



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ciencias (Recursos Hídricos y Ambiental)

DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA INTEGRAL DE LABRANZA PARA ZONAS SEMIÁRIDAS

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de Maestro en Ciencias (Recursos Hídricos y Ambiental)

Presenta:

Leandro Velázquez Luna

Dirigido por:

Dr. Eusebio Jr. Ventura Ramos

SINODALES

Dr. Eusebio Jr. Ventura Ramos

Presidente

Firma

Dr. Miguel Ángel Domínguez Cortázar

Secretario

Firma

M.I. Filiberto Luna Zúñiga

Vocal

Firma

Dr. Martín Cadena Zapata

Suplente

RÚBRICA

Firma

M.C. César Augusto Granada Isaza

Suplente

Firma

Dr. Gilberto Herrera Ruíz
Director de la Facultad

Dr. Luis G. Hernández Sandoval
Director de Investigación y
Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Septiembre del 2011
México

RESUMEN

El crecimiento poblacional actual ha generado una creciente demanda de alimentos, cuya producción es más complicada en zonas semiáridas debido a que la escasez del agua de lluvia limita el desarrollo de los cultivos. Captar y/o conservar agua en el perfil del suelo para la producción de cultivos, es uno de los grandes retos de los agricultores en estas zonas. Aunque la labranza de conservación, y el uso asociado de residuos de cosecha como cobertura del suelo para reducir la evapotranspiración y la erosión, es una opción de producción; es necesario el desarrollo de nuevos sistemas para conservar la humedad, ya que los productores en estas zonas utilizan los residuos para alimentar al ganado. En este trabajo se presentan los resultados del desarrollo y la evaluación de un nuevo Sistema de Labranza para zonas semiáridas; el cual se basa en el concepto de labranza vertical, la colocación de la semilla de forma más precisa en la cama de siembra, y el acondicionamiento de la superficie del suelo. El sistema integrado se evaluó en parcelas tipo Ecuación Universal de Pérdidas de Suelos (USLE), simulando los efectos mecánicos de cada componente. Utilizando simulación de lluvia se evaluaron los procesos de erosión y escurrimiento así como el contenido de humedad. La resistencia a la penetración se redujo de 1750 a 1500 Pa, con una consolidación uniforme después de la aplicación del sistema propuesto. El escurrimiento disminuyó en un 95% por efecto del sistema como tal, y alcanzó una reducción de prácticamente el 100% con un cultivo establecido de frijol en floración. La erosión del suelo se redujo hasta en un 70% por efecto del sistema, en comparación con la parcela estándar de referencia. El nivel de humedad se mantuvo en un promedio de 38% comparado con un 22% en la condición estándar. Estos efectos se vieron reflejados en un incremento del rendimiento del 44% y plantas más vigorosas en comparación con las condiciones de un control compactado.

Palabras clave: (Labranza de suelos, Compactación del suelo, Conservación de Suelo y Agua, Agricultura en zonas semiáridas).

SUMMARY

Population growth has generated an increasing demand for food, which is more difficult to produce in arid lands due to the fact that scarcity of water limits crop development. Water harvesting and conservation in the soil profile for crop production is one of the biggest challenges farmers face in arid lands. Although conservation tillage, and the associated use of crop residues as soil cover for reducing evapotranspiration and erosion, is a production option; it is necessary to develop new systems for conserving moisture, since farmers in this areas use crop residues to feed their animals. The results of developing and evaluating a new tillage system for semiarid areas, based on the concept of vertical tillage, the precise placement of seed in the soil seedbed, and the conditioning of the soil surface are presented in this work. The integrated system was evaluated in USLE-type plots simulating the mechanical effects of each component. Soil erosion and runoff processes, as well as the water content were evaluated using simulated rainfall. Soil resistance to penetration was reduced from 1750 to 1500 Pa after application of the system, with a more uniform consolidation. Runoff decreased 95% due to the effect of the system itself, and reached a reduction of practically 100% when a common beans crop in the stage of flowering was established. Soil erosion was reduced up to 70% due to the sole effect of the system, in comparison with the reference standard plot. Moisture level was kept in the average of 38% as compared to a value of 22% on the standard condition. All these effects were reflected in the 44% yield increment and the presence of more vigorous plants in comparison with the compacted control conditions.

Key words: (Soil Tillage, Soil Compaction, Soil and Water conservation, Rainfed agriculture).

DEDICATORIAS

**A MIS PADRES
A MIS HERMANOS
A MI ALMA MATER**

AGRADECIMIENTOS

Te agradezco a ti Dios por el don de la sabiduría que has puesto en mí, por la paz, el amor y la salud que me has brindado.

A toda mi familia en especial a mi papá por creer en mí, por su esfuerzo para sacarme adelante y por los valores inculcados.

A la Universidad Autónoma de Querétaro por permitirme ser parte de ella.

A mi asesor y director de tesis Dr. Eusebio Jr. Ventura Ramos por haberme brindado su apoyo y conocimiento.

Al M. en C. Cesar A. Granada por haberme encausado en este camino, por su valioso apoyo, y consejos durante el desarrollo de esta investigación y estancia en esta Universidad.

Al Dr. Miguel Ángel Domínguez, M. I Filiberto Luna y Dr. Martín Cadena por sus aportaciones a este trabajo.

A mis compañeros y amigos, Gerardo Núñez, Josept David, Flor Rodríguez, Patricia Marín Arturo Aguado, Myrna Lorena, Andrés Castaño, Mauricio Martínez, Noé Suarez, Luis Fernando, Israel Ruíz y Eduardo Banda, por su amistad y consejos.

A todos mis maestros por haberme compartido sus conocimientos.

Al pueblo de México, que a través del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) me otorgó la beca para mis estudios de maestría.

ÍNDICE

RESUMEN	I
SUMMARY	II
DEDICATORIAS	III
AGRADECIMIENTOS	IV
ÍNDICE	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS	IX
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Conceptualización del Problema e Importancia del Estudio	1
1.2. Antecedentes	3
1.3. Justificación	4
II. REVISIÓN DE LITERATURA	6
2.1. Propiedades del suelo	6
2.1.1. Densidad Aparente (ρ_b) y Densidad de Partículas (ρ_s)	6
2.1.2. Porosidad	6
2.1.3. Contenido de humedad	7
2.1.4. Resistencia a la penetración	11
2.2. Sistemas de Labranza	13
2.2.1. Labranza convencional	13
2.2.2. Labranza reducida	14
2.2.3. Labranza Vertical	15
2.2.4. Labranza en franjas	16
2.2.5. Labranza en camellones	16
2.2.6. Labranza cero	17
2.2.7. Sistemas combinados de Labranza-Siembra	18
2.2.8. Labranza de subsuelo	28
2.3. Interacción Suelo-Implemento	28
2.4. Elementos de apertura del surco de siembra	32
2.5. Rugosidad del suelo	33

2.6.	Conservación del Suelo y Agua.....	35
2.6.1.	Infiltración.....	35
2.6.2.	Escurrimiento	37
2.6.3.	Erosión Hídrica.....	37
III.	OBJETIVOS E HIPÓTESIS	41
3.1.	Objetivo general	41
3.2.	Objetivos específicos	41
3.3.	Hipótesis.....	41
IV.	METODOLOGÍA.....	42
4.1.	Diseño conceptual del implemento integral de labranza para zonas semiáridas	42
4.2.	Evaluación del Sistema de Labranza	43
4.2.1.	Sitio de estudio	43
4.2.2.	Parcelas	43
4.2.3.	Suelo	44
4.2.4.	Tratamientos	45
4.3.	Evaluación de la Compactación	48
4.4.	Experimentación.....	49
4.4.1.	Simulación de lluvia.....	49
4.4.2.	Erosión y Escurrimiento.....	50
4.4.3.	Cálculo del factor P de la Ecuación Universal de Pérdidas de suelo	51
4.5.	Contenido de humedad.....	52
4.6.	Establecimiento y monitoreo del cultivo.....	52
4.7.	Procesamiento y Análisis de Datos.....	53
V.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	55
5.1.	Prototipo.....	55
5.2.	Evaluación del efecto del Sistema en la Compactación del suelo	60
5.3.	Efecto del Sistema en el Escurrimiento Superficial.....	62
5.1.	Erosión	66
5.2.	Contenido de humedad.....	68
5.3.	Desarrollo y rendimiento del cultivo	69
VI.	CONCLUSIONES.....	72
VII.	RECOMENDACIONES	72
VIII.	REFERENCIAS	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
2.1. Estados del agua en el suelo.	8
2.2. Efecto de la textura del suelo en la retención del agua.....	10
2.3. Efecto de la estructura del suelo en la retención del agua.	10
2.4. Equipo para la labranza profunda - sembradora combinada.....	20
2.5. Implemento para el acondicionamiento del suelo en la preparación de la cama de siembra (Harden <i>et al.</i> (1980).....	21
2.6. Maquina sembradora de subsuelo	22
2.7. Implemento de labranza de un solo paso (Shrinivasa <i>et al.</i> , 2001).	24
2.8. Máquina combinada de labranza reducida (Akbarnia <i>et al.</i> , 2010).....	25
2.9. Combinación de Multiarado Subsolador y rueda Aqueel™ para la preparación del suelo (Ventura <i>et al.</i> , 2003).....	26
2.10. Combinación de Sembradora modificada con Rodillo Aqueel adaptado para la captación <i>in situ</i> del agua de lluvia (Ventura <i>et al.</i> , 2007)	27
2.11. Desarrollo de la adhesión suelo/interfaz a) con alto contenido de humedad; b) con mediano ...contenido de humedad.	30
2.12. Efecto del pulimento de la superficie de contacto sobre el ángulo de fricción suelo/metal.	31
2.13. Efecto del contenido de humedad sobre el esfuerzo de deslizamiento suelo/metal	32
2.14. Elementos de apertura del surco de siembra (Morrison <i>et al.</i> 1988).	33
2.15. Comportamiento teórico de la infiltración.	37
2.16. Parcela de escurrimiento tipo USLE, en la Estación Experimental de USDA-ARS (Agricultural Research Service) de Palouse, Estado de Washington, Estados Unidos.	39
4.1. Colocación de membrana de polietileno calibre 600 en las parcelas de evaluación.	45
4.2. Suelo Vertisol Pélico utilizado en las parcelas.	46
4.3. Tratamientos.	47
4.4. Tratamiento Control Compactado, (CC).	47
4.5. Tratamiento Control Estándar (Barbecho + Rastra), (CE).....	48
4.6. Sistema Integral (Labranza Vertical + Reja de siembra+ RGO), (SI).....	49
4.7. Medición de resistencia a la penetración.	50
4.8. Esquema del simulador de lluvia.	51
4.9. Muestreo de erosión y escurrimiento.	52
4.10. Medidor de humedad en el suelo TDR.....	53
4.11. Cultivo de frijol establecido en cada uno de los tratamientos.....	54

5.1. Herramienta de corte vertical.....	57
5.2. Diseño del prototipo para la colocación de granos hecho por el autor.....	58
5.3. Rueda Aqueel.....	59
5.4. Prototipo del Sistema Integral de Labranza.....	60
5.5. Variación espacial de la compactación del suelo antes y después de la aplicación del Sistema Integral.....	62
5.6. Perfil de compactación del suelo antes y después del tratamiento SI.....	63
5.7. Escurrimiento acumulado en la primera simulación de lluvia.	64
5.8. Condición de escurrimiento durante la lluvia simulada para los tres tratamientos.	65
5.9. Volumen de escurrimiento acumulado en la segunda simulación de lluvia.	65
5.10. Cultivo con déficit de agua en el tratamiento CE.....	66
5.11. Simulación de lluvia sobre la parcela con el tratamiento SI.	67
5.12. Erosión acumulada en la primera simulación de lluvia.	68
5.13. Cantidad de suelo erosionado en la simulación de lluvia con cultivo.	69
5.14. Variación en el contenido volumétrico de Agua en el suelo.....	70
5.15. Rendimiento del cultivo en los tres tratamientos.	71
5.16. Desarrollo radicular del cultivo.....	72

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
2.1. Sistemas de labranza clasificados en base del grado de remoción del suelo y de la cobertura de rastrojos.....	13
5.1. Prueba de Rango Múltiple para los datos de escurrimiento.....	66
5.2. Prueba de Rango Múltiple para la humedad en el suelo.....	69
5.3. Prueba de Rango Múltiple para los datos de rendimiento.	71

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Conceptualización del Problema e Importancia del Estudio

FAO (1994) define a las regiones semiáridas como zonas cuya proporción entre la Precipitación Media Anual (PMA) y la Evapotranspiración Potencial (ETP) es menor a 0.65. Estas áreas ocupan aproximadamente el 40% (54 millones de km²) de la superficie del planeta (Slaymaker y Spencer, 1998), de las cuales el 24% corresponde al continente americano (Sivakumar, 2007). En México, las zonas áridas y semiáridas cubren aproximadamente 40% de la superficie total del país (Villa, 1981), la mayoría localizadas en la región centro-norte.

En cuanto a las condiciones climáticas, las zonas áridas y semiáridas se caracterizan por presentar condiciones extremas de temperatura (D'Odorico y Porporato, 2006) y por tener eventos de lluvias escasos, con altas intensidades y de corta duración (Wei *et al.*, 2007), que al caer sobre terrenos con pendientes significativas y desprotegidos de vegetación, aceleran los procesos de erosión y escurrimiento (Granada, 2009). Estos ecosistemas son generalmente frágiles y a menudo susceptibles a la desertificación (UNCCD, 2004).

De igual manera, las zonas semiáridas se caracterizan por una baja y errática precipitación, que se refleja en producciones agrícolas y pecuarias relativamente bajas, así como, ampliamente impredecibles. Típicamente, las zonas semiáridas reciben entre 200 y 500 mm de precipitación en invierno y de 400 a 600 mm en verano (FAO, 1994). Sin embargo, la característica principal de su sequedad radica, no tanto en la precipitación, sino en el balance negativo entre ésta y la evapotranspiración potencial (ETP).

Entre las principales actividades productivas que se desarrollan en las regiones semiáridas se encuentra la agricultura de temporal. Aunque, uno de los grandes problemas a los que se enfrentan los agricultores de estas zonas, es la dificultad para captar y conservar la humedad en el perfil del suelo.

En el año 2007, la agricultura de temporal en México ocupó un área de 16 283 449 hectáreas, comparado con 5 449 780 hectáreas cultivadas bajo condiciones de riego (SEMARNAT, 2009). La agricultura de temporal se caracteriza porque la principal fuente de

humedad que puede ser aprovechada para la producción es la precipitación, que ocurre durante el ciclo agrícola. En este tipo de agricultura se busca que la máxima cantidad de agua penetre al suelo, se retenga y esté disponible para la planta, y que se reduzcan los problemas de escurrimientos y erosión. Sin embargo, las tasas de erosión en condiciones semiáridas son generalmente elevadas, sobre todo en campos agrícolas con laboreo convencional (De Alba S. *et al*, 1998) donde las precipitaciones torrenciales de alta intensidad favorecen notablemente la erosión (Del Valle y Del Val, 1990), al caer sobre suelos frágiles, sujetos a encostramiento, propiciando una reducción de la tasa de infiltración, así como, un aumento de la tasa de escurrimiento superficial (Martínez y Walthall, 2000)

Frecuentemente, las zonas con problemas de escasez de agua y degradación de suelo tienen una densidad poblacional elevada, con niveles de pobreza extrema que engloban, entre otros, problemas de salud; destacando la mala nutrición en la mayoría de los casos por falta de alimentos (FAO, 2006). Por lo que en estas zonas, nuevas propuestas de establecimiento y manejo de cultivos, como la labranza de conservación, podrían desempeñar un papel fundamental en la mejora de la seguridad alimentaria.

La labranza de conservación, puede mejorar la estructura del suelo e incrementar su estabilidad, facilitando así un mejor drenaje y retención de agua, lo cual tiende a reducir los extremos de anegamiento y sequía. Estas mejoras en la estructura del suelo, también reducen los problemas de escurrimiento y la contaminación de las aguas superficiales con sedimentos, pesticidas y nutrientes (Holland, 2004). Por esta razón, una de las opciones para mejorar las condiciones de los suelos agrícolas, es dejar una capa de desechos agrícolas, producto de la cosecha, la cual impedirá una excesiva evaporación así como, la erosión hídrica y/o eólica del suelo.

Desafortunadamente, para los productores de zonas áridas, los desechos de la cosecha (rastrojo) son un recurso importante para alimentar el ganado, por lo que resulta difícil lograr que se utilice como cobertura protectora del suelo. Por tal razón, es necesario identificar otras opciones más eficientes para proteger el suelo y retener la humedad.

Si bien es cierto que la viabilidad de la inversión en equipos agrícolas no siempre está garantizada y que los costos de la energía a nivel mundial están en constante aumento, el

sector agrícola está forzado a hacer un uso más eficiente de dichos insumos. En el mercado existen equipos y maquinaria agrícola, necesaria para llevar a cabo el trabajo de laboreo, que incrementan la calidad y el rendimiento a medida que aumenta la producción. De manera adicional, también es posible determinan en gran medida, el uso eficiente de otros insumos de producción tales como semillas, agroquímicos y fertilizantes.

Por lo anterior, es necesario desarrollar nuevas tecnologías integrales, que ayuden a resolver los retos que enfrenta la agricultura moderna y, que contribuyan a mejorar las condiciones del suelo y la calidad del agua, pero que a su vez, contribuyan a lograr un uso eficiente de la energía. En este trabajo se propone y evalúa un Sistema Integral de Labranza para el establecimiento y desarrollo del cultivo, fomentando la infiltración y almacenamiento del agua, y disminuyendo el escurrimiento y la erosión.

1.2. Antecedentes

La labranza, se define como la interacción de todas aquellas labores de perturbación mecánica del suelo que se realizan para crear condiciones favorables a la instalación y crecimiento de los cultivos agrícolas (Centeno y Gil, 1976). Gil (1998) menciona que la labranza es generalmente una aplicación de esfuerzos al suelo con el propósito de hacer una reducción del tamaño de agregados, cambiando las condiciones físicas del suelo que varían dinámicamente con el tiempo, el manejo y las condiciones ambientales. Por lo tanto, esta práctica es de gran importancia en el proceso productivo, demandante de una gran cantidad de energía y condiciones ecológicas específicas para ser realizada.

La combinación de máquinas de siembra con otros implementos, ha resultado ser muy eficaz en la reducción de tiempo y consumo de combustible (Abdalla, 2000). Entre las primeras combinaciones de implementos que se han llevado a cabo, se tiene la combinación de equipos de labranza con maquinaria de siembra, o un sistema de labranza mínima combinada (Sheruden *et al.*, 1981, Peterson *et al.*, 1983). A la combinación de herramientas de labranza no se le había dado mucha importancia, salvo en muy pocos estudios realizados recientemente.

Desde hace más de cinco décadas los países desarrollados están tratando de reducir al mínimo el tráfico y las operaciones agrícolas como lo son; la siembra y la preparación de la

cama de siembra para la semilla y el cultivo. Cada año se vuelve más popular en la agricultura europea y estadounidense, el empleo de equipos combinados, ya que se ha demostrado que los equipos que realizan más operaciones en un solo paso resultan mejores que el trabajo tradicional de la tierra. Los resultados del uso de máquinas combinadas han demostrado ser buenos en la reducción del consumo de energía y por ende, en el costo de las operaciones de campo, en la reducción de la compactación del suelo y en el aumento de la producción de los cultivos (Upadhyaya *et al.*, 2001).

Dado que la mayoría de las tierras agrícolas en México son tierras de temporal las condiciones climáticas son divergentes, los equipos agrícolas importados deben adaptarse a estas condiciones con el fin de ser aplicables o en su defecto, deben desarrollarse nuevos equipos que se ajusten a estas condiciones. Sin embargo, para México existe poca información sobre la combinación de implementos de labranza, así como, de la combinación de estos con herramientas de siembra.

Las combinaciones realizadas han requerido de labores adicionales antes o después, ya sea primaria o de siembra, lo que contribuye a aumentar el consumo energético y el paso de los vehículos de arrastre de los implementos. La combinación de herramientas de labranza utilizando labranza vertical, dispositivos de implantación de granos y Rugosidad Geométricamente Ordenada (RGO), permite realizar en un solo paso las labores para el establecimiento de cultivos típicos de las zonas semiáridas. Lo cual representa una alternativa para atenuar los problemas de erosión y escurrimiento, con un consumo mínimo de energía, incrementando el rendimiento y la rentabilidad de los cultivos.

1.3. Justificación

La producción agrícola bajo condiciones de temporal se basa, en gran medida, en la relación que existe entre la cantidad de agua requerida por las plantas para su óptimo desarrollo y la cantidad de lluvia disponible (Anaya, 1973). Lo anterior induce a la necesidad de reforzar e impulsar nuevos enfoques en la investigación, en cuanto a la generación de tecnologías que contribuyan a satisfacer la demanda de agua en las zonas áridas y semiáridas, haciendo uso eficiente del agua de lluvia y al mismo tiempo, controlar los procesos de erosión y los escurrimientos.

En las zonas semiáridas de México predomina la agricultura de temporal, siendo la producción de maíz y frijol de las actividades más importantes del sector rural ya que cubren más de 49% de la superficie sembrada en el país (González, 2008). Sin embargo, en estas zonas los productores son de escasos o nulos recursos económicos, lo que les impide invertir en tecnologías costosas que les permitan elevar su producción. Por ello, la implementación de prácticas de bajo costo para la captación de agua de lluvia y para el control de los escurrimientos, las convierte en opciones accesibles para los productores. Por esta razón, el incremento de los rendimientos que se pueden generar con nuevas tecnologías, se debe considerar no solo como una opción real y práctica para tal fin, sino también, como la base para generar una economía estable para los productores rurales de las zonas áridas y semiáridas.

De ahí la importancia de desarrollar nuevas tecnologías de labranza para las zonas semiáridas, que mitiguen la problemática de escases de agua para el campo y que contribuyan a mejorar la producción agrícola. De tal manera que la realización de este trabajo de investigación, debe ser considerado como una contribución a la solución de los retos de la práctica agrícola en las zonas áridas y semiáridas de México para los pequeños productores, a través de la implementación de prácticas agrícolas que incrementen la disponibilidad de agua y disminuyan la degradación del suelo, manteniendo un enfoque de Agricultura Sustentable.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Propiedades del suelo

2.1.1. Densidad Aparente (ρ_b) y Densidad de Partículas (ρ_s)

La densidad aparente del suelo, ρ_b , es un indicador de la porosidad, estado de compactación, grado de aireación y capacidad de drenaje del suelo. Por definición, se expresa como la relación entre la masa de sólidos y el volumen total del suelo (Hillel, 1998).

$$\rho_b = \frac{M_s}{V_t} = \frac{M_s}{V_s + V_a + V_w} \quad (2.1)$$

Donde:

ρ_b es la densidad aparente del suelo

M_s es la masa de sólidos

V_t es el volumen total

V_s es el volumen de sólidos

V_a es el volumen de aire

V_w es el volumen de agua

La densidad de partículas, ρ_s se define como la masa de las partículas del suelo dividida entre el volumen ocupado por los sólidos (es decir, excluyendo poros). Los valores típicos para los suelos van de 2.5 a 2.8 Mg m⁻³, siendo 2.65 Mg m⁻³ el valor representativo de varios tipos de suelo.

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s} \quad (2.2)$$

Donde:

ρ_s es la densidad de partícula

M_s es la masa de solidos

V_s es el volumen de solidos

2.1.2. Porosidad

El crecimiento de las plantas está determinado por factores atmosféricos, biológicos y edáficos. Estos últimos son físicos y químicos, y los primeros se relacionan con las

propiedades del suelo y condicionan el crecimiento radicular y la dinámica del aire y del agua. Estas propiedades están determinadas por las características cuantitativas y cualitativas del espacio del suelo no ocupado por sólidos, denominado espacio poroso (Rucks *et al.*, 2004).

Dentro del espacio poroso se pueden distinguir macroporos y microporos, los primeros no retienen el agua contra la fuerza de la gravedad y por lo tanto son los responsables del drenaje y la aireación del suelo, constituyendo además, el principal espacio en el que se desarrollan las raíces; los segundos, son los que retienen agua, parte de la cual está disponible para las plantas. La porosidad total o espacio poroso del suelo, es la suma de macroporos y microporos. Las características del espacio poroso, dependen de la textura y la estructura del suelo.

En cuanto a la magnitud de la porosidad total, f , su valor es mayor en texturas dominadas por fracciones finas que cuando dominan las gruesas. Los suelos arcillosos poseen más porosidad total que los arenosos. La porosidad es un índice relacionado con el espacio poroso del suelo y se expresa como:

$$f = \frac{V_f}{V_t} = \frac{V_a + V_w}{V_s + V_a + V_w} \quad (2.3)$$

Donde:

f es la porosidad

V_f es el volumen de vacíos

2.1.3. Contenido de humedad

El agua se puede encontrar en diferentes estados en el suelo. Un suelo está saturado cuando todos sus poros o espacios están llenos de agua; en esta situación el suelo se encuentra sin aire.

La fuerza que interviene cuando el suelo está saturado es la gravedad. En esta situación el agua circula libremente entre los espacios y desciende en profundidad. Dicha agua se denomina libre o de gravedad (Figura 2.1). Este estado desaparece por percolación en un tiempo que varía para cada tipo de suelo, dependiendo de su textura; en suelos arenosos el

tiempo son horas, mientras que en suelos arcillosos son días. Después, una parte de agua queda en el suelo, retenida por fuerzas superiores a la gravedad y al desaparecer una parte del agua contenida en el suelo, los espacios son ocupados por aire.

El agua capilar es la que se encuentra en los poros del suelo, bajo una presión inferior. Del agua agregada a un suelo seco, hay una parte que no habiendo sido drenada por haber sido retenida por la atracción capilar de los poros, conservará húmedo el suelo hasta que las plantas la absorban o en su defecto, sea evaporada para dejar el suelo seco (Bolívar, 2004).

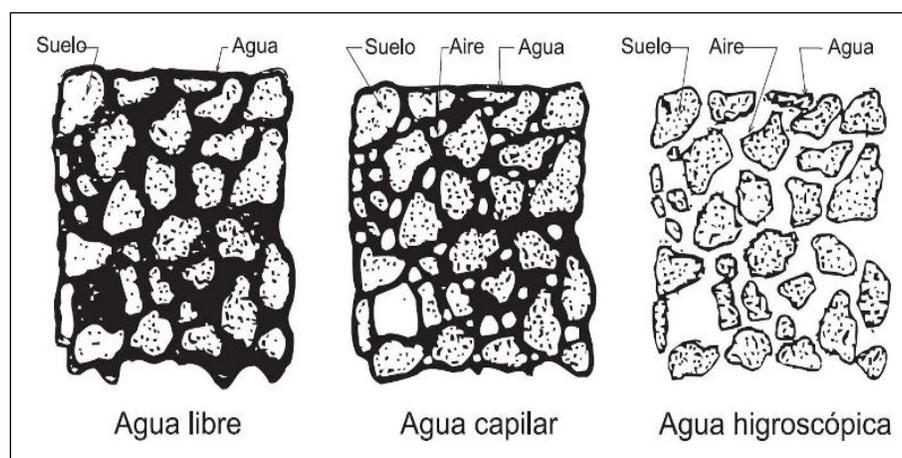


Figura 2.1. Estados del agua en el suelo.

Cuando un suelo bien drenado está saturado hasta el límite de su zona radical, el agua de lluvia que no drena fuera de esa zona en un plazo de 48 horas será retenida en los poros del suelo menores a 0.05 mm de diámetro (el tamaño crítico de los poros puede variar entre 0.03 y 0.1 mm de diámetro). La cantidad de agua retenida después de 48 horas corresponde a la Capacidad de Campo (CC) del suelo. Las fuerzas o succiones con las cuales el agua es retenida, variarán de acuerdo al tamaño de los poros, por lo que en general un suelo arcilloso retiene más que un suelo arenoso (Figura 2.2) y un suelo compactado retiene menos en la zona cercana a la saturación pero retiene más a succiones más altas (Figura 2.3).

La succión máxima que pueden ejercer las plantas para extraer agua del suelo, varía con el cultivo, sin embargo, el valor generalmente aceptado es de cerca de 15 veces la presión atmosférica; es decir, 1.5 Mpa o 15 atm. Esto es aproximadamente equivalente a la presión

que sería ejercida por un peso de una tonelada sobre la palma de la mano. Cuando el contenido de humedad en el suelo llega al nivel en el que las plantas ya no pueden extraer el agua, esta permanece en el suelo almacenada en los poros menores de 0.0002 mm de diámetro y corresponde al Punto de Marchitez Permanente, PMP, (Shaxson y Barber, 2005).

El agua retenida a succiones mayores que este punto de marchitez no está disponible para las plantas, por lo tanto, el agua retenida entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente puede ser aprovechada por los cultivos, para la transpiración y es conocida como Capacidad de Agua Disponible. Sin embargo, después de una fuerte lluvia, una parte del agua en exceso de la capacidad de campo del suelo puede ser usada por el cultivo, mientras que el exceso de agua, percola en el suelo a través de la zona radical.

El agua disponible entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente, es retenida con diferentes tensiones y cerca de un tercio de la misma no está disponible fácilmente para los cultivos, especialmente si están transpirando con intensidad. Cuanta más alta es la demanda de transpiración, debe haber más agua disponible en el suelo, para evitar el estrés hídrico en las plantas. En contraste, para un cultivo de transpiración lenta como son las gramíneas, el agua retenida puede usarse a tensiones más altas sin causar estrés.

La cantidad máxima de agua disponible que puede retener un suelo (es decir, la capacidad de agua disponible) varía con la textura del suelo, la estructura, el contenido de materia orgánica y la profundidad de enraizamiento.

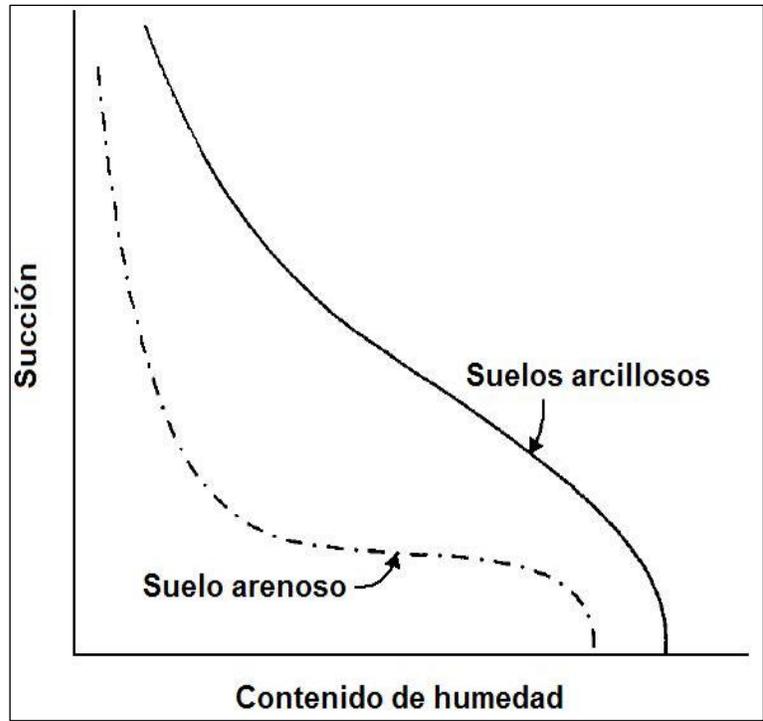


Figura 2.2. Efecto de la textura del suelo en la retención del agua

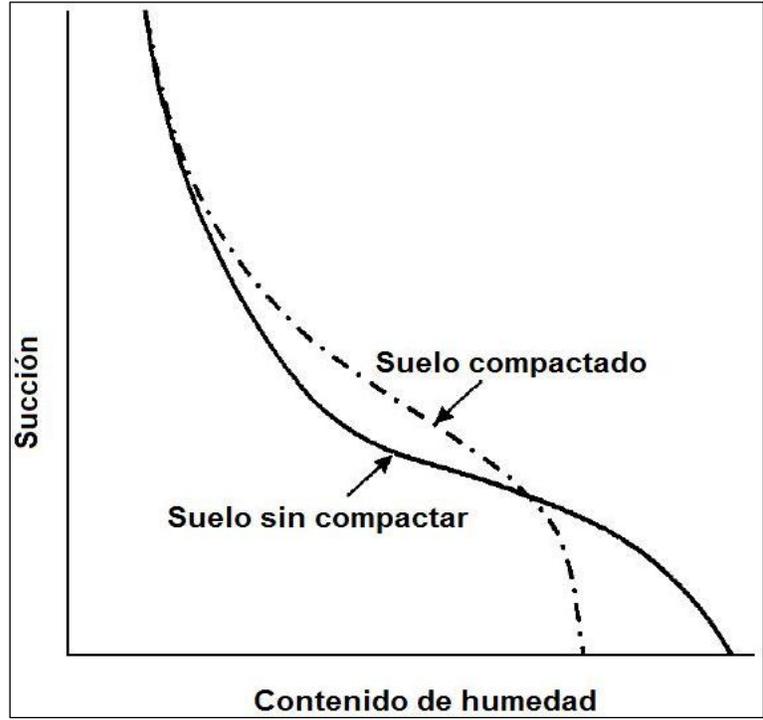


Figura 2.3. Efecto de la estructura del suelo en la retención del agua.

El suelo, desde el punto de vista hidrológico, es un depósito o almacén de agua cuya capacidad para retenerla y contenerla depende de sus propiedades físicas. En la mayoría de las aplicaciones hidrológicas el contenido de agua en el suelo se expresa en una base volumétrica como:

$$\theta = \frac{V_w}{V_t} = \frac{W_w BD}{W_d D} \quad (2.4)$$

Donde:

- θ es el contenido volumétrico de agua, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$.
- V_w es el volumen de agua, cm^3 .
- V_t es el volumen total de suelo, cm^3 .
- BD es la densidad aparente del suelo, g cm^3 .
- W_w es el Peso del agua, g.
- W_d es el peso del suelo seco, g.
- D es la densidad del agua (normalmente se asume igual a 1 g cm^{-3}).

2.1.4. Resistencia a la penetración

La compactación de los suelos agrícolas, puede tener severos efectos sobre el crecimiento de los cultivos y la productividad global (Raper, 2004). Numerosas técnicas han sido utilizadas para minimizar la compactación, entre ellas se puede mencionar el tráfico controlado (Dumas *et al.*, 1973), disminución de la presión de inflado en los neumáticos del tractor (Raper *et al.*, 1995a, 1995b), la reducción del tamaño del vehículo (Cooper *et al.*, 1969) y el uso de coberturas con residuos de cultivos (Reeves *et al.*, 1992); todos han sido aplicados para reducir los efectos negativos de este problema.

La compactación del suelo corresponde a la pérdida de volumen que experimenta una determinada masa de suelo, debido a fuerzas externas que actúan sobre esta en la actividad agrícola. Estas fuerzas tienen su origen principalmente en implementos de labranza del suelo, cargas producidas por los neumáticos de tractores e implementos de arrastre y pisoteo de animales (Casanova, 1991).

La compactación causa cambios en las propiedades físicas del suelo, aumentando la resistencia a la penetración y la densidad aparente, así como, la reducción de la porosidad

(Patterson, 1977). La resistencia a la penetración es uno de los parámetros más importantes de evaluar, cuando se quiere medir el efecto de implementos de labranza o de tránsito de maquinaria agrícola sobre la impedancia mecánica del suelo (Jiménez *et al.*, 1992). Un suelo suelto tendrá una resistencia baja a la penetración, mientras que uno compacto tendrá una resistencia elevada.

Una técnica muy utilizada para mitigar los efectos de la compactación del suelo, es el subsoleo (Campbell *et al.*, 1974, Reid, 1978; Garner *et al.*, 1987); esta práctica de labranza, altera los perfiles de suelo compactado a profundidades de hasta 0.5 m. Los subsoleadores han sido diseñados para reducir al mínimo la inversión de las capas del suelo, con el fin de maximizar la cobertura de residuos después del subsoleo (Pidgeon, 1982, 1983).

La resistencia a la penetración es expresada como una presión y se define como la fuerza dividida entre el área:

$$P = \frac{F}{A} \quad (2.5)$$

Donde:

P es la presión, N m^{-2}

F es la fuerza, N

A es el área, m^2

En varias investigaciones como la realizada por Bengough *et al.* (2001) se ha encontrado que la presión está en función de la resistencia al corte, de la compresibilidad del suelo y de la fricción suelo-metal. Otros como Dawidowski *et al.*, (1988), la relacionan con propiedades que son, en sí mismas, de la importancia práctica directa; por ejemplo, la fuerza de tiro (y por lo tanto los requerimientos de energía) de los implementos de labranza, tráfico de vehículos (Dexter y Zoebisch, 2002) así como, el crecimiento (o tasa de elongación) de raíces de las plantas en el suelo (Taylor y Ratliff, 1969).

2.2. Sistemas de Labranza

Existe un gran número de sistemas de labranza que varían con los implementos utilizados, las combinaciones de estos y las intensidades de laboreo; más aún, diferentes autores utilizan los mismos términos para sistemas distintos. De acuerdo con la FAO (2000), los sistemas de labranza más importantes son la labranza convencional, labranza reducida, labranza en camellones, labranza vertical, labranza en bandas o franjas, labranza cero, los sistemas combinados de labranza-siembra y la labranza profunda o subsolación. Las labranzas se pueden clasificar con base en el grado de remoción del suelo y la cobertura de rastrojos que queda de la siembra (Tabla 2.1).

Tabla 2.1. Sistemas de labranza clasificados en base al grado de remoción del suelo y a la cobertura de rastrojos.

Labranza convencional		Labranza no conservacionista	Labranza conservacionista				
Arado vertedera	Arado de discos	Labranza reducida	Labranza reducida	Labranza en camellones	Labranza vertical	Labranza en bandas	cero
-----							<input type="checkbox"/>
Menor remoción en intensidad y frecuencia del suelo							
-----							<input type="checkbox"/>
Mayor cobertura de rastrojos							

2.2.1. Labranza convencional

La labranza convencional involucra la inversión del suelo, normalmente con el arado de vertedera o el arado de discos como labranza primaria, seguida por labranzas secundarias con la rastra de discos. El propósito principal de la labranza primaria es controlar las malezas por medio de su enterramiento, y el objetivo principal de la labranza secundaria es desmenuzar los agregados y crear una cama de siembra. El control de malezas siguiente se puede hacer por medio de cultivaciones o herbicidas. La desventaja de este sistema es que al suelo le falta una cubierta de protección de rastrojos y queda casi desnudo, por lo tanto es susceptible a las pérdidas de suelo y agua debido a los procesos de erosión.

Entre las ventajas de este sistema se encuentra; el control de las malezas y por ende menor costo de herbicidas; el control de enfermedades e insectos al enterrar los residuos de los cultivos; la incorporación de fertilizantes, pesticidas y herbicidas pre-siembra; y el aflojamiento del perfil, de capas compactadas y costras. Es apto para la incorporación de

pastos en sistemas de rotaciones de cultivos y crea una superficie rugosa que mejora la infiltración de la lluvia con solamente una arada.

Dentro de las limitantes está dejar los suelos desnudos y por lo tanto susceptibles al encostramiento, a la erosión hídrica y eólica; requieren de muchos equipos para las diferentes operaciones y para ahorrar tiempo, a menudo se utilizan tractores pesados y grandes que aumentan la compactación. Se tiene un mayor consumo de combustible, tarda más para sembrar y es menos flexible cuando la época de siembra es afectada por el clima.

El subsuelo puede, eventualmente, llegar a la superficie lo cual a su vez, si sus características físicas y químicas no fueran favorables, podría provocar problemas de germinación y de crecimiento en la etapa inicial del cultivo. La inversión y las muchas labranzas del suelo resultan en un suelo blando y susceptible a la compactación.

La base de la vertedera alisa el suelo, resultando en el taponamiento de los poros del suelo, lo que perjudica la permeabilidad de la capa superficial. Al arar cada año a la misma profundidad, se forma una zona compactada o “piso de arado”, lo que es común cuando la superficie del suelo está seca, aunque el contenido de humedad a 20 cm de profundidad sea aún alto.

El alto número de labranzas para preparar la cama de siembra pueden conducir a una pérdida de humedad. Aunque al comienzo de las labranzas, el suelo tuviera un contenido de humedad apropiado para la germinación, al terminar la preparación de la cama de siembra podría estar demasiado seca para poder sembrar; por lo que habría que esperar otra lluvia para humedecer la cama y entonces sembrar la semilla.

2.2.2. Labranza reducida

El término de labranza reducida, se refiere a los sistemas de labranza donde hay menor frecuencia o menor intensidad de labranza, en comparación con el sistema convencional. Esta definición es bastante amplia y por lo tanto los sistemas de labranza que varían en los implementos, frecuencia e intensidad pueden ser considerados como la labranza reducida. Los tipos de implementos y el número de pasadas también varía; la consecuencia es que en algunos sistemas quedan muy pocos rastros y en otros más de 30%. Por esta razón,

algunos sistemas de labranza reducida son clasificados como labranza de conservación. En general, los sistemas de labranza reducida no ocupan el arado vertedera, ni el de discos.

Debido a la gran variabilidad de los sistemas de labranza reducida, resulta difícil generalizar sobre sus bondades y limitaciones. Sin embargo, todos los sistemas tienen la ventaja de reducir el consumo de combustible, el tiempo de trabajo y los equipos requeridos en comparación con la labranza convencional, por lo que, son más flexibles que los sistemas convencionales. Por otra parte, debido a la roturación del suelo, las condiciones de germinación de las semillas son mejores que en labranza cero; además, hay mayor flexibilidad en el control de malezas, por medio de cultivaciones y/o herbicidas, en comparación con labranza cero.

2.2.3. Labranza Vertical

La roturación vertical de los suelos es una práctica conocida desde 1860, cuando se comenzaron a usar las cultivadoras de cincel; lamentablemente este sistema fue desplazado por la labranza horizontal en virtud de la popularidad que alcanzaron los implementos de discos y vertederas (Planchart, 2003). No obstante, desde hace varios años, se ha venido discutiendo el daño que se le está ocasionando a los suelos con las prácticas tradicionales de labranza, realizadas con los clásicos implementos de discos y vertederas, con los cuales se efectúan acciones inconvenientes para la conservación del recurso suelo, como son el volteo y mezclado de sus diferentes horizontes o capas.

En la labranza vertical se rotura el suelo sin provocar su inversión, respetando la conformación natural de los horizontes, garantizando de esta manera la conservación de la estructura del suelo agrícola. Otra ventaja adicional muy importante, es que no se ocasiona el efecto de compactación por cizallamiento que producen los implementos de discos o vertederas, dando origen a los conocidos pisos de arado o capas endurecidas.

La labranza vertical protege el suelo al conservar las distintas capas que lo conforman, evitando su degradación. La tierra se prepara utilizando implementos de punta que sólo provocan acciones de roturación y desterronado, por lo que si se utilizan residuos de cosecha el suelo queda con una cobertura en su superficie. Esta cobertura protege el suelo

contra los procesos de erosión hídrica y eólica, e impide la formación de la costra superficial que retrasa o dificulta la emergencia de las plántulas. De igual manera, debido a que la labranza vertical no invierte el suelo, hay menos descomposición de la materia orgánica y menos pérdida de humedad, que es muy importante antes de la siembra.

2.2.4. Labranza en franjas

La labranza en franjas se refiere a un sistema donde se preparan hileras para la siembra de 5- 20 cm de ancho, entre ellas el suelo no se disturba y queda con su cobertura de rastrojos. En este sistema hay mayor remoción del suelo y una menor cobertura de rastrojos en las hileras de siembra que en la labranza cero.

Las ventajas que presenta este sistema son: al aflojar el suelo en franjas, se tienen buenas condiciones para la siembra y germinación de la semilla, así como para la etapa inicial de crecimiento de las plantas; además de que es posible usar una sembradora convencional. La presencia de una cubierta protectora entre las bandas, facilita la infiltración de la lluvia, por lo que hay menos problemas de erosión y encostramiento. Se presenta menor uso de combustible, gasto de equipos y es necesario menos tiempo para preparar las tierras. No se requieren tractores de gran potencia; es más fácil colocar fertilizantes en las bandas de suelo removido y el sistema es apto para suelos compactados y suelos endurecidos.

Sus limitaciones consisten en que, el suelo en las bandas de siembra puede formar costras que impiden la emergencia de las plantas, por tanto, es menos apto para suelos susceptibles al encostramiento. Es más difícil preparar las bandas, para genera buenas condiciones para la siembra con implementos convencionales.

2.2.5. Labranza en camellones

La labranza en camellones se refiere al sistema de camellones y surcos. Los camellones pueden ser angostos o anchos, mientras que los surcos pueden ser paralelos al contorno o contruidos con una ligera pendiente, dependiendo de si el propósito es conservar la humedad o drenar su exceso. Los camellones pueden ser semi-permanentes o contruidos cada año, lo que afectará la cantidad de rastrojos que queda sobre el suelo. En los sistemas semi-permanentes que tienen una buena cobertura de rastrojos entre los camellones, habrá más

remoción y menor cobertura de rastrojos, en comparación con la labranza cero. En general, este sistema es menos conservacionista que la labranza en bandas.

En este sistema los surcos pueden funcionar de dos maneras: atrapar y acumular la lluvia en zonas semiáridas, o drenar el exceso de agua en zonas húmedas. Por lo tanto, el sistema debe ser diseñado para necesidades específicas, o sea para conservar humedad, para drenar humedad, o para aceptar humedad, como en sistemas de riego por gravedad. Los camellones y surcos pueden ser contruidos a mano, con tracción animal o con maquinaria. Además, los camellones pueden ser contruidos cada año o pueden ser semipermanentes haciendo solamente operaciones de mantenimiento cada año. En los sistemas contruidos cada año queda una baja cobertura de rastrojos sobre la superficie, mientras que en los sistemas semi-permanentes, la cobertura depende del sistema del control de las malezas y del manejo de los rastrojos. También existen camellones anchos con lomos ligeramente combados que tienen un ancho que varía entre siete y diez metros.

2.2.6. Labranza cero

Los conceptos de siembra directa y labranza cero, representan un tipo de labranza de conservación de suelos o labranza mínima. El término “siembra directa” puede ser interpretado de varias maneras; una forma sería la combinación de todas las labores de labranza convencional en una operación, incluyendo la siembra. Mientras la “labranza cero” excluye cualquier tipo de modificación,

Interpretada así, la siembra directa trae ventajas en términos de tráfico y compactación, organización de trabajo y tal vez, costos de preparación de terreno, tiempo necesario para la siembra y la reducida exposición del suelo a la intemperie. Sin embargo, con frecuencia incluye una labranza muy intensiva, con implementos accionados por la toma de fuerza y requiere tractores grandes y potentes.

La labranza cero al contrario no incluye ningún tipo de alteración y puede ser realizada a nivel manual, de tracción animal o de tractor a pequeña o gran escala. En este sistema, la semilla se coloca directamente en el suelo en forma de inyección o con rejas sembradoras de disco o de cincel que cortan los rastrojos, abren el suelo y depositan la semilla.

La tecnología de labranza cero disponible hoy en día, permite usar este concepto para casi cualquier cultivo agrícola.

A nivel manual, se parte del simple palo (coa) para hacer huecos, para la siembra, inyectando la semilla y a veces, el fertilizante al suelo de forma manual. Existen sembradoras para labranza cero a tracción animal de una o dos hileras, las cuales trabajan con rejas de discos o con ruedas estrellas. Para la tracción mecánica existen sembradoras de pastos, cereales y cultivos de hileras, según las características del suelo trabajan con cinceles, discos sencillos o dobles discos o también con ruedas estrellas siendo los dobles discos los más comunes. Estas sembradoras son en general muy pesadas para asegurar la penetración uniforme a la profundidad de siembra deseada en suelos duros. La distancia entre rejas de una fila no puede ser demasiado estrecha para asegurar la pasada en los rastrojos; motivo por el cual, las rejas están puestas en dos o tres filas logrando distancias mínimas entre surcos de alrededor de 15 cm.

2.2.7. Sistemas combinados de Labranza-Siembra

Los sistemas combinados de labranza-siembra se refieren a sistemas donde la preparación del suelo y la siembra se hacen en una misma operación; se requiere maquinaria especial conformada por varios componentes y, de los cuales existen muchas variaciones. La maquinaria tiende a ser muy larga debido al espacio requerido por los componentes y para dejar espacio para el movimiento del suelo y rastrojos sin causar problemas de atascamiento. Se han reportado tres sistemas combinados comunes: labranza en bandas-siembra, labranza en camellones-siembra y labranza profunda-siembra. El común entre estos sistemas es la labranza primaria y la inclusión de procesos de siembra.

A) Labranza en bandas-siembra

En este sistema se prepara y siembra en bandas de 5 a 20 cm de ancho y 5 a 10 cm de profundidad, sin disturbar el suelo entre las bandas. Existen variaciones en el tipo de maquinaria, pero la mayoría tiene adelante un disco cortador, seguido de un fleje o disco para aflojar el suelo y atrás una unidad de siembra, como en las sembradoras directas. En

ocasiones, hay ruedas pesadas sobre la punta del cincel para evitar la formación de agregados grandes.

Las ventajas de este sistema son el rápido establecimiento y crecimiento inicial de los cultivos, debido al aflojamiento del suelo en las bandas de suelo trabajado. La sembradora funciona mejor, dado que es posible colocar las semillas de manera más uniforme y dejarla cubierta por el suelo de forma adecuada. Además, es más fácil colocar fertilizante en la banda aflojada. En las zonas entre las hileras, no se disturba el suelo lo que resulta en una mejor infiltración. En comparación con los sistemas convencionales, el sistema de bandas-siembra requiere de menos combustible y potencia.

El sistema de bandas-siembra es apropiado para suelos endurecidos y suelos susceptibles a la compactación. La mayor limitación de este sistema es que con frecuencia la maquinaria no está disponible y las bandas pueden formar costras.

B) Labranza en camellones-siembra

En una sola operación, se remueven el suelo y los residuos de la cresta de los camellones angostos, formados en la época anterior y las semillas son colocadas sobre las hileras limpias, planas y lisas de los camellones. En la zona entre las hileras no se hace ningún laboreo previo a la siembra y quedan con una cubierta protectora de rastrojo; una o dos veces durante el crecimiento del cultivo, se controlan las malezas y al mismo tiempo, se reconstruyen los camellones con cultivadores. Este sistema conlleva un tráfico de vehículos controlado, debido a que las ruedas de los equipos quedan en los mismos surcos y no causan compactación del suelo en los camellones. Para este sistema se requiere una sembradora equipada para remover el suelo de la cumbre de los camellones, antes de la siembra. Este sistema utiliza menos herbicida, permite un mejor establecimiento de las plantas en el suelo aflojado en los camellones, y es más apto para suelos mal drenados. La mayor limitación es que se requiere maquinaria especial.

C) Labranza profunda-siembra

Este sistema es parecido a la labranza cero con la excepción de que, la sembradora tiene un subsolador montado entre el disco cortador y los discos dobles abresurco (Figura 2.4).

Además, se deberían montar ruedas de presión atrás del doble disco abresurco para cerrar el corte. Este sistema tiene todas las ventajas de la labranza cero y ha sido desarrollado especialmente, para suelos endurecidos y compactados. Las limitaciones son la disponibilidad de las máquinas y la alta potencia de tiro requerida.

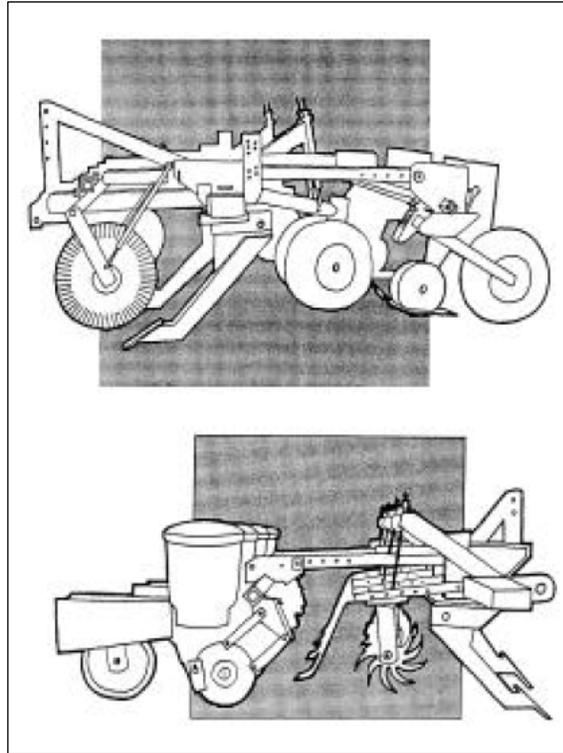


Figura 2.4. Equipo para la labranza profunda - sembradora combinada.

Existen grandes desarrollos de combinación de herramientas enfocados principalmente, a la reducción del consumo de energía, no así, al cuidado del suelo y el agua. Sin duda, estos sistemas han dado buenos resultados, aunque han sido desarrollados para países con un gran desarrollo económico y para terrenos de gran extensión. Por ejemplo, Zumbahlen (1977) desarrolló una maquina combinada para labranza y siembra, consiste en un implemento que labra el suelo, prepara la cama de siembra y establece el cultivo deseado en una sola pasada. Opcionalmente, la maquina también puede aplicar fertilizantes y/o herbicidas en la misma pasada.

Harden y William (1980) también desarrollaron un dispositivo para el acondicionamiento del suelo y la preparación de la cama de siembra (Figura 2.5), consiste en

la combinación de una reja al frente para el corte de los residuos de cosecha y para el corte de la capa superior del suelo. Tras la reja frontal, un subsolador para romper a mayor profundidad el suelo y eliminar el llamado “piso de arado”, creado por la labranza convencional, después del subsolador, cuenta con una rueda para el llenado de la grieta dejada por el subsolador y evitar derrumbes o asentamientos, que lleven las semillas a lugares demasiado profundos del suelo. Detrás de la rueda se encuentra el dispositivo para la preparación de la cama de siembra, el cual pulveriza el suelo e incorpora los residuos orgánicos. Todos estos elementos montados sobre un bastidor de forma integrada para formar un solo implemento.

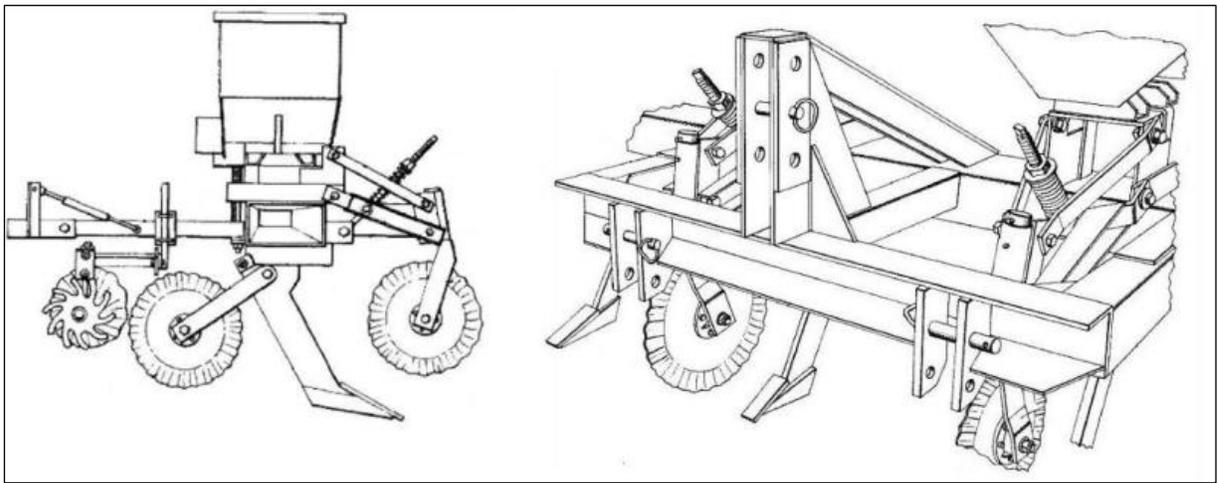


Figura 2.5. Implemento para el acondicionamiento del suelo en la preparación de la cama de siembra (Harden *et al.* (1980))

Mellinger (1980) también utilizó el arado de subsuelo para formar una maquina sembradora combinada (Figura 2.6). El arado fue incluido con el fin de mejorar las condiciones del subsuelo así como, la preparación de la cama de siembra; mientras que la colocación de la semilla se realiza mediante sistemas rotativos, accionados por la toma de fuerza.

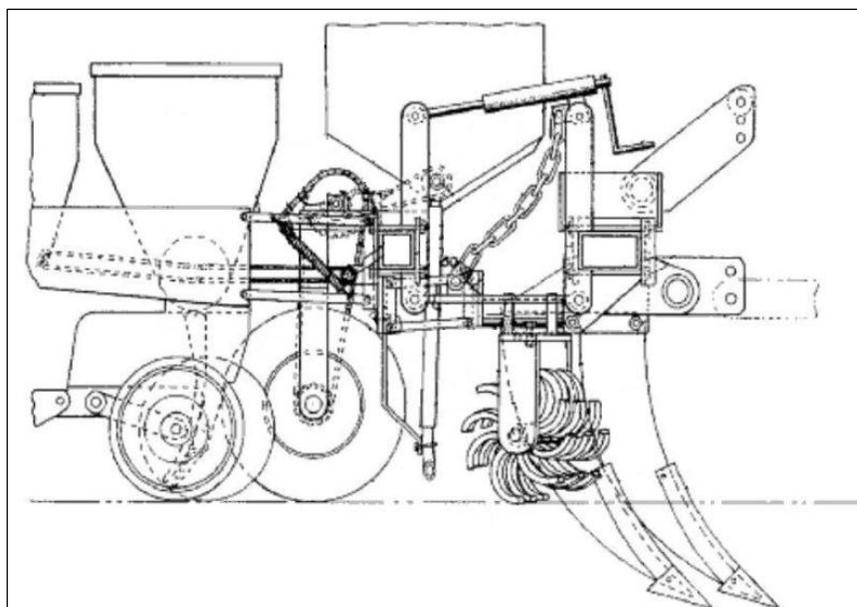


Figura 2.6. Máquina sembradora de subsuelo

Beasley (1986) desarrolló un dispositivo combinado para la siembra de cultivos, con el principal propósito de reducir el número labores o pasadas en la preparación del suelo y el establecimiento del cultivo. Este dispositivo incluye una cuchilla para cortar los residuos que se encuentren sobre la superficie, además de hacer un corte superficial al suelo, detrás de esta un arado de cincel o subsolador, el cual penetra y levanta el suelo para eliminar su compactación. Posteriormente, un par de ruedas para disminuir la presión sobre el suelo en oposición a la acción de levantar, además de la creación de un aplaste y corte en el suelo para evitar la formación de grandes terrones y así generar las condiciones para la germinación de la semilla.

Dentro de los estudios recientes sobre sistemas de labranza y combinaciones de implementos, se encuentra el de Kailappan *et al.* (2001), quienes encontraron que la combinación de herramientas de labranza utilizadas en dos tipos de suelos dio como resultado la disminución en los costos de operación y del tiempo: de 44 a 55% y de 50 a 55% respectivamente. Más tarde, Kosutic *et al.* (2005) estudiaron el consumo de energía en tres diferentes sistemas de labranza para cultivos en Eslovenia, de tal manera que los sistemas de labranza e instrumentos que utilizaron fueron: labranza convencional (LC) con arado y rastra de discos y la combinación de estos, la labranza de conservación (RT), utilizando un arado de

vertedera y multi-cultivador y el sistema de siembra directa (SD). Los resultados indicaron que el sistema de LC fue el mayor consumidor de energía, con 1.8 GJ ha^{-1} . El sistema RT consume 1.1 GJ ha^{-1} ; 37.5% menos que el sistema LC, mientras que el sistema SD requiere 0.27 GJ ha^{-1} , que es el 85.1% menos de energía que el sistema de LC.

Taki (2007) realizó un estudio sobre una sembradora de avena añadiendo un abridor de surco el cual, es accionado por la toma de fuerza. Este abridor corta el suelo que no fue arado y crea un surco para colocar la semilla y el fertilizante en el suelo. En sus resultados mencionan que las unidades de corte de suelo, basado en la rotación, fueron capaces de abrir surcos con una profundidad de 5.5 cm y 1.5 cm de ancho y mover el suelo en dos direcciones hacia adelante y hacia arriba de 580 a 700 rpm en las placas de corte, girando en sentido opuesto a las ruedas. Craciun *et al* (2004), reportaron que en comparación con la tecnología tradicional con dos labores, el consumo de combustible se reduce hasta un 60% con la nueva sembradora. Jory (2002) sugirió que para sistemas combinados de labranza en la agricultura sustentable se pueden utilizar discos, cultivadores y/o arado de cincel como herramientas de labranza.

Guerif *et al* (2001), afirman que el uso de arados de cincel son más eficientes debido al menor consumo de energía y tiempo de operación por unidad de área; dado que el consumo de energía es menor aunque la labranza de conservación reduce el tiempo de operación, con un desempeño similar en campo. También compararon este método con labranza reducida, omitiendo un paso de la labranza convencional y uniendo dos herramientas de cultivo; una operación que llamaron labranza mínima. Mientras que en otros sistemas, el uso de equipos independientes resulta en un mayor número de pasadas del tractor, incluso en el método de labranza mínima, que es sugerido por los expertos. También Taki en 2007 introdujo un nuevo mecanismo para el funcionamiento de la siembra directa utilizando el método abridor activo, o abresurcos dentado agregado a la sembradora.

Shrinivasa *et al.* (2001), desarrollaron un implemento integral (Figura 2.7) que incorpora prácticas de labranza convencional; de igual manera, hicieron la comparación con herramientas individuales de labranza, evaluando la energía de los equipos y el ahorro de tiempo, encontraron que el equipo de labranza de una sola pasada, superó a los métodos convencionales de preparación de suelo en el consumo de combustible y en la velocidad. El

ahorro de combustible osciló entre 19 y 81%, con un ahorro promedio del 50% mientras que el ahorro de tiempo varió de 67 a 83% con una media del 72%.



Figura 2.7. Implemento de labranza de un solo paso (Shrinivasa *et al.*, 2001).

Resultados similares obtuvo Mohamed (2007), en su estudio del rendimiento de los implementos de labranza primaria y secundaria, de forma independiente y combinados en una sola máquina, con el fin de optimizar el trabajo. Sus resultados muestran la reducción en la fuerza de tracción requerida en un 49% y en el tiempo total en un 47%.

Akbarnia *et al.* (2010) evaluaron el rendimiento de tres sistemas de labranza en un cultivo de trigo; el primero la labranza convencional, el cual se considera como la manipulación máxima del suelo, el segundo considerado como labranza mínima, el cual consiste en un implemento multi-labor y en el tercero, utilizaron para la siembra una máquina de siembra directa como cero-labranza. La máquina combinada utilizada como labranza mínima o reducida realiza la arada a una profundidad de 20 cm, la preparación de la cama de siembra, cultivo, cobertura, estabilización de la semilla y conformación del surco para el riego, todo esto en un solo paso o en una sola operación (Figura 2.8)

Los rendimientos que obtuvieron los autores en la producción de masa seca fue mayor en labranza reducida (19.7 toneladas ha⁻¹) en comparación con el convencional (19.3 toneladas ha⁻¹) y con labranza cero (15.1 toneladas ha⁻¹). Los rendimientos en grano de trigo con labranza convencional fueron 8.06 toneladas por hectárea, mientras que para la labranza

reducida y labranza cero fueron 7.9 y 6.3 toneladas, respectivamente. Concluyendo que en los cultivos de temporal y de riego la labranza convencional puede ser sustituida por el sistema de siembra directa con abridores de surcos de discos. La práctica de labranza reducida puede ser usada para diferentes fines en los cultivos debido al menor tráfico, lo que reduce los costos de operación y la compactación de los suelos.



Figura 2.8. Máquina combinada de labranza reducida (Akbarnia *et al*, 2010)

Un enfoque en los efectos de la combinación de herramientas de labranza sobre las propiedades del suelo la realizaron Arzhang y Ali (2006), con el objetivo de desarrollar una máquina combinada para el rompimiento de los terrones y, generar uniformidad de la superficie en una sola pasada, así como, en el menor tiempo posible. La máquina fue la combinación de una rastra de discos y un rodillo de Cambridge. Los parámetros que analizaron fueron la densidad aparente, diámetro medio del terrón, resistencia a la penetración y el perfil de la superficie. Concluyeron que la máquina combinada solo mejora algunas propiedades físicas del suelo, importantes para la labranza secundaria. La nueva máquina combinada podría suplir el paso del arado, permitiendo llevar a cabo varias operaciones en una sola pasada.

Leyva *et al.* (2007) desarrollaron en Cuba una máquina combinada para el laboreo mínimo de suelos pesados en cultivos de caña de azúcar y otras plantaciones en hileras, constituida por órganos activos (tambores fresadores y escarificadores vibratorios) y surcadores. Con la evaluación, lograron apreciar entre sus ventajas, que disminuye el número

de paso de equipos de cinco o seis a solamente uno, evitando el sobrelaboreo y el deterioro de la estructura del suelo; además, permite una mejor conservación del suelo dejando sobre la superficie de 30 a 50% de los restos vegetales. En la parte económica, tuvieron una productividad de 1 ha h⁻¹, el costo y el gasto de combustible de 31 pesos ha⁻¹ y 36. 6 L ha⁻¹ respectivamente.

A este respecto, dentro de los pocos estudios realizados en México se encuentra el de Ventura *et al.* (2003), quienes desarrollaron un novedoso sistema de labranza de reserva para la producción de cultivos en zonas semi áridas. El sistema incluye la combinación de un arado de subsuelo y un rodillo formado con ruedas dentadas, para mejorar la estructura del suelo y promover la creación de mini-reservorios en su superficie, para la cosecha de agua de lluvia *in situ* (Figura 2.9). Estos autores reportaron que el nuevo sistema de labranza retrasó los escurrimientos por 20 minutos sobre el tratamiento control, con una precipitación de 40 mm h⁻¹. También encontraron que, tanto la tasa de escurrimiento como la de erosión del suelo fueron mayores en el control; esto debido a que los minireservorios detienen el agua y permiten un mayor tiempo de infiltración en el perfil del suelo.



Figura 2.9. Combinación de Multiarado Subsolador y rueda AqueelTM para la preparación del suelo (Ventura *et al.*, 2003)

Fuentes y Wiesner (2009) realizaron la adaptación de un equipo integral para realizar cuatro labores en cultivo de caña de azúcar en una sola pasada, con lo cual lograron la reducción del número de tractores y equipos, logrando un rendimiento mayor, reducción de costo y baja compactación. Los niveles de rendimiento que lograron fueron de 2.62 a 0.34

horas por hectárea y la reducción en los costos fue de 23.18 dólares por hectárea a 8.65 dólares por hectárea.

Uno de los desarrollos realizados en México donde se incluyen herramientas de siembra fue el de Ventura *et al.* (2007), ellos sembraron frijol con una sembradora modificada para llevar a cabo la siembra de 3 hileras, en una cama de siembra o melga, en lugar de las dos hileras convencionales. Atrás de la sembradora adaptaron la *Rueda Aqueel* formando un rodillo (Figura 2.10), el cual consolidó al suelo para asegurar un buen contacto suelo-semilla y se realizó la “impresión” de las indentaciones o minireservorios para la captación *in situ* del agua de lluvia.



Figura 2.10. Combinación de Sembradora modificada con Rodillo Aqueel adaptado para la captación *in situ* del agua de lluvia (Ventura *et al.*, 2007)

Los resultados de Ventura *et al.* (2007), muestran que el sistema permitió incrementar el número de plantas de frijol por metro cuadrado, de alrededor de 10 a más de 20; de igual manera, se elevó el contenido de humedad del suelo de un 20% a un 50% en promedio con respecto al sistema tradicional. Otros resultados mostraron que con una lámina de lluvia acumulada de menos de 100 mm durante el ciclo vegetativo del cultivo, se obtuvieron rendimientos de más de 900 kg ha⁻¹, comparado con 450 kg ha⁻¹ en el sistema tradicional y con 250 mm de lluvia alcanzaron un rendimiento de 1400 kg ha⁻¹ manteniéndose el sistema tradicional con 450 kg ha⁻¹.

2.2.8. Labranza de subsuelo

La labranza de subsuelo se debería considerar como una práctica de recuperación de suelos degradados debido a problemas graves de compactación. Por lo general, la subsolación no es una labranza que se puede usar cada año en la rutina de la preparación de suelos.

La labranza de subsuelo tiene un efecto de levantamiento, de rompimiento y de aflojamiento del suelo. Esto resulta en un mejor desarrollo de las raíces y muchas veces también mejora el drenaje del suelo.

La ventaja principal es que rompe las capas compactadas y afloja el suelo sin invertirlo y así no lleva el subsuelo a la superficie y deja la mayoría de los rastrojos sobre el suelo. En suelos bien drenados la mayor profundización de las raíces puede aumentar los rendimientos, especialmente en áreas con déficit de humedad. También se puede mejorar el drenaje de los suelos que presentan este problema, obteniendo mayores rendimientos. A menudo la subsolación de suelos arcillosos beneficia tanto el enraizamiento del cultivo como el drenaje del suelo y por lo tanto supera tanto los problemas de déficit de humedad en la época seca como el exceso de humedad en la época de lluvia.

El acoplamiento de otros discos o rodillos puede ser útil; un disco cortador delante del subsoleador facilita la operación en sistemas de labranza conservacionista; un rodillo desterronador acoplado detrás de los brazos ayuda a desmenuzar los agregados grandes y la combinación de ruedas o discos ayuda a cerrar las hendiduras.

Para sistemas combinados de labranza-siembra es posible, combinar el subsoleador con una sembradora o con discos para formar camellones. Estos sistemas tienen la ventaja de preparar la tierra y sembrar la semilla en una sola operación.

2.3. Interacción Suelo-Implemento

La adherencia es una propiedad que se manifiesta en la mayoría de los suelos agrícolas; la misma contribuye conjuntamente con la fricción al aumento de la resistencia tractiva de las herramientas de labranza (Herrera, 2006).

La falla del suelo debida a una herramienta de labranza depende de los parámetros de resistencia en la superficie de falla, que consiste en un interfaz suelo/suelo y otro normalmente de suelo/metal (Ashburner, 1984). La mayor parte de las herramientas de labranza trabajan por deslizamiento por el suelo, y de ahí que el esfuerzo y la fuerza de deslizamiento en la interfaz suelo/metal, sea de importancia fundamental al estar la mayoría de estas herramientas fabricadas con metales.

La adhesión suelo/interfaz representa las fuerzas de atracción generada principalmente por la presencia de agua en el suelo. Con un valor alto de humedad, el agua muestra una succión dentro de la estructura del suelo, que en forma similar también atrae el interfaz (Figura 2.11 a), en cambio con poca humedad se genera una serie de interfaces de aire y agua entre el material en contacto y el suelo, lo que desarrolla una fuerza de atracción debida a la tensión superficial del agua (Figura 2.11 b).

Al aumentar la humedad de un suelo seco, el efecto de la tensión superficial también se incrementa, hasta alcanzar un máximo que se aproxima al valor del punto de ‘atascamiento’.

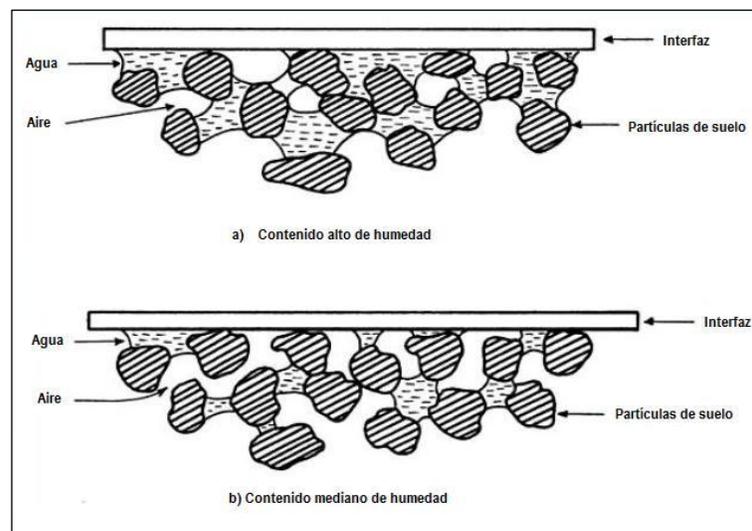


Figura 2.11. Desarrollo de la adhesión suelo/interfaz a) con alto contenido de humedad; b) con mediano contenido de humedad.

La fricción entre el suelo y el material en contacto depende mucho de la rugosidad del material; en el caso del metal, la fricción se da según el grado de pulimento de la superficie (Figura 2.4) donde se demuestra la ventaja de eliminar la oxidación de la cara metálica para reducir el ángulo de fricción suelo/metal (δ) de aproximadamente 25° hasta cerca de 10° a 15° . Al mismo tiempo, la gráfica de la Figura 2.12 muestra la escasa utilidad de pulir el metal, por la poca reducción que provoca en el ángulo δ .

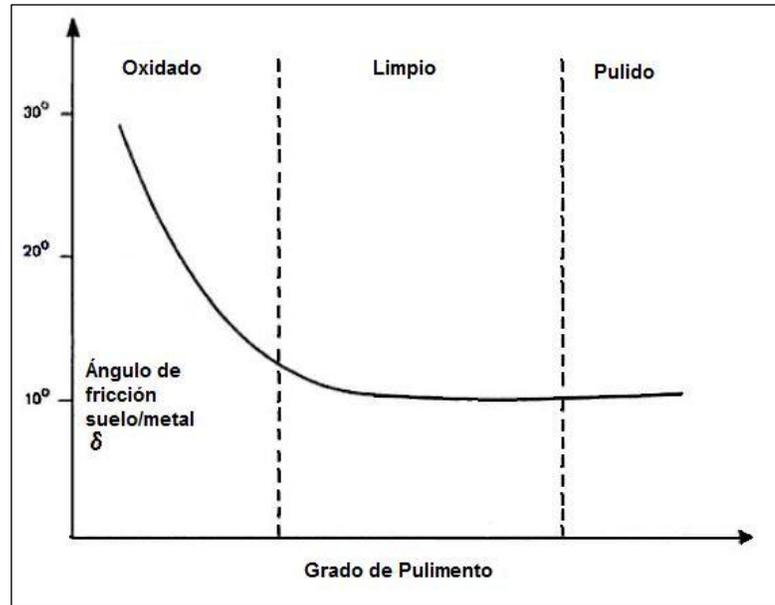


Figura 2.12. Efecto del pulimento de la superficie de contacto sobre el ángulo de fricción suelo/metal.

La resistencia al deslizamiento τ' es expresada mediante la ecuación de Coulomb.

$$\tau' = c_\alpha + \sigma \tan \delta \quad (2.6)$$

Donde:

- c_α es la adhesión
- σ es el esfuerzo normal
- δ es el ángulo de fricción suelo/interfaz.

La Figura 2.13 presenta la relación que existe entre la resistencia al deslizamiento y la humedad, destacando cuatro diferentes etapas de comportamiento. El suelo en estado

cementado no tiene la humedad necesaria para desarrollar adhesión y, la resistencia al deslizamiento es netamente de naturaleza friccional.

En los estados friable y plástico, la adhesión aumenta progresivamente en razón de las fuerzas de tensión superficial, hasta que la resistencia llega a un punto máximo llamado 'Punto de atascamiento'. Normalmente, este punto tiene un valor de humedad un poco menor que el LSP (Limite Superior Plástico) para los suelo plásticos y, un poco mayor en el caso de los suelos de poca plasticidad. La adición de más agua hace pasar el suelo al estado líquido y el exceso del agua tiene el efecto de lubricación, bajando dramáticamente la resistencia al deslizamiento.

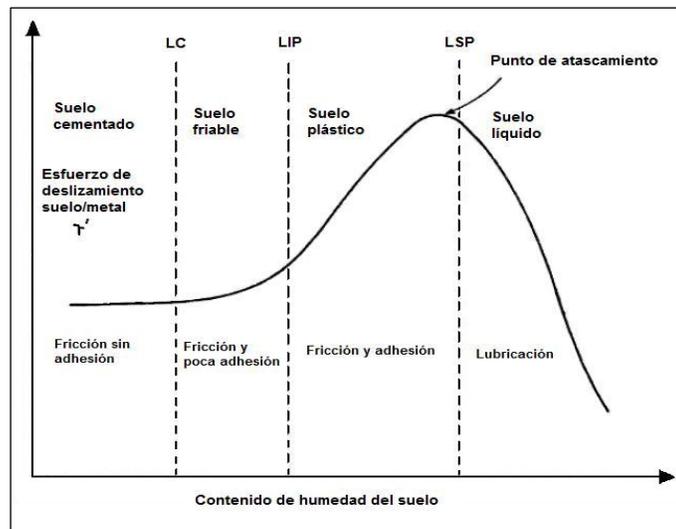


Figura 2.13. Efecto del contenido de humedad sobre el esfuerzo de deslizamiento suelo/metal

Conocer los estados del suelo y el comportamiento del esfuerzo de deslizamiento suelo-metal o suelo-herramienta resulta de gran importancia, ya que la eficiencia de los implementos depende, en gran medida, del estado en el que se encuentre el suelo en el momento de las labores agrícolas.

2.4. Elementos de apertura del surco de siembra

El propósito de la siembra es la ubicación de la semilla, tratando siempre de proveerle las mejores condiciones para su posterior germinación, con el objetivo de lograr una buena implantación del cultivo.

Dentro de las funciones que debe cumplir una sembradora se encuentra la de abrir un surco en el suelo, con la profundidad y forma adecuadas. Para una buena germinación las semillas deben colocarse debajo de la superficie, por lo tanto, el equipo sembrador debe proveer un mecanismo para la apertura del surco. Este dispositivo debe mantener el surco a una profundidad apropiada, en una variedad de condiciones de suelo. La semilla no debe plantarse muy superficialmente ni a mucha profundidad, ya que estas dos situaciones ponen en riesgo la germinación.

Los elementos de apertura del surco de siembra, pueden estar precedidos o no por los elementos de corte de residuos; es frecuente que el corte de residuos y apertura del surco lo realice un mismo elemento. Su trabajo depende de la velocidad de avance, tipo y estado del suelo, del residuo y de la profundidad de siembra. Los sistemas empleados se pueden clasificar en dos grupos: Discos y rejas (botas, cincel, tipo sable y ala ancha) (Figura 2.14).

i) Los discos pueden ser simples o dobles. Las máquinas de disco simple no suelen llevar elemento cortador delantero, realizando él mismo la función de corte y apertura del surco de siembra. Las de doble disco abren el suelo en forma de V y suelen requerir un disco delantero para el corte de los residuos (Hernanz, 1997). Los discos suelen ser más pequeños que los de corte de residuos para reducir la fuerza de corte necesaria, con la limitación de tener que evitar los atascos. El peso necesario puede llegar a los 180 kg por disco.

ii) Las rejas deben ser agudas y atacar con un ángulo elevado (casi vertical), lo que lleva a que necesiten bastante menos peso por unidad. En el segundo grupo encontramos rejas de tipo bota, cincel, sable y ala ancha. Una característica común es la necesidad de una gran separación entre los brazos para evitar la acumulación de residuos por lo que se montan en al menos tres filas.

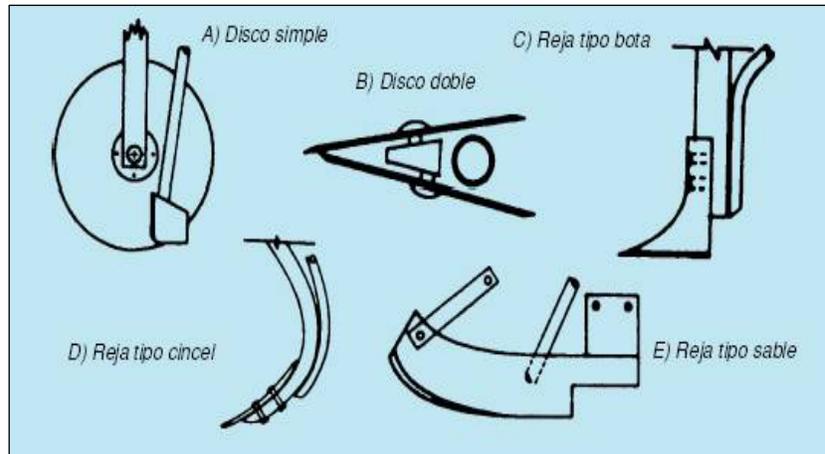


Figura 2.14. Elementos de apertura del surco de siembra (Morrison *et al.* 1988).

La elección entre sembradora directa de disco o reja no es fácil, ya que ambas trabajan bien en la mayor parte de los casos. En principio, las de disco se adaptan mejor a una elevada cantidad de residuos, aunque presentan más problemas en suelos muy arcillosos y en condiciones húmedas. Por otra parte, en suelos muy pedregosos el desgaste de los elementos en general es mayor y en estas situaciones puede ser recomendable el uso de los elementos de reja, al ser menor su coste de reposición frente a los elementos de discos, además de trabajar mejor en estas condiciones

2.5. Rugosidad del suelo

La labranza es una forma muy efectiva para modificar las características físicas superficiales del suelo, debido a su efecto sobre el espacio poroso (volumen, forma y continuidad de los poros), cobertura de residuos orgánicos y la rugosidad de la superficie. Sin embargo, los equipos tradicionales de labranza, tales como arados y rastras de disco producen rugosidad al azar debido al corte y reacomodo del suelo, con todas las consecuencias negativas asociadas (Schuller *et al.*, 2007).

La relación entre la rugosidad, la erosión del suelo y los procesos de escorrentía, ha sido estudiada por diversos autores; Carvajal *et al.* (2006) consideran que el volumen y la distribución espacial del agua disponible para las raíces de las plantas, depende en gran medida del relieve de la superficie del suelo. Por otro lado, el almacenamiento de agua en las depresiones del suelo, reduce los volúmenes y la concentración de flujos de los escurrimientos

(Onstad, 1984). La erosión del suelo se puede reducir en condiciones de mayor rugosidad, no sólo por la reducción de la velocidad del escurrimiento, sino también, por un nivel mayor de resistencia hidráulica que disipa la energía de flujo (Bresson y Boiffin, 1999).

Por otro lado, Lampurlanés y Cantero (2006) consideran que las condiciones de superficie, juegan un papel importante en la determinación de las tasas de infiltración del agua y la evaporación del suelo. Las operaciones agrícolas en gran medida tienen influencia local en el escurrimiento superficial, infiltración y almacenamiento por la alteración de las propiedades hidráulicas y la rugosidad superficial del suelo (Larson, 1964; Mwendera y Feyen, 1993, 1994; Andrieux *et al.*, 1996; Earl, 1997; Ahuja *et al.*, 1998, Léonard y Andrieux, 1998; Sillon, 1999; Van Dijck, 2000).

La labranza afecta diferentes propiedades del horizonte superficial del suelo, modificando entre otras la distribución de tamaño de agregados y la rugosidad superficial. Esta última es una propiedad edáfica, que condiciona marcadamente el comportamiento hídrico de un suelo (Onstad 1984, Zobeck y Onstad 1987). La rugosidad se define según Guzha (2004) como la configuración del suelo causada por el arreglo orientado o aleatorio de los terrones. Porta (2003) la define como la desviación típica de las elevaciones superficiales del suelo. Las herramientas de labranza pueden producir dos tipos de rugosidad; rugosidad orientada y rugosidad aleatoria.

Para la creación de rugosidad orientada o geométricamente ordenada se han generado rodillos impresores, los cuales son máquinas enormes de rodillos con gran diámetro, con patrones complejos, los dientes de impresión soldados a sus circunferencias (Dixon y Simanton 1977). Los diseños de impresores se evaluaron a diámetros más pequeños, más ligeros en peso, de fabricación más económica y más fácil de transportar; también con patrones de impresión más simples y eficientes. La aplicación de rodillos impresores para la generación de rugosidad orientada en las tierras agrícolas de México ha sido probada recientemente por Ventura *et al.* (2003).

2.6. Conservación del Suelo y Agua

2.6.1. Infiltración

La infiltración, es el proceso por el cual el agua penetra en el suelo a través de su superficie y queda retenida en él, o alcanza un manto acuífero (Campos, 2007). La definición anterior implica que la descripción de la evolución del contenido de humedad del suelo, resultante de la lluvia y del almacenamiento en depresiones, es también parte del fenómeno de la infiltración. La infiltración de la lluvia continuará hasta que ésta exceda a la llamada capacidad de infiltración del suelo, definida como la máxima intensidad de lluvia que el suelo puede absorber en un tiempo específico, dada la historia previa de su contenido de humedad y la distribución de la lluvia (Morel *et al*, 1991). Así, la cantidad de agua de lluvia que se infiltra será gobernada por la intensidad de la lluvia en relación con la tasa de infiltración del suelo. Una excesiva labranza y la pérdida de materia orgánica del suelo, a menudo conducen a una reducción de la tasa de infiltración debido a la pérdida de la porosidad superficial.

En muchos suelos el número de poros superficiales se reduce rápidamente por el impacto de las gotas de lluvia, las cuales rompen los agregados en partículas más pequeñas que obstruyen los poros superficiales y forman un sellado de la superficie con escasos poros. La acción destructiva de las gotas de lluvia se evita con la protección de una cubierta por medio del follaje de los cultivos, de residuos vivos o muertos e incluso con malezas en o sobre la superficie del suelo.

Cuando el agua llega al suelo seco, ésta no se desplaza hacia abajo hasta que el agua pelicular ha sido restablecida, sólo después de que esto ocurre el agua fluye por acción de la gravedad. Entonces la fuerza de succión del agua es la suma de la tensión de humedad del suelo y la gravedad, por ello, la infiltración comienza en (suelos secos) con alta capacidad de infiltración y va decreciendo conforme el suelo se va humedeciendo hasta llegar a un límite inferior constante denominado infiltración final, valor que corresponde a la velocidad del flujo de agua a través del suelo debido únicamente a la gravedad, es decir, es la conductividad hidráulica del medio recién saturado.

Considerando que la infiltración ocurre en un suelo profundo, homogéneo con contenido inicial de humedad uniforme (θ_i) y en el que en un tiempo $t = 0$ se mantiene constante una lámina de agua sobre su superficie, tal infiltración se comportará como se muestra en la Figura 2.15.

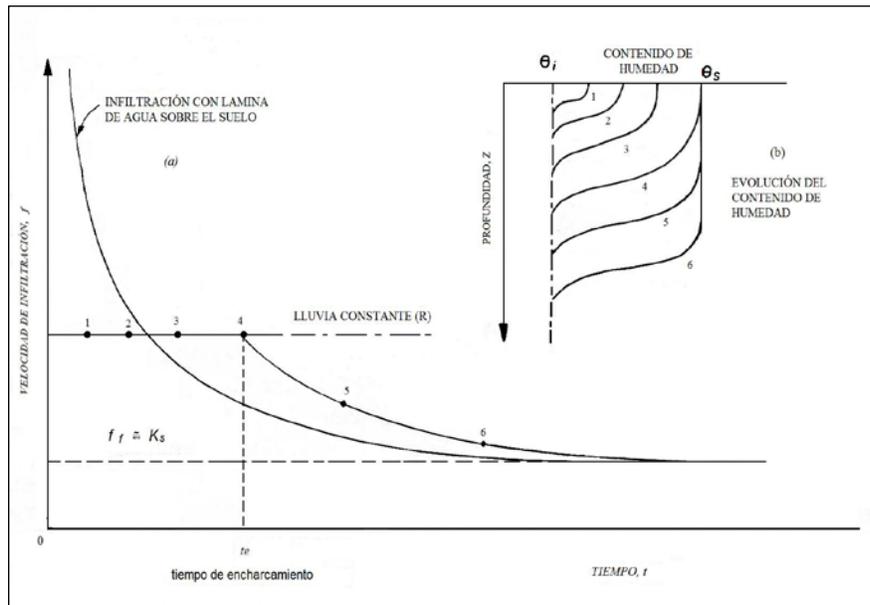


Figura 2.15. Comportamiento teórico de la infiltración.

A la ecuación que describe el flujo del agua de un medio anisotrópico saturado o no saturado, se le conoce como la ecuación de Richards.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K(h) \frac{\partial H}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K(h) \frac{\partial H}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \frac{\partial H}{\partial z} \right] \quad (2.7)$$

Donde:

θ es el contenido de humedad

$K(h)$ es la conductividad hidráulica de un medio poroso, $m s^{-1}$.

H es la carga hidráulica, m.

2.6.2. Esgurrimiento

El escurrimiento ocurre cuando la tasa de infiltración del suelo es menor que la tasa de precipitación. Según Marshall y Holmes (1988), cuantitativamente el proceso de escurrimiento se puede describir como:

$$R = P - I \quad (2.8)$$

Donde:

R es la tasa de escurrimiento

P es la tasa de precipitación instantánea

I es la tasa de infiltración

2.6.3. Erosión Hídrica

Los fenómenos de escurrimiento y erosión ocurren a causa del daño que ha sufrido la porosidad del suelo, en su superficie o debajo de la misma. Esas son las consecuencias y no la primera causa de la degradación de la tierra. En muchos casos, la labranza para aflojar el suelo a fin de permitir una mayor entrada de agua, puede también dar lugar al colapso del mismo, lo cual a su vez, tiende a incrementar la erosión y la pérdida del potencial de retención de la humedad del suelo a causa de la escorrentía.

La erosión hídrica, es el desprendimiento y arrastre de partículas constituyentes del suelo por la acción de la lluvia y el agua en movimiento. Wischmeyer y Smith (1978) desarrollaron la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE, por sus siglas en inglés), para determinar la tasa de erosión hídrica, como una metodología para la estimación de la erosión laminar y en surcos en parcelas pequeñas. Luego de varias modificaciones, la ecuación se presentó como una metodología de gran utilidad en la planificación de obras de conservación de suelos.

La USLE permite predecir la pérdida anual de suelo por hectárea y también precisar las técnicas más apropiadas para el laboreo del suelo, en especial para cultivos agrícolas. La ecuación utiliza como modelo parcelas base (Figura 2.16) de 22.1 m de longitud, 3.6 m de

ancho y 9% de pendiente. De esta manera, USLE efectúa sus estimaciones en torno a la proporción de pérdida de suelo que ocurriría en las condiciones que el usuario determine, respecto a la situación base especificada.



Figura 2.16. Parcela de escurrimiento tipo USLE, en la Estación Experimental de USDA-ARS (Agricultural Research Service) de Palouse, Estado de Washington, Estados Unidos.

La representación matemática de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo es:

$$A = R * K * LS * C * P \quad (2.9)$$

Donde:

- A es la pérdida media anual de suelo (expresado en unidades escogidas para K, y período abarcado en R, $\text{ton ha}^{-1} \text{año}^{-1}$).
- R es la erosividad de la lluvia, $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{h}^{-1}$.
- K es la erodabilidad del suelo, $\text{ton ha h MJ}^{-1} \text{ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$.
- L es el factor longitud de la pendiente. Es la relación entre la erosión con una longitud de pendiente dada y la que ocurre en el estándar de 22.1 m de longitud, a igualdad de los demás factores, adimensional.
- S es el factor de inclinación de la pendiente. Es la relación entre la erosión con una inclinación de pendiente dada y la que ocurre en el estándar de 9% de inclinación, a igualdad de los demás factores, adimensional.
- C es el factor de cubierta vegetal y manejo del recurso, adimensional.

P es el factor de práctica de conservación aplicada (cultivo en contorno, franjas o terrazas), adimensional.

La erosión causada básicamente por salpicado, es la forma de erosión por flujo laminar o entre surcos y se define como, aquella erosión debida al desprendimiento y al transporte de las partículas de suelo por impacto de la gota de agua y el flujo superficial. Según el concepto idealizado, la erosión laminar elimina uniformemente el suelo en estratos delgados, como consecuencia de la corriente superficial o flujo laminar que ocurre en capas delgadas sobre el terreno o pendiente.

Los estudios actuales sobre el mecanismo de la erosión, en los que se han utilizado técnicas fotométricas de exposición prolongada y de alta velocidad indican que la forma idealizada de erosión laminar rara vez se presenta. El impacto de las gotas de lluvia combinado con el flujo superficial, forman los riachuelos microscópicos iniciales.

Estudios con simuladores de lluvia muestran que la erosión entre surcos, varía con el cuadrado de la intensidad de la precipitación (Meyer, 1981). Por lo tanto, la erosión entre surcos puede ser descrita mediante la función (Foster ,1982):

$$D_i = K_i i^2 [2.96(\text{sen}\theta)^{0.79} + 0.56] C_i \quad (2.10)$$

Donde:

D_i es la erosión entre surcos, $\text{kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$.

i es la intensidad de la lluvia, mm h^{-1}

K_i es el factor de erodabilidad del suelo, adimensional

θ es el ángulo entre la horizontal y la superficie entre surcos, grados

C_i es el factor por manejo de cultivo entre surcos, adimensional

La erosión en surcos es la remoción de suelo debido a la concentración de flujo que fluye a través de pequeños canales llamados surcos. Es un proceso hidráulico donde el esfuerzo cortante del flujo en la interface suelo-agua desprende y transporta las partículas de suelo. El desprendimiento no es uniforme a lo largo del surco. Algunos surcos se forman por los desgajamientos pendiente arriba, mucha de la erosión se localiza en estos desgajamientos. La probabilidad de que surjan éstos, depende en gran medida de la forma del surco, textura del

suelo, condiciones del suelo y la tasa de descarga. La erosión puede ocurrir también a lo largo de todos los surcos por el esfuerzo cortante ejercido en el canal por el flujo en los surcos. Este tipo de erosión puede socavar las laderas del surco, y cuando el peso del suelo socavado excede esta fuerza, entonces el suelo es desprendido y transportado dentro del surco por el flujo.

Según los estudios de Foster (1982), la relación típicamente usada para describir la capacidad de desprendimiento en un surco es:

$$D_c = k_r(\tau - \tau_c) \quad (2.11)$$

Donde:

D_c es la capacidad de desprendimiento, $\text{kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$.

K_r es la erodabilidad del suelo en el surco

τ es el esfuerzo cortante hidráulico de flujo, Pa.

τ_c es el esfuerzo cortante crítico, Pa.

Para Foster *et al.*, (1985), el esfuerzo cortante, τ es la variable hidráulica frecuentemente usada para describir la erosividad del suelo debida al flujo, y se expresa como:

$$\tau = \delta_w R_h S_F \quad (2.12)$$

Donde:

δ_w es la densidad del agua, kg m^{-3} .

R_h es el radio hidráulico, m.

S_F es el gradiente hidráulico o pendiente del fondo.

III. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

3.1. Objetivo general

Desarrollar y evaluar un nuevo Sistema Integral de Labranza para zonas áridas y semiáridas, que permita mejorar las condiciones hidrofísicas del suelo, incremente la disponibilidad de agua, disminuya la erosión hídrica y el escurrimiento superficial.

3.2. Objetivos específicos

- Desarrollar el diseño conceptual del implemento de labranza.
- Evaluar el Sistema Integral de Labranza, en términos de su efecto en las propiedades del suelo.
- Evaluar el efecto del Sistema Integral de Labranza en los procesos hidrológicos de superficie (erosión, escurrimiento e infiltración) y en la variación del contenido de humedad del suelo, bajo condiciones de lluvia simulada.
- Validar los efectos del Sistema Integral de Labranza con el establecimiento de un cultivo de frijol, monitoreando su evolución durante su ciclo vegetativo así como, su rendimiento.

3.3. Hipótesis

El Sistema Integral de Labranza propuesto para zonas semiáridas, permite mejorar las propiedades hidrofísicas del suelo, aumentando la disponibilidad de agua para los cultivos y disminuyendo los efectos de erosión y escurrimiento.

IV. METODOLOGÍA

En este capítulo, se aborda la metodología seguida para el desarrollo y evaluación de un sistema integral de labranza propuesto para zonas semiáridas, el cual está basado en la combinación de un implemento de labranza vertical, que elimina la compactación del suelo sin invertirlo, con un dispositivo para la colocación precisa y uniforme de semillas en la cama de siembra, así como, la aplicación posterior de un dispositivo (rueda dentada) para consolidar el suelo a fin de lograr un mejor contacto suelo semilla, y crear una Rugosidad Geométricamente Ordenada (RGO) en la superficie del suelo para la captación del agua de lluvia.

4.1. Diseño conceptual del implemento integral de labranza para zonas semiáridas

Como se mencionó anteriormente, las regiones áridas y semiáridas son zonas con problemas de escasez de lluvias, de carácter torrencial, con una alta intensidad y poca duración. En estas zonas se encuentran terrenos agrícolas degradados, que generan grandes volúmenes de escurrimiento y problemas de erosión; ambos procesos disminuyen la cantidad de agua disponible para las plantas y reducen la productividad de los suelos.

Ante esta problemática, se requiere desarrollar tecnologías que ayuden a conservar el suelo y el agua, modificando las propiedades del primero, relacionadas con los procesos hidrológicos. En este sentido, la herramienta de subsuelo rotura el suelo con un principio de no inversión y crea una serie de grietas continuas verticales, capaces de incrementar la capacidad de infiltración del agua bajo el concepto de continuidad; este es el primer elemento o componente del sistema.

Para hacer el sistema más eficiente, se integra un aditamento para la colocación precisa de la semilla en el suelo. El prototipo se diseñó y se desarrolló con un enfoque hacia la reducción del consumo de energía, partiendo del diseño de un arado convencional de reja, disminuyendo su tamaño y área de contacto con el suelo y logrando, la apertura de la franja de siembra sin perturbar el suelo más allá de la profundidad necesaria, para la colocación de la semilla. Este dispositivo además, cuenta con aletas en la parte posterior para el cubrimiento de la semilla.

Posterior a la colocación de la semilla, una meta importante en el desarrollo del trabajo fue el lograr un buen contacto de la semilla con el suelo, por lo cual fue necesario su consolidación una vez colocada la semilla, utilizando un dispositivo tipo rueda dentada. La creación de Rugosidad Geométricamente Ordenada (RGO) sobre la superficie del terreno con este dispositivo, permitió adicionalmente, captar e infiltrar el agua de lluvia, a la vez que consolida el suelo para lograr un buen contacto suelo-semilla y así, lograr una mejor emergencia de la planta por los mayores flujos de calor y humedad.

Los componentes fueron conceptualizados, construidos e implementados para su evaluación en parcelas tipo USLE.

4.2. Evaluación del Sistema de Labranza

4.2.1. Sitio de estudio

La investigación se realizó en el módulo hidrológico de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro. Este módulo se encuentra ubicado en las coordenadas geográficas 20°35'23.16'' de latitud Norte y 100°24'43.92'' de longitud Oeste, a 1813 metros sobre el nivel medio del mar. De acuerdo con García (1998), el clima del lugar es templado semiseco, caracterizado por un verano cálido. La temperatura media anual es de 18°C, siendo mayo y junio los meses más calurosos con temperaturas máximas de hasta 36°C y, diciembre y enero los más fríos con temperaturas mínimas de hasta -3°C. La precipitación anual es de 555 mm y los vientos predominantes son del Noreste, Sur y Sureste.

4.2.2. Parcelas tipo USLE

Las parcelas experimentales de erosión y escurrimiento tipo USLE tienen de 10.67 m de largo, 2.42 m de ancho y una pendiente del 5.5%. El suelo es el representativo de la región. Cada parcela se delimitó con paredes de 30 cm de ancho y funcionaron como división entre los tratamientos.

Para controlar los flujos de agua, se colocó una membrana de polietileno calibre 600, en cada una de las parcelas, a una profundidad de 50 cm (Figura 4.1), a partir de la cual se

rellenó de suelo hasta lograr un espesor de 45 cm, con un grado de compactación promedio de 1.53 Kpa, conservando la pendiente de 5.5%.



Figura 4.1. Colocación de membrana de polietileno calibre 600 en las parcelas de evaluación.

4.2.3. Suelo

El suelo utilizado para la experimentación fue un Vertisol Pélico (Figura 4.2), representativo de la región del bajío, zona que se caracteriza por su clima semiárido. De acuerdo con la clasificación de suelos FAO-UNESCO (1987), el suelo se clasifica como de tipo Vertisol Pélico y en general, presentan grietas anchas y profundas en la época de sequía, son muy duros cuando secos, arcillosos y masivos, comúnmente de color negro, gris o rojizo. Son de climas templados y cálidos con una marcada estación de sequía y otra lluviosa. Su vegetación natural es muy variada y la susceptibilidad a la erosión es moderada.



Figura 4.2. Suelo Vertisol Pélico utilizado en las parcelas.

De acuerdo con el análisis realizado en el Laboratorio de Hidráulica, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, el suelo utilizado tiene una conductividad hidráulica de $7.83 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$, un pH entre 7.5 y 8, una densidad real de 2.36 g cm^{-3} , una capacidad de campo de 46.5%, un punto de marchitez permanente de 24% y un contenido de arcilla, limo y arena de 20.52%, 46.36% y 33.12% respectivamente.

4.2.4. Tratamientos

En este estudio se establecieron tres tratamientos en parcelas tipo USLE:

- a) Control Compactado (CC)
- b) Control Estándar (Barbecho + Rastra) (CE)
- c) Sistema Integral (Labranza Vertical + Reja de siembra+ RGO) (SI)

La distribución de los tratamientos en las parcelas se observa en la Figura 4.3.

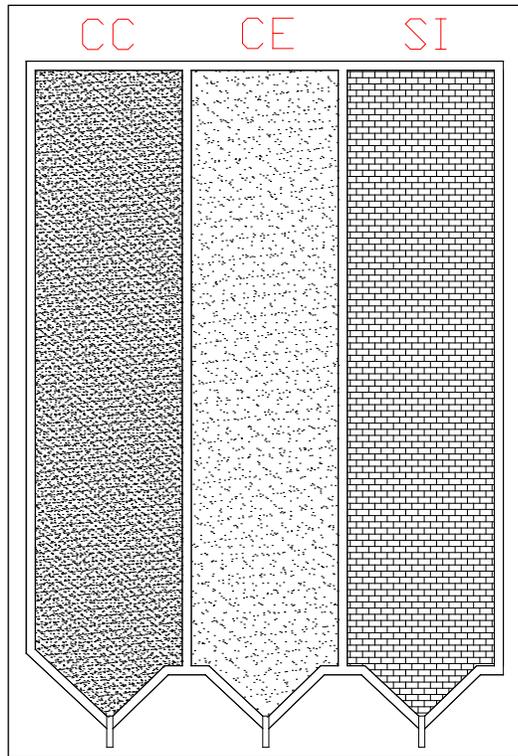


Figura 4.3. Tratamientos.

El tratamiento (CC) Control Compactado se refiere a un suelo compactado, sin laboreo y en el cual se realizó una siembra directa (Figura 4.4).



Figura 4.4. Tratamiento Control Compactado, (CC).

El tratamiento (CE) Control Estándar (Figura 4.5) corresponde a la definición de una parcela estándar, donde el suelo se remueve, simulando el efecto de un arado de discos, seguido de una rastra y una nivelación del suelo, tal como lo considera Wischmeier y Smith (1978).



Figura 4.5. Tratamiento Control Estándar (Barbecho + Rastra), (CE).

El tratamiento del Sistema Integral (SI) (Figura 4.6), se basó en la aplicación combinada de un Subsolador de corte vertical y horizontal, el cual rompe el suelo sin invertirlo. Posteriormente, se usó el dispositivo para la colocación de las semillas y enseguida, la aplicación de la rueda dentada para la consolidación del suelo y la creación de rugosidad, con un patrón de bordos y depresiones espacialmente distribuidos. La rueda está formada por seis dientes y está hecha de un material elastómero de poliuretano microcelular, el cual es autolimpiable, de larga duración y con una alta resistencia a la abrasión. El ancho de cada rueda es de 0.115 m y tiene un diámetro al borde de los dientes de 0.08 m.



Figura 4.6. Sistema Integral (Labranza Vertical + Reja de siembra+ RGO), (SI).

Cada tratamiento se aplicó después de lograr en el perfil del suelo, una condición friable para simular el efecto de las primeras lluvias, que el agricultor de estas zonas espera para poder realizar las labores de siembra.

4.3. Evaluación de la Compactación

La compactación de un suelo es usualmente medida con un penetrómetro o medidor de compactación; este instrumento mide la resistencia a la penetración, expresada por la presión necesaria para introducir la punta cónica del equipo hasta una cierta profundidad. Esta variable no constituye por sí sola una medida directa del estado de compactación del suelo, pero es un indicador de la resistencia a la penetración debido a la compactación del suelo.

Para la medición de la compactación se generó una malla con espaciamentos de 0.5 m y 1.0 m a lo ancho y largo de la parcela donde se midió la compactación, antes y después de la aplicación de los sistemas. La medición se realizó con un medidor de compactación SC 900 (Figura 4.7), de la marca FIELDSCOUT™, con una resolución de 1'' (2.5 cm) y un rango de medición de 0 a 18'' (0-45 cm). El aparato cuenta con un data logger que permite almacenar datos de varios sitios.



Figura 4.7. Medición de resistencia a la penetración.

Las mediciones de la resistencia a la penetración realizadas antes y después de la aplicación del Sistema Integral, se graficaron con la herramienta ArcGis para obtener por interpolación, el mapa de la compactación en la parcela SI.

4.4. Experimentación

4.4.1. Simulación de lluvia

Con el propósito de tener las condiciones del experimento lo más controladas posible, para la evaluación del efecto del sistema en la erosión y el escurrimiento, se utilizó un simulador de lluvia (Figura. 4.8). Esta herramienta está formada por dos partes fundamentales, el sistema hidráulico de suministro de agua y su estructura. Tiene una altura de 2.2 m y su ancho puede llegar hasta los 2.8 m como máximo. A lo largo, cuenta con 5 aspersores con una distancia entre ellos de 2.04 m, con esto se logra cubrir una superficie de 25 m². Los aspersores son de tipo ‘Spray nozzles’, boquillas de aspersión de cono lleno cuadrado.

Para el control de las intensidades de lluvia, el simulador cuenta con una motobomba eléctrica marca Evans de 1.5 hp de potencia y válvulas de control de caudal. El sistema hidráulico cuenta con 2 manómetros para el monitoreo de la presión durante el experimento, lo cual permite tener una relación de presión vs intensidad. El sistema puede trabajar en un rango

de presiones que va de los 0.25 a 1.9 kg cm⁻², dependiendo de la intensidad de lluvia (Aguado, 2010).



Figura 4.8. Esquema del simulador de lluvia.

Se realizaron dos simulaciones de lluvia con una intensidad de 95 mm h⁻¹: la primera se realizó sobre un suelo desnudo y con una duración de 30 minutos, la segunda con una duración de 60 minutos se llevó a cabo sobre el cultivo establecido.

4.4.2. Erosión y Escurrimiento

Las muestras de escurrimiento y sedimentos se tomaron cada 5 minutos en los cuatro tratamientos, utilizando botellas de plástico de boca ancha (Figura 4.9). Posteriormente, con el tiempo de muestreo predeterminado y un procesamiento gravimétrico, se calculó el escurrimiento así como, la tasa de erosión. Las muestras fueron decantadas y secadas al horno a 105° C por 24 horas, hasta tener un peso constante.



Figura 4.9. Muestreo de erosión y escurrimiento.

4.4.3. Cálculo del factor P de la Ecuación Universal de Pérdidas de suelo

Como una forma de determinar la efectividad de la implementación práctica del Sistema, se evaluó el factor P de la ecuación universal de pérdida de suelo.

El factor de práctica de conservación (P) de la ecuación USLE, es uno de los factores más importantes en las estimaciones de la pérdida de suelo. Este factor junto con el factor (C), representan las prácticas destinadas a reducir la erosión. El valor de P en USLE, es la relación de pérdida de suelo con una práctica específica de soporte y la pérdida de suelo correspondiente, con un tratamiento de labranza de filas rectas cuesta arriba y cuesta abajo.

La forma de estimar el factor P, se hizo midiendo la pérdida de suelo en la parcela con la práctica de conservación y la pérdida correspondiente en la parcela estándar USLE, calculándose como sigue:

$$P = \frac{W_P}{W_E} \quad (4.1)$$

Donde:

W_P es la cantidad de pérdida de suelo en la parcela con práctica de conservación, ton ha⁻¹.

W_E es la cantidad de pérdida de suelo en la parcela estándar USLE, ton ha⁻¹.

4.5. Contenido de humedad

El contenido de humedad se midió de manera puntual, en una malla con el mismo espaciamiento utilizado en la medición de la compactación. En este caso, la humedad se monitoreó durante tres semanas, de manera simultánea para las cuatro parcelas. Para realizar esta medición, se utilizó un medidor de humedad del suelo (TDR 300), de la marca FIELDSCOUT™ (Figura 4.10), el cual cuenta con barras censoras de 20 cm de largo, tiene una resolución de 1% y un rango de 0 a 50%. Además, cuenta con un data logger el cual permite almacenar hasta 3250 datos.



Figura 4.10. Medidor de humedad en el suelo TDR.

4.6. Establecimiento y monitoreo del cultivo

Con la finalidad de comprobar y validar los resultados del efecto del Sistema Integral de Labranza, se estableció un cultivo de referencia que en este caso, correspondió a frijol de la variedad pinto villa, siendo éste, un cultivo representativo de esta zona (Figura 4.11). El frijol se sembró en tres hileras, con una separación de 80 cm y una densidad de siembra equivalente a 58 000 plantas por hectárea. El cultivo se monitoreo durante su desarrollo y la producción se midió en el ciclo vegetativo de producción de ejote, cuantificando tres cortes y estimando la producción equivalente en toneladas por hectárea.



Figura 4.11. Cultivo de frijol establecido en cada uno de los tratamientos.

4.7. Procesamiento y Análisis de Datos

Para identificar si los efectos de los diferentes tratamientos fueron iguales o diferentes, se realizó un análisis de varianza mediante la prueba de F y posteriormente, se hicieron pruebas de comparación de medias. La prueba de F, indico si los efectos de los tratamientos fueron iguales o diferentes. En caso de aceptar la hipótesis de que todos los

tratamientos no tuvieron el mismo efecto, fue necesario realizar la prueba de comparación de medias, a fin de saber entre que tratamientos específicos hubo diferencias.

El estudio de las comparaciones dependientes, se realizó a través de las pruebas de rangos múltiples. Esta prueba, que constituye el método de comparación múltiple más utilizado, supone que las medias de los tratamientos no están correlacionadas (William y Mroginski, 1993), entonces se desea probar una hipótesis nula:

$$H_0: \mu_i = \mu_j, i \neq j \quad (4.2)$$

Donde:

H_0 es la hipótesis nula

μ_i es la media del tratamiento i

μ_j es la media del tratamiento j

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

5.1. Prototipo

De acuerdo con el análisis de los requerimientos para mitigar o reducir los problemas de compactación de suelos y los bajos rendimientos en los cultivos de las zonas semiáridas, se planteó una solución basada en la integración de una serie de herramientas para la preparación del suelo, la colocación precisa de la semilla, la consolidación del suelo y la creación de una Rugosidad Geométricamente Ordenada (RGO), formando así el Sistema Integral de Labranza y Siembra mostrado en la Figura 5.1.

La integración se concibió con la idea de que en un solo paso, sea posible realizar las labores de roturación del suelo para eliminar la compactación, de establecimiento del cultivo y, de reacondicionamiento y configuración de la superficie del suelo, todo ello con el fin de reducir los consumos de energía, conservar el suelo y el agua y, aumentar el rendimiento de los cultivos.

El sistema está formado por los componentes siguientes: *i)* Multiarado. *ii)* Dispositivo para la colocación de la semilla. *iii)* Rodillo formado por ruedas dentadas. Herramientas con las que se realizaron las labores antes mencionadas de manera respectiva.

El funcionamiento de los componentes y su diseño final, se muestra a continuación:

El Multiarado, rotura el suelo con un principio de no inversión y crea el sistema de poros en el suelo, capaces de incrementar la capacidad de infiltración del agua. Está conformado por un cincel modificado con una punta de arado y saetas cortadoras, este implemento rotura el suelo dejando los residuos de cosecha en la superficie. Las aletas cortadoras, trozan las raíces de las plantas presentes, lo cual favorece el control de malezas.

Con el Multiarado el suelo se rotura en forma vertical y horizontal en el fondo, a diferencia de los cinceles tradicionales, los cuales aran el suelo solamente en forma vertical. La principal ventaja de esta roturación horizontal es el incremento en la infiltración del agua, aprovechando mejor la lluvia, al realizar la roturación con el Multiarado en el sentido de los surcos o hileras de plantas, de esta forma se logra que el agua de lluvia penetre directamente

en la zona de raíces del cultivo. En la Figura 5.1, se muestra el diseño de la herramienta de corte vertical para la preparación del suelo.

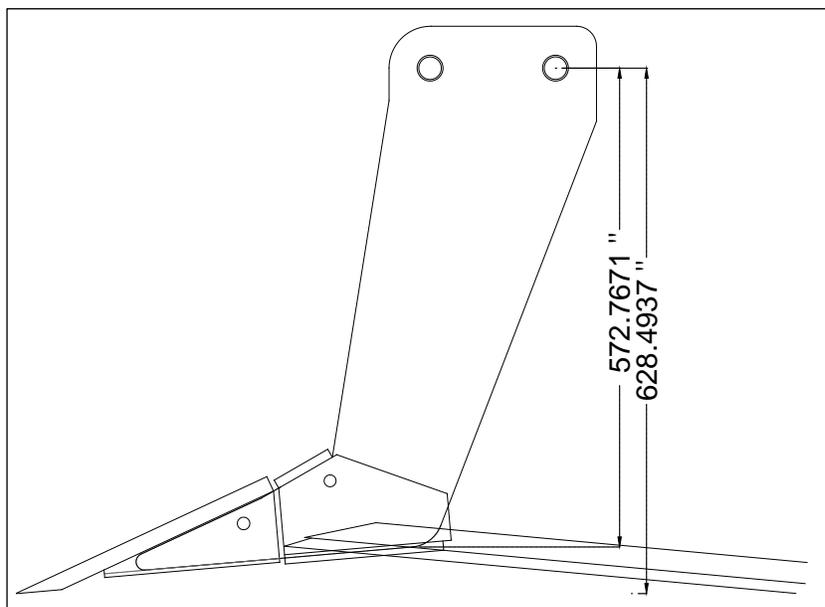


Figura 5.1. Herramienta de corte vertical.

Para la preparación del suelo, el uso de herramientas de corte vertical ha sido utilizado con éxito en zonas semiáridas para aliviar su compactación (Hamza y Anderson, 2005) y mejorar el uso del agua, el crecimiento de las raíces y el rendimiento de los cultivos (Tabatabaefar *et al.*,2005).

La colocación de la semilla a una adecuada profundidad y en las mejores condiciones, ha sido uno de los aspectos menos considerados en la producción de cultivos. Aun así, Desbiolles (s/f, comunicación personal) considera que la importancia de la profundidad de siembra en la maximización de la producción de cultivos, es reconocida por la mayoría de los agricultores progresistas, por lo que contar con dispositivos de colocación precisa que eliminen las fuentes de variación, ayudará a una emergencia uniforme y a un mayor rendimiento potencial. La regla general aceptada es, que el rendimiento disminuye cuando la profundidad de siembre aumenta, pero esto no es válido para los rangos someros de profundidad. El dispositivo diseñado para la colocación de la semilla (Figura 5.2) consiste en una reja la cual por su tamaño, solo disturba hasta 5 cm a lo ancho del suelo y la profundidad, puede ser ajustada de acuerdo al cultivo que se desee establecer; cuenta con dos tubos por los

cuales se conducen la semilla y el fertilizante desde el depósito hasta la profundidad deseada. Este dispositivo además, cuenta con aletas en la parte posterior para asegurar el cubrimiento de la semilla.

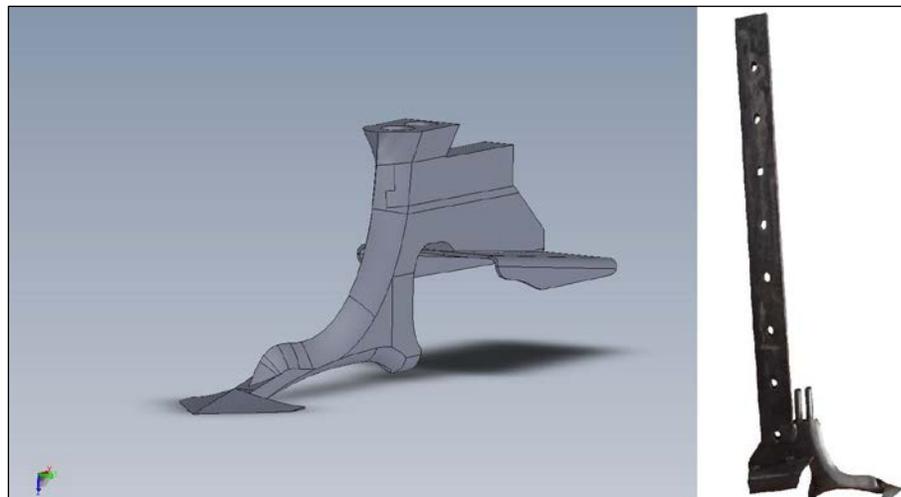


Figura 5.2. Diseño del prototipo para la colocación de granos hecho por el autor.

El tercer componente del sistema lo constituyó una rueda dentada (Figura 5.3) conformada en un rodillo. Las indentaciones forman pequeños reservorios con capacidad para el almacenamiento del agua de lluvia, lo que significa que el agua puede permanecer en el terreno por un período de tiempo más largo, lo cual también significa un mayor tiempo para que el agua se infiltre, el agua no escurre a los puntos bajos del terreno y reduce considerablemente la erosión.

La rueda puede usarse individualmente o agruparse en un rodillo continuo del tamaño del implemento al que se va a adaptar, lo que permite la impresión de las indentaciones, micro reservorios o micro cuencas en una forma homogénea en el terreno y en consecuencia la distribución de la humedad es también más uniforme. El paso de las ruedas sobre el terreno consolida el suelo sin provocar compactación, logrando un mejor contacto suelo-semilla en la siembra y la germinación. La rueda fue diseñada principalmente para ser usada al final de una serie de operaciones, de tal manera que los subsecuentes pasos de maquinaria no destruyan los mini reservorios creados. Sin embargo esto depende de las condiciones específicas.

El concepto simple de la rueda consiste en aplicar una presión en el suelo suelto para formar mini reservorios entre las hileras del cultivo o en la superficie de camas de siembra. La

superficie interna de los reservorios se consolida de tal manera que el agua se retiene por más tiempo dando oportunidad a la infiltración en el suelo con lo que ofrece a la zona de raíces humedad suficiente para un período considerable de tiempo.

La rueda utilizada está hecha de un material único elastomérico de Poliuretano Microcelular el cual es autolimpiable, de larga duración, y con una excelente resistencia a la abrasión, lo que la hace trabajar en terrenos con pedregosidad si ningún problema.

La conformación de la superficie del suelo se conoce como Rugosidad Geométricamente Ordenada (RGO).

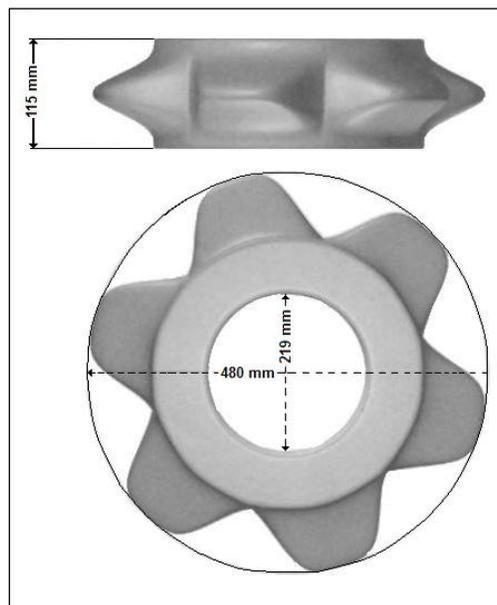


Figura 5.3. Rueda Aqueel.

El diseño final se muestra a continuación en la Figura 5.4 donde se muestra la integración de los tres componentes formando el Sistema Integral.

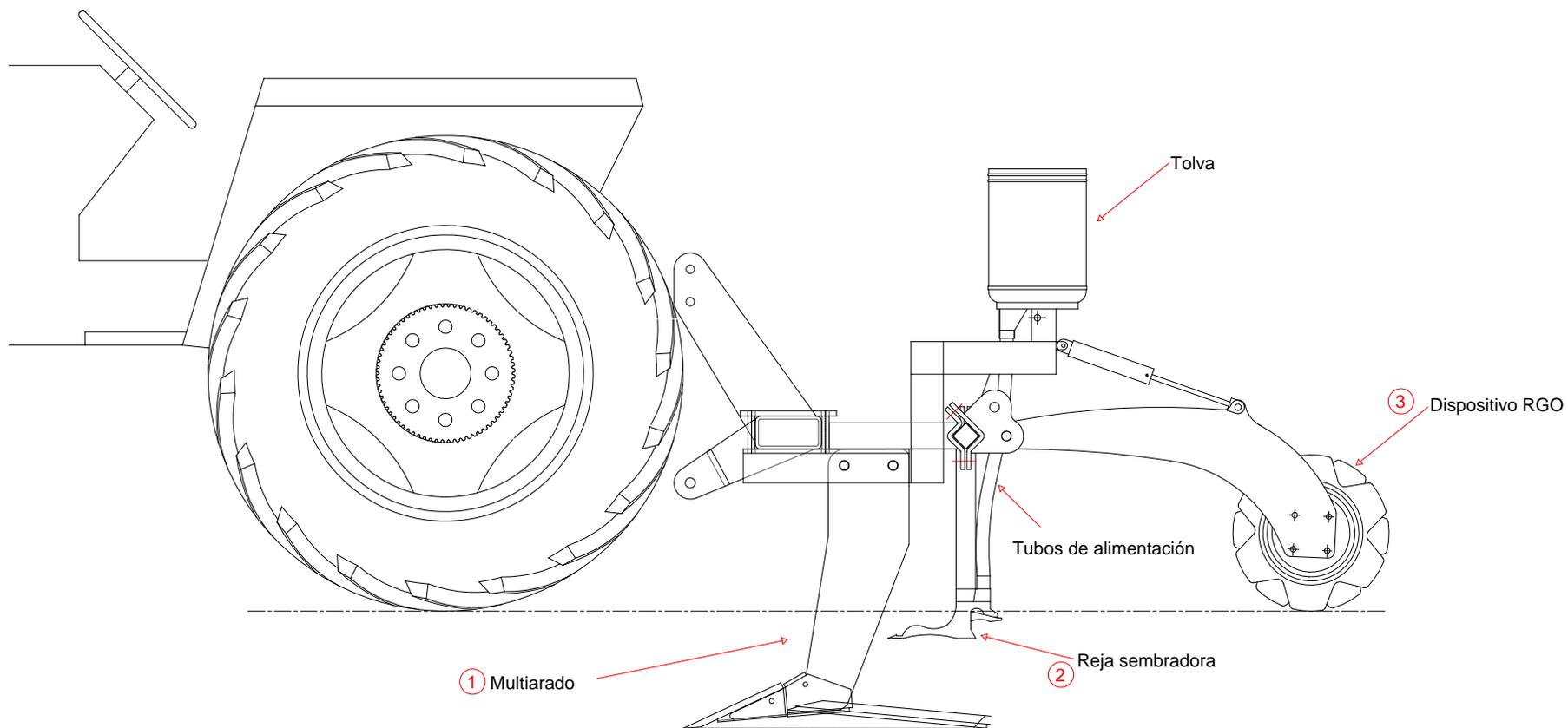


Figura 5.4. Prototipo del Sistema Integral de Labranza

5.2. Evaluación del efecto del Sistema en la Compactación del suelo

Con la aplicación del SI la resistencia a la penetración se redujo en promedio de 1.75 a 1.5 KPa mostrando valores más uniformes en el perfil del suelo lo que significa una preparación más adecuada del suelo para la siembra posterior. Es importante mencionar que, el efecto de las mediciones puntuales provocó una disminución no tan significativa en este parámetro (Figura 5.5), esto debido a que la simulación del paso del multirado no disturba como tal todo el suelo, solo genera grietas y eso hace que queden agregados compactados debajo de la superficie del suelo. Sin embargo la presencia de grietas para la infiltración del agua es uno de los efectos primordiales de esta herramienta.

La variación espacial en la resistencia a penetración se muestra en la Figura 5.5 donde la diferencia antes y después de la aplicación del tratamiento es de alrededor de 200 Pa con máximos puntuales de hasta 500 Pa. Esta disminución en la resistencia del suelo mejora la aireación al aumentar la porosidad y disminuir la densidad aparente del suelo, lo cual potencialmente favorece a que los cultivos tengan un mayor crecimiento radicular y puedan explorar a mayores profundidades donde se almacene el agua (Sánchez, 2004), y así puedan disponer y absorber una mayor cantidad de nutrientes.

La importancia de reducir la resistencia del suelo para mejorar las condiciones físicas del suelo (Letey, 1985) y aumentar la infiltración del agua en el suelo ha sido reconocida por varios autores

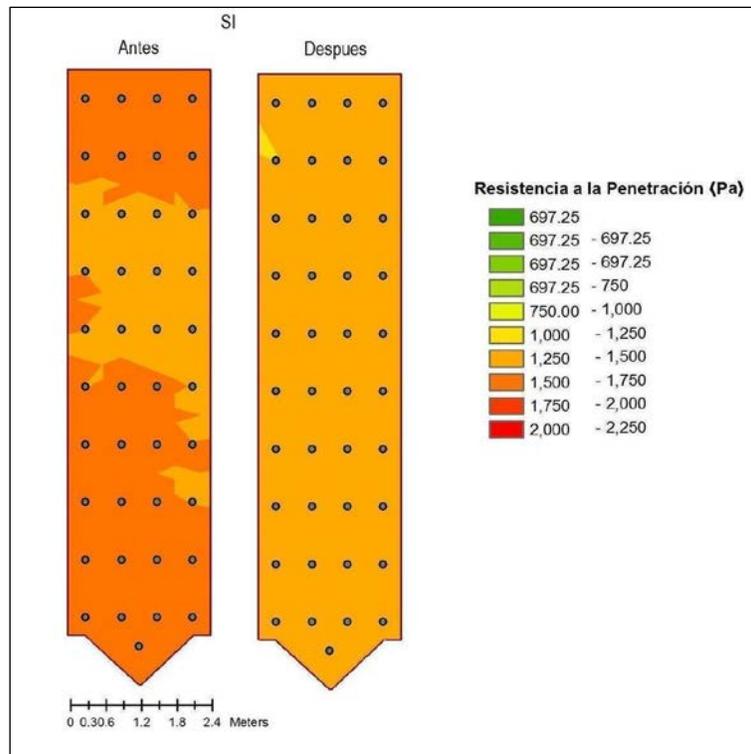


Figura 5.5. Variación espacial de la compactación del suelo antes y después de la aplicación del Sistema Integral.

La variación promedio de la resistencia con la profundidad antes y después de la aplicación del Sistema Integral, se muestra en la Figura 5.6.

El efecto del subsuelo en la compactación de suelos de regiones semiáridas ha sido documentado por varios autores. Akinci *et al.* (2004) reportan que el subsuelo redujo la resistencia del suelo en el rango de 13.3 a 26.2 %, dependiendo de si se hizo uno o dos pasos. Sin embargo, aunque la resistencia disminuyó el rendimiento no fue tan significativo, desapareciendo el efecto después de 2 a 4 años de implementado, por lo que se recomienda repetirlo para aliviar la compactación.

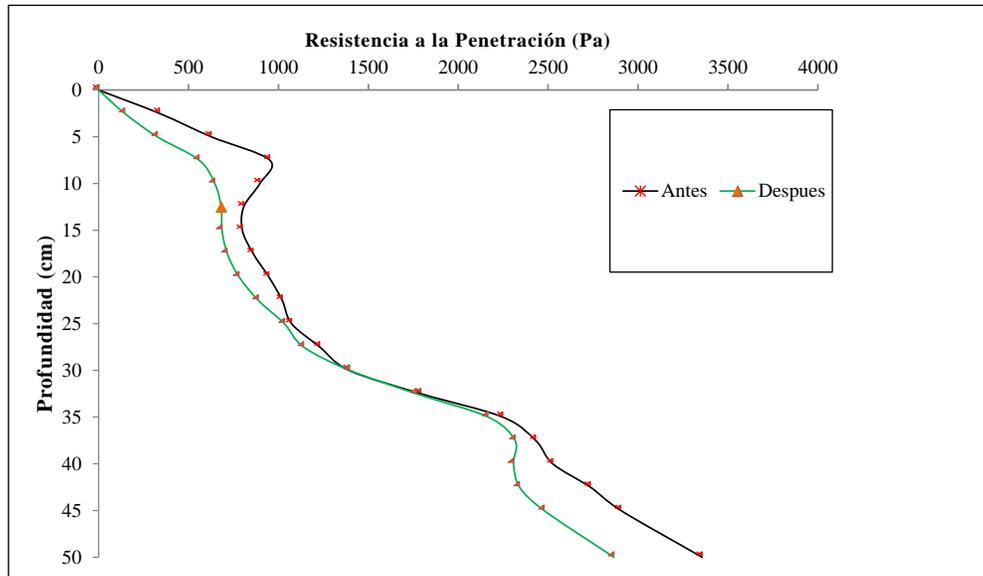


Figura 5.6. Perfil de compactación del suelo antes y después del tratamiento SI.

5.3. Efecto del Sistema en el Esguerrimiento Superficial

En la primera simulación (sin cultivo), inmediatamente después de aplicar los tratamientos, el SI mostró reducir los esguerrimientos en un 93.5% comparado con el 51.9% y 74.2% en los tratamientos CC y CE, respectivamente (Figura 5.7), en comparación con la cantidad de lluvia aplicada. Una reducción adicional del esguerrimiento en el Sistema Integral de alrededor de un 40% con respecto al Control Compactado y de casi un 20% con respecto a la parcela estándar es el resultado combinado de la creación de una porosidad vertical por parte de la herramienta de corte vertical y de la creación de mini reservorios en la superficie del suelo.

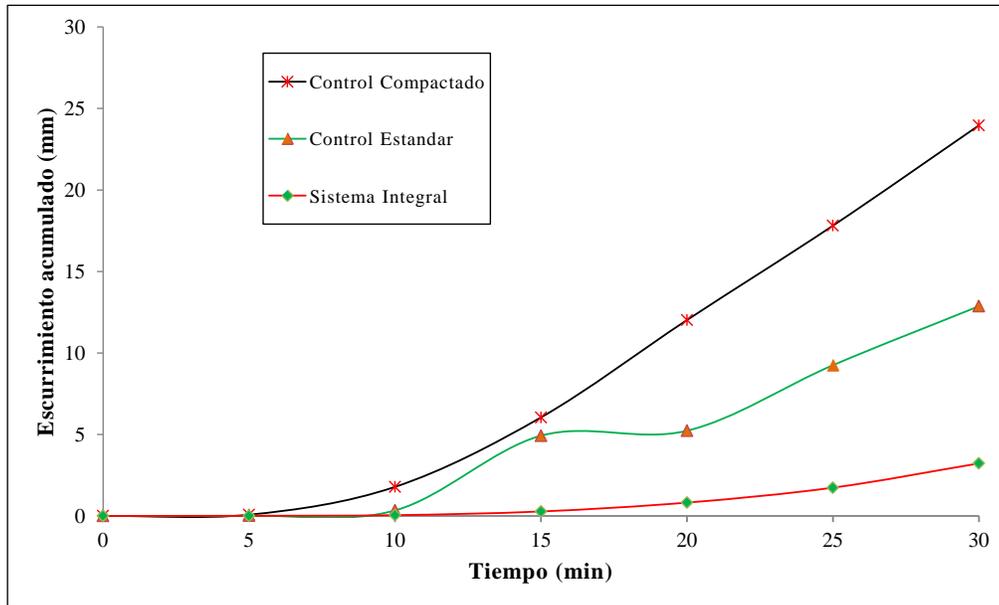


Figura 5.7. Esguerrimiento acumulado en la primera simulación de lluvia.

El aumento de la tasa de infiltración del agua en el suelo y el volumen de almacenamiento de la misma ha sido también reportada con el uso del subsuelo (Pikul y Aase, 2003). Sin embargo, el efecto de la aplicación de estas herramientas puede verse disminuido o inactivado con operaciones subsecuentes, al romper la continuidad vertical de los poros creados. Por otro lado, las mini depresiones ordenadas en la superficie del suelo detienen el agua de lluvia por más tiempo dándole tiempo para una tasa de infiltración mayor (Granada *et al.*, 2011).

Por otro lado, las mini depresiones ordenadas en la superficie del suelo detienen el agua de lluvia por más tiempo dándole tiempo para una tasa de infiltración mayor (Granada *et al.*, 2011). Esto de hecho retrasa el inicio del esguerrimiento en el SI, comparado con los tratamientos de Control Compactado y la el Control Estándar. En la Figura 5.8 se muestra la condición de esguerrimiento durante la lluvia simulada para los tres tratamientos estudiados.



Figura 5.8. Condición de escurrimiento durante la lluvia simulada para los tres tratamientos.

Los resultados de la simulación con cultivo fueron muy notables, ya que en el SI, el escurrimiento ocurrió a los 45 minutos después de iniciada la simulación, mientras que en el caso de los tratamientos CE y CC este proceso dio inicio a los 5 minutos de empezada la simulación de lluvia (Figura 5.8). Sin duda estos resultados se atribuyen a la función combinada que desempeña la cobertura del cultivo sobre el suelo y el efecto del manejo del suelo.

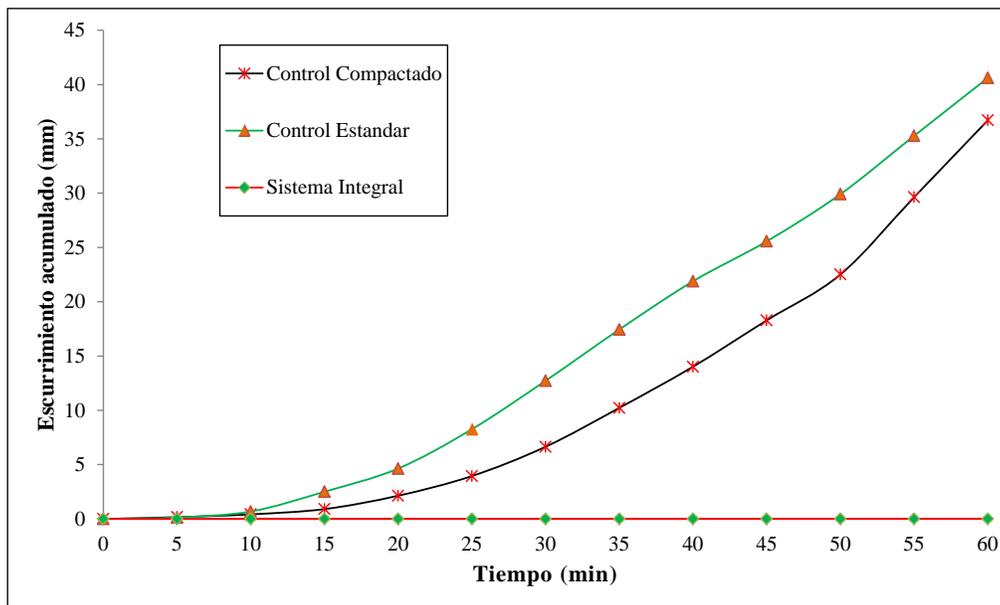


Figura 5.9. Volumen de escurrimiento acumulado en la segunda simulación de lluvia.

En la parcela CC, aunque se presentaron niveles altos de humedad comparado con CE, el grado de compactación no permitió una buena germinación y desarrollo del cultivo, lo

que llevó a tener gran cantidad de área de suelo descubierta. Caso contrario ocurrió con el CE, donde aunque hubo una reducción en la compactación del suelo, la configuración superficial del suelo no permitió la captación de agua suficiente para que el cultivo tuviera un buen desarrollo; y aunque existió una buena germinación, la configuración del suelo generó una alta tasa de evaporación al grado de llegar al estrés hídrico del cultivo con este tratamiento (Figura 5.10).



Figura 5.10. Cultivo con déficit de agua en el tratamiento CE.

La configuración del los tratamiento SI presentó un mejor desarrollo del dosel del cultivo (Figura 5.11), protegiendo así al suelo del efecto erosivo de la lluvia y por ende, reduciendo también los volúmenes de escurrimiento. Estos resultados se atribuyen también a la capacidad del cultivo para interceptar el agua de la lluvia.



Figura 5.11. Simulación de lluvia sobre la parcela con el tratamiento SI.

La prueba de Rangos Múltiples para los resultados de escurrimientos mostró que estadísticamente, el SI presentó el menor escurrimiento comparado con CE y CC; entre estos últimos, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas. El efecto positivo del SI se debe a la combinación de una reducción en el escurrimiento por la intercepción del dosel y una mejor condición física del suelo.

Tabla 5.1. Prueba de Rango Múltiple para los datos de escurrimiento.

	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
SI	2	0.040078	X
CE	2	0.664937	X
CC	2	0.754291	X

5.1. Erosión

En la Figura 5.12 se muestran los resultados de la erosión del suelo para una tormenta con una intensidad de alrededor de 95 mm h^{-1} , en los diferentes tratamientos de labranza. La cantidad de suelo erosionado en SI fue 3 y 1.5 veces menor que en los tratamientos CC y CE, respectivamente.

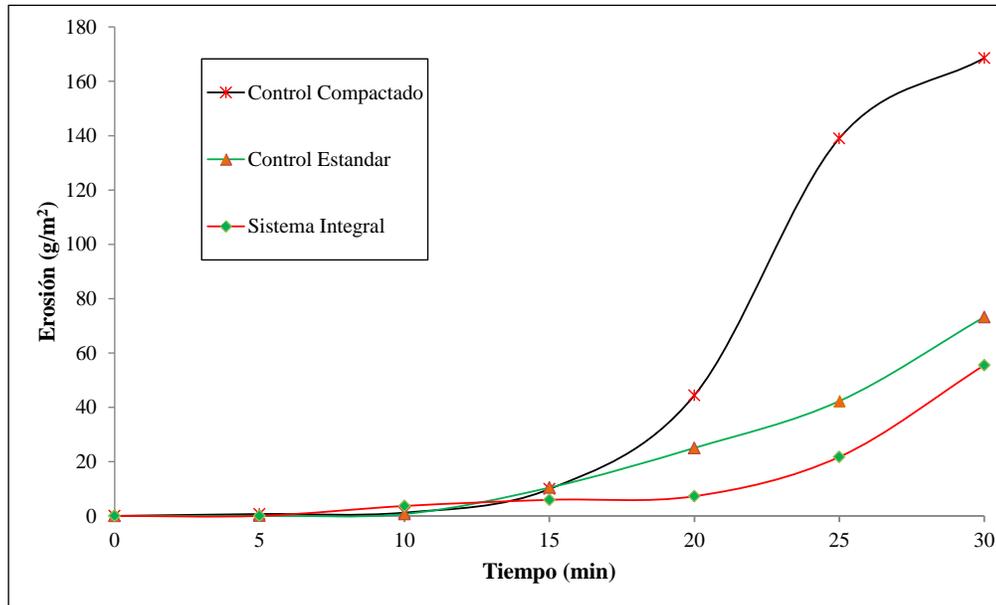


Figura 5.12. Erosión acumulada en la primera simulación de lluvia.

La creación de una porosidad vertical y continua con el multiarado, combinada con la Rugosidad Geométricamente Ordenada en la superficie, son la clave para una reducción del escurrimiento superficial y de la erosión del suelo (Granada et al, 2011)

A los 55 días del ciclo vegetativo del cultivo, se realizó una segunda simulación de lluvia con una intensidad de alrededor de 95 mm h^{-1} . La tasa de erosión disminuyó notablemente en el tratamiento SI teniendo pérdidas de tan sólo 0.12 g m^{-2} , comparado con CE con pérdidas de 660 g m^{-2} y en CC de 540 g m^{-2} (Figura 5.13).

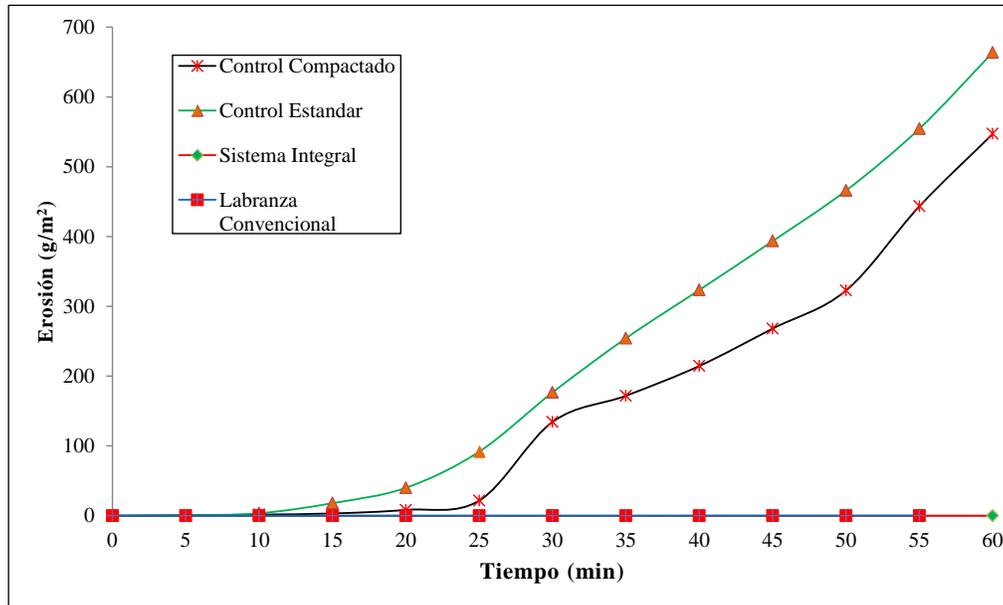


Figura 5.13. Cantidad de suelo erosionado en la simulación de lluvia con cultivo.

Con los resultados obtenidos en la primera simulación, donde se tienen las condiciones estándar, la pérdida de suelo en la parcela con práctica de conservación (SI) y en la parcela estándar USLE fue de 0.55 ton ha^{-1} y 0.73 ton ha^{-1} . Con estos datos se pudo obtener el factor P de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, siendo de 0.75.

5.2. Contenido de humedad

El SI mostró ser efectivo en la capacidad para retener y conservar la humedad en el suelo, tal como se muestra en la Figura 5.14 para el periodo de crecimiento activo del cultivo.

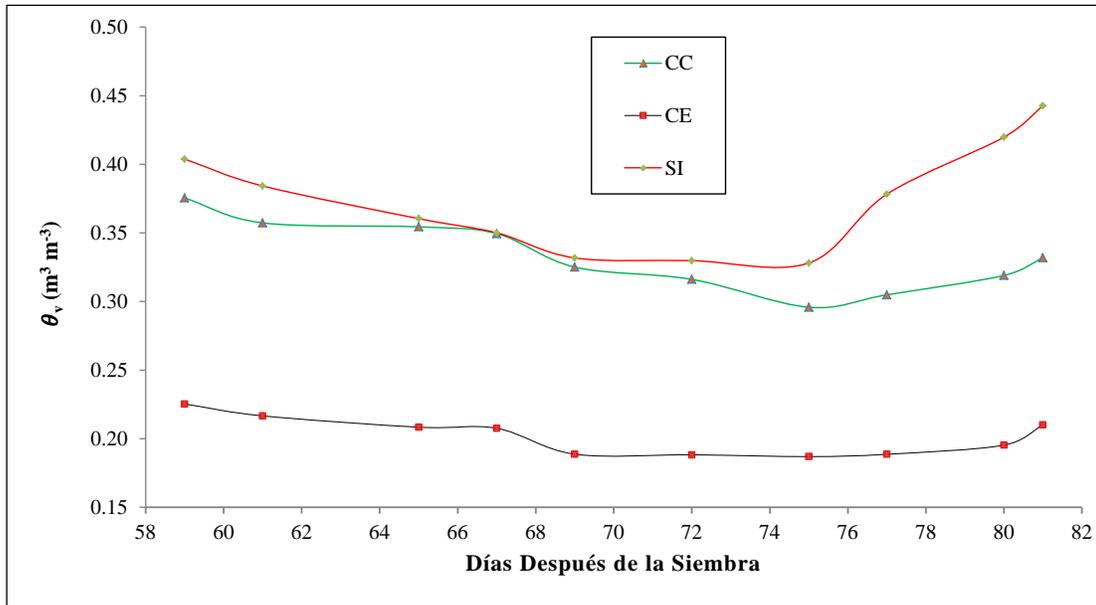


Figura 5.14. Variación en el contenido volumétrico de Agua en el suelo.

Con la prueba de Rangos Múltiples (Tabla 5.2), se logra comprobar que la humedad en el SI presenta diferencias estadísticamente significativas, con los tratamientos CE y LC.

Tabla 5.2. Prueba de Rango Múltiple para la humedad en el suelo.

	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
CE	11	22.3242	x
CC	11	34.2841	x
SI	11	37.9239	x

Dado que la humedad del suelo reportada es la volumétrica, al aumentar la compactación, el valor de ésta incrementa, razón por la cual no existió diferencia significativa entre el CC y el SI. Sin embargo, las condiciones físicas del suelo no son las más favorables en el CC, y eso se vio reflejado en el rendimiento del cultivo.

5.3. Desarrollo y rendimiento del cultivo

Con un total de 61, 123 y 108 plantas emergidas, en los tratamientos CC, CE y SI respectivamente, se inició el monitoreo del cultivo.

La cosecha del cultivo se realizó en la etapa de producción de ejote y fue dividida en tres cortes. Con el SI se obtuvieron rendimientos superiores en un 44%, en comparación con el CC y, un 67% comparado con el CE (Figura 5.15).

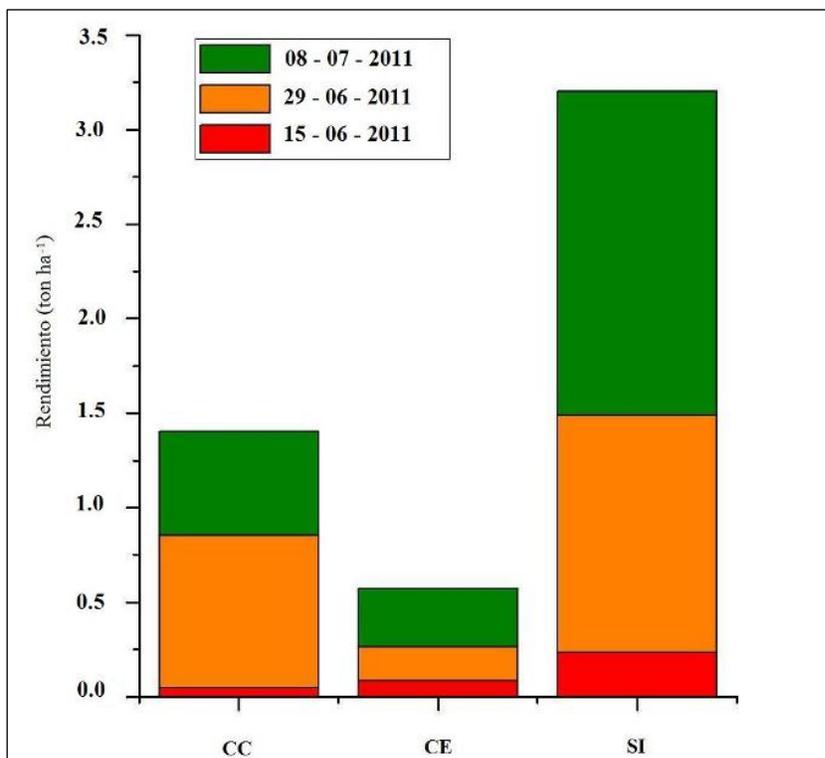


Figura 5.15. Rendimiento del cultivo en los tres tratamientos.

De igual manera, aunque no se realizaron mediciones, el desarrollo radicular en el SI mostró una gran cantidad de raíces con una longitud mayor, comparada con los otros tratamientos (Figura 5.16).



Figura 5.16. Desarrollo radicular del cultivo.

Con la prueba de Rangos Múltiples (Tabla 5.3), se identificaron diferencias estadísticamente significativas de rendimiento en el SI, comparado con los otros tratamientos.

Tabla 5.3. Prueba de Rango Múltiple para los datos de rendimiento.

	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
CE	3	0.305825	X
CC	3	0.766578	X
SI	3	1.64043	X

El cultivo siempre será un indicador de las condiciones físicas del suelo y del efecto de los tratamientos de manejo del mismo.

El Sistema Integral mejoró significativamente las propiedades hidrofísicas del suelo, al reducir la resistencia y al aumentar el contenido de humedad, disminuyendo el escurrimiento, aumentando la infiltración y reduciendo prácticamente a niveles poco significativos, la erosión del suelo; lo que se tradujo en mayores rendimientos del cultivo de frijol.

VI. CONCLUSIONES

La integración de una herramienta de corte vertical, con un dispositivo para la colocación de granos y una rueda dentada para la consolidación del suelo y la creación de rugosidad geoméricamente ordenada, disminuyó la resistencia a la penetración hasta en un 30%, incrementó en un 32% la germinación de la semilla de frijol y redujo el escurrimiento y erosión en comparación con una condición compactada y de laboreo convencional.

Los efectos en los procesos hidrológicos de superficie del Sistema Integral de Labranza, fueron positivos, ya que se redujeron los escurrimientos en un 95% comparado con las condiciones de suelo desnudo y de prácticamente el 100% cuando el cultivo de frijol estuvo presente, principalmente en el periodo de floración. Además la tasa de erosión se redujo hasta un 70% comparado con el control de referencia.

La aplicación del Sistema Integral mantuvo niveles de humedad en un promedio de 38% comparado con las condiciones estándar, donde la humedad promedio fue de 22%, lo cual se vio reflejado en el incremento del rendimiento del cultivo de un 44% más que el CC y 67% más que CE.

La cobertura del cultivo durante su ciclo vegetativo, juega un papel muy importante en los procesos de superficie, ya que el dosel de la planta protege el suelo de los impactos de las gotas de lluvia, almacenando agua y generando una barrera al escurrimiento, reduciendo así las tasas de escurrimiento y erosión, cuando se combina con un buen manejo del suelo.

VII. RECOMENDACIONES

- Evaluar el Sistema Integral en condiciones de campo.
- Evaluar la efectividad en diferentes tipos de suelo y condiciones topográficas.
- Evaluar los efectos en el tiempo sobre todo para entender la persistencia en el tiempo del laboreo vertical y la rugosidad geoméricamente ordenada.
- Realizar una evaluación económica del sistema para cultivos y regiones específicas.

VIII. REFERENCIAS

- Abdalla, Y. A., 2000. Development and evaluation of a ridger-planter implement. M.Sc. Thesis, Faculty of Agriculture, University of Khartoum.
- Ahuja, L., F. Fiedler, G. Dunn, J. Benjamin y A. Garrison. 1998. Changes in soil water retention curves due to tillage and natural reconsolidation. *Soil Science Society of America Journal* 62, 1228–1233.
- Aguado M. J. A. 2010. Pavimentos Permeables como Alternativa para el Manejo Sustentable de Aguas Pluviales en la Zona Metropolitana de Querétaro. Tesis de Maestría en Recursos Hídricos y Ambiental, Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro.
- Akbarnia, A., R. Alimardani and Baharloeyan Sh. 2010. Performance Comparison of Three Tillage Systems in Wheat Farms. *Australian Journal of Crop Science*. 4(8):586-589
- Akinci, I., E. Cakir, M. Topakci, M. Canakci, and O. Inan. 2004. The effect of subsoiling on soil resistance and cotton yield. *Soil & Tillage Research* 77:203-210
- Anaya, G. M. 1973. Captación in situ de Agua de Lluvia bajo Diferentes Tratamientos al Suelo para la Producción de Rábano. VI Congreso de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo.
- Andrieux, P., X. Louchart, M. Voltz, and T. Bourgeois. 1996. Déterminisme du Partage Infiltration-Ruissellement sur Parcelles de Vigne en Climat Méditerranéen. *BRGM* 256, 7-11.
- Arzhang, J. and H. Ali. 2006. Effect of a New Combined Implement for Reducing Secondary Tillage Operation. *International Journal of Agriculture and Biology*. 724–727.
- Ashburner, J. E. and B. G. Sims. 1984. Elementos de Diseño del Tractor y Herramientas de Labranza. San José, Costa Rica. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, número 56. ISBN 92-9039-058-1.
- Beasley, E. O. 1986. Minimum Tillage Planting Apparatus. United States Patent. 4 601 248
- Bengough, A.G., D. J. Campell and M. F. O'Sullivan. 2001. Penetrometer Techniques in Relation to Soil Compaction and Root Growth. In: K. A. Smith and C.E. Mullins, Editors, *Soil and Environmental Analysis* (2nd ed.), Marcel Dekker, New York, pp. 377–403.
- Bolívar, P. C. J. 2004. El agua: sus formas, efectos, abastecimientos, usos, daños, control y conservación. Segunda Edición. Bogotá. Eco Ediciones.

- Bresson, L. M. and J. Boiffin. 1999. Morphological Characterization of Soil Crust Development Stages on an Experimental Field. *Geoderma* 7, 301-325.
- Campbell, R. B., D. C. Reicosky and C. W. Doty. 1974. Physical Properties and Tillage of Paleudults in the Southeastern Coastal Plains. *J. Soil Water Conservation*. 29(5): 220–224.
- Campos, A. D. F. 2007. Estimación y Aprovechamiento del Esguerrimiento. Primera edición ISBN-970-95118-0-7.
- Carvajal, F., M. A. Aguilar, F. Agu F. J. Aguilar and J. V. Gira. 2006. Maximum Depression Storage and Surface Drainage Network in Uneven Agricultural Landforms. *Biosystems Engineering*. 95, 281-293.
- Casanova, E. O. 1991. Introducción a la Ciencia del Suelo. Facultad de Agronomía, UCV. C.D.C.H.T. Litopar, C.A.
- Centeno, A. and F. Gil. 1976. Algunas Ideas Acerca de las Prácticas de Labranza en Venezuela. Material de trabajo, UCV, Facultad de Agronomía, Maracay, Venezuela.
- Cooper, A. W., A. C. Trowse and W. T. Dumas. 1969. Controlled Traffic in Row Crop Production. In Proc. 7th Int. Congress of CIGR, 1–6. Baden–Baden, Germany: CIGR.
- Craciun, V., E. Nitescu, O. Balan and M. Magureanu. 2004. Combined Machines for Seedbed Preparation and Sowing, a Necessity for Applying Advanced Technologies in Crop Production. *Balkan Agricultural Engineering Review*. Vol. 6.
- Dawidowski, J. B., M. Worona and A. Hencel. 1988. The Determination of Plow Draft From Soil Penetration Resistance, Proceedings of the 11th International Conference on Soil Tillage Research Organization, vol. 2 Edinburgh, Scotland, pp. 457–462.
- De Alba, S., G. Benito and A. Pérez González. 1998. Erosión de Suelo en Episodios de Lluvia de Elevada Intensidad versus Episodios de Moderada y Baja Intensidad y Elevada Frecuencia, en Ambientes Semiáridos. Investigaciones recientes de la Geomorfología española. Barcelona. pp. 483-492. ISBN: 84-87779-33-6.
- Del Valle, J. M. and J. Del Val. 1990. Procesos de Erosión y Análisis de sus Condicionantes en una Region Semi-Arida: La Cuenca de Cornialito (Barderas, Navarra). *Cuaternario y Geomorfología*, 4. pp. 55-67.
- Desbiolles, J. s/f. Optimising seeding depth in the paddock. Agricultural Machinery Research and Design Centre. University of South Australia. (personal communication).
- Dexter, A. R. and M. A. Zoebisch. 2002. Critical Limits of Soil Properties and Irreversible Soil Degradation. In: R. Lal, Editor, *Encyclopedia of Soil Science*, Marcel Dekker, New York, pp. 272–276.

- Dixon, R. M. and J.R. Simanton. 1977. A Land Imprinter for Revegetation of Barren Land Areas Through Infiltration Control. *Acad. Sci. and Am. Water Resources Assoc.* 7, 79-88.
- D'Odorico, P. and A. Porporato. 2006. Ecohydrology of Arid and Semiarid Ecosystems: an introduction. In: D'Odorico, P., Porporato, A. (Eds.), Printed in the Netherlands. *Dryland Ecohydrology*. Springer, pp. 1–10.
- Dumas, W. T., A. C. Trowse, L. A. Smith, F. A. Kummer and W. R. Gill. 1973. Development and Evaluation of Tillage and Other Cultural Practices in a Controlled Traffic System for Cotton in the Southern Coastal Plains. *Trans. ASAE* 16(5): 872–876.
- Earl, R. 1997. Prediction of Trafficability and Workability from Soil Moisture Deficit. *Soil and Tillage Research* 40, 155–168.
- FAO, 1994. Aspectos Claves de las Estrategias para el Desarrollo Sostenible de las Tierras Áridas. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Viale delle Terme di Caracalla, Roma, Italia.
- FAO, 2000. Manual de Prácticas Integradas de Manejo y Conservación de Suelos. Boletín de tierras y aguas de la FAO. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. ISBN 92-5-304417-9.
- FAO, 2006. El estado Mundial de la Agricultura y la Alimentación, Subdirección de Políticas y Apoyo en Materia de Publicaciones Electrónica, Dirección de Información.
- FAO-UNESCO.1987. World Soil Classification.
- Foster, G. R. 1982. Modeling the Erosion Process, Workshop on Estimating Erosion and Sediment Yield on Rangelands. Tucson, Arizona. 297-380pp.
- Foster, G. R., R. A. Young, M. J. M. Romkens and C. A. Onstad. 1985. Processes of soil erosion by water. *Soil Erosion and crop productivity*. ISBN 08-911-80877, 137-162pp.
- Fuentes, F. and F. I. Wiesner. 2009. Adaptación de Equipo Mecánico Integral para las Labores de Cultivo de la Caña de Azúcar en el Ingenio San Carlos. Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción. Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- García, E. 1998. Carta de climas de la República Mexicana. Escala 1:1000 000 en tres colecciones de 16 hojas c/u de Temperatura, Precipitación y Climas. CONABIO, México.
- Garner, T. H., W. R. Reynolds, H. L. Musen, G. E. Miles, J. W. Davis, D. Wolf and U. M. Peiper. 1987. Energy Requirement for Subsoiling Coastal Plain Soils. *Trans. ASAE* 30(2): 343–349.

- Gil, P. Y., F. J. G. Gil, P. Silva, A. Centeno and R. Dávila. 1998. Efectos sobre las Propiedades Físicas del Suelo Debido al uso de Maquinaria para Labranza en Turén Estado de Portuguesa. Memorias, IV Congreso Internacional sobre el Medio Ambiente.
- González, C. F. and M. M. Martínez. 2008. Proyecto Estratégico de Apoyo a la Cadena Productiva de los Productores de Maíz y Frijol (PROMAF II).
- González, L. A, F. D. Nava, G. Villa, V. A. Campos. 2006. Análisis de Esfuerzos en un Apero de Tracción Animal, Empleando Métodos Experimentales y Numéricos. Ingenierías, Vol. IX, No. 33.
- Granada-Isaza, C. A. 2009. Evaluación de la Rugosidad Geométricamente Ordenada de la Superficie del Suelo, Bajo los Efectos de la Lluvia Utilizando Técnicas de Reconstrucción de Imágenes por Triangulación y Escaneo Láser. Tesis de Maestría en Recursos Hídricos y Ambiental, Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro.
- Granada-Isaza, C. A., J. L. Oropeza-Mota, E, Jr. Ventura-Ramos. 2011. Reinforcement of Soil Imprinting with Gypsum and Polyacrylamide to Control Water Erosion and Runoff. Terra Latinoamericana. Artículo aceptado para publicación.
- Guzha, A. C. 2004. Effects of Tillage on Soil Microrelief, Surface Depression Storage and Soil Water Storage. Soil and Tillage Research 76, 105–114.
- Hamza, M.A. and W.K. Anderson. 2005. Soil compaction in cropping systems. A review of nature, causes and possible solutions. Soil Tillage and Research 82:121-145
- Harden, J. W. B. and P. B. William. 1980. Soil Conditioning and Seed Bed Preparing Apparatus. United States Patent. 4 187 916
- Hernanz, M. J. L. and G. V. Sánchez. 1997. Utilización de la Energía en Diversos Sistemas de Laboreo. Agricultura de Conservación: Fundamentos Agronómicos, Medioambientales y Económicos". Asociación Española Agricultura de Conservación. Suelos Vivos (Ed.).
- Herrera, S. M. 2006. Simulación del Comportamiento Mecánico de los Suelos Ferralíticos Rojos Mediante el Método de Elementos Finitos. Tesis Doctoral. Universidad Agraria de la Habana. 52 pp.
- Hillel, D. 1998. Environmental Soil Physics. Academic Press.
- Holland J. M. 2004. The Environmental Consequences of Adopting Conservation Tillage in Europe: Reviewing the evidence. Agriculture, Ecosystems and Environment 103,1–25
- Jiménez, J., H. Puentes and y F. R. Leiva. 1992. Efectos de Tratamientos de Labranza sobre la Resistencia a la Penetración de un Andisol. Agronomía Colombiana. Vol. 9 No 1: 30-39.

- Jory, I. J. 2002. Standard Selection for Disc-ripper. ASAE Annual Meeting. 28-31 Julio 2002. Chicago. USA.
- Kailappan, R., N. C. Vijayaraghavan, K. P. Swaminathan and G. Muthan. 2001. Performance Evaluation of the Combination of Tillage Tools Under Field Conditions. *Journal of Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America* 32 (4), 9-12.
- Kosutic, S., D. Filipovic, Z. Gospodaric, S. Husnjak, I. Kovacev and K. Copec. 2005. Effects of Different Soil Tillage Systems on Yields of Maize, Winter Wheat and Soybean on Albic Luvisol in North-West Slovenia. *Journal of Central Eur. Agric.* 6:241–8.
- Lampurlanés, J. and C. C. Martínez. 2006. Hydraulic Conductivity, Residue Cover and Soil Surface Roughness Under Different Tillage Systems in Semiarid Conditions. *Soil and Tillage Research* 85, 13–26.
- Larson, W. 1964. Soil Parameters for Evaluating Tillage Needs and Operations. *Soil Science Society of America Proceedings* 28, 119–122.
- Léonard, J. and P. Andrieux. 1998. Infiltration Characteristics of Soils in Mediterranean Vineyards in Southern France. *Catena* 32, 209–223.
- Letey, J. 1985. Relationship Between Soil Physical Properties and Crop Procution. In: B.A. Stewart (Ed). *Advances in Soil Science*. Vol. 1. 277-294 pp.
- Leyva, O. S., S. L. R. Parra, L. A. Luna, R. O. Aguilera and P. O. Pupo. 2007. Máquina Combinada Para Laboreo Mínimo Localizado en Caña de Azúcar y otras Plantaciones en Hileras. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, Vol. 16, No. 2.
- Marshall, J. and J. W. Holmes. 1988. *Soil Physics*. Cambridge University Press: Cambridge.
- Martínez, G. M. A. and P. M. Walthall. 2000. Agentes Cementantes en el Encostramiento de la Superficie de Suelos de México y Louisiana, EU. *Terra Latinoamericana*. Vol 18, número 003, pp. 199-209
- Mayor, G. A., S. Bautista and J. Bellot. 2009. Factors and Interactions Controlling Infiltration, Runoff, and Soil Loss at the Microscale in a Patchy Mediterranean Semiarid Landscape. *Earth Surface Processes and Landforms*. 34(12):1702-1711
- Mellinger, P. B. 1980. Sub-Soil Planter. United States Patent. 4 241 674
- Meyer, L. D. 1981. How Intensity Effects Interrill Erosion. *American Society Agricultural Engineering*. 25:1472-1475.
- Mohamed, H. D., I. M. Hassan, D. A. Tarig and R. E. Haitham. 2007. A Combined Chisel–Ridger Implement for Economizing Power Under Heavy Clay Soils. Department of Agricultural Engineering. College of Agriculture, University of Khartoum.

- Morel, J. L., L. Habib, S. Plantureux and A. Guckert. 1991. Influence of Maize Root Mucilage on Soil Aggregate Stability. *Plant Soil*. 136:111–119.
- Mwendera, E., and J. Feyen. 1993. Predicting Tillage Effects on Infiltration. *Soil Science* 155, 229–235.
- Mwendera, E. and J. Feyen. 1994. Effects of Tillage and Rainfall on Soil Surface Roughness and Properties. *Soil Technology* 7, 99–103.
- Onstad, C A. 1984. Depressional Storage on Tilled Surfaces. *Trans. ASAE* 27:729-732.
- Patterson, J. 1977. Soil Compaction-Effects on Urban Vegetation. *J. Arboriculture* 3:161-167.
- Peterson, C. L., E. A. Dowding, K. N. Hawley and R. W. Harder. 1983. The Chisel-Planter Minimum Tillage System. *Transaction of ASAE*, 26(6) 1412- 1416.
- Pidgeon, J. D. 1982. Paraplow. A rational Approach to Soil Management. In *Proc. 9th Conf. Int. Soil Tillage Research. Org.*, 633–638. Osijek, Yugoslavia: ISTRO.
- Pidgeon, J. D. 1983. Paraplow. A new Approach to Soil Loosening. *ASAE Paper No. 832136*. St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Pikul, J. L. Jr., and J. Kristian Aase. 2003. Water Infiltration and Storage affected by Subsoiling and Subsequent Tillage. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67:859–866.
- Planchart, R. 2003. Labranza Vertical en una Agricultura Sostenible. *Fundación para la Investigación Agrícola. Boletín Informativo N° 2*.
- Porta, C., L. A. Reguerín, C. Roquero de Lamburu. 2003 *Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente*. Ed. Mundi-Prensa.
- Raper, R. L., A. C. Bailey, E. C. Burt, T. R. Way and P. Liberati. 1995a. Inflation Pressure and Dynamic Load Effects on Soil Deformation and Soil–tire Interface Stresses. *Trans. ASAE* 38(3): 685–689.
- Raper, R. L., A. C. Bailey, E. C. Burt, T. R. Way and P. Liberati. 1995b. The Effects of Reduced Inflation Pressure on Soil–tire Interface Stresses and Soil Strength. *J. Terra*. 32(1): 43–51.
- Raper, R. L., A. K. Sharma. 2004. Soil Moisture Effects on Energy Requirements and Soil Disruption of Subsoiling a Coastal Plain Soil. *American Society of Agricultural Engineers*. Vol. 47(6): 1899–1905.
- Reeves, D. W., H. H. Rogers, J. A. Droppers, S. A. Prior and J. B. Powell. 1992. Wheel traffic Effects on Corn as Influenced by Tillage System. *Soil Tillage Research*. 23(1–2): 177–192.

- Reicosky, D.C. 1997. Tillage Induced CO₂ Emission From Soil. Nutrient Cycling in Agroecosystems 49: 273–285.
- Reid, J. T. 1978. A Comparison of the Energy Input of Some Tillage Tools. ASAE Paper No. 781039. St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Rucks, L., F. García A. Kaplán J. Ponce de León and M. Hill. 2004. Propiedades Físicas del Suelo. Facultad de Agronomía Universidad de la República Dpto. Suelos y Aguas.
- Sánchez, V. H. 2004. Aspectos Físicos y Químicos del Suelo. Ciencia Ahora, N° 13. ISSN 0718 - 8293
- Schuller, P., D. E Walling, A. Sepulveda, A. Castillo, I. Pino. 2007. Changes in Soil Erosion Associated With the Shift From Conventional Tillage to a no Tillage System Documented Using 137 measurements. Soil and Tillage Research 94, 183-192
- Semarnat. 2009. Compendio de Estadísticas Ambientales 2009.
- Shaxson, F. y R. Barber. 2005. Optimización de la Humedad del Suelo para la Producción Vegetal. Capítulo 2. Boletín de Suelos de la FAO, número 79.
- Sheruden, B. J., M. Baloch, G. M. Rassol, A. M. Nawaz and A. Bhutto. 1981. Combination of Rotary Tiller and Pneumatic Seeder. Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America 12(4): 13-15.
- Shrinivasa, K. U., P. L. Kleber, G. S. Abilio and S. R. Narendra. 2001. One-pass Tillage Equipment Outstrips Conventional Tillage Method. California Agriculture, volume 55, number 5
- Sillon, J. F. 1999. Etude Expérimentale et Modélisation des Effets de la Structure de la Couche Labourée sur le Régime Hydrique du Sol nu en Phase de Dessèchement: Application à la Prévision des Jours Disponibles. PhD Thesis, Institut National Agronomique Paris-Grignon, Paris.
- Sivakumar, M. V. K. 2007. Interactions Between Climate and Desertification. Agricultural and Forest Meteorology 142, 143–155.
- Slaymaker, O. and T. Spencer. 1998. Physical Geography and Global Environmental Change. Addison Wesley Longman, New York.
- Tabatabaeefar, A., S. Norouzeih and G. Ghorbaninasar. 2005. Impact of Alleviation of Soil Compactness on Water use and Yield of Cotton. International Journal of Agriculture and Biology 7(6):885-888

- Taki, A. 2007. Design and Fabrication of Planting Machine Equipped with Rotary Disk Furrower for Directed Planting of Wheat in No-Tillage method. Res In Agric. Publication No:86/1367.
- Taylor, H. M. and L. F. Ratliff. 1969. Root Elongation Rates of Cotton and Peanuts as a Function of soil strength and soil water content, Soil Sci. 108 (2), pp. 113–119.
- UNCCD. 2004. Preserving Our Common Ground. UNCCD 10 years on. United Nations Convention to Combat Desertification. Bonn, Germany.
- Upadhyaya, S., K. P. Lancas, A. G. Santos-Filho and N. S. Raghuwanshi. 2001. One-pass Tillage Equipment Outstrips Conventional Tillage Method. California Agriculture. 55(5):44-47
- Van, Dijck S. 2000. Effects of Agricultural Land use on Surface Runoff and Erosion in a Mediterranean area. PhD Thesis. University of Utrecht.
- Ventura, E. Jr., J. A. Acosta-Gallegos, M. A. Domínguez and W. Keith. 2007. Captación de Agua de Lluvia.
- Ventura, E. Jr., M. A. Domínguez, L. D. Norton, K. Ward, M. López-Bautista and A. Tapiar-Naranjo. 2003. A New Reservoir Tillage System for Crop Production in Semiarid Areas. ASAE Paper No. 032315. St Joseph, Michigan.
- Villa, S.A. 1981. Los Desiertos de México. General Technical Report WO-28 Arid Land Resource Inventories: Developing Cost-Efficient Methods. An International Workshop November 30–December 6, 1980. México, La Paz, pp. 18–20.
- Wei, W., L. Chen, Z. Huang, D. Wu and L. Gui. 2007. The Effect of Land Uses and Rainfall Regimes on Runoff and Soil Erosion in the Semi-arid Loess Hilly Area, China. Journal of Hydrology. 335:247-258.
- William, M. R. and L. A. Mroginski. 1993. Cultivo de Tejidos en la Agricultura: Fundamentos y Aplicaciones. Centro Internacional de Agricultura Tropical. No. 51. L. A. ediciones.
- Wischmeier, W. H. and D. D. Smith. 1978. Predicting Rainfall Erosion Losses. A guide to Conservation Planning. U.S. Department of Agriculture. Agriculture Handbook N° 537. Washinton. USA.
- Zobeck, T. M. and C. A. Onstad. 1987. Tillage and Rainfall Effects on Random Roughness: a review. Soil Till. Res. 9: 1-20.
- Zumbahlen, V. J. 1977. Combined Apparatus for Tilling and Planting. United States Patent. 4 048 929