

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



ELABORACIÓN DE MAPAS DE PRESCRIPCIÓN PARA LABOREO VARIABLE
DE SUELOS EMPLEADO EN UN SISTEMA DE LABRANZA VERTICAL

Tesis

Que presenta DIEGO CRUZ HERNÁNDEZ

Como requisito parcial para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA
DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

Saltillo, Coahuila México

Diciembre de 2017

ELABORACIÓN DE MAPAS DE PRESCRIPCIÓN PARA LABOREO VARIABLE
DE SUELOS EMPLEADO EN UN SISTEMA DE LABRANZA VERTICAL

Tesis

Elaborado por DIEGO CRUZ HERNÁNDEZ como requisito parcial para obtener el
grado de MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE
PRODUCCIÓN con la aprobación del Comité de Asesoría



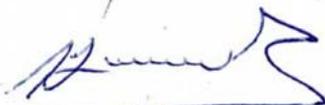
Dr. Santos Gabriel Campos Magaña
Asesor principal



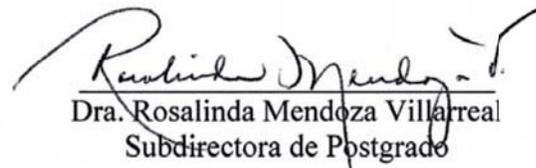
Dr. Martín Cadena Zapata
Asesor



MC. Félix de Jesús Sánchez Pérez
Asesor



Dr. Alejandro Zermeño González
Asesor



Dra. Rosalinda Mendoza Villarreal
Subdirectora de Postgrado

Saltillo, Coahuila México

Diciembre de 2017

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Santos Gabriel Campos Magaña, por dirigir este trabajo de investigación. Agradezco su empeño, dedicación profesional, aportaciones teóricas, experiencias, consejos y llamadas de atención enmarcadas en torno a la investigación. Su exigencia y rigurosidad que han sido claves en este trabajo, ya que sin su dedicación y disponibilidad, sin duda no hubiera podido lograr esta meta.

A mis asesores, por el tiempo y las recomendaciones vertidas en la investigación: Dr. Dr. Martin Cadena Zapata, Dr. Alejandro Zermeño Gonzales y al M.C. Félix de Jesús Sánchez Pérez que contribuyeron para que este trabajo se realizara, por sus conocimientos brindados.

Al Ing. Gilbert Fresh López López. y amigo, por los intercambios de opiniones, sugerencias y recomendaciones sobre los trabajos.

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro y CONACYT.

A todos aquellos que me apoyaron de alguna forma en la realización de este trabajo.

Gracias.

DEDICATORIAS

A mis padres: Sr. Zeferino Cruz Osorio y Sra. Silvina Hernández Gertrudis. Por haberme guiado en este camino tan difícil, por haberme brindado su confianza, por brindarme esta educación de la cual pueden sentirse orgullosos. Ya que gracias a ustedes he podido llegar a esta etapa; por su paciencia y comprensión, porque a pesar de las dificultades y carencias han realizado su máximo esfuerzo por brindarme lo mejor; reconozco su gran esfuerzo por educarme y formarme, por los valores que siempre me han inculcado. Esta tesis se las dedico con mucho cariño, y como símbolo de gratitud por su amor y apoyo incondicional que siempre me han manifestado.

A mis hermanas, que han sido un motor para lograr mis propósitos, gracias por su amistad, fortaleza y buenos momentos compartidos.

A toda mi familia, amigos y conocidos.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	iii
DEDICATORIAS	iv
ÍNDICE GENERAL	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS	viii
RESUMEN.....	ix
ABSTRACT	xi
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	3
General	3
Específicos.....	3
HIPÓTESIS.....	3
REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
Labranza	4
Labranza vertical	4
Agricultura de precisión	5
Sistemas de control en la agricultura de precisión	6
Sensor de profundidad de trabajo.....	7
Dinámica de sistemas	7
Polos	8
Zeros	8
MATERIALES Y MÉTODOS	9
Prototipo de labranza vertical variable.....	9
Electro válvulas hidráulicas y módulo VM-430.....	11
Levantamiento topográfico de sitios de prueba.....	13
Generación de mapas de prescripción de corte y relleno	13
Comprobación de respuesta del sistema de labranza vertical	13
Variables y análisis de respuestas del sistema de labranza vertical	14
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	15

Resultados en pruebas estáticas con la electro válvula hidráulica de voltaje proporcional (Danfoss) en diseño Survey y diseño MultiPlane	15
Resultados en pruebas estáticas con la electro válvula hidráulica de tiempo proporcional (Vickers) en diseño Survey y diseño MultiPlane	17
CONCLUSIONES	20
RECOMENDACIONES	20
REFERENCIAS	21

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de las fases del trabajo	9
Figura 2. Modelo conceptual del arado de labranza vertical articulado	10
Figura 3. a) Válvula Danffos y b) Válvula Vickers.	11
Figura 4. a) pantalla FmX, b) sensor sonar (MaxBotix® Inc, USA), c) Antena de radio RTK (Trimble, USA), d) antena de recepción satelital (Trimble AG25 GNSS, USA) y e) actuadores hidráulicos.	12
Figura 5. a) Variables para válvula de voltaje proporcional (izquierda) y b) Variables para válvula de tiempo proporcional (derecha).....	14
Figura 6. Mapa de prescripción y escala de colores en diseño Survey (izquierda) y MultiPlane (derecha).....	15
Figura 7. a) Gráfico de datos en áreas de corte (izquierda) y b) relleno (derecha) empleando la válvula de voltaje proporcional con diseño Survey.....	16
Figura 8. a) Gráfico de datos en áreas de corte (izquierda) y b) relleno (derecha) empleando la válvula de voltaje proporcional con diseño MultiPlane.	16
Figura 9. (a) Gráfico de datos en áreas de corte (izquierda). (b) Gráfico de datos en áreas de relleno (derecha). Empleando la válvula de tiempo proporcional con diseño Survey.	18
Figura 10. a) Gráfico de datos en áreas de corte (izquierda). b) Gráfico de datos en áreas de relleno (derecha). Empleando la válvula de tiempo proporcional con diseño MultiPlane.....	18

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Descripción de los elementos del prototipo de labranza vertical articulado.....	10
Tabla 2. Elementos del módulo VM-430 en las dos formas de emulación.....	11
Tabla 3. Distancias y tiempos registrados al cambio de prescripción en los sitios de prueba con mapas de prescripción en diseño Survey y Multiplane	17
Tabla 4. Valores de tiempo de subida, magnitud de disparo, tiempo de estabilidad y función de transferencia de los modelos dinámicos de las pruebas con mapas de prescripción en diseño Survey y MultiPlane.....	19

RESUMEN

ELABORACIÓN DE MAPAS DE PRESCRIPCIÓN PARA LABOREO VARIABLE
DE SUELOS EMPLEADO EN UN SISTEMA DE LABRANZA VERTICAL

POR

DIEGO CRUZ HERNÁNDEZ

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DR. SANTOS GABRIEL CAMPOS MAGAÑA –ASESOR-

Saltillo, Coahuila

Diciembre de 2017

La presente investigación de evaluación de un sistema de labranza vertical automatizada empleando dos tipos de electro válvulas hidráulicas, una de voltaje proporcional (Danffos) y otra de tiempo proporcional (Vickers) en combinación con dos diseños de mapas de prescripción uno empleando el sistema Survey y otro el sistema Multiplane, en términos de tiempos y distancias de respuesta para alcanzar la profundidad de trabajo objetivo. Para esto se empleó un prototipo de labranza vertical articulado, en conjunto con un sistema de control FmX, un sistema de corrección satelital RTK además de un sistema de adquisición de datos del tipo DaqBook 2K. Para la evaluaciones de los tiempos y distancias de respuesta del sistema en función de los mapas de prescripción generados se empleó un sensor de tipo sonar para el monitoreo de los cambios de profundidad. Las ecuaciones de transferencia fueron generadas empleando el software Matlab y para los análisis estadísticos el Software Minitab. Los resultados muestran que el mejor tipo de válvula para el sistema de labranza vertical en donde se requieren una respuesta casi inmediata a los cambio de prescripción es la válvula de tiempo proporcional (Vickers) la cual presenta tiempos de respuesta, de 0.0 a 0.10 m de profundidad de laboreo, en 1.58 a 2.63s en un solo escalón a diferencia de la válvula de voltaje proporcional que presenta tiempos de respuesta, para la misma profundidad, de 25.25 a 54.24s requiriendo cuatro escalones para alcanzar la profundidad objetivo. Así mismo se muestra que no hay diferencia para el tipo de diseño de prescripción lo cual indica que se puede emplear en forma indistinta el diseño Survey o MultiPlane. El menor error, de profundidad de trabajo, se presenta en la respuesta de relleno en comparación con la respuesta de corte.

PALABRAS CLAVE: labranza vertical automatizada, prototipo articulado, sistema de control, FmX, función de transferencia.

ABSTRACT

ELABORATION OF PRESCRIPTION MAPS FOR VARIABLE SOIL TILLING
EMPLOYED IN A VERTICAL TILLAGE SYSTEM

BY:

DIEGO CRUZ HERNÁNDEZ

MASTER OF SCIENCE IN
PRODUCTION SYSTEM ENGINEERING
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DR. SANTOS GABRIEL CAMPOS MAGAÑA –ADVISER–

Saltillo, Coahuila

December 2017

The present research work for evaluation of an automated vertical tillage system using two different types of electro hydraulic valves, a proportional voltage (Danffos) and another time proportional (Vickers) in combination with two prescription designs maps using the Survey the Multiplane systems, in terms of times and distances response to reach target tillage depth. To do this a prototype of articulated vertical tillage plow was used, in conjunction with a FMX control equipment, a RTK system for position correction and DaqBook 2 K data acquisition system for data collection. A sonar sensor was used for the evaluations of the time and distances of response of the system to a change on prescription maps for monitoring changes in depth. The transfer function equations were generated using the Matlab software and Minitab Software for Statistical analyses. The results show that the best type of valve system for automated control depth was the proportional time valve (Vickers) which presents a response time, from 0.0 to 0.10m of depth of tillage, from 1.58 to 2.63s on a single step in contrast to proportional voltage valve presenting a response time, to the same depth, from 25.25 to 54.24s requiring four steps to achieve the target depth. Also the results shows that for prescription maps design that Survey or MultiPlane design can be used interchangeably. The minor error working depth occurs with the fill response compared to the cut response.

Key words: automated vertical tillage, articulated prototype, FmX, transfer function, control system.

INTRODUCCIÓN

Reynolds *et al.* (2005), describen que la demanda de alimentos, combustibles y recursos energéticos continúan aumentando en todo el mundo, los logros en rendimientos de cultivos no son suficientes en comparación con el alto costo de la energía aplicada a la producción de cultivos, por lo tanto, es necesario optimizar los recursos utilizados en actividades que requieren mayores costos en la producción agrícola, como la labranza del suelo, que se considera una de las operaciones agrícolas más costosas. Las operaciones de labranza del suelo requieren un gran consumo de energía; esto puede limitar las actividades agrícolas reduciendo la rentabilidad del sistema de producción (Kichler *et al.*, 2007); sin embargo, si se implementan cambios tecnológicos en sistemas apropiados de producción de alimentos, incluida la agricultura de conservación, se podría ahorrar un 50% de la energía fósil (Pimentel *et al.*, 2008).

La labranza reducida no solo ahorra tiempo y energía, sino que también reduce el costo del cultivo, mejora el ambiente del suelo para un mejor rendimiento de los cultivos y aumenta la disponibilidad de agua para el crecimiento de las plantas (Shrivastava y Satyendra, 2011). Al respecto, la labranza vertical podría ser una buena alternativa como sistema de conservación, incluso cuando pueda dar lugar a una pequeña reducción del rendimiento de la cosecha. Por otro lado, el ahorro de energía es considerable (Cavalaris y Gemtos, 2002).

El ahorro de energía utilizando la labranza vertical en comparación con el sistema convencional se ha documentado en varios estudios (Hoogmoed y Derpsh, 1985; Cadena *et al.*, 2004; Camacho y Rodríguez, 2007). La fuerza de tiro requerida para los implementos y la calidad del trabajo depende de la resistencia específica del suelo, la profundidad de trabajo, la densidad del suelo y la humedad en el momento de la operación; el espaciado entre los cinceles en combinación con el trabajo de profundidad crítica podría dar lugar a diferentes requisitos de fuerza, incluso para la misma condición del suelo (Arvidsson *et al.*, 2004; Raper y Bergtold, 2007; Manuwa, 2009).

Cada punta tiene una profundidad útil de trabajo, por debajo de esta profundidad también llamada la profundidad crítica (PC), la compactación se puede producir en lugar de aflojar el suelo y un considerable aumento de los valores de la resistencia específica puede ocurrir

(Spoor y Godwin, 1978). Esta profundidad depende de las condiciones de la geometría de la punta y de las condiciones del suelo. Además de esto, el consumo de combustible aumenta proporcionalmente con la profundidad de arado (Moitzi et al., 2006; Kalk y Hulsbergen, 1999).

Por su parte el concepto de agricultura de precisión (AP) se basa en la variabilidad edáfica donde se requiere el uso de diferentes técnicas para caracterizar y evaluar los campos de producción mediante el uso de sistemas de posición global (GPS), sensores remotos y locales y Sistemas de Información Geográfica (GIS) (Zhang *et al.*, 2002) para obtener mejoras en el rendimiento y reducir el consumo de combustible en las prácticas de cultivo agrícola.

Andrade *et al.* (2004) mencionan que la (AP) está siendo ampliamente difundida, lo que aumenta el interés de usar sensores locales para obtener información de suelos y cultivos, muchos de estos sensores están integrados con un GPS para obtener mapas de diferentes variables como la magnitud y ubicación de áreas de compactación de suelos. Sin embargo, la tecnología desarrollada por (PA) tiene pocos estudios para la aplicación de labranza vertical automatizada.

El objetivo de este trabajo fue evaluar la respuesta de un sistema de labranza vertical automatizado, utilizando dos tipos de electro válvulas hidráulicas y dos sistemas de controladores para obtener una mejor respuesta en el sistema a un cambio de señal en la profundidad de trabajo como función de mapas de prescripción geo-referenciadas para capas compactadas de suelo.

OBJETIVOS

General

Obtener un sistema de control automático de respuesta optima aplicado en labranza vertical variable mediante mapas de prescripción.

Específicos

Generar mapas de prescripción de energía aplicados en el laboreo variable de suelos.

Desarrollar un sistema de control mecánico.

Determinar la función de transferencia de la caracterización de respuesta de dos tipos de válvulas.

HIPÓTESIS

Mediante el uso de mapas de prescripción y sistemas de control automático es posible realizar la aplicación de laboreo variable de suelos.

REVISIÓN DE LITERATURA

Labranza

La labranza adquiere importancia en la preparación del suelo debido a que la remoción es alta y que esta labor afecta en gran medida sus propiedades físicas, y directa e indirectamente las propiedades químicas y biológicas. Los cambios promovidos por la labranza deben favorecer la producción de los cultivos y mantener la calidad física del suelo, pero debido al uso inadecuado de los implementos de labranza se provoca la erosión y degradación física de este. La degradación física del suelo puede ser definida como la pérdida de la calidad de la estructura del suelo (Velázquez, 2011).

Esa degradación estructural puede ser observada tanto en la superficie con el surgimiento de finas costras; por debajo de la capa arada, donde surgen capas compactadas. Con esa degradación Cabeda (1983) menciona que las tasas de infiltración de agua en el suelo se reducen, mientras las tasas de escorrentía y de erosión aumentan.

La búsqueda de soluciones a esta problemática ha conducido al estudio e implementación de la labranza de conservación, con el fin de disminuir el impacto sobre el medio ambiente y especialmente sobre el suelo. Por lo anterior, es importante conocer diferentes parámetros operativos de los implementos de labranza y su incidencia en el suelo (Velázquez, 2011). Por otro lado, el alto costo en las labores es debido a un gran número de pasos de implementos y por lo tanto, grandes consumos de energía en forma de combustible. Es un factor que puede limitar la actividad agrícola pues reduce el costo beneficio del sistema de producción. Steiner (1998) menciona que para muchos agricultores antes de una conciencia conservacionista, la principal razón de adopción de los sistemas de labranza de conservación es la posibilidad de reducción de costos.

Labranza vertical

La labranza vertical se refiere a un sistema donde toda la tierra está preparada con implementos que no invierten el suelo y causan poca compactación. Por lo tanto, el suelo queda normalmente con una buena cobertura de rastrojo de más de 30% sobre la superficie (Velázquez, 2011).

La labranza vertical es un sistema ventajoso en un amplio rango de tipos de suelo, inclusive en los que tienen problemas de drenaje y que son susceptibles a la compactación. La eficacia operativa del sistema de labranza vertical es más alta que la de labranza convencional, sobre todo debido a que el vibro-cultivador trabaja con mayor velocidad y tiene mayor ancho de trabajo que la rastra de discos.

Por consiguiente es posible preparar entre 50 hasta 80% más de superficie por día con labranza vertical, si se la compara con labranza convencional (Barber et al., 1993).

La principal característica de la labranza vertical es que utiliza brazos o flejes equipados con puntas en lugar de discos para aflojar el suelo sin invertirlo, dejando en la superficie una cobertura protectora formada por los residuos del cultivo anterior y por las malezas arrancadas (Barber et al., 1993).

Agricultura de precisión

La Agricultura de precisión (AP) es una técnica para aumentar la productividad, rentabilidad, mediante la diferenciación de sectores “homogéneos”, busca dar un manejo diferenciado de manera que las áreas agrícolas expresen su máximo potencial (Ortega y Flores, 2008). La AP requiere información de posicionamiento satelital, no obstante ésta no indica lo que hay que hacer en el campo, sino que permite a través de ciertas herramientas dar a cada zona del campo cultivado el tratamiento agronómico más apropiado, tomando en cuenta el aspecto económico, productivo y ambiental.

Bolstad, P. (2005). Menciona que dentro de la AP, los Sistemas de Información geográfica (SIG) están integrados por un hardware y un software los cuales capturan y almacenan datos. Si bien la agricultura de precisión es un tema relativamente nuevo, se han logrado muchos avances, principalmente en el desarrollo de máquinas e implementos que permiten el manejo localizado en base a mapas. Los recursos más avanzados en tecnología de información hoy disponibles, como los sistemas de posicionamiento global (GPS), los sistemas de información geográfica (SIG), los sistemas de control y adquisición de datos, sensores y actuadores, entre otros, están cada vez más presentes en el campo. A pesar de ese avance tecnológico, hay áreas que necesitan desarrollarse aún más para que la

agricultura de precisión pueda consolidarse como una solución amplia y plenamente viable, para todos los segmentos de la agricultura.

La agricultura de precisión suele dividir este conjunto de tecnologías en tres grandes etapas:

- Recolección de datos.
- Análisis, procesamiento e interpretación de la información
- Aplicación diferencial de insumos.

Sistemas de control en la agricultura de precisión

En años recientes, los sistemas de control han asumido un papel cada vez más importante en el desarrollo y avance de la civilización moderna y la tecnología.

Los sistemas de control se encuentran en gran cantidad en todos los sectores de la industria:

- Control de calidad de los productos manufacturados, Líneas de ensamble automático.
- Control de máquinas-herramienta, Agricultura de precisión, Control de posición en el sistema hidráulico de tractores, Tecnología espacial y sistemas de armas.
- Control por computadora, Sistemas de transporte, Sistemas de potencia, Robótica y muchos otros.

Los sistemas de control automático en lo que consta a su operación, no tiene demasiada complejidad, algunos autores lo definen como algo esencial e indiscutiblemente primordial en nuestra sociedad. Navarro (2004), lo define como un conjunto formado por el proceso y el sistema de control. Para conseguir este objetivo son indispensables una serie de dispositivos adicionales, que de alguna manera lleven a cabo el control o regulación del proceso con el fin de sustituir la acción del hombre por un dispositivo llamado controlador o regulador. El conjunto que forman los componentes que llevaran a cabo el control automático de un proceso se le llama sistema de control automático.

Acedo (2006), define un sistema de control automático el cual mide una variable y actúa de una forma determinada, para que esa variable se mantenga en un valor deseado de referencia. Un sistema de control no automático, puede hacer cambiar el valor de la variable pero no llevarla al valor de referencia.

En la actualidad existen plantas industriales que solo requieren para su operación de unas cuantas personas que supervisen sus procesos de producción, los cuales se realizan automáticamente bajo el control de sistemas computarizados. Estos sistemas efectúan el control directo de las variables, ajustan los parámetros de acuerdo a las condiciones de operación, informan a los operadores de las condiciones anormales de la planta y aun sugieren las acciones de corrección en caso de falla.

El desarrollo de los sistemas de control automático se ha logrado en poco tiempo ya que podemos considerar que este se inició, como conocimiento estructurado en la década de 1920, (Cabada, 1998) citado por Cuervo (2014). Acedo (2006), hace referencia sobre los controladores automáticos en donde han incorporado una habilidad que corresponde al ser humano. Esa habilidad es la de (Sentir) una condición correcta o incorrecta y actuar para corregirla.

Sensor de profundidad de trabajo

Son utilizados sensores de posición, normalmente constituidos de reglas electro- ópticas. También se usan sensores basados en ultrasonido. Este mismo tipo de sensor es utilizado para la determinación de la altura de corte de los cabezales de cosechadoras de cereales y forraje (Silva y Borges, 1998) citados por Cuervo (2014).

Dinámica de sistemas

Un sistema es una combinación de componentes que actúan conjuntamente para alcanzar un objetivo específico. Una componente es una unidad particular en su función en un sistema. De ninguna manera limitados a los sistemas físicos, el concepto de sistema se puede ampliar a fenómenos dinámicos abstractos, tales como los que se encuentran en la economía, el transporte, crecimiento de la población y biología. Un sistema se llama dinámico si su salida en el presente depende de una entrada en el pasado; si su salida en curso depende solamente de la entrada en curso, el sistema se conoce como estático. La salida de un sistema estático permanece constante si la entrada no cambia y cambia solo cuando la entrada cambia. En un sistema dinámico la salida cambia con el tiempo cuando no está en su estado de equilibrio (Ogata, 1987).

Polos

Determinan la estabilidad del sistema (denominador). Si el polo tiene parte real positiva el sistema es inestable.

Zeros

Afectan el tiempo de respuesta (numerador). Si los polos tienen solo parte reales el sistema está sobre amortiguado. Si los polos son complejos el sistema esta sub amortiguado y si los polos están en el eje imaginario el sistema no tiene amortiguamiento.

MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología utilizada en este trabajo de investigación se muestra en la Figura 1 indicando las principales fases del trabajo así como los equipos, instrumentos, software y parcelas de evaluación empleados:

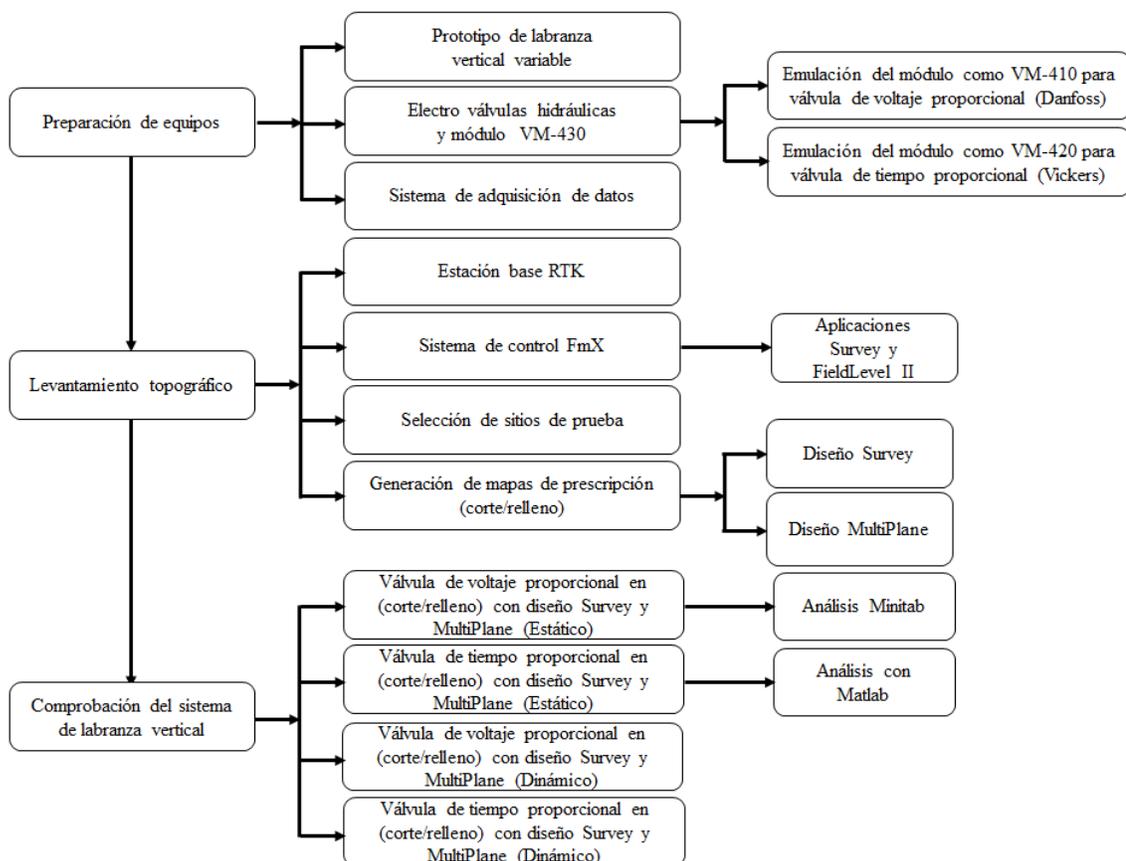


Figura 1. Diagrama de las fases del trabajo.

Prototipo de labranza vertical variable

Para la realización del presente trabajo se utilizó un prototipo de labranza vertical variable Figura 2, cuyos elementos lo integran: dos barras porta implementos una en la parte frontal y otra en la parte trasera (1), estas permiten el acoplamiento de cuatro cinceles frontales (6) y dos cinceles traseros (5), se encuentran unidas por un sistema de paralelogramo el cual es accionado por dos actuadores hidráulicos (4) mediante una válvula hidráulica (2) y (3).

En la Tabla 1 se describen los elementos que integran al prototipo de labranza vertical articulado.

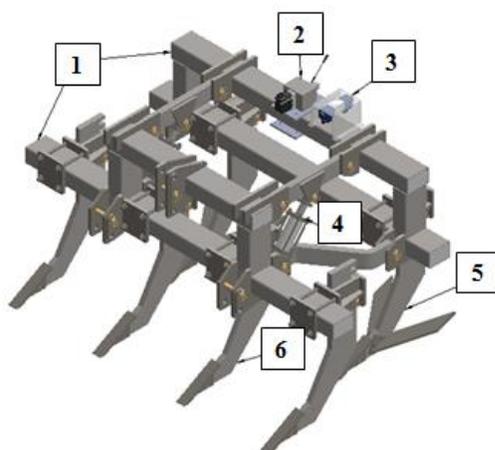


Figura 2. Modelo conceptual del arado de labranza vertical articulado.

Tabla 1. Descripción de los elementos del prototipo de labranza vertical articulado.

Elemento	Descripción	Cantidad	Especificaciones
1	Bastidor paralelogramo	4	
2	Válvula proporcional Danffos	1	Presión Max. 30 bares [435Psi] (Danffos, Dinamarca).
3	Válvula solenoide Vickers	1	Presión Max. Para P, A & B 350 bar [5075 psi]. Y para T 210 bar [3045 psi] (Vickers®, USA).
4	Actuadores hidráulicos	2	Diámetro del cilindro 34.87176. Máximo desplazamiento del vástago 0.19cm. Mínimo desplazamiento del vástago 0.06m.
5	Cinzel de profundidad variable	2	Cinceles con alas de 0.60m a profundidad variable de trabajo 0.20,0.30,0.40m
6	Cinzel frontal	4	Cinceles someros de 0.75m de largo a 0.20m de profundidad de trabajo

Electro válvulas hidráulicas y módulo VM-430

Para el accionamiento de la parte articulada del prototipo se utilizaron dos tipos de electro válvulas hidráulicas. En la Figura 3(a) muestra la primera válvula del tipo de voltaje proporcional de la marca Danffos con configuración de emulación VM-410 y la segunda, Figura 3(b), la válvula de tiempo proporcional marca Vickers con configuración de emulación VM-420.

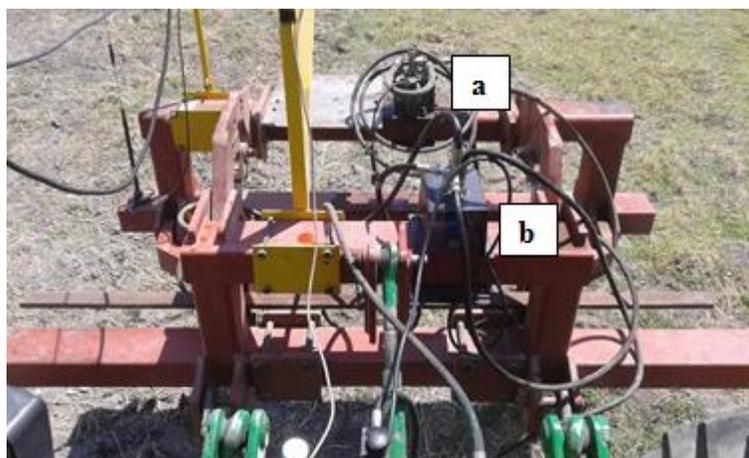


Figura 3. a) Válvula Danffos y b) Válvula Vickers.

El módulo VM-430 (Marca Trimble, USA) tiene tres configuraciones de trabajo, para este proyecto se utilizaron dos configuraciones de arneses para emular los módulos VM-410 y VM-420, en la Tabla 2 se presentan la lista de componentes.

Tabla 2. Elementos del módulo VM-430 en las dos formas de emulación.

Emulación VM430-410	Emulación VM430-420
1. FmX integrated display to CAN with port replicator (75407)	1. FmX integrated display to CAN with port replicator (75407)
2. Can Field Manager Display (85482)	2. Can Field Manager Display (85482)
3. CAN terminator (59783)	3. CAN terminator (59783)
4. Field Level II CAN to VM cable (84270-150)	6. Cable GCS400 Dual PT Valve Quick Disc Tra (84263-150)
5. Cable CGS300 SGL Danfoss Valve Quick Disconnect (58729-200)	7. Cable GCS300 SGL PT Valve Quick Disc (58947-200)

En la Figura 4 se muestran los otros elementos que integran el sistema de labranza vertical variable son: a) pantalla FmX (Trimble, USA), b) sensor sonar (MaxBotix® Inc, USA),

c) Antena de radio RTK (Trimble, USA), d) antena de recepción satelital (Trimble AG25 GNSS, USA) y e) actuadores hidráulicos.

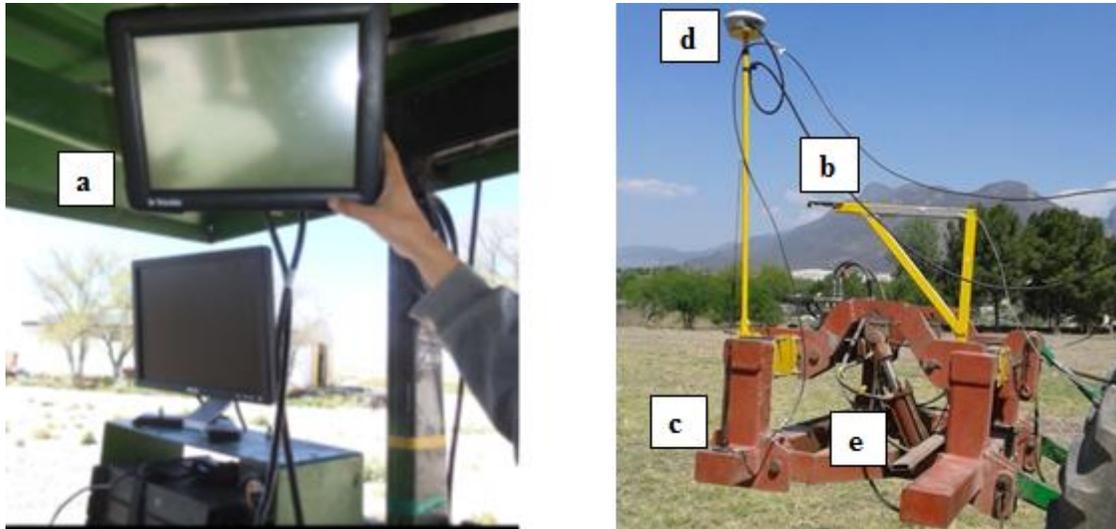


Figura 4. a) pantalla FmX, b) sensor sonar (MaxBotix® Inc, USA), c) Antena de radio RTK (Trimble, USA), d) antena de recepción satelital (Trimble AG25 GNSS, USA) y e) actuadores hidráulicos.

Para la corrección de la posición del sistema de labranza vertical variable en campo se empleó el sistema de corrección satelital RTK (Trimble, USA). Para verificar la magnitud de desplazamiento vertical entre el marco fijo y el marco trasero del prototipo de labranza vertical articulado se utilizó un sensor para medición de profundidad desarrollado por (Campos *et. al.*, 2015), el cual fue seleccionado para mediciones en un rango de 0.03 a 0.600 m y está integrado por un sensor de distancia (MaxBotix® Inc, LV-MaxSonar-EZ1, USA), dos amplificadores de instrumentación en serie AD620AN (Analog Devices Inc, USA) y un filtro pasa bajo Resistivo-Capacitivo (RC). Esta combinación de circuitos integrados acondicionan las señales para un porcentaje menor al 2% de ruido magnético al realizar el registro de datos en el sistema de adquisición DaqBook 2K (IOTech Company, USA). La constante de calibración utilizada fue de $0.280mV^{-1}$ con una R^2 de 99.99 %. La frecuencia de muestreo que se estableció en la aplicación DaqView fue de 20 Hz.

Levantamiento topográfico de sitios de prueba

Los sitios de prueba fueron dos parcelas ubicadas dentro de las instalaciones de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro en Saltillo, Coahuila México. La primera se localiza en las coordenadas $-101^{\circ} 1' 49.29''E$, $25^{\circ}20'57.72''N$ a 1793 msnm y la segunda en $-101^{\circ} 1'44.64''E$, $25^{\circ}21'14.38''N$ a 1782 msnm, con áreas totales de $12000m^2$ y $10000m^2$ respectivamente.

El levantamiento topográfico se realizó empleando la pantalla FmX (Trimble, USA) con la aplicación Survey, el prototipo de labranza vertical, una antena de recepción satelital (Trimble AG25 GNSS, USA). Una estación base RTK para corrección de la señal de posición con precisión menor a 2.54 cm, integrado por un receptor AgGPS (542, USA), una antena de recepción satelital (ZEPHYR GEODETIC Model 2, USA), dos antenas de radio (Trimble, USA) con rango de frecuencia de 450 a 470 MHz.

Generación de mapas de prescripción de corte y relleno

La generación de los mapas de prescripción se realizó con dos métodos diferentes; la primera opción fue la generada por el sistema de control FmX mediante la aplicación Survey. En este caso se estableció un punto de control maestro (MBP), después se realizaron dos recorridos, uno para definir el límite exterior (polígono) y otro con un patrón de zigzag en el interior para obtener las alturas del terreno. Posteriormente se generan mapas de alturas relativas y para finalizar el mapa de prescripción de cortes/rellenos, generado por el sistema de control FmX (Diseño Survey).

La segunda forma se utilizó el archivo (Multiplane.txt) generado por la pantalla FmX con los datos del polígono. Al final se obtiene el mapa de prescripción de cortes/rellenos rediseñado en el software MultiPlane, para esta prescripción se utilizaron cuadrículas de $3 \times 3 m$.

Comprobación de respuesta del sistema de labranza vertical

La comprobación de respuestas se realizó bajo condiciones de campo en forma estática, esto localizado en los mapas de prescripción generados tanto con Survey como con MultiPlane. Esta verificación se realizó en alturas de 0.0 a 0.10m tanto de corte como de relleno. Una vez localizadas en los mapas las áreas de corte, neutral y relleno se posiciona

el equipo de labranza vertical articulado en dicha zona y se procede al registro de los datos de la variable de desplazamiento vertical (m) empleando el sistema de adquisición de datos DaqBook 2K.

Variables y análisis de respuestas del sistema de labranza vertical

Las variables de respuesta a medir del sistema de control para la válvula de voltaje proporcional fueron: desplazamiento vertical total (m), tiempo total hasta el cambio de prescripción (s) y error (%) como se muestra en la figura en la Figura 5(a). Para el caso de la válvula de tiempo proporcional se determinó la función de transferencia de las respuestas de desplazamiento vertical (m) tomándolo como un sistema dinámico de tipo mecánico, se determinó el tiempo de subida (s), el tiempo total hasta el cambio de prescripción (s) y el porcentaje de la magnitud de disparo sobre la profundidad objetivo (%) como se ilustra en la Figura 5(b). El análisis de la información así como la generación de las ecuaciones de la función de transferencia de la válvula de tiempo proporcional se realizó con el software Matlab R2015a V. 8.5.0.197613 mediante la generación de modelos dinámicos a partir de datos experimentales.

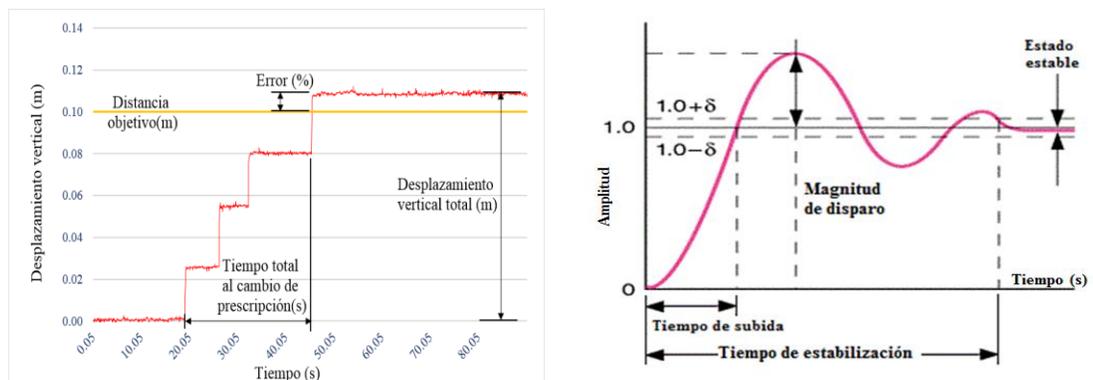


Figura 5. a) Variables para válvula de voltaje proporcional (izquierda) y b) Variables para válvula de tiempo proporcional (derecha).

El análisis de la información de respuesta de la válvula de voltaje proporcional se realizó en el software estadístico Minitab® V.16.2.4 una comparación de medias del desplazamiento vertical (m), así como de los tiempos de retardo debido a los cambios de prescripción (corte /relleno) entre los mapas de diseño Survey y MultiPlane.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En los mapas de prescripción en ambos diseños (Figura 6) se presenta una escala con colores que representan las profundidades que parten desde un punto neutral, donde no se requiere de una instrucción de corte o relleno por el sistema de control. Los valores van desde los -0.24 a 0.24m , área de cortes y área de rellenos, respectivamente. Las áreas de corte parten desde el color verde a rojo y para las de relleno de verde a azul.

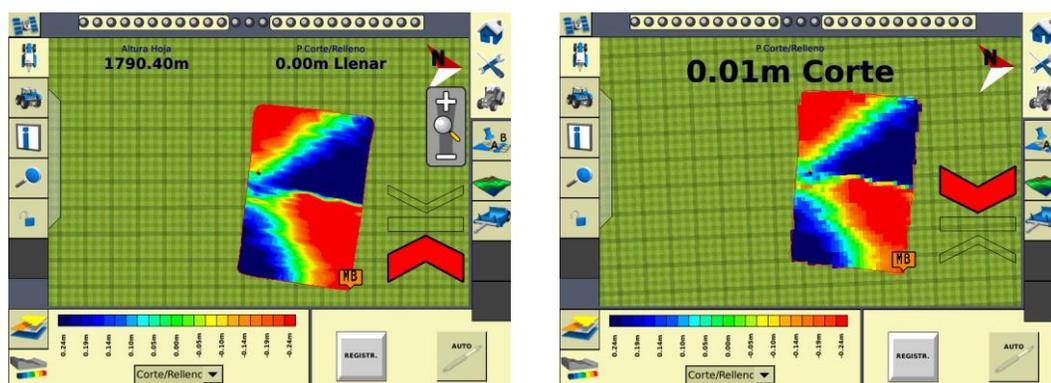


Figura 6. Mapa de prescripción y escala de colores en diseño Survey (izquierda) y MultiPlane (derecha).

Resultados en pruebas estáticas con la electro válvula hidráulica de voltaje proporcional (Danfoss) en diseño Survey y diseño MultiPlane

En la figuras 7 y 8 se muestran los gráficos de repuesta tanto de corte como relleno empleando la válvula de voltaje proporcional tanto con diseño Survey (Figura 7) como del diseño MultiPlane (Figura 8). En estas figuras se muestra el desplazamiento vertical (m) por cambio de prescripción.

La figura 7(a) muestra el desplazamiento del marco trasero, con diseño Survey, en las áreas de corte en donde se aprecia que para alcanzar la distancia objetivo de 0.10 m se requieren cuatro escalones de desplazamiento; además presentan un error promedio por encima de 14.9% .La figura 7(b) muestra el desplazamiento del marco trasero en las áreas de relleno en donde se aprecia que para alcanzar la distancia objetivo de los 0.10 m se requieren también de cuatro escalones de desplazamiento con un error promedio por debajo de 16.73% y por encima de 8.04% .

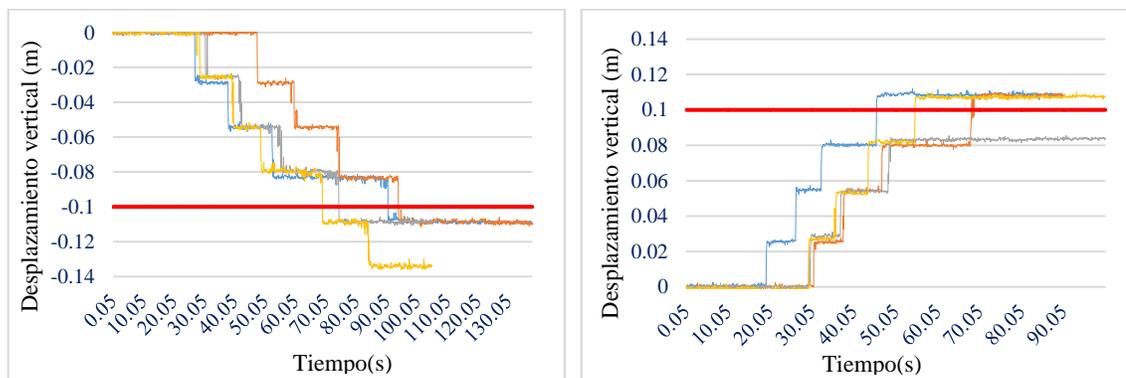


Figura 7. a) Gráfico de datos en áreas de corte (izquierda) y b) relleno (derecha) empleando la válvula de voltaje proporcional con diseño Survey.

La figura 8(a) muestra el desplazamiento del marco trasero, con diseño MultiPlane, en las áreas de corte en donde se aprecia, como en el diseño Survey, que para alcanzar la distancia objetivo de 0.10 m se requieren también de cuatro escalones de desplazamiento; además presentan un error promedio de profundidad por debajo 19.97% y por encima 8.61%. La figura 8(b) muestra el desplazamiento del marco trasero en las áreas de relleno en donde se aprecia que para alcanzar la misma distancia objetivo prefijada de 0.10 m se requieren también de cuatro escalones de desplazamiento con un error promedio de profundidad por debajo de 19.17% y por encima de 8.23%.

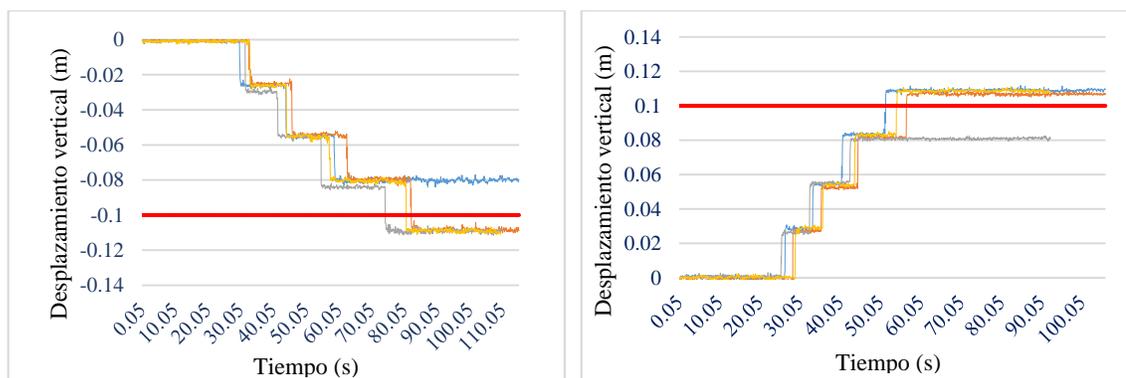


Figura 8. a) Gráfico de datos en áreas de corte (izquierda) y b) relleno (derecha) empleando la válvula de voltaje proporcional con diseño MultiPlane.

En la Tabla 3 se muestra el análisis de los valores obtenidos para los diferentes arreglos evaluados empleado la válvula de voltaje proporcional (Danffos, Dinamarca) y los diseños de cortes y rellenos generados con Survey y MultiPlane. En esta tabla se muestran las medias del desplazamiento vertical (m) y el tiempo de respuesta hasta el cambio de prescripción(s) para alcanzar la profundidad prefijada de 0.10m, así como su desviación

estándar y coeficiente de variación. El análisis de varianza muestra que para el desplazamiento los valores de las medias son iguales no así para el tiempo de respuesta. El tiempo de respuesta para corte es el mismo empleando tanto el diseño Survey como el diseño MultiPlane. En forma similar el tiempo de respuesta para relleno es el mismo para los dos tipos de diseño.

Tabla 3. Distancias y tiempos registrados al cambio de prescripción en los sitios de prueba con mapas de prescripción en diseño Survey y Multiplane

Arreglo	Acción	$ \bar{x} $ de distancia(cm)	s	CV	$ \bar{x} $ de tiempo(S)	s	CV
Survey	C	11.492a	1.274	11.08	54.24a	8.17	15.07
MultiPlane	C	10.147a	1.430	14.09	44.65a	9.34	20.91
Survey	R	10.185a	1.240	12.18	29.05b	8.01	27.58
MultiPlane	R	10.138a	1.374	13.55	25.25b	5.27	20.86
Survey	N	-0.010	0.063	-	-	-	-
MultiPlane	N	0.031	0.063	-	-	-	-

*Mismas letras en el análisis de varianza ($P < 0.05$) con Tukey indican que los valores de las medias son iguales.

*C=área de corte, R=Área de relleno y N=área neutral

De acuerdo con las figuras 7 y 8 la distancia (m) a recorrer para alcanzar la profundidad objetivo (de corte o relleno) de 0.0 a 0.10m a una velocidad de laboreo de 6 km h^{-1} es de 89m en áreas de corte y de 48m en áreas de relleno.

Resultados en pruebas estáticas con la electro válvula hidráulica de tiempo proporcional (Vickers) en diseño Survey y diseño MultiPlane

En la figuras 9 y 10 se muestran los gráficos de repuesta tanto de corte como relleno empleando la válvula de tiempo proporcional tanto con diseño Survey (Figura 9) y diseño MultiPlane (Figura 10). En estas muestran el desplazamiento vertical (m) por cambio de prescripción.

La figura 9(a) muestra el desplazamiento del marco trasero, con diseño Survey, en las áreas de corte en donde se aprecia que para alcanzar la profundidad objetivo de 0.10 m se requieren un solo escalón con una ecuación de transferencia de primer orden. La figura 9(b) muestra el desplazamiento del marco trasero en las áreas de relleno en donde se aprecia que para alcanzar la distancia objetivo de los 0.10 m al igual que en las áreas de

corte se requieren también de un solo escalón de desplazamiento y una ecuación de transferencia al igual que para el de corte del tipo de primer orden.

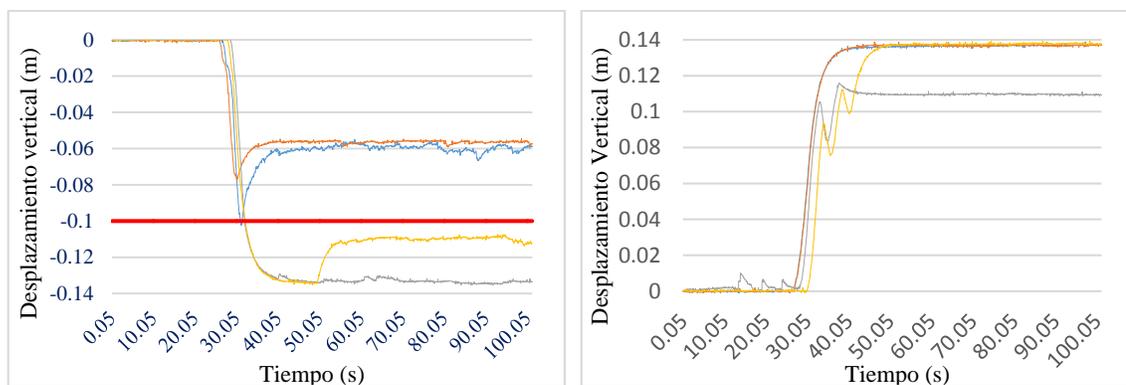


Figura 9. (a) Gráfico de datos en áreas de corte (izquierda). (b) Gráfico de datos en áreas de relleno (derecha). Empleando la válvula de tiempo proporcional con diseño Survey.

La figura 10(a) muestra el desplazamiento del marco trasero, con diseño MultiPlane, en las áreas de corte en donde se aprecia que para alcanzar la distancia objetivo de 0.10 m se requiere un solo escalón de desplazamiento al igual que para el diseño Survey. La figura 10(b) muestra el desplazamiento del marco trasero en las áreas de relleno en donde se aprecia que para alcanzar la distancia objetivo de los 0.10 m se requieren también de un solo escalón de desplazamiento.

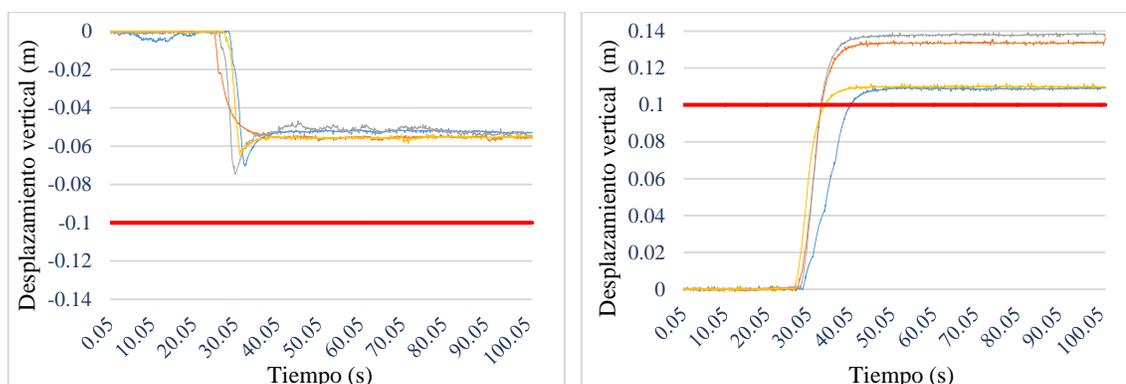


Figura 10. a) Gráfico de datos en áreas de corte (izquierda). b) Gráfico de datos en áreas de relleno (derecha). Empleando la válvula de tiempo proporcional con diseño MultiPlane.

En las figuras 9 y 10 se puede apreciar que para la fase de relleno existe un error por encima de la distancia objetivo tanto para el diseño Survey como para el diseño MultiPlane

lo cual indica una mayor profundidad de laboreo como se muestran en las figuras 9(b) y 10(b). Para el caso de corte en ambos diseños presenta en algunos de los resultados profundidades menores que la profundidad objetivo como se presentan en las figuras 9(a) y 10(a).

En la tabla (4) se muestran el análisis de los datos obtenidos de las respuestas dinámicas del sistema ante los cambios de prescripción de profundidades. El rango de tiempo (T) requerido para alcanzar la profundidad objetivo fue de 1.58 a 2.63 s para ambos diseños. El rango de porcentaje de disparo sobre o por debajo de la profundidad objetivo fue de 6.30 a 7.64 % lo cual indica una profundidad máxima alcanzada de 0.1076 m y el rango menor 0.0973 m sobre la profundidad objetivo. El rango de tiempo de estabilidad para alcanzar la profundidad objetivo fue de 5.87 a 12.15s; lo que significa que la distancia promedio para alcanzar la profundidad objetivo trabajando a 6 km h^{-1} sería de 18m.

Tabla 4. Valores de tiempo de subida, magnitud de disparo, tiempo de estabilidad y función de transferencia de los modelos dinámicos de las pruebas con mapas de prescripción en diseño Survey y MultiPlane.

Arr.	Acci.	T. rpt.(s)	Mag. disp. (%)	T. stab. (s)	Ec. FT	K	T _{1s}	τ	Error (%)
Su	C	1.58a	6.51a	5.87a	$\frac{K}{(T_1s+1)} e^{-\tau s}$	-9.19	1.72	0.01	14.96a
MP	C	1.70a	7.64a	7.58a	$\frac{K}{(T_1s+1)} e^{-\tau s}$	-5.42	1.23	1.04	9.46 ^a
Su	R	2.63b	6.30a	12.15b	$\frac{K}{(T_1s+1)} e^{-\tau s}$	13.03	3.00	0.81	4.64b
MP	R	1.94b	7.25a	11.01b	$\frac{K}{(T_1s+1)} e^{-\tau s}$	12.28	3.46	1.40	3.43b

*Mismas letras en el análisis de varianza ($P < 0.05$) con Tukey indican que los valores de las medias son iguales.

*C=área de corte, R=Área de relleno

CONCLUSIONES

El análisis realizado de los dos diseños de prescripción y de las dos configuraciones de válvulas para obtener la mejor respuesta a los cambios de prescripción de profundidad de laboreo indican que el mejor tipo de válvula para el sistema de labranza vertical en donde se requieren una respuesta casi inmediata a los cambio de prescripción es la válvula de tiempo proporcional (Vickers) la cual presenta tiempos de respuesta, para una profundidad de laboreo de 0.0 a 0.10 m, de 1.58 a 2.63s en un solo escalón a diferencia de la válvula de voltaje proporcional que presenta tiempos de respuesta de 25.25 a 54.24s requiriendo cuatro escalones para alcanzar la profundidad objetivo.

El tiempo de respuesta a los cambios de profundidad y los tiempos de estabilidad son mayores cuando se trata una acción de relleno en comparación con la acción de corte no habiendo diferencia para el tipo de diseño de prescripción lo cual indica que se puede emplear en forma indistinta el diseño Survey o MultiPlane. El menor error se presenta en la respuesta de relleno en comparación con la respuesta de corte.

RECOMENDACIONES

La válvula de tiempo proporcional marca (Vickers) es la recomendable para ser empleada en un sistema de laboreo automatizado de labranza vertical, empleando el módulo de control FmX, dado que la respuesta a los cambios de profundidad las realiza en una sola etapa con bajos tiempos de respuesta, porcentajes de disparo y con errores menores al 15%.

Se requiere validar todo el sistema bajo condiciones de campo en parcelas con productores y evaluar la variabilidad de la profundidad de laboreo en función de los cambio de mapas de diagnóstico de áreas compactadas.

REFERENCIAS

- Acedo, J. 2006. Instrumentación. Ediciones Díaz de Santos. Primera edición. España, 2006.
- Andrade S., P., S. K. Upadhyaya, B. M. Jenkins, C. Plouffe, and B. Poutre. 2004. Field evaluation of the improved version of the UCDavis compaction profile sensor (UCD CPS). *Paper number 041037. ASAE Annu. Meeting.* (doi:10.13031/2013.17644).
- Arvidsson, J., T. Keller, and K. Gustafsson. 2004. Specific draught for mouldboard plough, chisel plough and disc harrow at different water contents. *Soil and Tillage Research*, 79(2): 221-231.
- Barber, R., Navarro, F. y Orellana, M. (1993), Labranza Vertical, Centro de Investigación Agrícola Tropical, Misión Británica en Agricultura Tropical y Proyecto de Desarrollo Tierras Bajas del Este del Banco Mundial, Santa Cruz, Bolivia.
- Bolstad, P. (2005) GIS Fundamentals: A first text on Geographic Information Systems, Second Edition. White Bear Lake, MN: Eider Press, 543 pp.
- Cabeda, M. (1983), Degradacao física e erosao., in ‘I Simposio do manejo do solo e plantio direto no sul do Brasil e III Simpósio de conservacao de solos do planalto’, Passo fundo, RS. Anais.
- Cadena Z., M., T. Gaytán M. And A. Zermeño G.. 2004. Desempeño de implementos de labranza en términos de consumo de energía y calidad de trabajo. *Revista Agraria Nueva Época*, 1(3): 12-17.
- Camacho-Tamayo, J. H. y G. A. Rodríguez. 2007. Evaluación de implementos de labranza a diferentes velocidades de operación y contenidos de agua del suelo. *Agricultura Técnica*, 67(1): 60-67.
- Campos-Magaña, S. G., López-López, J.A., Cadena-Zapata, M., Reynolds-Chávez, M. A., Cuervo-Piña, N. y G. Ramírez-Fuentes. Desarrollo de un penetrómetro integrado con tecnología GPS-RTK para la generación de mapas de resistencia a la penetración del suelo. *Terra Latinoamericana* 33: 119-128
- Cavalaris, C. K. y T. A. Gemtos. 2002. Evaluation of four conservation tillage methods in the sugar beet crop. *The CIGR E-Journal*. Volume 4. The Internet-First UniversityPress. Cornell University Library. Ithaca, NY, USA.
- Cuervo, P. N. (2014), ‘Rediseño de prototipo para labranza de precisión.’. Tesis de licenciatura. Desarrollo y evaluación de un sistema de control inteligente de profundidad aplicado a la labranza vertical. Tesis de maestría. UAAAN.

- Hoogmoed, W. B. and R. Derpsch. 1985. Chisel Ploughing as an alternative tillage system in Parana Brazil. *Soil Tillage Research*, 6(1): 53-67.
- Kalk, W. D., and K. J. Hülsbergen. 1999. Diesel fuel input in plant production. *Agricultural Engineering. Landtechnik*, 54 (6): 332-333.
- Kichler, C.M, J.P. Fulton, R.L. Raper, W.C. Zech, T.P. McDonald, and C.J. Brodbeck. 2007. Spatially Monitoring Tractor Performance to Evaluate Energy Requirements Of Variable Depth Tillage and Implement Selection ASABE annual meeting 2007 paper 071028.
- Manuwa, S. I. 2009. Performance evaluation of tillage tines operating under different depths in a sandy clay loam soil. *Soil Tillage Research*, 103(2): 399-405.
- Moitzi, G., H. Weingartmann, and J. Boxberger. 2006. Effects of tillage systems and wheel slip on fuel consumption. In: The Union of Scientists - Rousse: Energy Efficiency and Agricultural Engineering, 7. - 9. June 2006, Rousse, Bulgaria, 237-242, ISSN 1311-9974.
- Navarro, R. 2004. Ingeniería de control analógica digital. McGraw-Hill. Tercera edición, México D.F.
- Ogata, k. 1987. Dinámica de sistemas. Prentice-Hall Hispanoamérica. Primera Edición. ISBN 968-880-074-0
- Ortega, B. R y Flores, M. L. 2008. Introducción al manejo sitio-especifico. Agricultura de precisión: Departamento de recursos naturales y medio ambiente. Vicente Méndez No 515. Chillán Chile.
- Pimentel, D., Marklein, A., Toth, M. A., Karpoff, M., Paul, G. S., McCormack, R., Kyriazis, J., and Krueger, T. (2008). Biofuel Impacts on World Food Supply: Use of Fossil Fuel, Land and Water Resources. *Energies* 1: 41-78; doi: 10.3390/en1010041, online, open access. <http://www.mdpi.org/energies/papers/en1020041.pdf>. Accessed on 16 September 2008
- Raper, R. L. and J. S. Bergtold. 2007. In row subsoiling: A review and suggestions for reducing cost of this conservation tillage operation. *Applied Engineering in Agriculture*, 23(4): 463-471.
- Reynolds-Chávez, M. A., S. G. Campos-Magaña, M. Cadena-Zapata, J. A. López-López and N. Cuervo-Piña. 2015. Vertical tillage parameters to optimize energy consumption. *Agric. Eng. Int.: CIGR Journal*. 17(4): 130-140.

- Shrivastava, A. K. and Satyendra Jha. 2011. Modification and performance evaluation of tractor drawn improved till plant machine under vertisol. *Agric Eng Int: CIGR Journal*, 13(2).
- Spoor, G. and R.J. Godwin. 1978. An experimental investigation into deep loosening soil by rigid tines. *Journal Agriculture Engineering Research*, 23(3):243-258.
- Steiner, K. (1998), 'Conserving natural resources and enhancing food security by adopting no tillage, TO' B Publication
- Velázquez, J. U. (2011), 'Rediseño de prototipo para labranza de precisión.'. Tesis de licenciatura.
- Zhang, N., M. Wang, and N. Wang. 2002. Precision agriculture—a world overview. *Computers and Electronics in Agriculture*. 36(2): 113-132.