes de la prueba con un comprobador de manómetros (AAMS Salvarani BVBA, Maldegem, Bélgica) con manómetro de referencia con escala de 0-25 bar de 160 mm de diámetro y clase 0.6.



Figura 2. Banco para experimentos estáticos de comandos de pulverización.

2.2.1.2. Comandos evaluados

Fueron evaluados dos comandos de pulverización agrícola de dos de los orígenes más frecuentes en el medio forestal, un comando GeoLine® (Tecomec S.r.l., Reggio Emilia, Italia) y un comando Arag® (ARAG S.r.l., Reggio Emilia, Italia).

El comando GeoLine® (Figura 3) estuvo constituido por una válvula de máxima presión manual con válvula general de accionamiento eléctrico, válvula reguladora de presión proporcional con accionamiento eléctrico y dos válvulas de sección con retornos calibrados y accionamiento eléctrico.

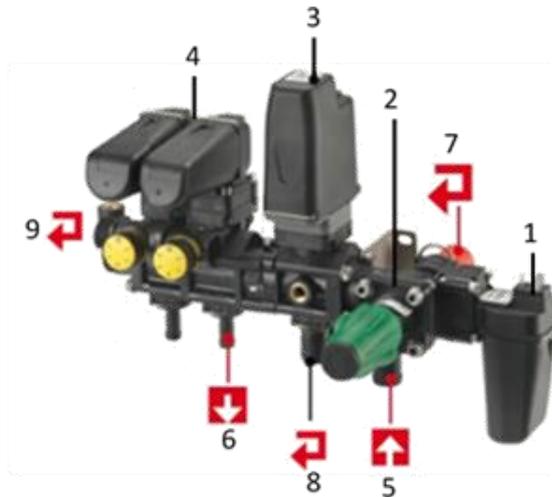


Figura 3. Partes de comando GeoLine® evaluado. (1) válvula general, (2) válvula de máxima presión, (3) válvula reguladora de presión proporcional, (4) válvulas de sección con retornos calibrados, (5) entrada de caldo al comando, (6) salida a barra de pulverización y (7, 8 y 9) retornos.

El comando Arag® (Figura 4) estuvo constituido por una válvula de máxima presión de accionamiento manual y válvula general eléctrica, válvula reguladora de presión proporcional con accionamiento eléctrico, caudalímetro electromagnético Arag® (modelo Orión 46211A10000, ARAG S.r.l., Reggio Emilia, Italia) con rango de medición de $1-20 \text{ l min}^{-1}$, $3000 \text{ pulsos l}^{-1}$ y precisión a escala completa de $0,5 \%$; y dos electroválvulas de sección.

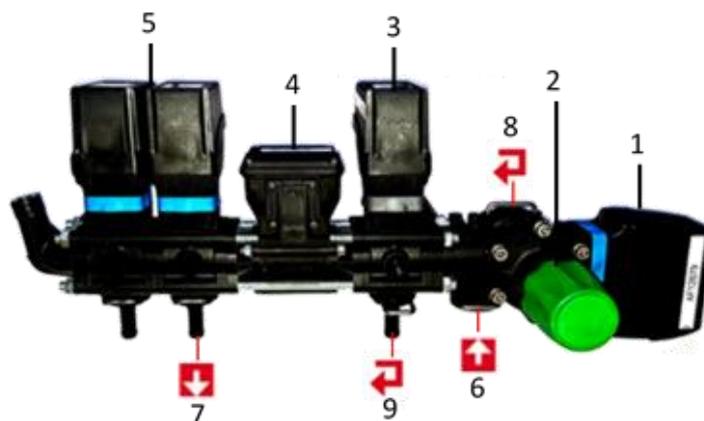


Figura 4. Partes de comando Arag® evaluado. (1) válvula general, (2) válvula de máxima presión, (3) válvula reguladora de presión proporcional, (4) caudalímetro, (5) válvulas de sección, (6) entrada de caldo al comando, (7) salida a barra de pulverización y (8 y 9) retornos.

Ambos comandos, tienen capacidad de actuar como sistemas CPM en su configuración completa o como sistemas CC, si se retira o anula el retorno de la válvula reguladora de presión proporcional y se utiliza la válvula de máxima presión para la calibración del equipo.

2.2.1.3. Obtención y registro de datos

Se realizaron los experimentos con agua siguiendo los lineamientos establecidos en la norma ISO 5682-3 (ISO, 2017).

Se registró en planilla Excel sistema (CC o CPM) y origen de comando evaluado (Arag® o GeoLine®), presión de trabajo (bar), caudal (l min^{-1}) de la barra de pulverización, del retorno de la válvula general de máxima presión, del retorno de la válvula reguladora de presión proporcional (cuando se ensayó los comandos proporcionales) y el caudal total de entrada al comando (Figura 5).

El caudal pulverizado por las boquillas de la barra de pulverización se midió a partir de la recolección en cada boquilla del pulverizado durante un minuto en probeta de 1000 ml (apreciación de ± 10 ml). El caudal expedido por la válvula reguladora de presión (cuando se ensayó comandos proporcionales), por ser muy elevado, se calculó a partir de los datos de recolección del volumen de agua expedido durante 10 s y pesaje en balanza comercial modelo PCR40 (Torrey®, México). Los retornos de la válvula general fueron recolectados durante 10 s cuando se ensayaron los comandos de caudal constante y durante 60 s cuando se evaluaron los comandos proporcionales, y posteriormente pesados. El caudal total de entrada al comando de pulverización se calculó como la suma del caudal de boquillas y los retornos correspondientes.

Todas las mediciones de tiempo fueron realizadas con cronómetro digital utilizando un smartphone. La presión de las boquillas se midió con el manómetro instalado en la barra de pulverización.

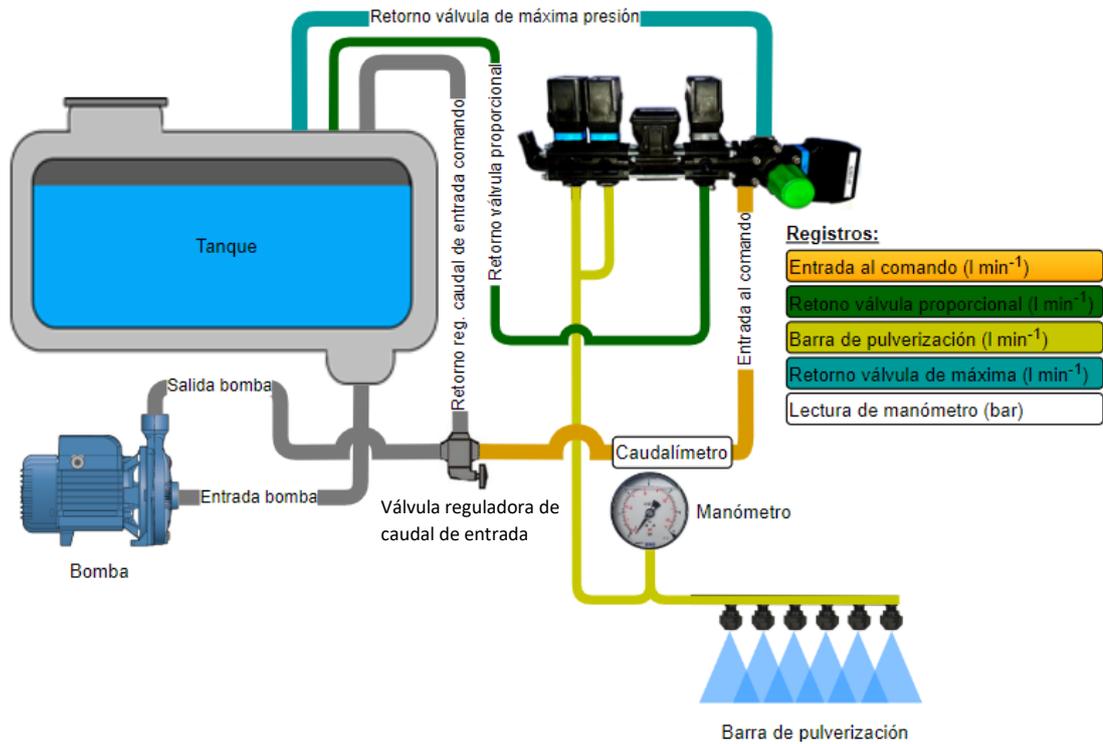


Figura 5. Diagrama del circuito hidráulico de banco de pruebas y detalle de los datos registrados durante el experimento.

Se reguló cada comando de pulverización a 3 bar de presión de trabajo. Se simularon variaciones de velocidad variando el caudal de entrada al comando de pulverización en un rango de $\pm 40\%$ cambiando la regulación de la válvula reguladora de caudal de entrada. Luego de la regulación inicial y en cada variación de caudal de entrada se midieron y registraron tres veces todas las variables de registro luego de esperar que se estabilizara el sistema durante 60 s (Figura 6).

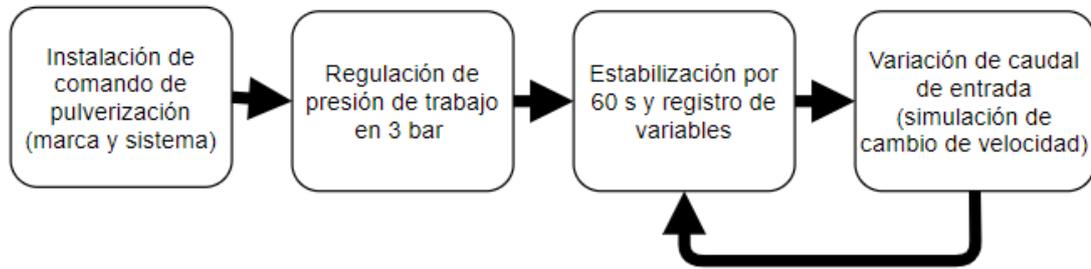


Figura 6. Procedimiento de recolección de datos en experimentos con banco de prueba.

2.2.1.4. Procesamiento de datos

Se calculó en cada simulación de velocidad la variación obtenida entre el caudal de entrada al comando respecto al caudal inicial de regulación (Ecuación 1). Estos valores se interpretaron como las variaciones ocurridas en la velocidad de avance y se asumieron idénticos a la variación teórica requerida en el caudal pulverizado por las boquillas para mantener la tasa de aplicación ($l\ ha^{-1}$) constante.

$$Variación\ (\%) = \frac{\text{caudal actual } (l\ min^{-1}) - \text{caudal inicial } (l\ min^{-1})}{\text{caudal inicial } (l\ min^{-1})} * 100$$

Ecuación 1. Procedimiento de cálculo de variación de velocidad de avance y caudal pulverizado durante simulación en banco de prueba.

Fueron calculadas las variaciones obtenidas entre el caudal de las boquillas respecto al caudal pulverizado en la regulación inicial a 3 bar de presión (Ecuación 1).

Se calculó la diferencia entre las variaciones teóricas de caudal pulverizado para mantener la tasa de aplicación constante y la variación real de caudal pulverizado por las boquillas, los resultados se asumieron idénticos a los desvíos de la tasa de aplicación objetivo y fueron expresados como valores absolutos para su posterior análisis.

2.2.1.5. Diseño experimental

Se utilizó un diseño con arreglo factorial de tratamientos con dos factores, origen (GeoLine® y Arag®) y sistema (CC y CPM), con tres repeticiones. La variable evaluada fue desvío de tasa de aplicación objetivo.

2.2.1.6. Análisis estadístico

Se utilizó software estadístico InfoStat® a fin de determinar diferencias entre los diferentes sistemas de control evaluados mediante ANAVA y test de Tukey. Se realizaron pruebas de normalidad y homocedasticidad a fin de verificar el cumplimiento de estos supuestos en el modelo. Las diferencias entre las medias con una probabilidad de error tipo I superior al 5 % no se consideraron significativas.

El modelo estadístico utilizado con sus correspondientes factores principales e interacción de primer orden se describe a continuación:

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

Y : Variable de respuesta (desvío de tasa de aplicación objetivo)

μ : Media general

τ : Factor Origen

β : Factor Sistema

$(\tau\beta)$: Interacción entre factores Origen y Sistema

ε : Error

i : i -ésimo nivel del factor Origen (Arag®, GeoLine®)

j : j -ésimo nivel del factor Sistema (CC, CPM)

k : repetición (1, 2, 3)

Ecuación 2. Modelo estadístico utilizado en experimento estático y descripción de sus términos.

2.2.2. Experimento estático de desvío de tasa de aplicación y tiempo de estabilización en sistemas CC, CPM y CPA

2.2.2.1. Banco de prueba

Se utilizó el mismo banco de prueba descrito en el punto 2.2.1.1. al que se añadió un sistema adicional que permitió controlar con precisión los cambios de caudal de entrada a los comandos de pulverización evaluados y de esta forma simular variaciones de velocidad, este sistema permitió simular variaciones de velocidad variando caudales de entrada en intervalos de 10 % del caudal a la velocidad objetivo de regulación en un rango entre - 40 y 40 %. Se utilizaron válvulas de regulación continua para la regulación de los diferentes caudales de entrada y válvulas esféricas de rápida apertura y cierre para el intercambio entre caudales de entrada sucesivos. Se añadió en el extremo de la barra de pulverización un sensor electrónico de presión (marca Novus®, modelo 8801022020, Brasil) con certificado de calibración, precisión $\pm 0,5$ % y rango de medición de 0-20 bar, la precisión del mismo se comprobó antes de la prueba con comprobador de manómetros AAMS®, los datos de presión de boquillas generados fueron almacenados con una frecuencia de 20 Hz en data logger especialmente diseñado con plataforma Arduino (Figura 7).

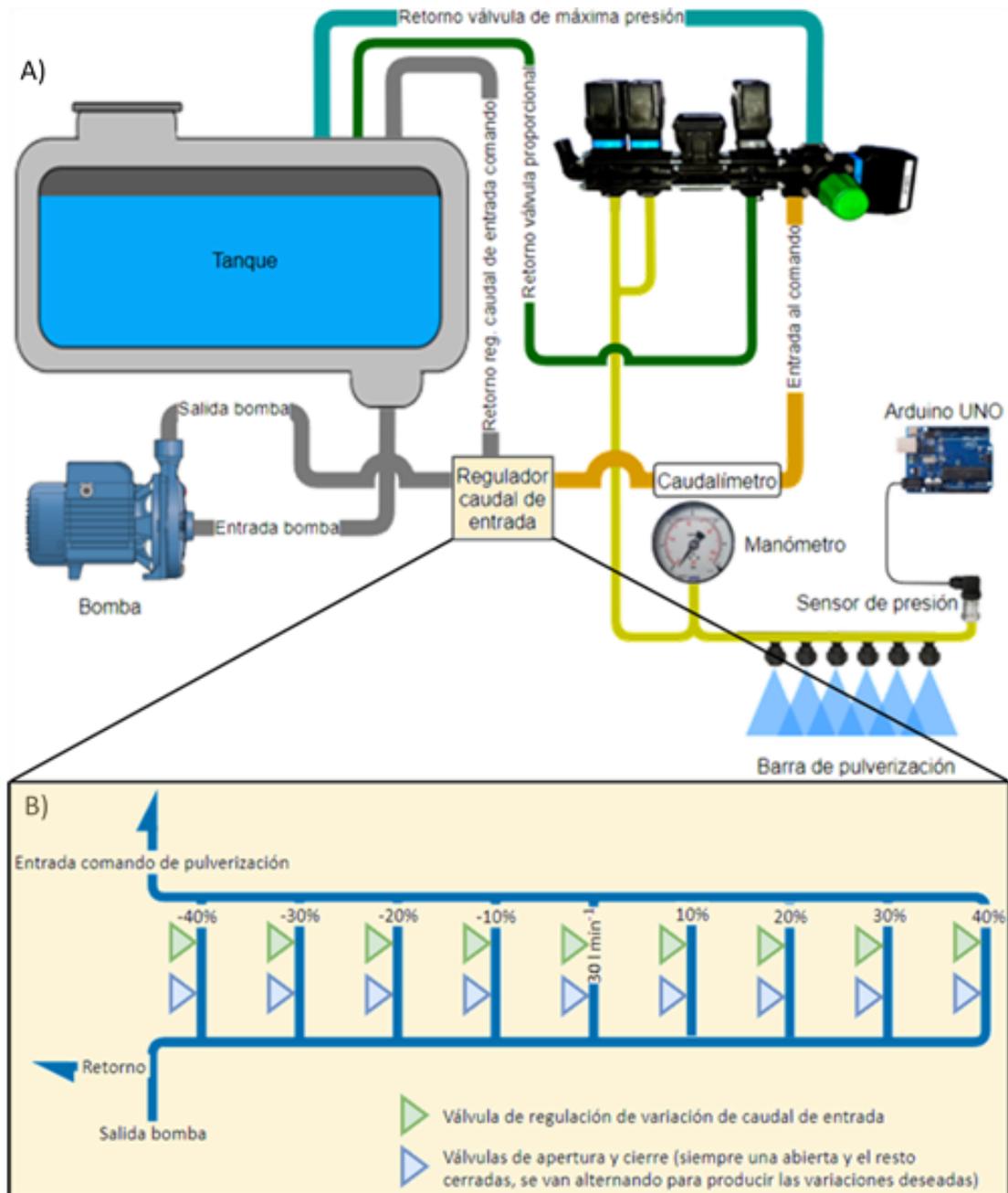


Figura 7. Esquema de circuito hidráulico de banco de prueba y hardware de medición y registro de presión (A) y detalle del circuito hidráulico regulador de caudal de entrada al comando de pulverización (B).

2.2.2.2. Comandos evaluados

Fueron evaluados los comandos GeoLine® y Arag® descritos en el apartado 2.2.1.2. actuando como sistemas CPM y CC. Adicionalmente se evaluó el sistema CPA

utilizando el comando Arag® equipado con una computadora de pulverización Arag® Bravo 400S LT (ARAG S.r.l., Reggio Emilia, Italia) configurada para recibir datos de velocidad de avance en tiempo real ingresados de forma manual durante el experimento.

2.2.2.3. Procedimiento de calibración y registro de datos

Se calibró el sistema de regulación de caudal de entrada al comando de pulverización mediante ajuste del caudal proporcionado individualmente por cada válvula de variación continua. Se reguló el caudal de una de las válvulas en 30 l min^{-1} y se asumió como variación de 0 % de la velocidad objetivo y, el caudal erogado individualmente por cada una de las ocho válvulas restantes se ajustó con variaciones de $\pm 3 \text{ l min}^{-1}$ ($\pm 10 \%$) entre si completando un rango de variaciones entre -40 y 40 % de la velocidad objetivo (Figura 7). Durante dicho procedimiento de calibración se calculó el caudal erogado por cada válvula a partir del tiempo requerido para llenar un recipiente con volumen total de 28,2 l, cada válvula se ajustó hasta alcanzar el caudal requerido por cada tratamiento siendo inmovilizadas posteriormente para evitar modificaciones accidentales. Las variaciones de caudal de entrada al comando de pulverización se asumieron como las variaciones ocurridas en el caudal erogado por una bomba volumétrica de una pulverizadora convencional accionada por toma de fuerza, por lo que dichas variaciones simulaban variaciones en la velocidad de avance del tractor debido a variaciones en el régimen del motor.

Cada sistema evaluado se reguló para obtener una tasa de aplicación de 100 l ha^{-1} (tasa de aplicación objetivo), a una velocidad de 6 km h^{-1} y 2,24 bar de presión de boquilla con un caudal de entrada al comando de 30 l min^{-1} .

Durante el proceso de evaluación de los sistemas CC y CPM se simulaban variaciones de velocidad de avance mediante el cierre y apertura simultáneo de las válvulas

esféricas asociadas a variaciones de caudal sucesivos, por ejemplo, para conseguir el tratamiento en aceleración de 0 - 10 % de la velocidad de regulación (pasar de 6 a 6,6 km h⁻¹) se cerró la válvula con caudal de 30 l min⁻¹ (0 %) y se abrió simultáneamente la válvula con caudal de 33 l min⁻¹ (10 %). Durante el proceso de evaluación del sistema CPA la simulación de variaciones de velocidad se efectuó mediante ingreso manual de la velocidad de avance en la computadora de pulverización manteniendo constante el caudal de entrada al comando de pulverización. Se esperó 15 segundos entre cada simulación de velocidad para permitir la estabilización de la presión.

Las bombas utilizadas en equipos de pulverización forestal en general son volumétricas accionadas por toma de fuerza por lo que varían el caudal de entrada al comando proporcionalmente a cambios ocurridos en el régimen de giro del motor, lo cual está asociado a cambios en la velocidad de avance. El sistema CPA instalado en este tipo de equipos de aplicación recibe simultáneamente datos de variación de caudal debido a cambios de régimen del motor y datos de velocidad de avance. Utilizando ambas variables la computadora de pulverización define si actuar o no sobre la válvula reguladora de presión para mantener constante la tasa de aplicación. Teniendo en cuenta esta característica, también se simularon variaciones simultáneas de velocidad y caudal de entrada al comando, aunque con debilidades metodológicas. La falta de automatismo en el proceso de simulación impidió realizar las variaciones de caudal y de velocidad de avance simultáneamente, de manera manual fue imposible sincronizar la modificación de ambos parámetros. Por este motivo los datos obtenidos en este proceso de simulación fueron poco confiables y no se analizaron en profundidad.

Para cada tratamiento se obtuvieron datos de presión instantánea de trabajo con estampa de tiempo al milisegundo a una frecuencia de 20 Hz; totalizando aproximadamente 53.000 datos de presión durante el experimento.

A partir de los datos medidos de presión de boquilla se calculó el caudal de boquilla por medio del ajuste de una ecuación de segundo grado con los datos de caudal en función de la presión facilitados en el manual del fabricante de boquillas (Teejet, 2011). A partir del caudal instantáneo de boquillas y la velocidad de avance correspondiente a cada tratamiento se calculó la tasa de aplicación real para cada registro en base a la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{q * 600}{A * V}$$

Q: Tasa de aplicación (l ha⁻¹)

q: Caudal total de boquillas (l min⁻¹)

A: Ancho de trabajo (m)

V: Velocidad de avance (km h⁻¹)

600: Factor de conversión de unidades

Ecuación 3. Fórmula de cálculo de tasa de aplicación.

A partir de los datos de tasa de aplicación reales posteriores a la simulación de velocidad (a presión estabilizada) se calcularon los desvíos relativos como porcentaje de la tasa objetivo de regulación y se expresaron como enteros positivos.

Se calculó el tiempo de estabilización de presión de boquillas para cada tratamiento como la diferencia entre las estampas de tiempo del primer registro del valor de presión más frecuente posterior a la simulación de velocidad (asumiendo presión estabilizada a partir de ese momento) y del último registro de presión antes de la simulación de velocidad.

2.2.2.4. Diseño experimental y variables evaluadas

Se utilizó un arreglo factorial de tratamientos con tres factores; sistema evaluado, con tres niveles, CPA, CC y CPM; y sentido de variación de velocidad, con dos niveles, aceleración o desaceleración, y siete variaciones de velocidad con 4 repeticiones (Figura 8). Se desestimó el estudio del origen de los comandos como un factor adicional por no haber sido significativo en estudios preliminares. Las variables de

estudio fueron tiempo de estabilización de presión de boquillas y desvío de la tasa de aplicación objetivo ante cambios de velocidad de avance.

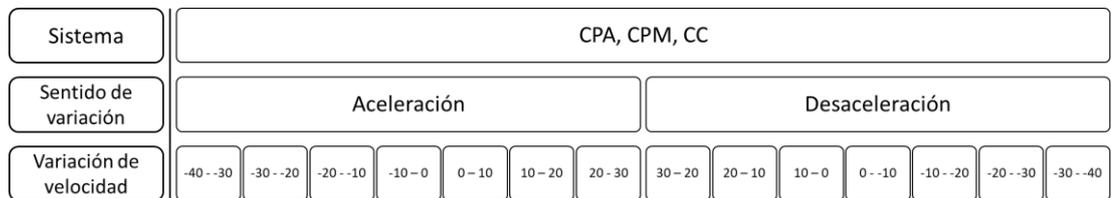


Figura 8. Diseño experimental de experimento estático con sensor de presión electrónico.

2.2.2.5. Análisis estadístico

Se utilizó el software estadístico InfoStat® para el análisis de la varianza y comparación de medias mediante Test de Tukey. Se realizaron pruebas de normalidad y homocedasticidad a fin de verificar el cumplimiento de estos supuestos en el modelo. Las diferencias entre las medias con una probabilidad de error tipo I superior al 5 % no se consideraron significativas.

El modelo estadístico adoptado con los correspondientes factores principales e interacciones de primer y segundo orden fue el siguiente:

$$Y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl}$$

Y : Variable de respuesta (desvío de tasa de aplicación, tiempo de estabilización)

μ : Media general

τ : Factor Sistema

β : Factor Sentido de variación de velocidad

γ : Factor Variación de velocidad

$(\tau\beta)$: Interacción Sistema-Sentido de variación de velocidad

$(\tau\gamma)$: Interacción Sistema-Variación de velocidad

$(\beta\gamma)$: Interacción Sentido de variación de velocidad- Variación de velocidad

$(\tau\beta\gamma)$: Interacción entre los tres factores evaluados

ε : Error

i : i -ésimo nivel del factor Sistema (CC, CPM, CPA)

j : j -ésimo nivel del factor Sentido de variación de velocidad (aceleración, desaceleración)

k : k -ésimo nivel del factor Variación de velocidad (-40, -30, -20, -10, 0, 10, 20, 30)

l : repetición (1, 2, 3, 4)

Ecuación 4. Modelo estadístico utilizado en experimento estático y descripción de sus términos.

2.3. EXPERIMENTO A CAMPO DE EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE CONTROL

El experimento a campo se realizó posplantación en presencia de residuos de cosecha (Figura 9) en dos fechas, el 12 de abril y el 3 de julio de 2019, siendo estas repeticiones.

2.3.1. Condiciones ambientales previas y volumen de residuos de cosecha

Durante el mes anterior al 12 de abril de 2019 se registró 132 mm de precipitación en la zona del experimento, precipitaron únicamente 10 mm durante los 23 días previos a esa etapa del experimento; durante el mes anterior al 3 de julio de ese año se registraron 422 mm de precipitación, precipitando alrededor de 300 mm en el transcurso de 15 días previos esta etapa del experimento (INUMET, 2019). No se midió volumen de residuos de cosecha en el sitio del experimento sin embargo muestreos realizados en montes de la empresa UPM para la misma especie y sistema de cosecha reportan un promedio de 10,7 Ton ha⁻¹ de materia seca de residuos de cosecha (Peirano y Dominguez, 2020).

2.3.2. Maquinaria utilizada

Un tractor Valmet 885 (Valmet, Brasil) con una pulverizadora de enganche integral (Lasta S.A, Canelones, Uruguay) equipada con bomba de diafragma con caudal nominal de 80 l min⁻¹ a 540 rpm de la toma de fuerza, depósito de caldo de pulverización de 400 l y barra de pulverización de 2 m de ancho de trabajo equipada con cuatro boquillas TTI 110 015 VP (Teejet®, IL, EE.UU.) espaciadas 0,5 m entre si fue la base para el experimento de campo (Figura 9).



Figura 9. Aplicación en una de las parcelas del experimento.

2.3.3. Comando de pulverización

Se utilizó el comando de pulverización Arag® descrito en el punto 2.2.1.2., provisto de válvula de máxima presión de accionamiento manual, válvula general de accionamiento eléctrico, válvula reguladora de presión proporcional con accionamiento eléctrico, caudalímetro electromagnético, dos válvulas de sección de accionamiento eléctrico y manómetro modelo 113.53 (Instrumentos WIKA S.A.U., Barcelona, España) con rango de lectura de 0 a 6 bar y clase 2.5, utilizado únicamente para control visual del operario (Figura 10).



Figura 10. Comando de pulverización Arag® utilizado en el experimento a campo. (1) manómetro, (2) válvulas de sección, (3) Caudalímetro, (4) Válvula proporcional, (5) Válvula de máxima presión, (6) válvula general.

2.3.3.1. Sistema proporcional a la velocidad de avance (CPA)

Se utilizó una computadora de pulverización Arag® Bravo 400 SLT. Este equipo fue programado para obtener una tasa de aplicación de 100 l ha^{-1} en modo automático de pulverización, se seleccionó por medio de la interface de usuario el caudal nominal y número de boquillas instaladas, la información de velocidad de avance instantánea se obtuvo con un receptor GPS Smart-Ag con señal DGPS (precisión de 0,8 m, exactitud entre pasadas sucesivas de 0,16 m y actualización de posición con

frecuencia de 10 Hz), el caudal instantáneo de boquillas fue informado a la computadora por medio del caudalímetro electromagnético Arag®. Basada en el caudal y la velocidad instantánea la computadora calcula el ajuste necesario para alcanzar la tasa objetivo y de ser necesario actúa sobre la válvula reguladora de presión proporcional del comando de pulverización para ajustar el caudal pulverizado.

2.3.3.2. Sistema proporcional al régimen del motor (CPM)

Se desactivó el modo automático de la computadora de pulverización Arag® Bravo 400 SLT, utilizándola únicamente para registro de los datos de pulverización. Luego, se realizó el procedimiento de calibración, regulando la presión de trabajo en 1,3 bar accionando de forma manual los comandos eléctricos que controlan la válvula reguladora de presión proporcional, se obtuvo un caudal promedio por boquilla de $0,37 \text{ l min}^{-1}$ que, para una velocidad de avance de $4,4 \text{ km h}^{-1}$ permitió obtener una tasa de aplicación objetivo de 100 l ha^{-1} .

2.3.3.3. Sistema de caudal constante (CC)

Para evaluar el comando como sistema de caudal constante fue anulada la válvula proporcional de regulación de presión y desactivado el modo automático de la computadora de pulverización Arag® Bravo 400 SLT, utilizándola únicamente para registro de los datos de pulverización. Luego, se realizó el procedimiento de calibración, ajustando la presión de trabajo en 1,3 bar de forma manual regulando la válvula de máxima presión, se obtuvo un caudal promedio por boquilla de $0,37 \text{ l min}^{-1}$, a una velocidad de avance de $4,4 \text{ km h}^{-1}$ permitió obtener una tasa de aplicación objetivo de 100 l ha^{-1} .

2.3.3.4. Sistema de obtención de datos

Se programó la computadora de pulverización para almacenar datos a la máxima frecuencia posible (1 Hz) en formatos de archivo Shape (.shp) y de texto plano (.txt). Los datos almacenados utilizados (Figura 11) contienen una estampa tiempo (fecha en formato dd/mm/aaaa y hora en formato hh:mm:ss), coordenadas geográficas de latitud y longitud en formato decimal, velocidad de avance instantánea (km h^{-1}), área cubierta acumulada (ha), tasa de aplicación objetivo (l ha^{-1}), tasa de aplicación real (l ha^{-1}), caudal instantáneo (l min^{-1}), presión instantánea (bar), volumen aplicado acumulado (l), nivel del tanque (l), secciones activas, ancho operativo (m) y código identificador de caudal nominal de boquillas.

Línea de texto archivo .txt $\left\{ \begin{array}{l} \text{Bravo400SLT;3,4,1;S;1;04/07/2019;10:51:42;-32,50253434;} \\ \text{-57,13848509;0;4,4;2,0;0,1;100;102;1,4;1,2;11;100;1;2,0;ISO015} \end{array} \right.$

Estampa de tiempo	Presión instantánea (bar)
Coordenadas geográficas	Volumen aplicado acumulado (l)
Velocidad de avance instantánea (km h^{-1})	Nivel del tanque (l)
Área cubierta acumulada (ha)	Secciones activas
Tasa de aplicación objetivo (l ha^{-1})	Ancho operativo (m)
Tasa de aplicación real (l ha^{-1})	Identificador de caudal nominal de boquilla
Caudal instantáneo (l min^{-1})	

Figura 11. Formato de archivo .txt almacenado por la computadora de pulverización Bravo 400 SLT.

2.3.4. Procesamiento de datos

Se obtuvieron alrededor de 28.000 datos geospaciales útiles a partir de los registros de la computadora de pulverización, fueron transferidos a una memoria extraíble para su procesamiento posterior.

A partir de los datos de tasa de aplicación real se calcularon los desvíos relativos como porcentaje de la tasa objetivo de regulación, fueron expresados como valores absolutos para su análisis estadístico posterior en software InfoStat®.

Multiplicando la distancia entre puntos sucesivos, calculada con la fórmula del semiverseno (Kifana y Abdurrohman, 2012), por el ancho operativo se calculó el área cubierta asociada a cada registro. Cada resultado de área aplicada fue asociado con el correspondiente valor de desvío de la tasa de aplicación objetivo calculado, de esta forma se generaron tablas e histogramas de frecuencia de área tratada en función de los desvíos de tasa de aplicación.

Fueron calculados los desvíos de velocidad instantánea como porcentaje de la velocidad de calibración. Los desvíos expresados como valores absolutos fueron analizados en InfoStat® a fin de confirmar que no hubiera diferencias significativas entre las variaciones de velocidad a las que fue sometido cada sistema evaluado.

Se calculó la magnitud de la aceleración ($m s^{-2}$) ocurrida entre puntos, como la diferencia de velocidad entre puntos sucesivos en el tiempo dividido por la diferencia entre las estampas de tiempo correspondientes. Asociada al área cubierta ya calculada para cada punto permitió la creación de tablas e histogramas de frecuencia absoluta y relativa de área tratada en función de si el equipo sufría aceleración o desaceleración.

El archivo con las nuevas variables calculadas y los archivos .shp fueron cargados en el software QGIS® obteniendo mapas de variación de velocidad de avance (como valores absolutos o como desvíos de la velocidad de regulación) y de desvíos de tasa de aplicación para cada tratamiento y parcela.

2.3.5. Diseño experimental

Los datos obtenidos durante las dos fechas de evaluación se consideraron como un único experimento durante el análisis, duplicando la cantidad de parcelas de evaluación y el número de repeticiones de los tratamientos. El experimento se realizó con un diseño de bloques completos al azar. Dentro del campo experimental fueron delimitadas 10 parcelas de 2000 m² (bloques), cada sistema (CC, CPM y CPA) fue testeado en el total del área de cada una de las parcelas, esto permitió minimizar el efecto de la variabilidad de la velocidad de avance entre los tratamientos de un mismo bloque.

2.3.6. Análisis estadístico

Se utilizó el software estadístico InfoStat® para el análisis de la varianza y comparación de medias mediante LSD de Fisher de la variable desvío de tasa de aplicación. Se realizaron pruebas de normalidad y homocedasticidad a fin de verificar el cumplimiento de estos supuestos en el modelo. Las diferencias entre las medias con una probabilidad de error tipo I superior al 5 % no se consideraron significativas.

Los términos del modelo estadístico utilizado se representan en la siguiente ecuación:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ij}$$

Y_{ij} : desvío de tasa de aplicación observado
 μ : media general
 τ_i : efecto del i -ésimo tratamiento ($i=CC, CPM, CPA$)
 β_j : efecto del j -ésimo bloque ($j=1,2,3,4,5,6,7,8,9,10$)
 ε_{ij} : error

Ecuación 5. Modelo estadístico utilizado en el experimento a campo.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. VELOCIDAD DE AVANCE EN OPERACIONES A CAMPO

3.1.1. Operaciones de control de malezas en reforestación

El 40 % de los registros de velocidad analizados de campos reforestados se encontró en un rango de ± 10 % de la velocidad de regulación, con una dispersión de hasta ± 40 % de la velocidad objetivo. El 81 % de los datos se encontró entre desvíos de ± 20 %. La mayoría de las variaciones se dio hacia velocidades menores a las de regulación, lo que se explica por la presencia de residuos de cosecha dificultando el desplazamiento de la maquinaria (Figura 12).

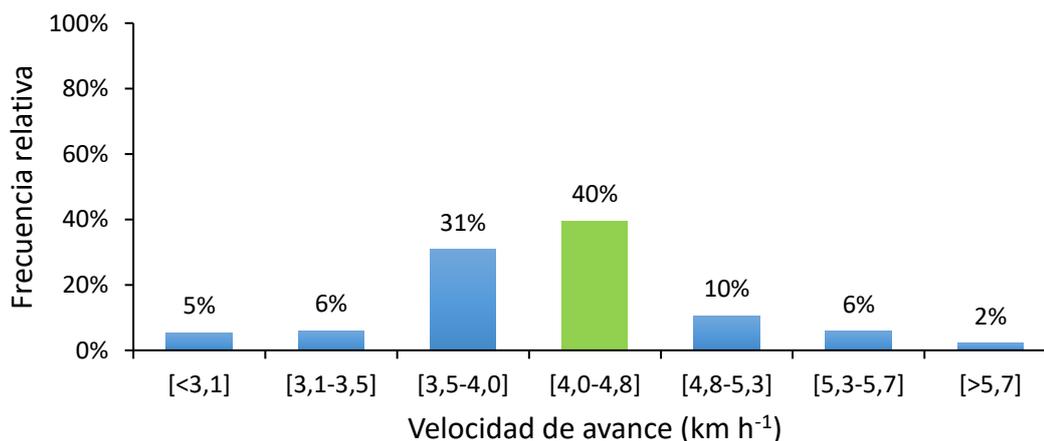


Figura 12. Frecuencia relativa de velocidad de avance de aplicación en función de desvíos en ± 10 % de la velocidad objetivo ($4,4 \text{ km h}^{-1}$) en campos reforestados.

3.1.2. Operaciones de control de malezas en campos nuevos

La aplicación de herbicidas en campos nuevos no se enfrenta a desafíos tan grandes de transitabilidad como en campos reforestados. El 75 % de los datos de velocidad se ajustaron a un ± 10 % de desvío de la velocidad de regulación, destacando así el efecto de la ausencia de residuos de cosecha (Figura 13).

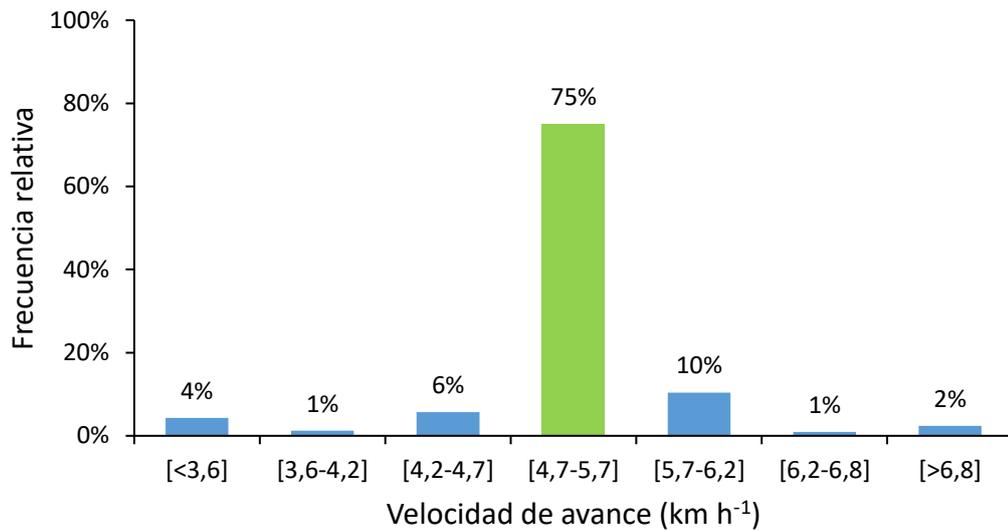


Figura 13. Frecuencia relativa de velocidad de avance de aplicación en función de desvíos en $\pm 10\%$ de la velocidad objetivo ($5,2 \text{ km h}^{-1}$).

3.1.3. Distribución espacial de la velocidad de avance en reforestación y campos nuevos

De modo ilustrativo en la Figura 14 se presenta un mapa de desvíos de la velocidad de avance objetivo en dos de los rodales evaluados, uno de reforestación con mayor ocurrencia de velocidades bajas de desplazamiento entre $3,6$ y $5,7 \text{ km h}^{-1}$ y uno de campo nuevo, con velocidades típicas de desplazamiento más altas, entre $4,7$ y $6,2 \text{ km h}^{-1}$. Para estas muestras puede observarse la mayor frecuencia de desvíos entre -10% y 20% de la velocidad objetivo y la mayor cantidad de variaciones de velocidad ocurridos en la dirección de avance del tractor para el campo reforestado, donde los desvíos fueron más frecuentes que en el campo nuevo.

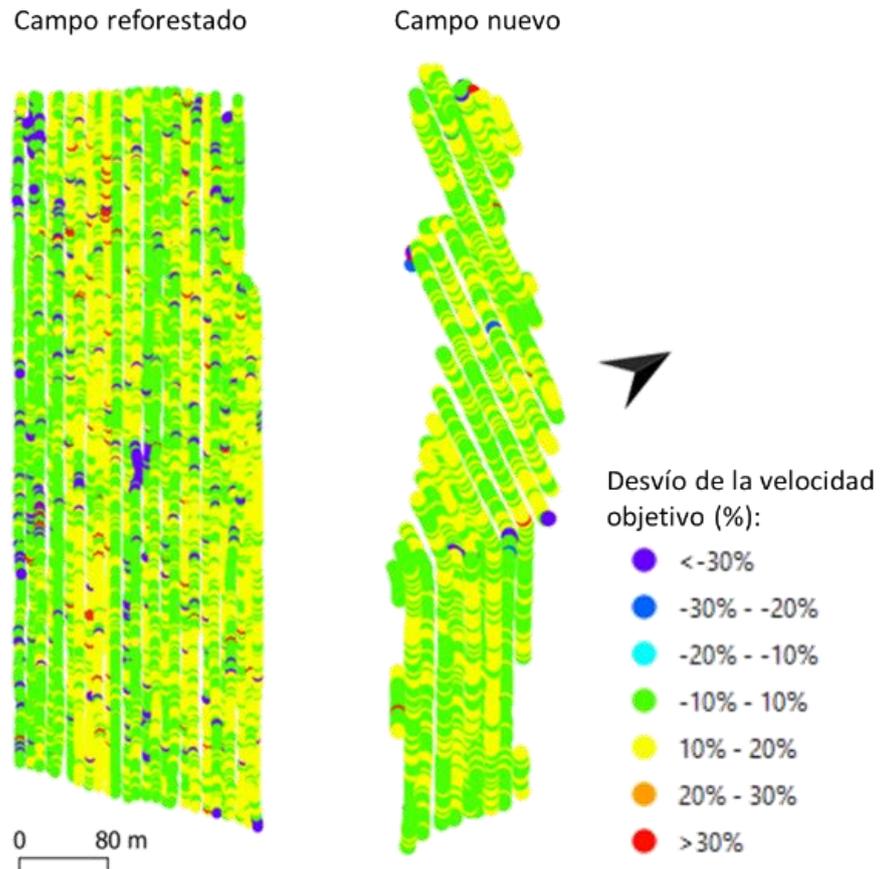


Figura 14. Distribución espacial de los desvíos de la velocidad de avance en rodales de campo nuevo y reforestado.

Las velocidades de regulación en aplicación de herbicidas en operaciones forestales ($4,4 \text{ km h}^{-1}$ para aplicación sobre residuos de cosecha y $5,2 \text{ km h}^{-1}$ para aplicación en campos nuevos); son inferiores a las logradas en ambientes agrícolas, que pueden variar entre 7 y 28 km h^{-1} dependiendo del equipo involucrado y del estado del terreno. Se han hecho diversas evaluaciones de sistemas CPA con variaciones de $\pm 10 \%$ de la velocidad de regulación (Al-Gaadi y Ayers 1994, Luck et al. 2011a, Rietz et al. 1997, Sharda et al. 2013). A las velocidades reportadas una variación de 1 km h^{-1} implica que el sistema CPA tenga que compensar el caudal en una proporción de entre 5 a 15% mientras que, en una aplicación forestal, un cambio de velocidad de esta magnitud implica como mínimo un ajuste del caudal pulverizado de 20% por lo

que las exigencias al sistema CPA son mayores, por lo que puede presentar problemas para mantener estable la tasa de aplicación.

3.2. EXPERIMENTOS ESTÁTICOS DE SISTEMAS DE CONTROL

3.2.1. Experimento estático de desvío de tasa de aplicación en sistemas CC y CPM

No se detectaron diferencias estadísticamente significativas entre orígenes de comandos de pulverización evaluados para la variable desvío de la tasa de aplicación objetivo (p-valor=0,8417) pero si entre sistemas de control (p-valor=0,0033), la interacción entre factores no fue significativa (p-valor=0,4332). El sistema CPM logró mejor ajuste del caudal de pulverización con desvíos promedio de la tasa de aplicación objetivo de 2,5 % frente a desvíos de 9,2 % en promedio del sistema CC (Cuadro 1).

Cuadro 1. Desvío de la tasa de aplicación objetivo (%) según origen y sistema de comandos evaluados.

Factor	Nivel	Desvío de tasa (%)
Origen	Arag	5,7 a
	GeoLine	6,0 a
	p-valor	0,8417
Sistema	CPM	2,5 a
	CC	9,2 b
	p-valor	0,0033
	CV%	47,98

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

El sistema CPM logró un mejor ajuste de caudal pulverizado presentando desvíos de caudal pulverizado muy cercanos a la curva teórica para variaciones de velocidad entre -35 a 40 % de la velocidad objetivo (Figura 15).

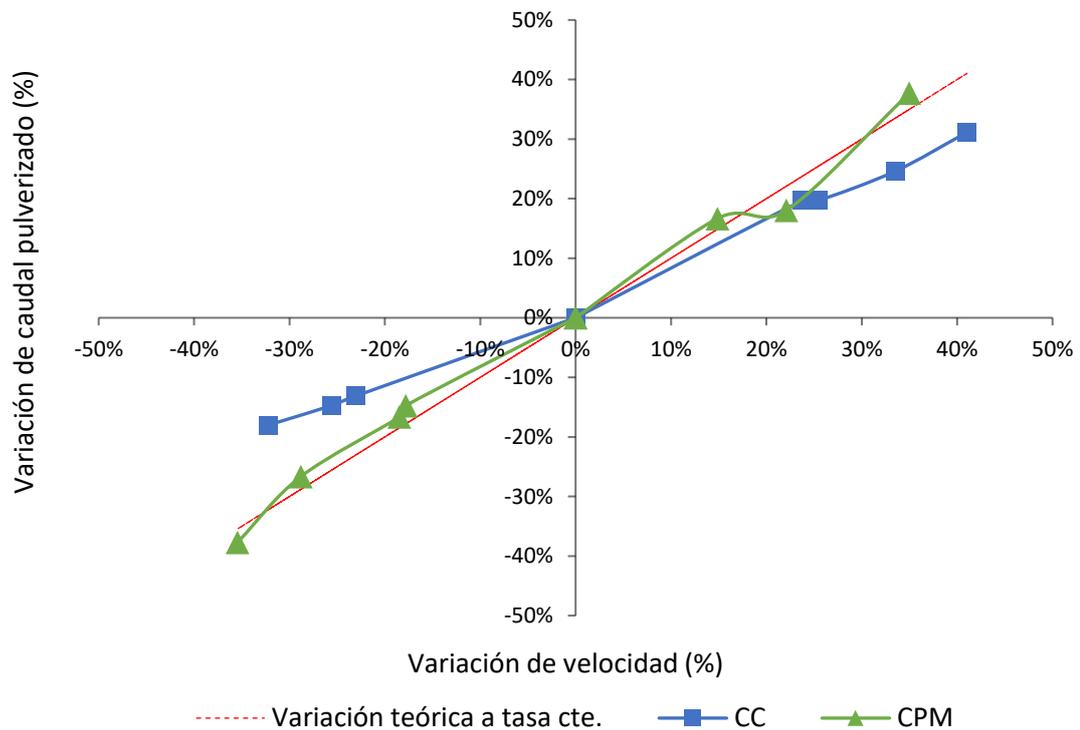


Figura 15. Promedio de variación de caudal pulverizado (%) en función de la variación de velocidad (%) según sistema de control evaluado en experimento estático.

Fue posible ajustar un modelo para estimar la variación de caudal de pulverización para cada sistema de control (Ecuación 6 y Cuadro 2) conociendo el desvío como porcentaje entre la velocidad de regulación y la velocidad de desplazamiento real. Esta ecuación permitiría estimar los desvíos de tasa de aplicación ocurridos durante una aplicación disponiendo únicamente de datos geoespaciales de velocidad de avance y tipo de sistema de control utilizado.

$$\text{Variación de caudal pulverizado (\%)} = \beta_0 + \beta_1 \times \text{Desv. velocidad (\%)}$$

Ecuación 6. Modelo ajustado para estimación de la variación de caudal en función de los desvíos de la velocidad objetivo.

Cuadro 2. Coeficientes y ajuste del modelo según sistema.

Sistema	β_0	β_1	R ²
CPM	0,0057	0,9953	0,9899
CC	0,0224	0,6783	0,9943

Los resultados indican que los sistemas CC evaluados tendieron a ajustar el caudal pulverizado ante variaciones en la velocidad de avance con desvío promedio de tasa de $\pm 9\%$. Este desempeño fue mejor al reportado por Maroni (2007); cuyos resultados fueron más consistentes con el comportamiento esperado de los sistemas CC, registrando desvíos de tasa de aplicación de $+19\%$ y -12% para variaciones de velocidad de $\pm 15\%$. Los desvíos obtenidos por los sistemas CPM evaluados fueron similares a los reportados por este mismo autor.

3.2.2. Experimento estático de desvío de tasa de aplicación y tiempo de estabilización en sistemas CC, CPM y CPA

3.2.2.1. Tiempo de estabilización

Fue significativo el efecto del factor sistema (p -valor $< 0,0001$), el factor sentido de variación de velocidad no fue significativo (p -valor = $0,0537$) tampoco el efecto del factor variación de velocidad (p -valor = $0,4905$) ni las interacciones entre factores.

El sistema CPA tuvo un tiempo promedio de estabilización de presión de $3,86$ s, significativamente superior que en los sistemas CPM ($0,61$ s) y CC ($0,46$ s) (Cuadro 3).

Cuadro 3. Tiempo de estabilización de presión (s) según sistema evaluado.

Sistema	Tiempo de estabilización (s)
CC	0,46 a
CPM	0,61 a
CPA	3,86 b
p-valor	<0,0001
CV%	42,79

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

El tiempo promedio de estabilización del sistema CPA cuando se varió simultáneamente velocidad de avance y caudal de entrada fue de 3,35 s.

La Figura 16 y Figura 17 muestran el tiempo de estabilización de tasa de los tres sistemas para un cambio de velocidad de 10 % en aceleración y desaceleración respectivamente, puede apreciarse el mayor tiempo requerido por el sistema CPA para estabilizar la tasa de aplicación y los mayores desvíos de la tasa objetivo de los sistemas CC y CPA respecto al sistema CPM.

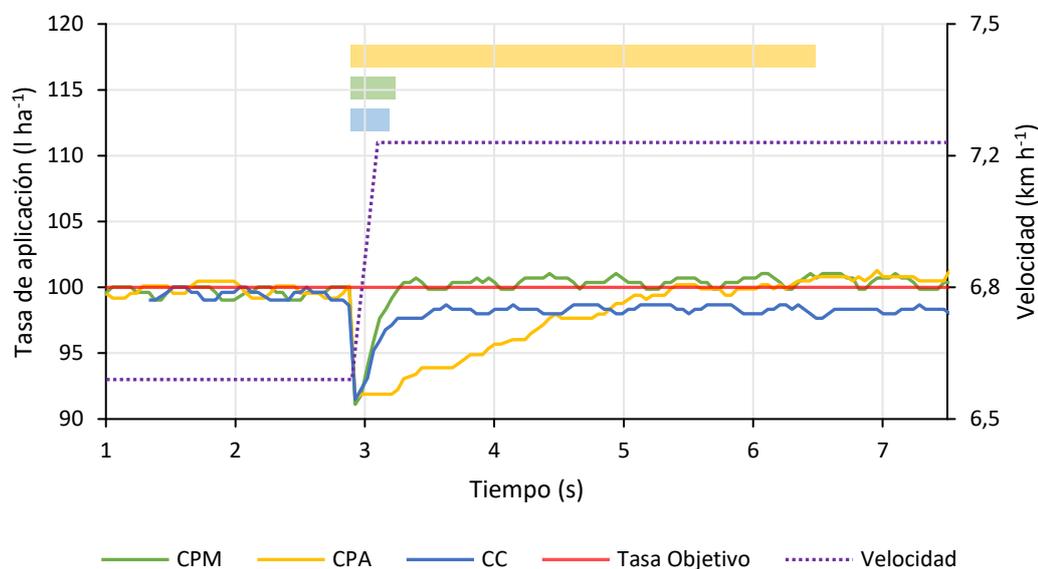


Figura 16. Tiempo de estabilización de tasa de aplicación según sistema para variación de velocidad de 10 % en aceleración, las barras horizontales indican el período de estabilización de CC (azul), CPM (verde) y CPA (amarillo).

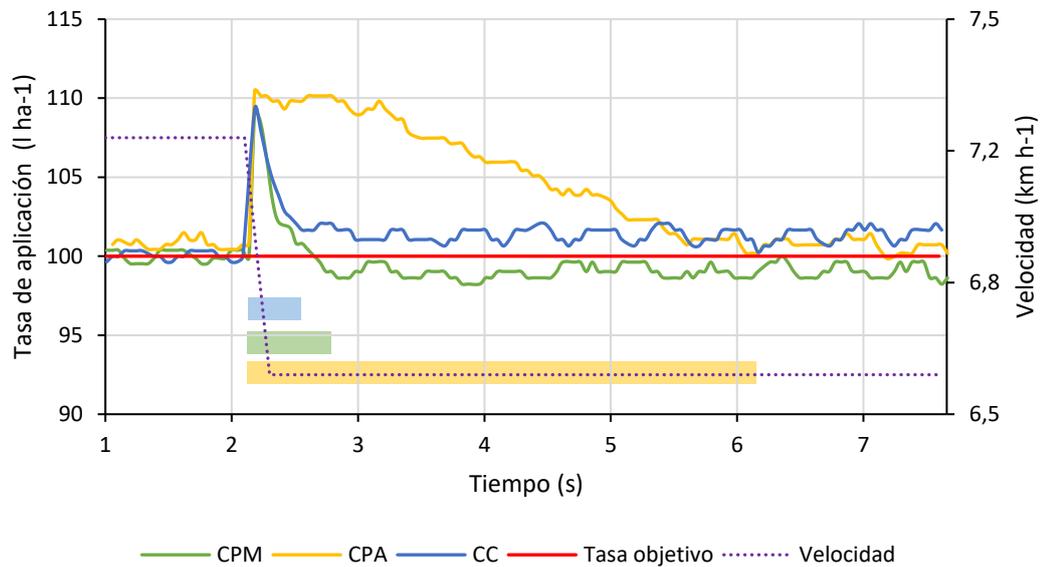


Figura 17. Tiempo de estabilización de tasa de aplicación según sistema para variación de velocidad de 10 % en desaceleración, las barras horizontales indican el período de estabilización de CC (azul), CPM (verde) y CPA (amarillo).

Los resultados de tiempo de estabilización obtenidos se alinean con los observados por Sharda et al. (2013) y Luck et al. (2011a). Según estos autores el tiempo de estabilización del caudal para el sistema CPA fue en todos los casos superior a 5,6 s (con un máximo de 20,8 s), lo que indica que cambios de velocidad ocurridos en intervalos de tiempo menores al tiempo de estabilización incrementan la probabilidad de resultar en errores de tasa de aplicación ya que el sistema se enfrenta a cambios en la velocidad de avance sin tiempo suficiente para realizar los ajustes de caudal correspondientes.

3.2.2.2. Desvío de la tasa de aplicación objetivo

Se encontró efecto significativo de la interacción Sistema*Sentido de variación (p-valor <0,0001) y de la interacción Sistema*Variación de velocidad (p-valor <0,0001) así como de los efectos principales de los factores evaluados, sistema (p-valor <0,0001), sentido de variación de velocidad (p-valor <0,0160) y variación de velocidad (p-valor <0,0001). La presencia de interacción podría estar

afectando las diferencias entre medias de los efectos principales por tal motivo se analizaron primero las interacciones.

En la interacción Sistema*Sentido de variación los desvíos de tasa de aplicación fueron siempre mayores en desaceleración para los sistemas CPM y CC, pero mayores en aceleración para el sistema CPA por lo que ocurre interacción con cambio de ranking (Figura 18), de igual manera esta interacción no afectó la detección de diferencias entre las medias del efecto principal del factor Sistema.

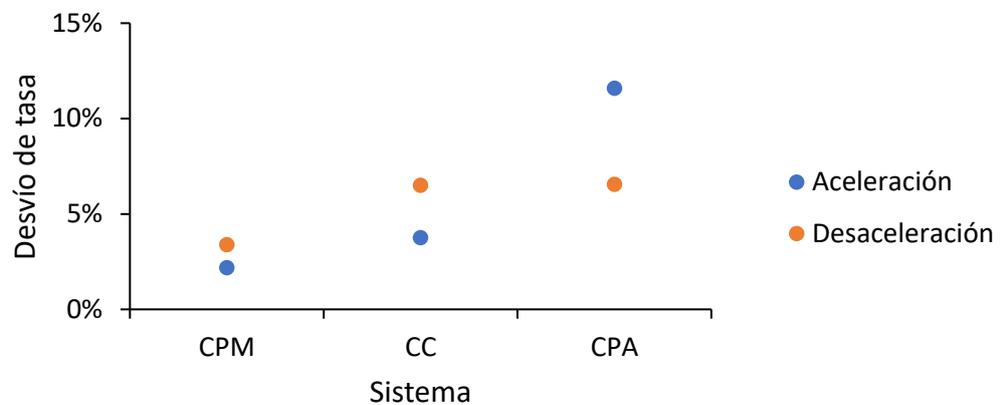


Figura 18. Interacción Sistema*Sentido de variación.

En la Figura 19 y Figura 20 donde se grafica la interacción Sistema*Variación de velocidad se puede ver con claridad que el sistema CPM presentó menores desvíos de tasa de aplicación independientemente de la variación de velocidad analizada tanto en aceleración como en desaceleración, pero, los sistemas CC y CPA en desaceleración, para variaciones de velocidad negativas ([-10 - -20], [-20 - -30] y [-30 - -40]) presentaron interacción con cambio de ranking.

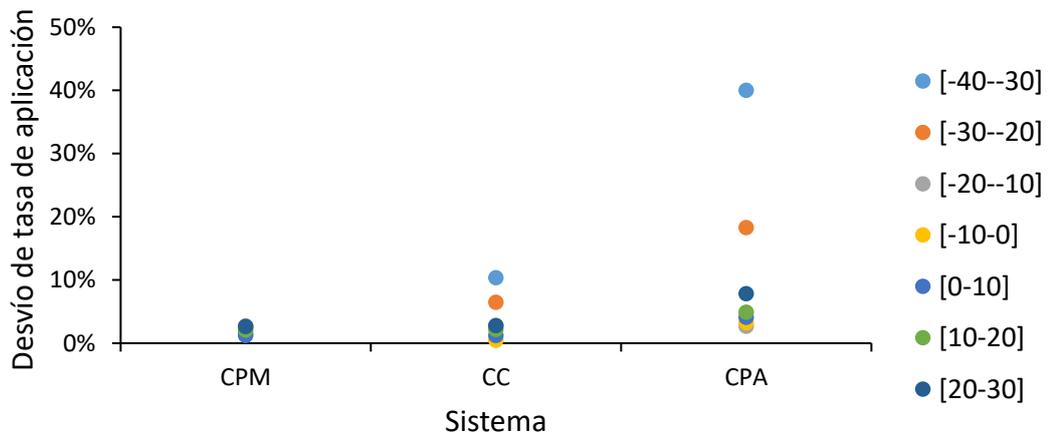


Figura 19. Interacción Sistema*Variación de velocidad en aceleración.

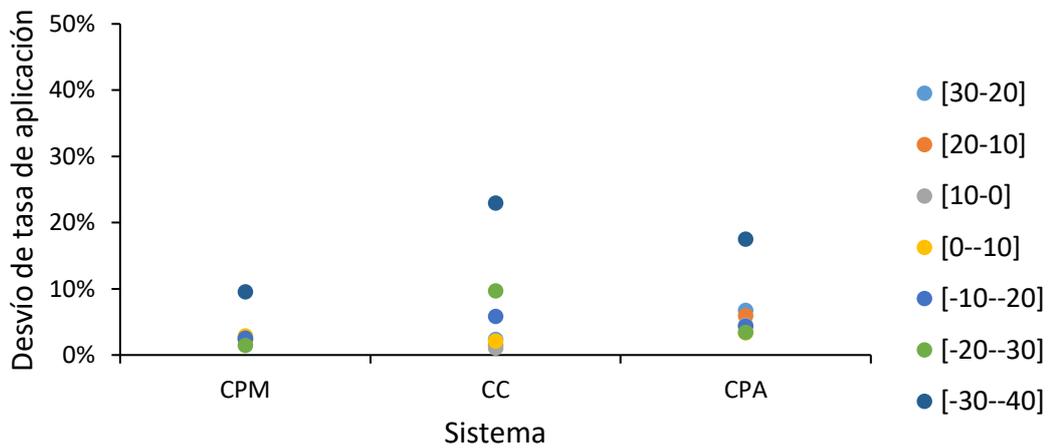


Figura 20. Interacción Sistema*Variación de velocidad en desaceleración.

El sistema CPM presentó un desvío promedio de tasa de aplicación significativamente menor que los sistemas CC y CPA (Cuadro 4).

Cuadro 4. Desvío de tasa de aplicación (%) según sistema evaluado.

Sistema	Desvío de tasa (%)
CPM	2,78 a
CC	5,13 b
CPA	9,07 c
p-valor	<0,0001
CV%	27,78

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

El sistema CPM tuvo el mejor ajuste de caudal en función de las variaciones de velocidad, en la Figura 21 puede observarse la similitud de la curva de variación del sistema CPM respecto a la curva teórica de variación para una tasa de aplicación constante. El desempeño del sistema CC fue mejor al esperado al tratarse de un sistema de caudal constante, para el cual se esperaba que el caudal pulverizado no se ajustara a los cambios de velocidad, sin embargo, logró un ajuste adecuado del caudal pulverizado a velocidades mayores a la velocidad objetivo de regulación, pero tuvo una menor capacidad de ajuste que el sistema CPM ante variaciones hacia velocidades menores al objetivo de regulación, probablemente esto pueda deberse a variaciones en el particular diseño de las válvulas evaluadas. El sistema CPA tuvo ajustes aceptables a caudal estabilizado para variaciones de velocidad mayores al objetivo, en cambio, para velocidades menores no logró ajustar el caudal correctamente.

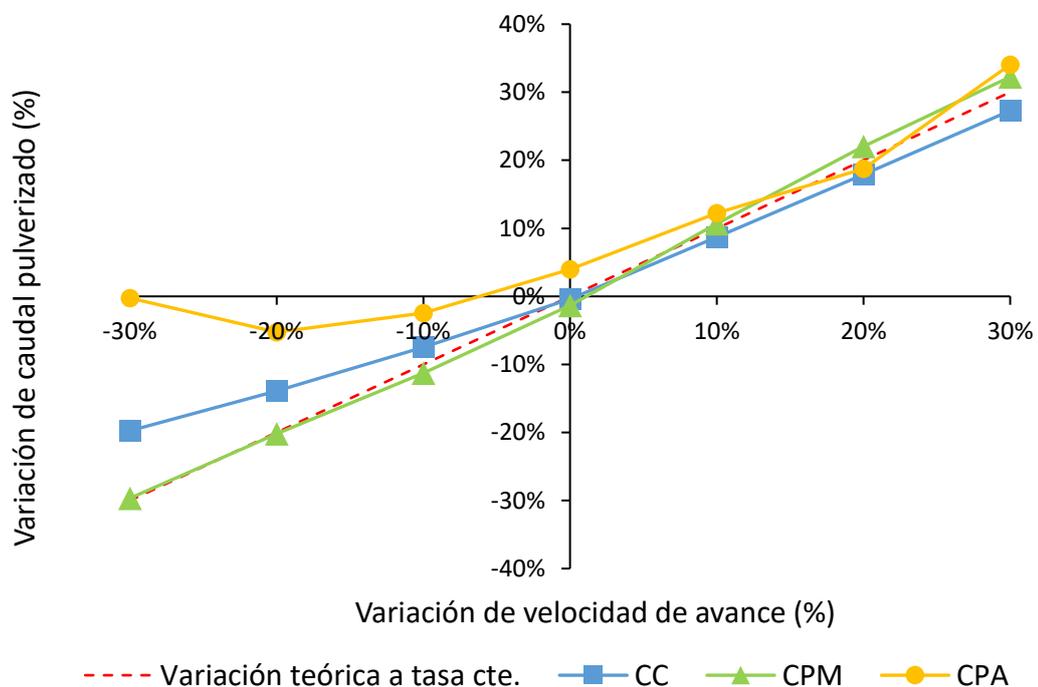


Figura 21. Promedio de variación de caudal pulverizado (%) en función de la variación de velocidad (%) según sistema de control evaluado.

Los desvíos de tasa de aplicación obtenidos mostraron tendencia similar a los obtenidos en simulación estática por Sharda et al. (2013), este autor reporta efectos del sentido del cambio de velocidad y desvíos de la tasa de aplicación en pulverizadores autopropulsados con sistema CPA de entre 7,8 y 7,4 % para aceleración y de entre 7,5 y 37,2 % para desaceleración. Se confirma que el desempeño de los sistemas CC evaluados fue mejor al de los sistemas de caudal constante evaluados por Maroni (2007) quien obtuvo mayores desvíos de tasa, en cambio, los desvíos obtenidos por los sistemas CPM evaluados fueron similares a los reportados por este mismo autor.

3.2.2.3. Comportamiento de los sistemas CC evaluados

Los sistemas de caudal constante evaluados no presentaron el comportamiento típico esperado de los sistemas CC, para los que se espera que mantengan la presión de trabajo estable a pesar de que ocurran variaciones en el caudal suministrado por la bomba. En la Figura 22 se puede apreciar que los sistemas CC evaluados presentaron un comportamiento similar a los sistemas CPM evaluados, pero logrando ajustes menores de presión en función de la variación de caudal de entrada al comando, esto explica los mayores desvíos de tasa de aplicación de los sistemas CC respecto a los sistemas CPM.

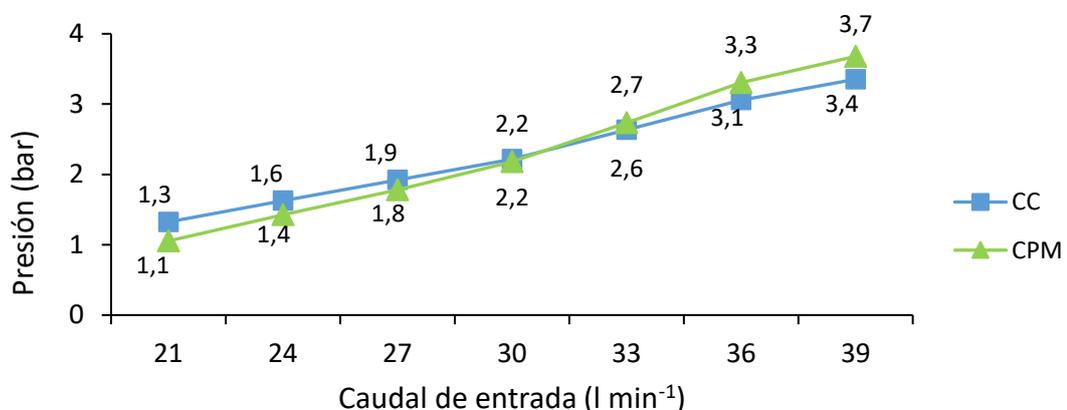


Figura 22. Ajuste de presión en función del caudal de entrada al comando de pulverización (caudal de regulación inicial de 30 l min⁻¹).

3.3. EXPERIMENTO A CAMPO DE EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE CONTROL

3.3.1. Variación de velocidad de avance

No se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre sistemas para la variable velocidad de avance (p -valor= 0,0580). Todos los sistemas fueron probados bajo condiciones similares de variaciones de velocidad, con desvíos entre $\pm 20\%$ de la velocidad de regulación establecida ($4,4 \text{ km h}^{-1}$) (Figura 23).

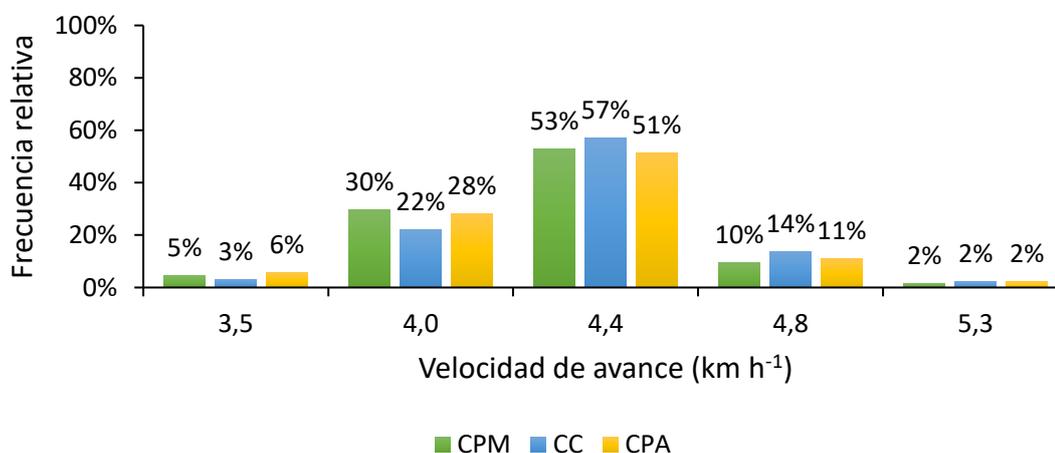


Figura 23. Frecuencia relativa de velocidad de avance en función de desvíos en $\pm 5\%$ de la velocidad de regulación ($4,4 \text{ km h}^{-1}$) según sistema evaluado.

A efectos ilustrativos en la Figura 24 se muestra los desvíos de la velocidad de avance real en relación a la velocidad objetivo de regulación ocurridos en uno de los bloques del experimento. Puede observarse que cada sistema estuvo sujeto a una variabilidad similar en la velocidad de avance.

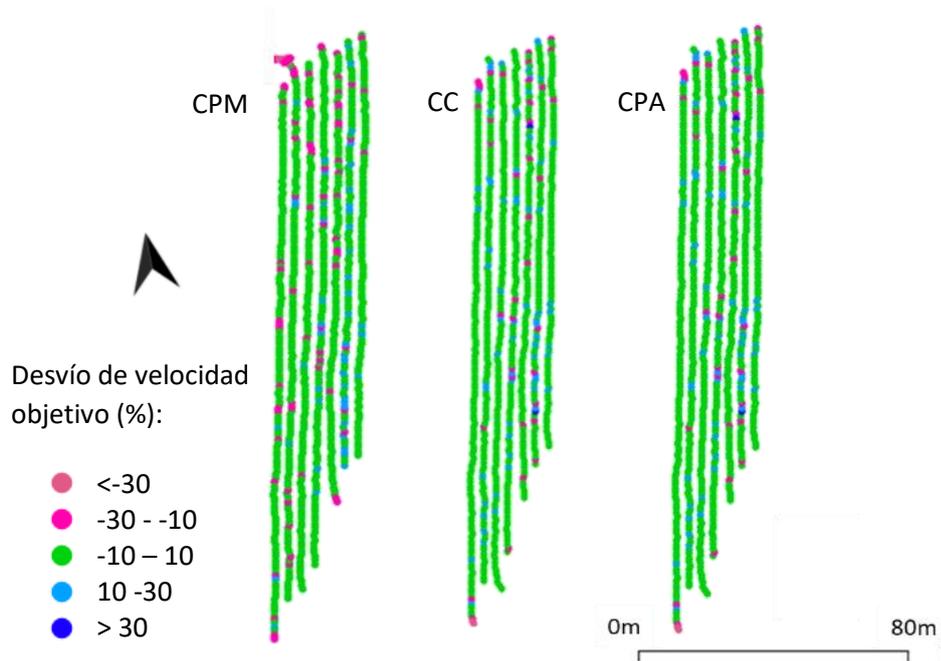


Figura 24. Mapa de desvíos de la velocidad objetivo en uno de los bloques del experimento, según sistema.

3.3.1.1. Frecuencia de cambios de velocidad

La dificultad de mantener estable la velocidad de avance en las condiciones forestales evaluadas puede apreciarse en la Figura 25, donde se presenta la proporción del tiempo total de aplicación en que la velocidad se mantuvo estable en intervalos de tiempo entre 1 y 5 segundos. En el 72 % del tiempo de aplicación la velocidad se mantuvo estable por tan solo un segundo, el 21 % del tiempo durante 2 s y únicamente el 1 % por períodos de 5 s.

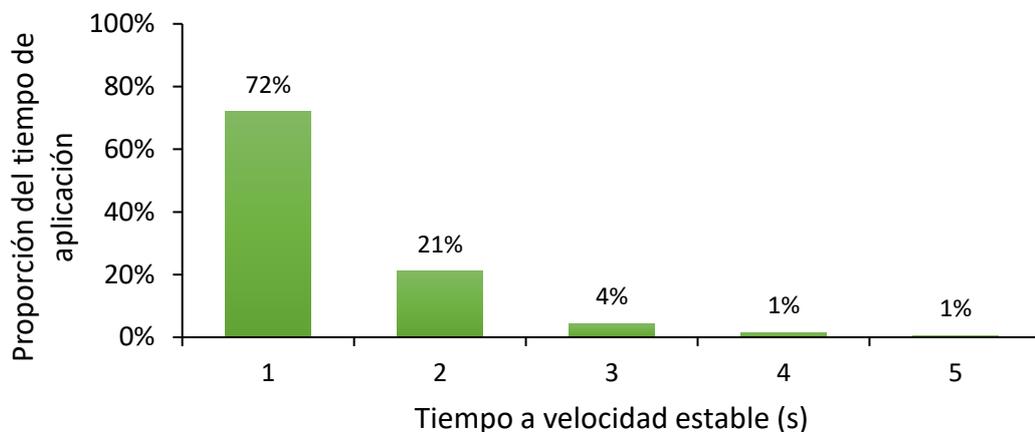


Figura 25. Proporción del tiempo de aplicación en función de intervalos de tiempo a velocidad estable.

3.3.2. Desvío de la tasa de aplicación objetivo

En el experimento a campo el sistema CPM presentó los menores desvíos de tasa de aplicación (p -valor $< 0,0001$). El sistema CPA tuvo los mayores desvíos de los tres sistemas evaluados, con desvíos promedio de tasa de aplicación de 16,2 % (Cuadro 5) continuando la tendencia observada durante los experimentos estáticos.

Cuadro 5. Desvío de tasa de aplicación según sistema en evaluación a campo.

Sistema	Desvío de tasa (%)
CPM	7,8 a
CC	12,3 b
CPA	16,2 c
p-valor	$<0,0001$
CV%	105,8

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

Se observaron diferencias en la magnitud de los desvíos de tasa de aplicación obtenidos a campo y durante los experimentos estáticos (Cuadro 6). Las mismas pueden atribuirse a que las variaciones de velocidad en el campo no dependieron únicamente del cambio en el régimen de giro del motor (como se asumió durante la simulación estática) sino que también se debieron al patinaje del tractor, reduciendo

la proporcionalidad entre la velocidad de avance y el caudal de entrada a los comandos y de esta forma limitando la capacidad de ajuste de los sistemas CC y CPM. En el caso del sistema CPA estas diferencias son atribuibles al intervalo de tiempo en que ocurrieron los cambios de velocidad en el campo (del orden de 1 s) superior al tiempo de estabilización de este sistema por lo que afrontó cambios en la velocidad de avance sin tiempo suficiente para realizar los ajustes de caudal correspondientes.

Cuadro 6. Resumen de desvíos de tasa de aplicación de experimentos estáticos y de campo.

Sistema	Desvío tasa (%)		
	Experimentos estáticos	Experimento a campo	
CPM	2,5 a	2,78 a	7,8 a
CC	9,2 b	5,13 b	12,3 b
CPA		9,07 c	16,2 c
	p-valor	0,0033	<0,0001
	CV%	47,98	27,78
			105,8

Medias con letra común en columna no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

3.3.2.1. Distribución espacial de la tasa de aplicación

El mayor ajuste se logró con el sistema CPM con el cual el 72% del área fue pulverizada con desvíos dentro de un rango aceptable de ± 10 %. Con el sistema CC el 53 % del área fue pulverizada con tales desvíos y con el sistema CPA el 46 %. El sistema CPA pulverizó el 37 % del área con desvíos superiores al 10 % de la tasa objetivo de aplicación mientras que el sistema CC pulverizó el 34 % del área con desvíos inferiores a $- 10$ % (Figura 26).

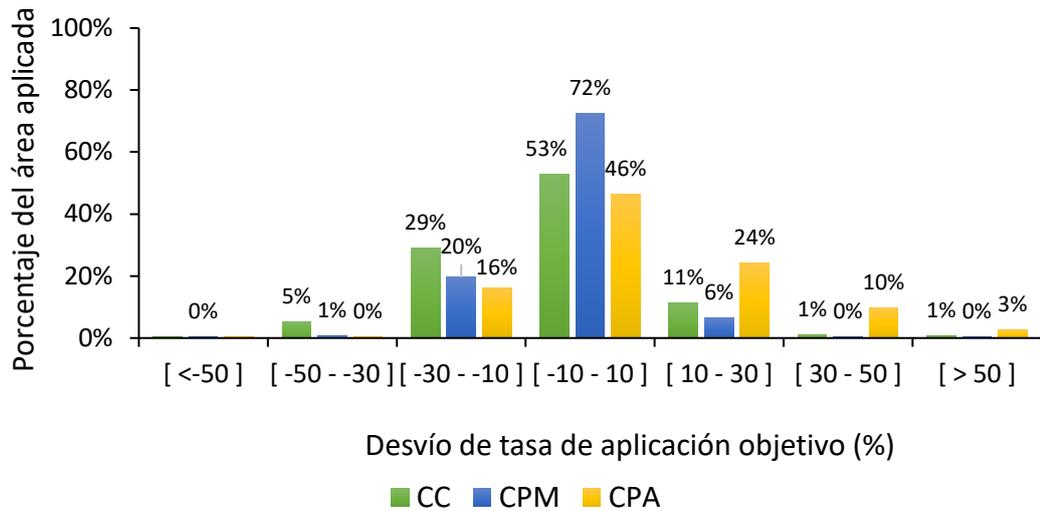


Figura 26. Porcentaje del área aplicada por cada sistema en función del desvío de la tasa de aplicación.

La distribución espacial de los desvíos de tasa de aplicación se puede observar en la Figura 27 donde se presentan mapas de uno de los bloques del experimento, puede notarse claramente como con el sistema CPM el mayor porcentaje del área presentó desvíos de la tasa objetivo ente $\pm 10\%$, el sistema CC presentó la mayor parte del área pulverizada en un rango entre el 30 y 10% inferior a la tasa objetivo, y el sistema CPA tasas de aplicación dentro del rango de 10 a 30% superior a la tasa objetivo.

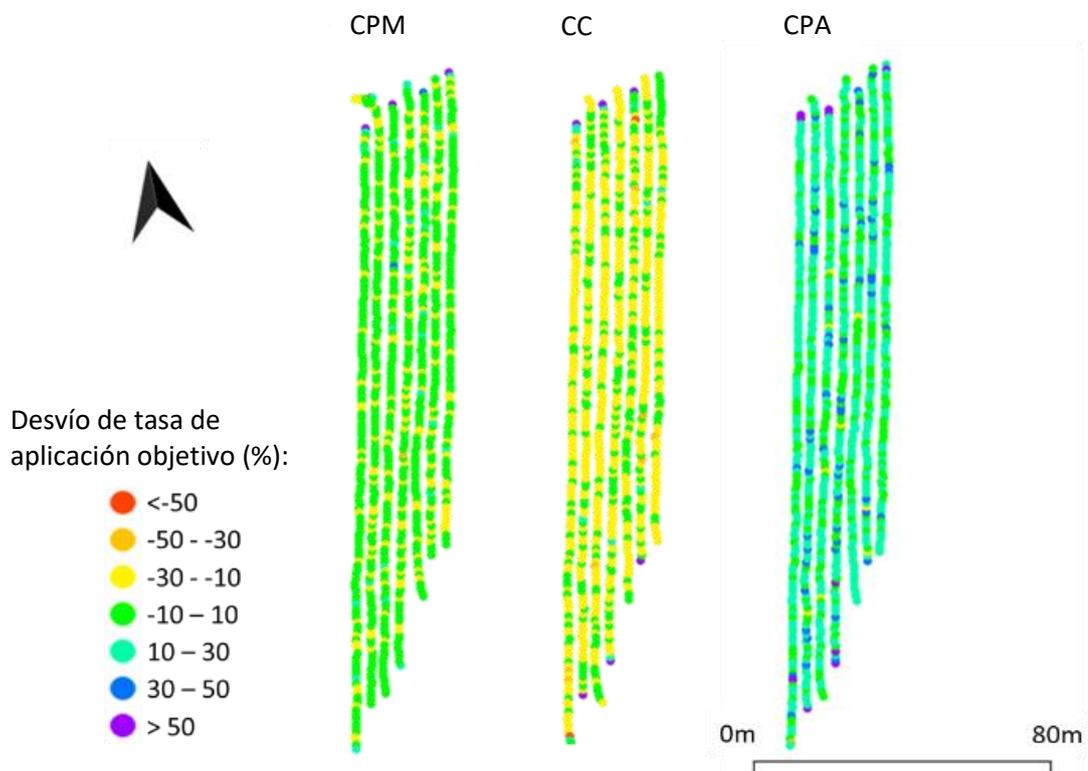


Figura 27. Distribución espacial de los desvíos de tasa de aplicación según sistema.

Los resultados obtenidos son similares a los de estudios realizados en ambientes agrícolas por Sharda et al. (2013) donde entre el 28 y 41 % del área tratada con sistemas CPA presentó desvíos entre $\pm 10\%$ de la tasa objetivo y por Luck et al. (2011a) donde solamente del 25 al 36 % del área tratada obtuvo tales desvíos de tasa; estos autores apuntan al tiempo de respuesta a los cambios de velocidad de los sistemas CPA como causa potencial de estos desvíos en la tasa de aplicación, factor que pudo ser observado en el presente trabajo donde los intervalos de tiempo entre variaciones de velocidad fueron frecuentemente menores al tiempo de estabilización del sistema CPA evaluado.

3.3.3. Efecto de los cambios de velocidad en la tasa de aplicación

A efectos ilustrativos se extrajo una muestra representativa de datos de tasa de aplicación en función de la velocidad de avance para cambios de velocidad en aceleración y desaceleración continua durante períodos de cuatro segundos para cada sistema evaluado. En la Figura 28 se puede observar que el sistema CPM ante una desaceleración desde 4,5 a 3,9 km h⁻¹ logró mantener la tasa de aplicación sin desvíos mayores a 5 % de la tasa objetivo, en cambio, el sistema CC tuvo desvíos entre - 10 % y 21 % y en sistema CPA entre 9 % y 41 %.

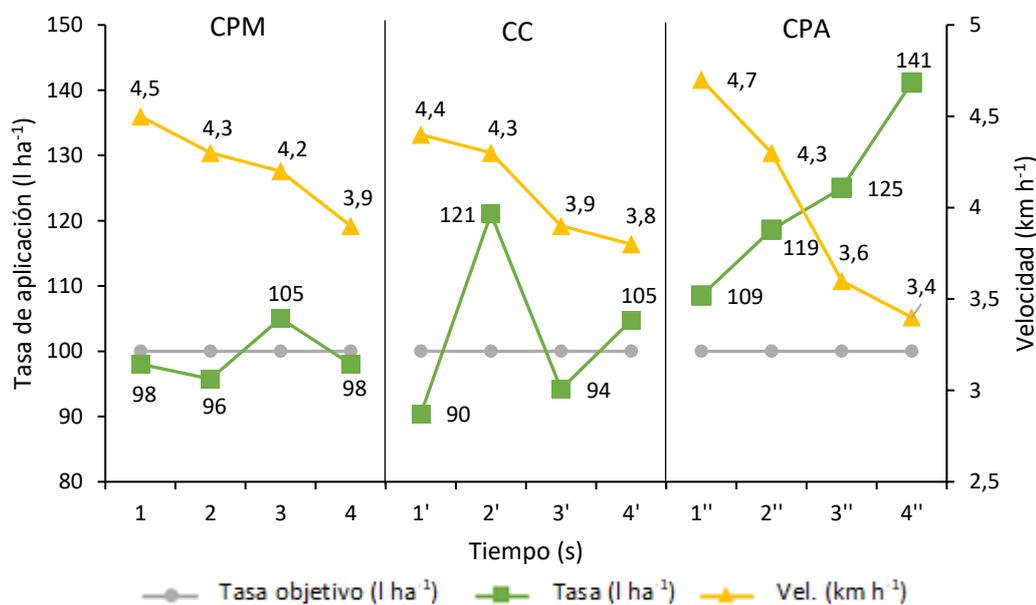


Figura 28. Efecto de la desaceleración en la tasa de aplicación según sistema evaluado.

En aceleración los sistemas CC y CPA tendieron a subaplicar; el sistema CC con desvíos entre -15 % y -19 % y el CPA con desvíos entre -7 % y -26 %. En el sistema CPA los mayores desvíos de tasa ocurrieron a mayores incrementos de velocidad. El sistema CPM, en cambio, logró mantener la tasa de aplicación dentro de desvíos de ± 7 % de la tasa objetivo a pesar del cambio de velocidad (Figura 29).

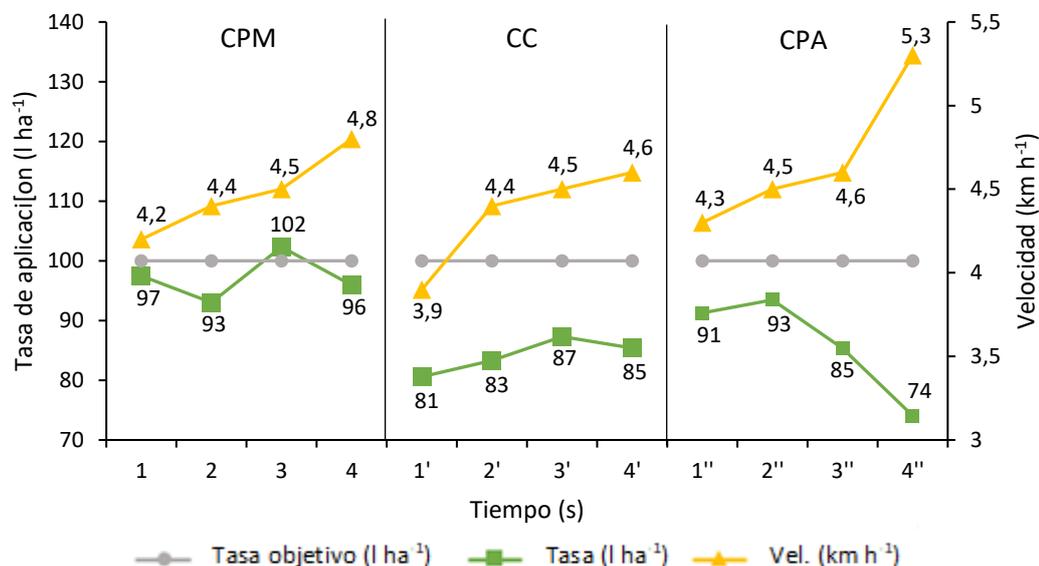


Figura 29. Efecto de la aceleración en la tasa de aplicación según sistema evaluado.

El área aplicada mientras el equipo experimentó aceleraciones o desaceleraciones fue similar. Los mayores desvíos de la tasa de aplicación objetivo ocurrieron en los sistemas CC y CPA, el sistema CPA tuvo un desvío absoluto de tasa de 17,9 % en desaceleración, el mayor registrado (Cuadro 7).

Cuadro 7. Proporción del área pulverizada (%) y desvío de la tasa objetivo (%) según sentido de cambio de velocidad y sistema.

Sistema	Proporción del área aplicada (%)		Desvío de tasa objetivo (%)	
	Aceleración	Desaceleración	Aceleración	Desaceleración
CPM	39,3	35,9	9,0	8,0
CC	39,6	36,5	13,0	13,0
CPA	40,2	36,7	15,2	17,9

En el sistema CPA los mayores desvíos de tasa ocurrieron a mayores cambios de velocidad observándose desvíos de tasa de diferente magnitud en función del sentido de la variación de velocidad. Estos resultados son similares a los expuestos por Sharda et al. (2013) y Luck et al. (2011a) quienes observaron que la capacidad de respuesta de estos sistemas de control se vio afectada por la magnitud requerida del

ajuste de caudal (dependiente de la magnitud del cambio de velocidad) y si el cambio de velocidad se producía en forma de aceleración o desaceleración.

4. CONCLUSIONES

La velocidad de avance en aplicaciones para el control de malezas en operaciones forestales presentó gran variabilidad. En campos reforestados en el 40 % del tiempo la velocidad se encontró dentro del rango aceptable de ± 10 % de la velocidad objetivo. En campos forestales de primera rotación el tiempo de aplicación con desvíos de velocidad aceptable representó el 75%.

En experimentos estáticos los sistemas CPM produjeron los menores desvíos de tasa de aplicación al variar la velocidad (2,5 %) mientras que los mayores desvíos fueron producidos por el sistema CPA evaluado (9,1 %).

Los dos sistemas CC evaluados no se comportaron como tales. Se observó una variación casi proporcional de la presión ante variaciones de caudal de entrada de ± 40 %.

El sistema CPA tuvo un tiempo de estabilización de presión de 3,86 s, significativamente superior que los sistemas CC (0,46 s) y CPM (0,61 s). El mayor tiempo de respuesta no se adecua a la alta frecuencia de variación de la velocidad de avance, por lo que el sistema CPA estuvo sometido a cambios en la velocidad de avance sin tiempo suficiente para realizar los ajustes de caudal correspondientes.

En el experimento de campo el sistema CPM presentó los menores desvíos de tasa de aplicación al variar la velocidad de avance (7,8 %), seguido por el sistema CC (12,3 %) y el CPA (16,2 %) respectivamente.

Los sistemas CPM evaluados mantienen en mayor proporción la tasa de aplicación objetivo logrando bajos desvíos de tasa en aplicaciones de herbicida en operaciones forestales, superando en desempeño a los sistemas CC y CPA, con la ventaja adicional

de ser sistemas tecnológica y operativamente más simples y con bajo costo de adquisición en comparación con los sistemas CPA.

Este trabajo es un aporte al conocimiento científico en el área de control de malezas en operaciones forestales, sin embargo, existen otras tecnologías además de las aquí evaluadas que aún no se han difundido en el medio pero que podrían tener un alto nivel de adopción en el futuro cercano. Sistemas de control de tasa de aplicación mediante pulsos de frecuencia modulada, sensores ópticos de detección de malezas o sistemas de inyección directa de herbicida son ejemplos de tecnologías que podrían aumentar la precisión de aplicación de herbicidas en operaciones forestales. Es importante que sean evaluadas en futuros estudios generando conocimiento nacional acerca del desempeño de este tipo de tecnología.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Al-Gaadi KA, Ayers PD. 1994. Monitoring controller-based field sprayer performance. *Applied Engineering in Agriculture*, 10(2): 205–208.
- ARAG. 2016. Catálogo de Pulverización (Vol. C111a).
- Bentancur P. 2017. Informe técnico sobre el estado de mantenimiento de los equipos de tratamientos fitosanitarios en Uruguay ante la posible implantación de un nuevo sistema de inspección. Tesis Ingeniería Agroalimentaria y del Medio Rural. Valencia, España. Universidad Politécnica de Valencia. 42p.
- Christensen S, Sogaard HT, Kudsk P, Norremark M, Lund I, Nadimi ES, Jorgensen R. 2009. Site-specific weed control technologies. *Weed Research*, 49(3): 233–241. doi: 10.1111/j.1365-3180.2009.00696.x
- Di Prinzio A, Behmer S, Magdalena JC. 2010. Equipos pulverizadores terrestres. En: Magdalena JC, Castillo Herrán B, Di Prinzio A, Homer Bannister I, Villalba J. (eds.) Tecnología de aplicación de agroquímicos. Río Negro, Argentina: Área de Comunicaciones del INTA Alto Valle. (Ciencia y tecnología para el desarrollo). 107-120.
- Dornelles M, Schlosser J, Boller W, Russini A, Casali A. 2011. Nota técnica: inspeção técnica de tratores e pulverizadores utilizados em pulverização agrícola. *Engenharia na agricultura*, 19(1): 36–43.
- DuPlissis J. 1998. Chemical Weed Control in Tree Planting Projects. Part II-Post-emergent herbicides. Nebraska Cooperative Extension, NF98-363. [En línea]. 20 marzo 2019. Disponible en: <https://digitalcommons.unl.edu/extensionhist/580/>
- Eyles A, Worledge D, Sands P, Ottenschlaeger ML, Paterson SC, Mendham D, O’Grady A. 2012. Ecophysiological responses of a young blue gum (*Eucalyptus globulus*) plantation to weed control. *Tree Physiology*, 32(8): 1008–1020. doi: 10.1093/treephys/tps058

- García F. 2007. Maquinaria para la distribución de los fitosanitarios: regulación y control/inspección de los equipos aplicadores. Agricultura de conservación: AC, (5), 32-37.
- Gil JA, Blanco GL, Cañero J. 2010. Mantenimiento y calibración de maquinaria para aplicación de productos fitosanitarios: pulverizadores hidráulicos de chorro proyectado. [En línea]. 20 junio 2019. Disponible en: https://www.juntadeandalucia.es/export/drupalida/Pulverizadores_hidraulicos_de_chorro_proyectado_versixn_2011.pdf
- Giles DK, Downey D. 2003. Quality Control Verification and Mapping for Chemical Application. Precision Agriculture, 4(1): 103–124.
- Grisso R, Alley M, Thomason W, Holshouser D, Roberson GT. 2011. Precision Farming Tools: Variable-Rate Application. [En línea]. 20 marzo 2018. Disponible en: https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/47448/442-505_PDF.pdf
- INUMET (Instituto uruguayo de meteorología). 2019. Boletín pluviométrico. [En línea]. 20 junio 2020. Disponible en: <https://www.inumet.gub.uy/clima/recursos-hidricos/boletin-pluviometrico>
- ISO (International Organization for Standardization). 2017. 5682-3. Equipment for crop protection-Spraying Equipment-Part 3: Test method to assess the performance of volume/area adjustment systems, Geneva, Switzerland: ISO
- Kifana BD, Abdurrohman M. 2012. Great Circle Distance Method for Improving Operational Control System Based on GPS Tracking System. International Journal on Computer Science and Engineering, 4(04): 647–662.
- Lawrence HG, Yule IJ. 2007. Modeling of Fertilizer Distribution Using Measured Machine Parameters. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 50(4): 1141–1147.

- Luck JD, Sharda A, Pitla S, Fulton JP, Shrearer S. 2011a. A Case Study Concerning the Effects of Controller Response and Turning Movements on Application Rate Uniformity with a Self-Propelled Sprayer. *Transactions of the ASABE*, 54(2): 423–431.
- Luck JD, Pitla S, Zandonadi R, Sama M, Shearer S. 2011b. Estimating Off-Rate Pesticide Application Errors Resulting from Agricultural Sprayer Turning Movements. *Precision Agriculture*, 12(4): 534–545. doi: 10.1007/s11119-010-9199-9
- Luck JD, Zandonadi RS, Luck BD, Shearer S. 2010. Reducing Pesticide Over-Application with Map-Based Automatic Boom Section Control on Agricultural Sprayers. *Transactions of the ASABE*, 53(3), 685–690.
- Maroni J. 2007. Eficacia de los comandos utilizados en las pulverizadoras agrícolas. [En línea]. 20 marzo 2018. Disponible en:
<http://www.fcagr.unr.edu.ar/Extension/Agromensajes/03/4AM3.html>
- DIEA (Dirección de estadísticas agropecuarias). 2019. Anuario estadístico agropecuario. Montevideo: MGAP (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca). Consultado 15 octubre 2020. Disponible en:
<https://descargas.mgap.gub.uy/DIEA/Anuarios/Anuario2019/Anuario2019.pdf>
- Olivet JJ. 2001. Tecnología para la aplicación de agroquímicos. INIA Serie Actividades de Difusión: 6–20.
- Osiecka A, Minogue P. 2013. Herbicides for Weed Control in Eucalyptus Culture. [En línea]. 10 marzo 2018. Disponible en:
<http://edis.ifas.ufl.edu/pdffiles/FR/FR37800.pdf>
- Peirano D, Dominguez M. 2020. Efecto del destape de cepas en el crecimiento y cantidad de rebrotes obtenidos en dos épocas de cosecha para la especie *Eucalyptus grandis*. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 83 p.
- Peligrinotti C, Agostinetto D, Panozzo LE, Silva L, Kleinick G, de Oliveira L. 2009. Períodos de interferência de plantas daninhas na fase inicial de crescimento

- do eucalipto. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 44(9): 1131–1137.
doi: 10.1590/S0100-204X2009000900010
- Rietz S, Pályi B, Ganzelmeier H, László A. 1997. Performance of Electronic Controls for Field Sprayers. Journal of Agricultural Engineering Research, 68: 399–407.
doi: 10.1006/JAER.1997.0217
- Sánchez N. 1997. Interferencia de las malezas sobre la absorción de nutrientes y el crecimiento inicial de *Eucalyptus globulus Labill. Spp. Globulus*. Tesis Ing. Agr. Santiago, Chile. Facultad de Agronomía. 65 p.
- Seifert J, Woeste K. 2002. Evaluation of Four Herbicides and Tillage for Weed Control On 1-0 Planted Tree Seedlings. Northern Journal of Applied Forestry, 19(3): 101–105.
- Seifert J, Selig MF, Morrissey R. 2007. Weed Competition Control in Hardwood Plantations. [En línea]. 10 abril 2018. Disponible en:
<https://www.extension.purdue.edu/extmedia/FNR/FNR-224.pdf>
- Sharda A, Fulton JP, McDonald TP. 2014. Impact of Response Characteristics of an Agricultural Sprayer Control System on Nozzle Flow Stabilization Under Simulated Field Scenarios. Computers and Electronics in Agriculture, 112: 139–148. doi: 10.1016/j.compag.2014.11.001
- Sharda A, Luck JD, Fulton JP, McDonald TP, Shearer SA. 2013. Field Application Uniformity and Accuracy of Two Rate Control Systems with Automatic Section Capabilities on Agricultural Sprayers. Precision Agriculture, 14(3): 307–322.
doi: 10.1007/s11119-012-9296-z
- Sharda A, Fulton JP, Mcdonald TP, Zech WC, Darr MJ, Brodbeck C. 2010. Real-Time Pressure and Flow Dynamics Due to Boom Section and Individual Nozzle Control on Agricultural Sprayers. Transactions of the ASABE, 53(5): 1363-1371.
- Silva JR, Alves P, Toledo R. 2012. Weed Control Strip Influences the Initial Growth of *Eucalyptus Grandis*. Acta Scientiarum. Agronomy, 34(1): 29–35.
doi: 10.4025/actasciagron.v34i1.12252

- Teejet. 2011. Teejet Technologies, Catalog 510A-ES. Spraying System Co.,
Wheaton, IL.
- Toledo R, Victoria R, Da Costa P, Pitelli R, Freitas M. 2003. Faixas de controle de plantas daninhas e seus reflexos no crescimento de plantas de eucalipto. *Forest Sciences*, 64: 78–92.
- Tommasino H. 2013. Cadena forestal madera: desempeño reciente y desafíos. En: Anuario OPYPA 2013. Montevideo, Uruguay. OPYPA-MGAP. 213-224.
- UNIT (Instituto Uruguayo de Normas Técnicas). 2020. Norma UNIT 1152:2020. Gestión forestal sostenible - Criterios e indicadores. 66 p.
- Uruguay XXI. 2019. Oportunidades de inversión: Sector forestal. [En línea]. 10 abril 2018. Disponible en:
<https://www.uruguayxxi.gub.uy/uploads/informacion/4e52d8c6a598944eb1ddc97bbf85233df5c290ba.pdf>
- Villalba J. 2010. Control de malezas en *Eucalyptus spp.* En: Series de actividades de difusión 629. Jornada Técnica de Protección Forestal. Tacuarembó, Uruguay. INIA. 1–8.

6. ANEXOS*

**Performance of spray control
systems for herbicide application in
forestry**

**Desempeño de sistemas de control
de pulverización para aplicación de
herbicidas en silvicultura**

**Desempenho de sistemas de
controle de pulverização para
aplicação de herbicida em
silvicultura**

Perdomo, C.A. ¹; Olivet, J.J¹

*¹Universidad de la República, Facultad de Agronomía, Montevideo,
Uruguay.*

* El presente artículo será publicado en revista Agrociencia Uruguay.

