

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO**

**DIVISIÓN DE INGENIERA**

**DEPARTAMENTO DE MAQUINARIA AGRÍCOLA**



**CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA DEL SUELO Y SU RELACION CON LA  
LABRANZA, BIOFERTILIZACIÓN Y TIPO DE CULTIVO**

Por:

**Francisco Castro Herrera**

**TESIS**

Presentada como Requisito parcial para Obtener el Título de:

**INGENIERO MECÁNICO AGRÍCOLA**

**Saltillo, Coahuila, México**

Junio 2016

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO**

**DIVISIÓN DE INGENIERA**

**DEPARTAMENTO DE MAQUINARIA AGRÍCOLA**

**CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA DEL SUELO Y SU RELACION CON LA  
LABRANZA, BIOFERTILIZACIÓN Y TIPO DE CULTIVO**

Por:

**Francisco Castro Herrera**


**TESIS**

Que somete a consideración del H. Jurado examinador como requisito parcial para obtener el título de:

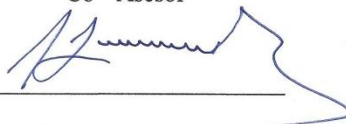
**INGENIERO MECÁNICO AGRÍCOLA**

Aprobada por el Comité de Tesis


Asesor principal

  
Dr. Martín Cadena Zapata

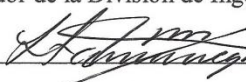
Co - Asesor

  
Dr. Alejandro Zermeno González

Co - Asesor

  
M.C. Aarón Isain Melendres Álvarez

Universidad Autónoma Agraria  
"ANTONIO NARRO"  
Coordinador de la División de Ingeniería

  
Dr. Luis Samaniego Moreno



Saltillo, Coahuila de Zaragoza, febrero 2016  
Coordinador de Ingeniería

## **DEDICATORIA**

### **A Dios:**

Agradezco a Dios por haberme permitido cumplir con éste gran sueño, el sacrificio fue grande pero tú siempre me distes la fuerza necesaria para continuar y lograrlo, por guiarme día a día en mi camino, otorgarme una familia maravillosa pues sin tu ayuda y la fe que tengo en ti no lo hubiera logrado, gracias señor por estar a mi lado te lo agradezco con todo mi corazón.

### **A mis padres:**

Juan Castro Rodríguez      Feliciano Herrera Hernández

Por estar ahí cuando más los necesite, gracias a ustedes lo he podido lograr, por su amor y cariño que siempre me han demostrado sabiendo que no existirá forma de agradecer una vida de sacrificio y esfuerzo, quiero que sepan que el objetivo logrado también es de ustedes y que la fuerza que me ayudo a conseguirlo fue su apoyo, gracias por ser el motor de mi vida.

### **A mis hermanos:**

Juan Carlos, Ricardo, Gabriel

Este triunfo lo comparto con ustedes por ayudarme cuando los he necesitado, quienes con su confianza, cariño y apoyo he llegado a realizar uno de los anhelos más grandes de mi vida culminar mi carrera profesional, la mejor de las herencias, gracias por confiar en mí y compartir esta etapa tan importante.

### **A mis primos:**

Gregorio y Guillermina

Por apoyarme en todo momento cuando se me presentaban problemas y por ser parte de mi familia, la ayuda que me han brindado ha sido sumamente importante les agradezco de corazón, mil gracias.

## **A mis sobrinos:**

Karla Aidee, Iraní Yamileth, Juanito

Gracias pequeños por brindarme mucha alegría y felicidad cada vez que estaba en mi casa y darme motivación para echarle muchas ganas y lograr mi objetivo.

## **AGRADECIMIENTOS**

*A Dios* por darme salud y fuerza para alcanzar esta meta en mi vida, bendecir mi camino en momentos complicados darme fortaleza en cada momento para no rendirme y seguir adelante, gracias señor por estar siempre a mi lado.

*A mis padres y hermanos* por el amor y apoyo moral que siempre he recibido de ustedes he culminado mi carrera profesional gracias por su confianza, la mejor de las herencias.

*A mi Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro*, por brindarme la oportunidad de estudiar estos años en los que curse mi licenciatura como Ingeniero Mecánico Agrícola. Orgullosamente buitre por siempre.

*Al Dr. Martin Cadena Zapata* por darme la oportunidad de participar en su proyecto de investigación y sobre todo darme la confianza para realizar esta tesis. Gracias por sus conocimientos.

*Al Dr. Alejandro Zermeño González* por todo el apoyo, paciencia y conocimientos que me ha brindado durante este proceso de tesis los cuales van hacer muy útiles para ejercer mi profesión le estoy muy agradecido. Gracias

*Al M.C. Aarón Isain Melendres Álvarez* por apoyarme para que este trabajo se realizara y resolver mis dudas durante la escritura de este documento, por su comprensión y paciencia y culminación del mismo. Gracias.

A los profesores, *M.C. Héctor Uriel Serna, M.C. Juan A. Guerrero Dr. Santos Gabriel Campos Magaña, M.C. Tomas Gaitán Muñiz, Ing. Juan Arredondo Valdez, M.C. Mario Alberto Méndez Dorado, Dr. Jesús Rodolfo Valenzuela García* entre otros profesores por sus conocimientos que me enseñaron y su experiencia para mi formación profesional.

*A mi novia Adriana Botello Frutos* por ser parte de mi vida, estar a mi lado en las buenas y las malas, por darme esa motivación día con día, te agradezco por estar conmigo todo este tiempo y siempre estaremos juntos, para toda la vida.

*A mis compañeros y amigos de la generación,* Jesús Magdiel, Edgar, Lázaro, Marcos, Rafa, Ronald, Alexander, Amado, Damián, Cantorio, Armindo por todo lo que convivimos juntos, su apoyo, confianza y sobre todo amistad durante estos años.

*A mi amigo Juan Manuel Rodríguez Delgado* por su amistad, apoyo y consejos durante el tiempo que le he conocido.

*A mis primos Laura Castro Rosales y Ricardo Eliel Pérez Castro* por ser como mis hermanos y apoyarnos siempre además por todo el tiempo que convivimos juntos

*A mis amigos y paisanos,* Edwin, Molina, Ginés, Rogelio, Edgar de Jesús, Jaqui, Maximiliano, Fausto, Obed, David, Luis, Mario, por sus amistad y convivencia.

*Agradezco al* M.C. Ariel Méndez Cifuentes, Ing. Bersain Vásquez López, la Ing. Martha del Ángel por su apoyo y conocimientos que me enseñaron durante la realización de mi tesis, también le agradezco por brindarme su amistad.

*A mis tíos* Leoncio, Valentín, Crescencio, Natividad, Magdalena, Amelia, Juana, gracias por motivarme cada vez que me venía a la escuela y darme buenos consejos.

## INDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA .....	I
AGRADECIMIENTOS .....	II
INDICE DE CONTENIDO .....	IV
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VI
INDICE DE CUADROS .....	VII
I. INTRODUCCION .....	1
II. OBJETIVO .....	3
III. HIPOTES .....	3
IV. REVISION DE LITERATURA .....	4
4.1 Sistemas de labranza .....	4
4.2 Labranza de convencional .....	4
4.3 Labranza cero.....	5
4.4 Labranza vertical.....	6
4.5 Rotación de cultivos.....	6
4.6 Conductividad hidráulica.....	7
4.7 Métodos para determinar conductividad hidráulica.....	8
4.7.1 Determinación de la conductividad hidráulica en laboratorio .....	10
4.7.2 Método de campo para determinar la conductividad hidráulica.....	14
4.8 Prácticas de manejo y la importancia de la labranza en la conductividad hidráulica ...	22
4.9 Investigaciones realizadas de la conductividad hidráulica en diferentes tipos de suelo y labranzas .....	23
V. MATERIALES Y METODOS .....	24
5.1 Localización geográfica .....	24
5.2 Caracterización inicial del sitio experimental.....	25
5.3 Determinación de la Conductividad hidráulica .....	26
5.4 Descripción del permeámetro de Guelph.....	26
5.4.1 Procedimiento llevado a cabo para medir la conductividad hidráulica in situ en el campo experimental.....	28

5.4.2 El permeámetro Guelph pozo de carga constante.....	32
VI. RESULTADOS Y DISCUSION .....	36
6.1 Conductividad hidráulica del suelo después de la cosecha del cultivo frijol.....	37
6.2 Conductividad hidráulica del suelo saturado después de la cosecha de un cultivo Maíz...	40
VII. CONCLUSION.....	44
VIII.LITERATURA CITADA .....	45

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Labranza convencional.....	5
Figura 2. Representación esquemática de un permeámetro de cabeza constante .....	10
Figura 3. Permeámetro de carga variable (Hartmann, 2000).....	12
Figura 10. Ubicación geográfica del sitio experimental .....	24
Figura 11. Distribución del terreno experimental .....	25
Figura 12. Permeámetro Guelph 2800K1 .....	26
Figura 13. Montaje del Trípode .....	28
Figura 15. Permeámetro armado y ensamblado.....	29
Figura 16. Llenado del Permeámetro.....	30
Figura 17. Verificación del permeámetro .....	31
Figura 18. Formato para el registro de datos .....	32
Figura 19. Permeámetro Guelph (Elrick y Reynolds, 1992) .....	33
Figura 20. Escala del factor C en función de h/a (Reynolds y Elrick, 1987). .....	35
Figura 21. Conductividad hidráulica del suelo a saturación (K) después de la cosecha del cultivo de frijol con y sin aplicación del mejorador de suelo. ....	39
Figura 22. Interacción de tres sistemas de labranza (labranza convencional, labranza de conservación, labranza vertical) con y sin la aplicación de un mejorador de suelo. En un cultivo de frijol.....	40
Figura 23. Conductividad hidráulica del suelo a saturación (mm/h) después de la cosecha del cultivo de frijol con y sin la aplicación del mejorador de suelo. ....	42
Figura 24. Interacción de tres sistemas de labranza (Labranza convencional, labranza de conservación, labranza vertical) con la aplicación de mejorador (con mejorador, sin mejorador o testigo) en un cultivo de maíz.....	43



## INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Clases de conductividad hidráulica del suelo saturado (tomadas de SSDS 1993).....	8
Cuadro 2. Valores de conductividad saturada para diferentes texturas de suelos .....	13
Cuadro 3. Categorías de medios usados para la estimación de $\alpha^*$ (Elrick et al., 1989) .....	21
Cuadro 4. Valores de conductividad hidráulica saturada para diferentes texturas del suelos. .	36
Cuadro 5. Valores de conductividad hidráulica (K) en cada parcela y tipo de cultivo. ....	37
Cuadro 6. Valores promedio de la conductividad hidráulica a saturación del suelo (K) en tres sistemas de labranza, después de la cosecha de un cultivo frijol.....	38
Cuadro 7. Conductividad hidráulica promedio del suelo en tres sistemas de labranza después de la cosecha de un cultivo de maíz.....	41

## RESUMEN

Con el objetivo de determinar el efecto de labranzas y biofertilización en la conductividad hidráulica del suelo. Se realizó el estudio en el campo experimental denominado El Bajío en la parcela “El Pedregal”, ubicado en las instalaciones de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), la cual se encuentra ubicada 100° 59' 57" de longitud Oeste, 25° 23' 42" de latitud Norte y una altitud de 1743 metros sobre el nivel del mar. Se evaluó durante el periodo primavera verano 2014 lo cual se estableció bajo un diseño factorial con arreglo en parcelas divididas en bloques completamente al azar, siendo tres sistemas de labranza: labranza convencional (LC), labranza vertical (LV) y labranza cero (NL) y dos mejoradores: Algaenzimas (M1) y Testigo (M0) sobre nueve parcelas con dimensiones de 40 metros de largo por 12 metros de ancho y divididas en dos sub-parcelas de 20 metros de largo por 12 metros de ancho, aplicando dosis de 1 L Ha<sup>-1</sup> de Algaenzima en los cultivos de frijol y maíz. Se realizaron 18 mediciones en cada cultivo utilizando el permeámetro de Guelph en un suelo que presenta una textura franco-arcillosa a dos cargas hidráulicas 5 y 10 cm sobre los tres sistemas de labranza estudiados, a una profundidad de 20 cm, las mediciones se realizaron después de la cosecha. Los resultados obtenidos mostraron que la conductividad hidráulica a saturación del suelo fue mayor en el sistema labranza cero con un valor de 7.585 mm h<sup>-1</sup> en frijol, con respecto al maíz fue mayor en el sistema labranza convencional con un valor de 5.013 mm h<sup>-1</sup> pero sin mostrar diferencia significativa con la cero labranza la cual presentó un valor de 3.872 mm h<sup>-1</sup>, el sistema labranza vertical presenta mayor diferencia a los demás sistemas estudiados y cultivo. En cuanto a mejorador de suelo se obtuvo en el frijol un valor de 5.237 mm h<sup>-1</sup> en Testigo y 3.142 mm h<sup>-1</sup> en Algaenzimas, para el maíz un valor de 5.605 mm h<sup>-1</sup> en (M0) y 2.688 mm/h<sup>-1</sup> en (M1). Por lo tanto la aplicación del mejorador disminuyó la conductividad hidráulica del suelo.

Correo electrónico; Francisco Castro Herrera, [fran\\_cat93@hotmail.com](mailto:fran_cat93@hotmail.com)

**Palabras clave:** *Sistemas de labranza, conductividad hidráulica, permeámetro de Guelph, biofertilización*

## I. INTRODUCCION

Actualmente la superficie cultivada del mundo se ha incrementado un 12 % en los últimos 50 años, la agricultura utiliza ya el 11 % de la superficie mundial de tierras para la producción agrícola también hace uso del 70 % de toda el agua extraída de acuíferos, corrientes fluviales y lagos. Los recursos de tierras y aguas y la forma en que se utilizan son fundamentales para mejorar la seguridad alimentaria en todo el mundo (FAO 2015; Tilman *et al.*, 2002)

La agricultura de conservación (AC) está ganando aceptación en todo el mundo debido a sus enfoques sostenibles como la cobertura permanente del suelo y su mínima alteración, de igual forma la rotación de cultivos planificados provee mejor distribución de agua, nutrientes y materia orgánica sobre el suelo (Bajwa, 2014).

La labranza es una práctica que consiste comúnmente en la inversión y mullimiento de la capa superficial del suelo (15-30 cm) a través de araduras y rastrajes. Los sistemas de labranza ejercen efectos diferenciales en el rendimiento de los cultivos y en las características físicas, químicas e hidráulicas de los suelos. Los sistemas conservacionistas tienen ventajas sobre los convencionales, puesto que no degradan las propiedades físicas y químicas del suelo y reduce la evaporación del agua de los estratos del suelo superior (Uribe y Rouanet, 2002; Venialgo *et al.* 2002; Camacho y Rodríguez, 2007; Oliveira *et al.* 2005).

El efecto de la labranza y tráfico de maquinaria pueden afectar la aglomeración de las partículas del suelo, lo que puede afectar la proporción y distribución de los micro y macro poros del suelo. Esto a su vez tiene efecto en la infiltración y distribución del agua en el suelo, lo que puede afectar la conductividad hidráulica del suelo (Hillel, 2004; Sasal, 2006)

La conductividad hidráulica saturada ( $K_s$ ) es una propiedad del suelo que afecta el flujo y transporte de solutos disueltos en la solución del suelo Jiang y Shao (2014).

López-Santos *et al.*, 2012 mencionan que el efecto de la labranza primaria sobre un suelo arcilloso produce cambios importantes en la conductividad hidráulica y características del sistema poroso. Indicando que el movimiento del agua en el suelo está estrechamente relacionado con la porosidad del suelo.

En un estudio realizado por Espinoza *et al.*, (2007) con dos sistemas de labranza, labranza convencional (LC) y labranza cero (CL) ambas con rotación de cultivo, obtuvieron que estas labranzas pueden modificar el contenido materia orgánica del suelo. Los residuos de cosecha sobre la superficie del suelo, promovidos por los tratamientos de labranza de conservación, mejoraron las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, respecto al tratamiento de labranza tradicional de barbecho (Salinas *et al.* 2005).

La fertilización biológica (biofertilización) es una alternativa viable para mejorar las condiciones de los campos mexicanos y para todo el mundo, no contaminan el suelo y la atmósfera, ayudan a producir alimentos sanos. La aplicación de biofertilizantes mejora las propiedades físicas, la actividad biológica y la fertilidad de los suelos (Aларcon y Cerrato, 2012: Herencia *et al.* 2008).

La rotación o asociación de leguminosas y gramíneas o la mezcla de ambas incrementan el contenido de materia orgánica del suelo mejorando la porosidad, equilibrio entre macro y microporos y por consecuencia la aeración e infiltración del agua (Roncallo *et al.* 2012: Murillo *et al.* 2014).

## **II. OBJETIVO**

Determinar el efecto de tres tipos de labranza, aplicación de un biofertilizante y dos tipos de cultivo en la conductividad hidráulica del suelo saturado.

## **III. HIPOTES**

La conductividad hidráulica del suelo saturado es mayor bajo cero labranza que bajo labranza vertical y convencional. También es mayor con aplicación de un biofertilizante y después de la cosecha de un cultivo de frijol que la de uno de maíz.

## **IV. REVISION DE LITERATURA**

### **4.1 Sistemas de labranza**

La labranza es la manipulación mecánica del suelo con el objetivo de reducir o eliminar algún impedimento físico para el desarrollo del cultivo. Las operaciones de labranza pueden ser buenas o malas dependiendo cuándo y cómo se realicen, es decir, cuando un suelo se ha deteriorado en sus características físicas; está compactado y los cultivos no se desarrollan, quizás es necesario ayudar a recuperar esas características físicas pasando implementos que básicamente rompen el suelo y en algunos casos lo voltean, para así permitir la entrada y almacenamiento de agua, aire, fertilizantes y abonos, con la finalidad de que la semilla germine y la planta se desarrolle (Romero, 2002).

La labranza del suelo es de gran importancia puesto que altera las propiedades físicas del suelo y directa e indirectamente las propiedades químicas y biológicas. Estos cambios deben favorecer la producción de los cultivos y mantener la calidad del suelo, pero debido al uso inadecuado de los implementos de labranza se provoca la degradación de éste (Camacho y Rodríguez, 2007).

Jaramillo (2002) menciona que el laboreo del suelo, labranza o mecanización son todas aquellas prácticas de manejo del suelo o del cultivo o explotación que tenga el mismo, que se llevan a cabo con maquinaria o por tracción animal desplazándose sobre él.

### **4.2 Labranza de convencional**

Esta práctica deja al descubierto el suelo por un largo período de días antes de que la cobertura del suelo se desarrolle, donde los suelos desnudos pueden ser objeto de erosión provocada principalmente por lluvias frecuentes (Schuller *et al.*, 2007).

En la agricultura convencional, la remoción del suelo con la labranza es considerada una de las operaciones más importantes para crear una estructura favorable del suelo, preparar el lecho de las semillas y controlar las malezas. Pero los implementos mecánicos, especialmente aquellos

arrastrados por tractores (Figura 1) destruyen la estructura del suelo al reducir el tamaño de los agregados; actualmente, los métodos de labranza convencional son la mayor causa de pérdida del suelo y de desertificación en muchos países en desarrollo (FAO, 2001).



**Figura 1.** Labranza convencional

### **4.3 Labranza cero**

La cero labranza es una opción importante para el control de la erosión y prevenir la compactación del suelo ya que reduce grandemente la incidencia del contacto del metal con el suelo. Esta práctica es aquella actividad en la cual las semillas son enterradas dentro del suelo con la menor alteración posible (Benites y Bot, 2013).

Galantini y Kleine (2013), mencionan que la cero labranza es una forma de cultivar sin arar, no se perturba el suelo, lo cual favorece a la conservación del agua en suelo también se reduce la incidencia de plagas, malezas y enfermedades.

En este tipo de labranza el ahorro de combustibles es de hasta un 80% del usado para el establecimiento de cultivos comerciales. En esta práctica al igual se tiene un mayor ahorro de tiempo en comparación de la preparación con la labranza convencional principalmente en los periodos de barbecho. Existen varias ventajas como lo es el incremento de materia orgánica,

mejor infiltración, prevención de la erosión del suelo, conservación de la humedad, mejor aireación, preservación de la fauna del suelo y disminución de la necesidad de riego, Baker y Saxton (2008).

#### **4.4 Labranza vertical**

La labranza vertical se refiere a un sistema donde toda la tierra está preparada con implementos que no invierten el suelo y causan poca compactación. Por lo tanto, el suelo queda normalmente con una buena cobertura de rastrojos del cultivo anterior de más de 30% sobre la superficie. Esta cobertura de rastrojos también impide la formación de costras superficiales que pueden provocar una baja emergencia en los cultivos, FAO (2000).

El sistema de manejo de suelo con labranza vertical busca alterar al mínimo la condición del mismo, con el objetivo de reducir los gastos de energía y conservar humedad y disminuir la erosión del suelo y reducir la compactación generada por la maquinaria agrícola (Riquelme, 2004).

#### **4.5 Rotación de cultivos**

Una rotación de cultivos tiene como objetivo el desarrollo de sistemas de producción diversificados que aseguren la sostenibilidad del suelo promoviendo cultivos que se alternen año con año, en una sucesión recurrente y sistemática en el mismo terreno para que mantengan la fertilidad del suelo y reduzcan los niveles de erosión. Incrementar los rendimientos de los cultivos en relación con los monocultivos, en esta práctica mejora el drenaje, la aireación del suelo, el tamaño y la estabilidad de los agregados del suelo (SAGARPA 2014).

La rotación de cultivos de gramíneas y leguminosas es una alternativa promisoriosa, ya que las leguminosas proveen Nitrógeno adicional al sistema y mejoran la calidad del suelo mediante el aumento de residuos orgánicos, favoreciendo el almacenamiento de agua en el perfil y la capacidad de infiltración y reduciendo la escorrentía y la erosión (Stanger y Laurer, 2008). Adicionalmente la rotación de cultivos en el largo plazo, combinada con un apropiado manejo



de la labranza, mejora las condiciones generales del suelo e incrementa los rendimientos de cultivos (Friesen *et al.*, 1997).

Altieri (1999) señala, que la rotación de cultivos es un sistema en el cual éstos se siembran en una sucesión reiterativa y en una secuencia determinada sobre un mismo terreno. Algunas pruebas indican que este sistema influye en la producción de las plantas, afectando la fertilidad, la erosión, la microbiología y las propiedades físicas del suelo. Las rotaciones son el medio primario para mantener la fertilidad del suelo y lograr el control de malezas, plagas y enfermedades en los sistemas agrícolas orgánicos.

#### **4.6 Conductividad hidráulica**

La conductividad hidráulica ( $k$ ) es la propiedad del suelo que describe la facilidad con la cual los poros del suelo permiten el flujo de agua. Cuando el suelo se satura, todos los poros pueden dirigir el agua y la conductibilidad está en su máxima expresión y es representada como  $K_s$ , mientras que en condiciones insaturadas o no saturadas es representada como  $K_q$ . En cualquier caso, depende del tamaño, número, orientación, distribución y continuidad de los poros especialmente los de retención, el tamaño de las partículas, tipo de fluido, cantidad relativa de fluido presente en la matriz del suelo (Reichardt y Timm, 2004). Es un parámetro dependiente de la humedad del suelo ( $\theta$ ). Por lo tanto, para un determinado medio poroso se define una función  $K(\theta)$  y todos los métodos para la determinación de la conductividad involucran la medición de la humedad del suelo (Calvache, 2005).

La conductividad hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ), debido a su importancia en la capacidad de transporte de agua, solutos y sustancias químicas en el suelo, debe ser bien caracterizada, pues a partir de esta y utilizando modelos matemáticos se puede determinar la conductividad hidráulica del suelo ( $K$ ) y así obtener información sobre el movimiento de agua y solutos. La conductividad a saturación ( $K_{sat}$ ) puede también proveer información indirecta sobre las propiedades físicas del suelo como la densidad, textura y porosidad (Mesquita y Moraes, 2005).

El Cuadro 1. Muestra los rangos de conductividad hidráulica de acuerdo al Soil Survey Division Staff ((SSDS, 1993).

**Cuadro 1.** Clases de conductividad hidráulica del suelo saturado (tomadas de SSDS 1993).

<b>RANGO DE LOS VALORES DE Ksat</b>			
<b>CLASE</b>	<b>um S<sup>-1</sup></b>	<b>Cm h<sup>-1</sup></b>	<b>m día<sup>-1</sup></b>
Muy alta	>100	>36	>864
Alta	10-100	3.6- 36	86.4-864
Moderadamente alta	1-10	0.36-3.6	8.64-86.4
Moderadamente baja	0.1-1	0.036-0.36	0.864-8.64
Baja	0.01-0.1	0.0036-0.036	0.0864-0.864
Muy baja	<0.01	<0.0036	<0.0864

#### 4.7 Métodos para determinar conductividad hidráulica

La medición de la conductividad hidráulica por cualquier método produce un valor equivalente para cada patrón particular de flujo producido en un suelo uniforme por las condiciones de frontera del método utilizado. Este valor será diferente para cada condición de frontera si los suelos varían espacialmente (Youngs, 2001).

Gabriels *et al.* (2011) enfatiza que la conductividad hidráulica es una propiedad clave en la descripción de los procesos de infiltración y redistribución de agua en el suelo, los métodos que se utilizan para determinarla son muchos y muy variados estos se agrupan de la siguiente manera:

a) Métodos de laboratorio

En este caso, se realiza mediante la utilización de permeámetros para muestras alteradas y para muestras inalteradas.

b) métodos de campo

En este grupo se puede dividir en dos:

1. Métodos que se realizan en presencia de nivel freático: se incluyen los elementos como piezómetro, dos, cuatro y multi-pozos, tubo, agujero de barreno, descarga de pozos y descarga de drenes.
2. Métodos que se realizan en ausencia de nivel freático: se incluyen los elementos tales como infiltrometro, permeámetro de inclusión, de cilindro, inyección de pozos someros, gradiente de infiltración y doble tubo.

c) Métodos indirectos

Se realizan a través de la evaluación de la textura, composición granular y distribución del tamaño del poro.

De todos los métodos enumerados, la selección del método e instrumento para medir la conductividad hidráulica va a depender del propósito de la medición y objetivo que se persigue, de la precisión requerida en los resultados, de los materiales y equipo disponible, y del tipo de suelo donde se realiza la prueba.

Para una predicción del movimiento de agua en el suelo se requiere una medición cuidadosa de los parámetros hidráulicos del suelo. Los métodos de laboratorio y los indirectos tienen la particularidad de medir la conductividad hidráulica en cualquier dirección. Los métodos que se realizan en campo se pueden agrupar en superficiales y subterráneos. Dentro del primer grupo aparece el método del infiltrometro y del permeámetro de inclusión que miden principalmente la conductividad hidráulica en dirección vertical. Dentro del segundo grupo se encuentran los métodos que se realizan con presencia o ausencia de nivel freático. A excepción del piezómetro que mide la conductividad hidráulica en ambas direcciones, los métodos que se realizan en presencia de nivel freático, en su mayoría lo hacen en dirección horizontal, mientras que aquellos que no requieren presencia de nivel freático, lo hacen en dirección vertical, exceptuando el método de inyección de pozos someros.

Uno de los métodos más sencillos, es el utilizado para determinar la velocidad de infiltración básica de campo, mediante el uso de cilindros y fundamentado en el hecho de que en un medio homogéneo la velocidad de penetración del agua es rápida al principio, para luego

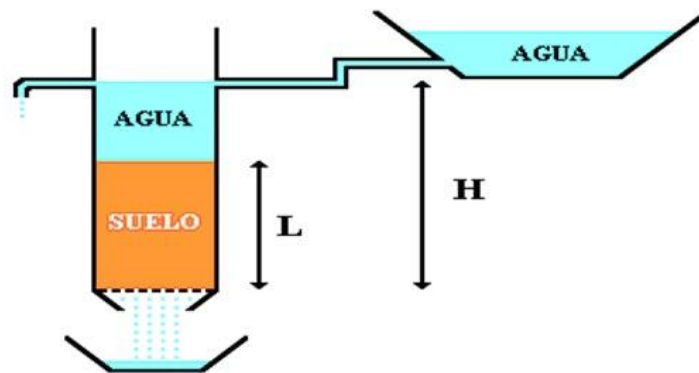
estabilizarse en un valor aproximadamente constante, que viene a corresponder a la conductividad hidráulica ( $K$ ).

#### 4.7.1 Determinación de la conductividad hidráulica en laboratorio

Los métodos de laboratorio para medir la conductividad hidráulica han estado disponible desde los primeros experimentos de Henri Darcy en 1856 (Stephens, 1996), los cuales generalmente utilizan muestras cilíndricas no alterados o cilindros de suelo empacados. Para medir la conductividad hidráulica en el laboratorio se utilizan aparatos llamados permeámetros tanto de carga constante como de carga variable (Reynolds *et al.*, 2002).

##### 4.7.1.1 Carga constante de agua

La conductividad hidráulica del suelo se determina en laboratorio, midiendo el tiempo que tarda en pasar un volumen determinado de agua a través de una columna, para hacer esta prueba se utilizan los permeámetros, los cuales pueden ser de carga constante (el más común; ver representación en la figura 2) y de carga variable (especial para suelos de baja permeabilidad) (Motta *et al.*, 1990).



**Figura 2.** Representación esquemática de un permeámetro de cabeza constante

Para llevar a cabo la determinación, lo más recomendable es tomar muestras, sin disturbar, en sentido vertical y replicadas por lo menos 4 veces; pueden fabricarse los cilindros con tubería de PVC o de metal, según la dureza del suelo, de 20 a 30 cm de altura y de 10 a 12 cm de diámetro; se les debe biselar uno de los bordes para facilitar su penetración en el suelo; a unos 4 o 5cm del borde no biselado hacer dos perforaciones enfrentadas, pegando en ellas un tubito al cual se puedan adherir sendas mangueras, una para entrada y la otra para salida de agua para poder mantener el nivel de agua constante; luego, los procedimientos a seguir son:

- Tomar las muestras en campo con cilindros que no las disturben, hasta la altura deseada.
- En la parte inferior del cilindro se coloca una malla fina y se pone a saturar la muestra.
- Se coloca el cilindro con el suelo saturado en un soporte; debajo del cilindro se coloca un recipiente graduado para recoger el agua y se empieza a adicionar ésta hasta que se alcance el nivel constante; observar el caudal que se está aplicando para no sobrepasar el nivel que proveen los orificios en el cilindro.
- Cuando se alcance el nivel constante, se empieza a contabilizar el tiempo; a ciertos intervalos de tiempo, se anota el volumen de agua que se ha recogido, estas observaciones se hacen hasta que la velocidad de paso del agua a través de la columna de suelo sea más o menos constante.
- Al finalizar las observaciones anteriores, se calcula la conductividad hidráulica mediante la Formula siguiente (Motta *et al.*, 1990).

$$K_{sat} = \frac{V}{tA} \times \frac{L}{H}$$

*Donde:*

*K<sub>sat</sub>: Conductividad hidráulica saturada (cm h<sup>-1</sup>)*

*V: Volumen total de agua que pasó a través del cilindro (cm<sup>3</sup>)*

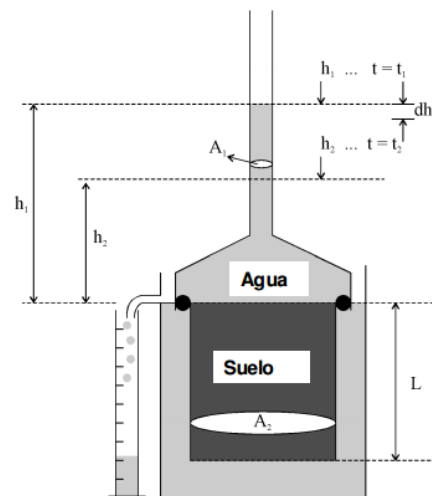
*t: Tiempo total empleado en la prueba (min)*

*A: Área transversal interna del cilindro ( $\text{cm}^2$ )*  
*L: Longitud de la columna de suelo (cm)*  
*H: Longitud de la columna de agua (cm)*

#### 4.7.1.2 Carga variable de agua

El permeámetro de carga variable es similar al de carga constante, excepto que en lugar de mantener una carga constante de agua sobre la superficie de la muestra de suelo no se agrega más agua y al cambiar el nivel de la carga de agua se observa como percola el agua a través de la muestra.

Los cilindros de suelo previamente preparados se humedecen desde la parte inferior hasta alcanzar la saturación. Se toman dos lecturas sucesivas en un mismo descenso del nivel del agua en la bureta para iguales intervalos de tiempo, luego se aplica agua con la bureta y se anota el tiempo y el nivel del agua sobre en punto de salida después de percolarse ( $h_0$ ), cuando se observe un descenso en el nivel de 40- 50cm o a las 24 h debe anotarse el nivel del agua sobre el punto de desagüe ( $h$ ). Se toma el volumen percolado y el tiempo transcurrido. Cada pequeño descenso en la altura de la columna de agua por unidad de tiempo representa un flujo de la misma cantidad de agua por unidad de área por unidad de tiempo a través de la columna (Figura 3).



**Figura 3.** Permeámetro de carga variable (Hartmann, 2000)

La conductividad hidráulica saturada con carga variable puede ser calculada usando la siguiente expresión:

$$KS = \frac{A1}{A2} + \frac{L}{t2 - t1} \ln \left( \frac{h1}{h2} \right)$$

Donde:

$Ks$  = conductividad hidráulica ( $L T^2$ )

$L$  = longitud de la columna de suelo ( $L$ )

$A1$  = área de la sección transversal del tubo por encima del suelo ( $L^2$ )

$A2$  = área de la sección transversal del suelo ( $L^2$ )

$t$  = intervalo de tiempo ( $T$ )

$h0$  = nivel inicial del agua sobre el punto de salida del agua percolada ( $cm$ )

$h$  = nivel final desagua sobre el punto de salida del agua percolada ( $cm$ )

Como referencia se presentan valores de conductividad hidráulica saturada (Cuadro 2) para diferentes texturas (Clapp y Homberger, 1978).

**Cuadro 2.** Valores de conductividad saturada para diferentes texturas de suelos

Textura	$Ks$ ( $m d^{-1}$ )	$Ks$ ( $cm h^{-1}$ )
Arenosa	15	62.5
Areno franca	13.5	56.3
Franco arenosa	3.0	12.5
Franco limosa	0.6	2.5
Franca	0.6	2.5
Franco arcillo arenosa	0.54	2.3
Franco arcillo limosa	0.15	0.6
Franco arcillosa	0.21	0.9
Arcilla arenoso	0.19	0.8
Arcillo limosa	0.09	0.4
Arcillosa	0.11	0.5

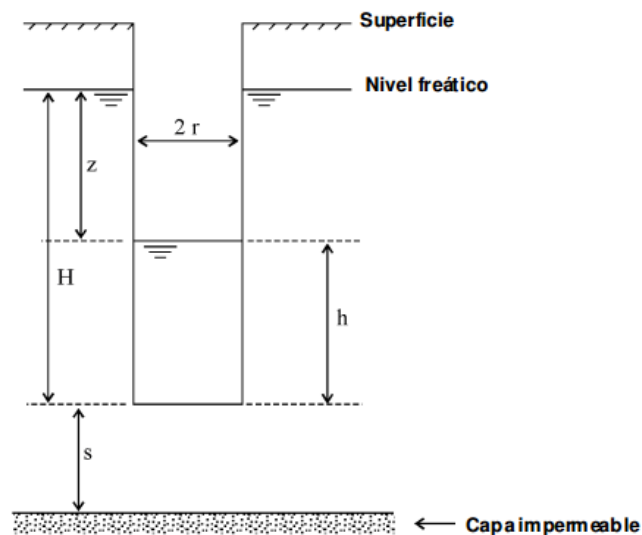
## 4.7.2 Método de campo para determinar la conductividad hidráulica

Los métodos de campo permiten medir la conductividad hidráulica de un suelo en forma directa, mediante experiencias que contemplan la excavación de pozos superficiales, en los cuales se efectúan pruebas de agotamiento y recuperación, el uso de pruebas de infiltración, o a través de medidas de velocidad. En algunos casos es posible obtener una medida de la conductividad hidráulica del suelo, mientras que en otros se obtiene la tasa de infiltración básica, la que se relaciona directamente con la conductividad hidráulica. La conductividad hidráulica puede medirse en la zona saturada y en la zona no saturada (Reynolds *et al.*, 2002).

### 4.7.2.1 Zona saturada

#### 4.7.2.1.1 Método del pozo

Consiste en realizar un pozo cilíndrico en el suelo a cierta profundidad de 10 a 20 cm de diámetro por debajo del nivel freático, una vez que el agua del pozo ha alcanzado el mismo nivel que la capa freática circundante, se baja entonces sacando el agua mediante bombeo y se mide la tasa de ascenso del agua dentro del agujero hasta alcanzar el nivel de equilibrio (Figura 4).





**Figura 4.** Método del pozo (Hartmann, 2000; Van Beers, 1958, Reynolds *et al.*, 2002)

La conductividad hidráulica puede ser calculada usando la fórmula:

$$Ks = c \frac{\Delta z}{\Delta t}$$

$$c = c(r/H, s/H, z/H)$$

*Donde:*

*Ks = conductividad hidráulica ( $L t^{-1}$ )*

*Z = altura del agua en el hueco por debajo del horizonte de agua en tiempo t (L)*

*Dz/Dt = tasa de ascenso del agua en el hueco ( $L t^{-1}$ )*

*C = factor de geometría que depende del radio r del agujero o pozo, la profundidad de la capa impermeable o infinitamente permeable por debajo del fondo del agujero (s), y la profundidad (z), todos medidos en relación a la profundidad (H) del agua en el pozo en equilibrio con el nivel freático (H/r, s/H, z/H)*

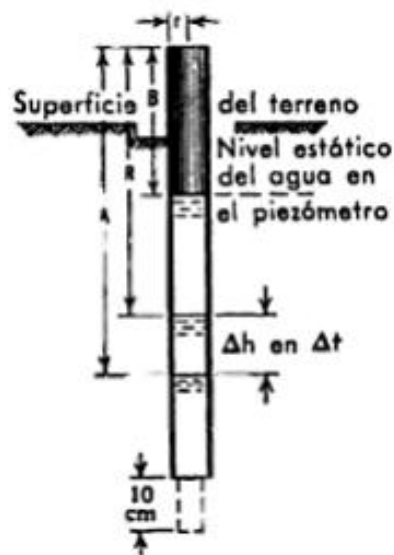
*H = Profundidad del pozo por debajo del nivel freático en equilibrio (L)*

#### **4.7.2.1.2 Método del piezómetro**

El método del piezómetro (figura 5) se emplea para calcular la conductividad hidráulica de un estrato dado o de una porción del perfil del suelo (la CH depende de las propiedades del agua del terreno, así como del perfil del suelo). Se hace un taladro en el terreno, que posteriormente se entuba, excepto una pequeña cavidad en el extremo inferior. La velocidad de entrada del agua en esa cavidad da una medida de la conductividad hidráulica del suelo que la rodea.

Instrucciones: se emplea una barrena de espiral, con un extremo cuadrado. Un tubo de conducción eléctrica de 3.8 a 5.1 cm de diámetro inferior, afilado por un extremo, puede ser utilizado como piezómetro. El taladro producido por la barrena es de diámetro inferior en 0.2 cm al diámetro inferior del piezómetro. Para evitar que el piezómetro se estropee al golpearlo, es preciso colocarle en su extremo superior un remache. Un instrumento eléctrico que mueva una campanilla puede ser utilizado para medir el nivel de agua. Para retirar el piezómetro puede emplearse un gato.

Método: se perfora un taladro de unos 15 cm de profundidad. Se introduce el piezómetro dentro del taladro unos 13 cm, por medio de golpes ligeros. De nuevo se barrana el suelo otros 15 cm más abajo del piezómetro. Este proceso continua hasta que el piezómetro ha alcanzado la profundidad deseada. En el extremo del piezómetro se deja una cavidad de 10 cm que se barrana con cuidado. Marcando la barrana debidamente se puede llegar a esa profundidad con precisión. Hay que retirar la barrana con cuidado para evitar que en la cavidad se produzcan desplazamientos. Se puede emplear una sonda hueca o un pequeño tubo al final de la sonda para permitir que el aire rompa la succión e impedir el enfangado de la cavidad. El piezómetro es bombeado o achicado con una bomba de engranajes o un achicador, para permitir que en los poros de la cavidad se provoque un flujo. Se inunda el piezómetro tantas veces hasta que la altura de elevación en el piezómetro sea la misma que la del bombeo anterior.



**Figura 5.** Perfil del piezómetro

Prueba: el agua se hace descender en el piezómetro a una distancia que depende de la tendencia al encharcamiento del perfil. El agua se nivela y los tiempos de las observaciones son registrados y utilizados en la fórmula de Kirkham, que sirve para calcular la conductividad hidráulica (Wiley y Sons, 1985).

$$CH = 337 * \frac{r^2}{c} * \frac{\Delta h}{\Delta t} * \frac{1}{A + R - 2B}$$

Donde:

$CH$  = Conductividad hidráulica ( $cm\ h^{-1}$ )

$r$  = diámetro inferior de un piezómetro ( $cm$ )

$c$  = función de la figura 5

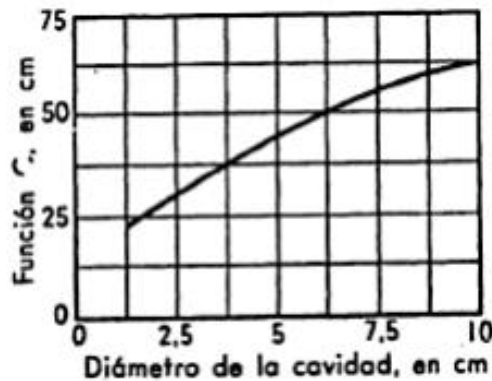
$\Delta t$  = tiempo necesario para perder una altura  $\Delta h$  ( $min$ )

$\Delta h$  = aumento del nivel del agua (A-R) ( $cm$  en un intervalo de tiempo)

$A$  = profundidad del nivel de agua al principio de la prueba ( $cm$ )

$R$  = profundidad de agua al final de la prueba ( $cm$ )

$B$  = profundidad estática del agua ( $cm$ )



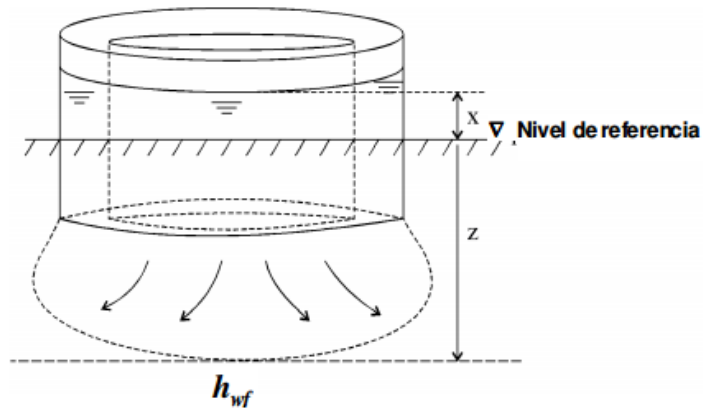
**Figura 6.** Determinación de C. función para una cavidad de 10.5 cm

#### 4.7.2.2 Zona no saturada

##### 4.7.2.2.1 Infiltrómetro de doble anillo

Consiste de dos cilindros separados, usados para determinar la tasa de infiltración, la infiltración acumulada y la conductividad hidráulica saturada (Bouwer, 1986; Reynolds *et al.*, 2002) (Figura 5). Es un método sencillo que puede ser usado para evaluar estos valores en los diferentes horizontes del suelo.

Los dos cilindros concéntricos son instalados con el propósito de reducir el flujo lateral en el cilindro interno. La tasa de infiltración en el cilindro interno se asume que sea una indicación del flujo vertical. Consiste en enterrar parcialmente un anillo de diámetro en el suelo y colocar una lámina de agua de inundación constante o variable dentro de él. Se mide cuánta agua penetra en el suelo por unidad de área y tiempo.



**Figura 7.** Infiltrómetro de doble anillo (Hartmann, 2000)

La tasa de infiltración final constante puede ser dada usando la ley de Darcy:

$$q = KT \frac{hwf + z + x}{z}$$

Donde:

$q$  = tasa de infiltración ( $L T^{-1}$ )

$KT$  = conductividad hidráulica de la zona de transmisión ( $L T^{-1}$ )

$hwf$  = valor absoluto de la carga de presión en el frente de humedecimiento (al fondo de la zona de transmisión ( $L$ ))

$z$  = espesor de la zona de transmisión ( $L$ )

$x$  = carga de agua en el anillo interior del infiltrómetro ( $L$ )

La influencia de  $hwf$  y  $x$  vs  $z$  disminuye cuando  $z$  y el contenido de humedad aumentan. Como el gradiente de potencial hidráulico en un suelo homogéneo saturado alcanza la unidad con el tiempo, consecuentemente la tasa de infiltración adquiere un valor constante, así la ecuación sería:

$$q \approx KT$$

En cuanto a texturas no demasiado gruesas, la conductividad hidráulica de la zona de la transmisión es más o menos igual a la de la zona saturada.

$$q \approx KT \approx KS$$

Durante la medición es necesario tener cuidado de que la carga de agua en el interior y fuera del cilindro o anillo sea igual; de lo contrario puede ocurrir flujo lateral entre los dos anillos. Ambos anillos deben enterrarse hasta una profundidad de al menos 10 cm para reducir el flujo lateral a un mínimo. Normalmente toma largo tiempo antes de que la tasa de infiltración se haga constante. El resultado, aunque no siempre exacto, da una aproximación buena de la situación del campo.

#### 4.7.2.2.2 Infiltrómetro de disco e Infiltrómetro de tensión

Los infiltrómetros de tensión de disco o de presión siguen el diseño básico de Perroux y White (1988). Están contruidos en metacrilato y dispone de una base circular de radio 'r' que está cubierta en su parte inferior por una malla permeable de nylon.

En la parte superior del disco, que sirve de base, se roscan un cilindro y un Mariotte. El primero es el recipiente de alimentación del agua que se infiltra en el suelo y lleva una escala graduada que permite leer la cantidad de agua infiltrada (cm) en función del tiempo. El Mariotte consta también de un cilindro con agua que se comunica con el exterior a través de un tubo móvil llamado tubo de burbujas, el cual dispone de una entrada de aire que se usa para fijar el potencial de agua, para lo cual, basta con ajustar la altura (h1) del tubo de burbujas que se sumerge en el agua que contiene el Mariotte, leyendo esta longitud en una escala graduada. El potencial real del agua (h0), medido en cm de columna de agua, corresponderá a la suma algebraica de la altura H1 y la altura H2. Esta última es la distancia existente entre la membrana de nylon y el tubo horizontal del capilar. Por tanto,  $H_0 = H_2 - H_1$ , y para todo  $H_1 > H_2$ ,  $h_0$  será negativo (tensión). Las tasas de infiltración leídas en la escala son luego convertidas en tasa de infiltración con referencia al área de la base del infiltrómetro pues es el área real de infiltración (Figura 8).

La conductividad hidráulica en campo puede estimarse mediante la siguiente expresión (Reynolds y Elrick, 1990):

$$kfs = \alpha * GAR1 / [\alpha(\alpha * H1 + 1) + G\alpha * \pi\alpha^2]$$

Donde:

$a^*$  ( $L^{-1}$ ): parámetro de textura – estructura (Cuadro 2)

$A$  ( $L^2$ ): área de la sección transversal del reservorio del infiltrómetro.

$R1$  ( $L T^{-1}$ ): tasa casi estable de caída del nivel del agua en el reservorio.

$a$  ( $L$ ): radio interno del anillo

$H1$  ( $L$ ): carga de agua estable sobre la superficie de infiltración.

$G$  (adimensional): factor de forma

$$G = 0,316(d / \alpha) + 0,184$$

Donde:

$d$  ( $L$ )= profundidad de inserción del anillo dentro del suelo

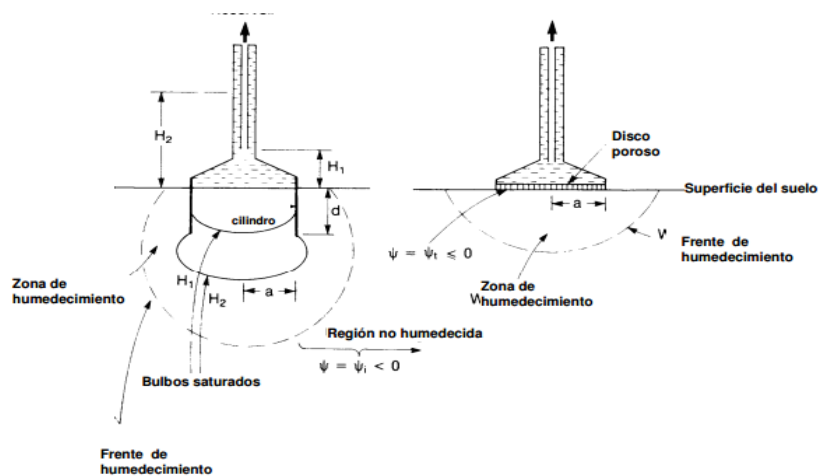


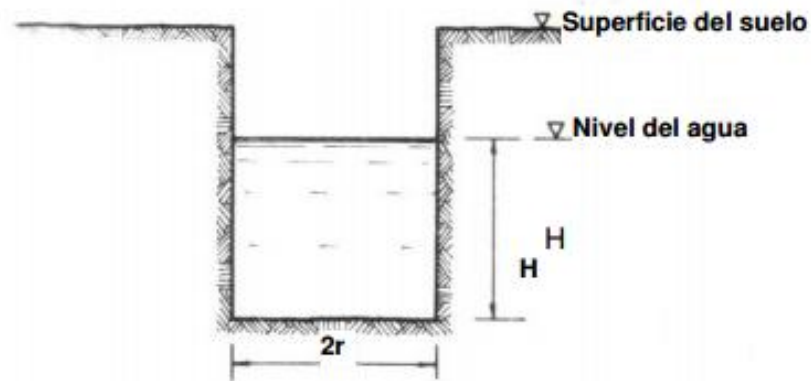
Figura 8. Infiltrómetro de disco e Infiltrómetro de tensión (Elrick y Reynolds, 1992)

**Cuadro 3.** Categorías de medios usados para la estimación de  $\alpha^*$  (Elrick et al., 1989)

Categoría del medio poroso	Valor de $\alpha^*$ ( $m^{-1}$ )
Materiales compactados, materiales arcillosos o limosos poco estructurados, tales como sedimentos marinos o lacustrinos, materiales de relleno, etc.	1
Suelos que tienen textura fina y sin estructura.	4
La mayor parte de los suelos estructurados desde arcillas, pasando por francos; además incluyendo arenas finas y gruesas desestructurados. Categoría más frecuentemente aplicada a suelos agrícolas.	12
Suelos pedregosos y arenas gruesas, pueden además incluir algunos suelos con buena estructura con grandes grietas y macro poros.	36

#### 4.7.2.2.3 Método del pozo (invertido) (por encima del nivel freático)

En un pozo abierto por encima del nivel freático se vierte agua hasta cierto nivel y se mide la velocidad de descenso de dicho nivel (Figura 9). Constituye un método rápido y fácil de implementar.



**Figura 9.** Pozo invertido (barreno invertido) (Hartmann, 2000; Bouwer, 1978)

La conductividad hidráulica se puede calcular mediante la expresión:

$$k = \frac{r \ln \left[ \left( 1 + \frac{2H_0}{r} \right) / \left( 1 + \frac{2H}{r} \right) \right]}{2(t - t_0)}$$

*Donde:*

*H<sub>0</sub> y H = las profundidades del nivel de agua en el pozo al inicio (t<sub>0</sub>) y después de un tiempo t  
r = radio del pozo.*

#### **4.8 Prácticas de manejo y la importancia de la labranza en la conductividad hidráulica**

Amézquita (1998) recomienda que antes de decidir el sistema de laboreo que se vaya a utilizar en un determinado suelo, se haga un diagnóstico de la condición física de él y evaluar sus posibilidades de soportar el desarrollo de las plantas que se piensan tener; en mini calicatas o excavaciones en varios sitios de campo de 40 o más centímetros de profundidad, según el tipo de suelos, cuyo número depende de la variabilidad de los suelos presentes, se debe estudiar:

- Espesor del horizonte superficial
- Distribución y tipo de horizontes
- Textura y estructura
- Presencia de capas u horizontes endurecidos y su espesor
- Continuidad del espacio poroso
- Distribución del sistema radicular de la vegetación existente y profundidad en la cual es mayor su volumen
- Cambios en el contenido de humedad.



#### **4.9 Investigaciones realizadas de la conductividad hidráulica en diferentes tipos de suelo y labranzas**

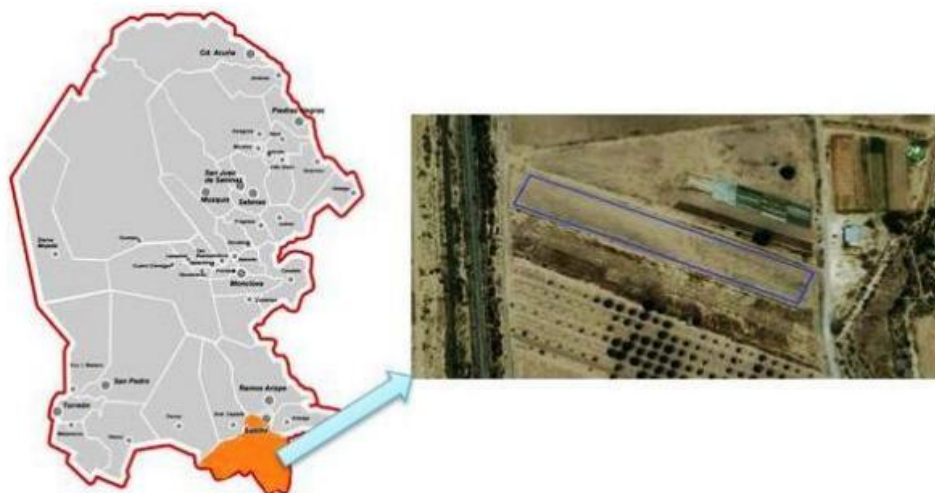
En una investigación realizada por Ohep et al., (2002), concluye que la labranza conservacionista con aplicación de residuos vegetales produjo modificaciones importantes, disminuyendo los valores de densidad aparente e incrementando la capacidad de aireación y la conductividad hidráulica del suelo. Los efectos de la labranza convencional con el paso de rastra de discos provocó efectos adversos en los atributos físicos del suelo.

Lampurlanés y Cantero-Martínez (2006) citan, que el estudio realizado por tres sistemas de labranza (labranza mínima, labranza vertical y labranza cero) y cobertura de residuos en la superficie, juega un papel importante en la conservación de agua en el suelo. Con la adopción de labranza cero puede haber una disminución de la conductividad hidráulica debido a la reducción en la porosidad del suelo. La estructura del suelo es una de las características más importantes que se pueden modificar mediante el laboreo del suelo. Un trabajo realizado utilizando labranza convencional y mínima en un suelo arcillo muestra que la inversión continua del suelo puede causar degradación y disminución de agua en el mismo, afectando el medio poroso y las propiedades hidráulicas (Kargas et al. 2016; Castellini y Ventrella, 2012)

## V. MATERIALES Y METODOS

### 5.1 Localización geográfica

El estudio se realizó dentro del campo experimental el “Bajío” ubicado en las instalaciones de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), la cual se encuentra ubicada  $100^{\circ} 59' 57''$  de longitud Oeste,  $25^{\circ} 23' 42''$  de latitud Norte y una altitud de 1743 metros sobre el nivel del mar. De acuerdo a la clasificación climática de Köppen, modificada por García (2004), el clima de Buenavista se asocia a seco – árido, templado con verano fresco largo. La temperatura media anual es de  $16.9^{\circ}\text{C}$ , con una precipitación media anual de 435 milímetros, la evaporación media anual oscila entre los 1956 mm. Los vientos predominantes tienen una dirección noreste, con velocidades de 25.5 km/h (Servicio Meteorológico Nacional 2012).



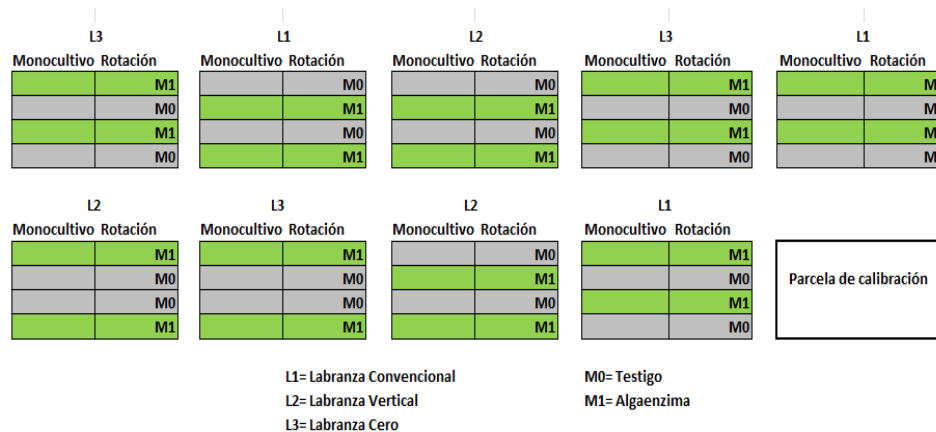
**Figura 10.** Ubicación geográfica del sitio experimental

## 5.2 Caracterización inicial del sitio experimental

El estudio se realizó en el campo experimental denominado El Bajío en la parcela “El Pedregal”, el tipo de suelo es de una textura franco arcilloso.

La superficie total del área experimental tiene dimensiones de 30 por 250 metros (7500 m<sup>2</sup>). El trabajo se realizó en dos cultivos; Maíz variedad (JAGUAR) y Frijol variedad (ANOS) sobre nueve parcelas con dimensiones de 40 metros por 12 metros (480 m<sup>2</sup>). Se establecieron tres tratamientos de labranza los cuales fueron: L1 (labranza convencional), L2 (labranza vertical) y L3 (labranza cero) replicándose tres veces. Cada tratamiento de labranza se dividió en dos sub-parcelas y cuatro franjas iguales de 3 por 40 metros (120 m<sup>2</sup>).

Para el mejorador de suelo se utilizó M0 (Testigo) y M1 (Algaenzimas) aplicándose en cada franja.



**Figura 11.** Distribución del terreno experimental

Para la preparación del suelo en el sistema de labranza convencional se utilizó el arado y la rastra de discos, en el sistema de labranza vertical el arado de cinceles y en la labranza cero solo la sembradora, como se indica siembra directa. El ciclo del cultivo desde la siembra hasta la etapa de cosecha comprende un periodo entre Julio-Octubre 2014.

### **5.3 Determinación de la Conductividad hidráulica**

La conductividad hidráulica a saturación del suelo, se determinó en campo en cada una de las parcelas de los tres sistemas de labranza, el mejorador del suelo y los dos cultivos. Las mediciones de la conductividad hidráulica se realizaron después de la cosecha de los cultivos. El tamaño de la muestra en cada cultivo (Maíz y frijol) fue de 18 mediciones, que consistieron en tres sistemas de labranza, con y sin mejorador de suelo y tres repeticiones. Para las mediciones se utilizó el permeámetro de Guelph.

El evaluar el efecto del método de labranza, mejorador del suelo y tipo de cultivo en la conductividad hidráulica, se usó un diseño de bloques al azar con parcelas divididas.

### **5.4 Descripción del permeámetro de Guelph**

Equipo: permeámetro de Guelph

Compañía: Soilmoisture Equipment Corp

Modelo: 2800k1



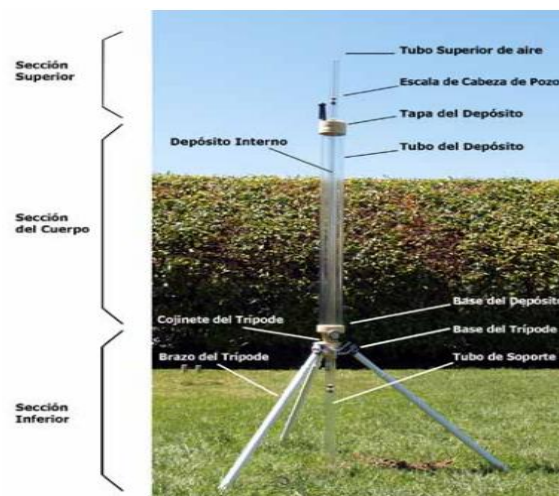
**Figura 12.** Permeámetro Guelph 2800K1

El kit del Permeámetro Guelph incluye varias herramientas de igual forma varios accesorios de conexión rápida y otros para extender la capacidad de medición del permeámetro.

1. Contenedor de Agua y Tubo
2. Barrena de Entallado
3. Barrena de Suelo
4. Base de Trípode & Cojinete de Trípode
5. Cepillo para Preparar Pozo
6. Depósito de Ensamblaje
7. Bomba de Mano para Prueba de Vacío
8. Tubo de Soporte & Tubo de Aire Inferior
9. Ensamblaje de barreno de mango
10. Patas de Trípode
11. Estuche de Transporte

Está dividido en cuatro secciones básicas para facilitar transporte y almacenamiento (figura 13)

12. Montaje del Trípode
13. Tubo de Soporte y Accesorios del Tubo de Aire Inferior;
14. Ensamblaje de Depósito
15. Escala de la Cabeza del Pozo y Accesorios del Tubo de Aire Superior.



**Figura 13.** Montaje del Trípode

#### **5.4.1 Procedimiento llevado a cabo para medir la conductividad hidráulica in situ en el campo experimental**

##### **Paso 1**

Utilizando la barrena de suelo se hace la perforación con una profundidad de 20 cm, una vez que se tenga el pozo se utiliza la barrena de entallado para obtener una geometría uniforme de 6 cm de diámetro con un fondo plano en la perforación. Al momento de realizar los procesos anteriores pueden crear una capa de barrillo que puede bloquear el flujo natural de agua del pozo en el suelo circundante. Esta capa debe ser eliminada, el cepillo está diseñado para remover la capa compactada del suelo



**Figura 14.** Perforación del pozo para la muestra

## Pasó 2

- Se monta el trípode, para esto se insertan las patas del trípode en la base de éste y luego insertar el seguro a través de los orificios que se encuentran en cada una de las patas.
- Se instala el permeámetro en el pozo con ayuda del trípode, el tubo de aire inferior se conecta con el tubo de aire medio hasta quedar lo más firme posible
- El tubo de soporte se une con los recipientes interior y exterior del tubo de aire medio, procurando que quede firmemente unido, para evitar la entrada y salida de aire. Se inserta firmemente la regleta para medir el nivel de agua sobre la tapa de los recipientes.
- Se monta el permeámetro dentro del trípode y se lleva el soporte deslizante hasta ajustarlo en la base del trípode y el fondo del pozo (Figura 21). Para instalar el equipo en el pozo de infiltración, simplemente se debe bajar lentamente el permeámetro a través del trípode y procurar que el tubo de soporte no golpee las paredes del agujero.



**Figura 15.** Permeámetro armado y ensamblado

### **Pasó 3**

- Para llenar el permeámetro se debe retirar el tapón presente en la parte superior de la tapa del reservorio, asegurándose que la válvula reguladora del flujo esté con su indicador hacia arriba para mantener conectados el reservorio interior y exterior.
- Utilizando la sonda se conecta la línea de agua del contenedor a la entrada que va al depósito, para rellenar se aplica presión con los brazos o pie en contra del recipiente o bien rellenar directamente levantando el recipiente.



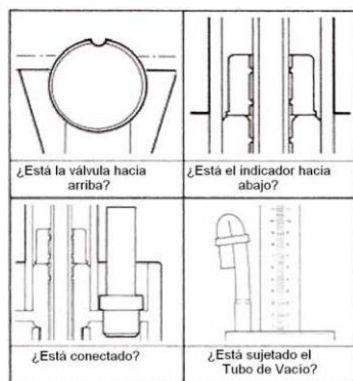
**Figura 16.** Llenado del Permeámetro

### **Paso 4**

Para determinar la tasa de infiltración en el suelo se verifica la configuración del permeámetro:

- La válvula de la base del recipiente debe estar con su indicador hacia arriba.
- El indicador de nivel de agua debe estar asentado a la base de la tapa del permeámetro.
- El orificio para llenar el permeámetro debe estar tapado.
- El tubo de vacío debe estar correctamente sellado.





**Figura 17.** Verificación del permeámetro

### **Pasó 5**

- Se establece la altura del nivel de agua en el pozo levantado suavemente el tubo de aire superior hasta que el indicador marque la altura de 5 cm.
- Se determina la tasa de infiltración registrando el comportamiento del nivel de agua dentro del permeámetro en un intervalo de 2 minutos, el tiempo es tomado con un cronometro. La tasa de infiltración se determina hasta que existan al menos tres tasas sucesivas iguales, lo que indica que el sistema se encuentra en régimen permanente.
- Se establece una segunda altura de nivel de agua en el pozo de 10 cm determinando la tasa de infiltración mediante el descenso de niveles en un intervalo de tiempo de 1 minuto, de igual manera hasta que existan al menos tres tasas sucesivas iguales.
- El descenso de los niveles que se da en cada intervalo de tiempo se anota en el formato correspondiente para el registro de datos (figura 18).

Date: \_\_\_\_\_

Tratamiento: \_\_\_\_\_

Repetición: \_\_\_\_\_

H1 = 5 cm

Depth of well: \_\_\_\_\_

Comb. Reserv. (X) = \_\_\_\_\_

Inner Reserv. (Y) = \_\_\_\_\_

H2 = 10 cm

Reading number	[1] Time (min)	[2] Δtime (min)	[3] Water level (cm)	[4] Δ Water level (cm)	[5]=[4]/[2] Rate of change (cm/min)
1	0	-			
2	1	1			
3	2	1			
4	3	1			
5	4	1			
6	5	1			
7	6	1			
8	7	1			
9	8	1			
10	9	1			
11	10	1			
12	11	1			
13	12	1			
14	13	1			
15	14	1			
16	15	1			

Reading number	[1] Time (min)	[2] Δtime (min)	[3] Water level (cm)	[4] Δ Water level (cm)	[5]=[4]/[2] Rate of change (cm/min)
1	0	-			
2	1	1			
3	2	1			
4	3	1			
5	4	1			
6	5	1			
7	6	1			
8	7	1			
9	8	1			
10	9	1			
11	10	1			
12	11	1			
13	12	1			
14	13	1			
15	14	1			
16	15	1			

**Figura 18.** Formato para el registro de datos

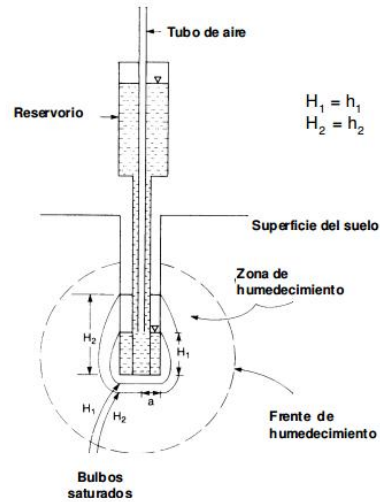
Una vez que se tenían las tres o cuatro tasas de infiltración iguales, se obtiene el promedio de estas últimas en cm/min para cada carga, 5 cm y 10 cm.

#### 5.4.2 El permeámetro Guelph pozo de carga constante

El permeámetro Guelph es un instrumento de carga constante para medir con rapidez y precisión la conductividad hidráulica in situ. La evaluación precisa de la conductividad hidráulica, capacidad de absorción y matriz de flujo potencial se puede hacer en todo tipo de suelos, las mediciones pueden realizarse en media hora a 2 horas, dependiendo del tipo de suelo y velocidad de infiltración para el llenado permeámetro se requiere una sonda con capacidad de 5 litros de agua.

Es un permeámetro de pozo de carga constante que hace uso del principio Mariotte. Con este aparato se mide la penetración a velocidad constante de agua en el suelo no saturado desde un

pozo cilíndrico, en el cual se mantiene una carga constante de agua (Reynolds y Elrick 1985, 1987). En el suelo se forma un bulbo con dimensiones que depende de tipo de suelo, radio del pozo y de la carga de agua en el pozo.



**Figura 19.** Permeámetro Guelph (Elrick y Reynolds, 1992)

La expresión para obtener Kfs es la siguiente:

$$K_{fs} = \frac{C_1 Q_1}{2\pi H^2 + \pi a^2 C_1 + 2\pi \frac{H}{\alpha^*}}$$

Donde:

$K_{fs}$  = Conductividad hidráulica saturada en campo

$Q$  = caudal de infiltración [ $L^3/T$ ]

$H$  = nivel de agua en el agujero de infiltración [ $L$ ]

$C$  = factor de forma adimensional

$a$  = radio del pozo o agujero de infiltración [ $L$ ]

$\alpha^*$  = parámetro que caracteriza el efecto del a zona no saturada del suelo [ $L$ ]

El parámetro textura-estructura ( $a^*$ ) puede ser obtenido en cuadro 3; mientras que el factor de forma  $C$  se pueden leer en la figura 26 o calculada directamente con las ecuaciones dadas a continuación:

$$C1 = \left( \frac{H/a}{2.074 + 0.093H/a} \right)^{0.754}$$

$$C2 = \left( \frac{H/a}{1.992 + 0.091H/a} \right)^{0.683}$$

$$C3 = \left( \frac{H/a}{2.081 + 0.121H/a} \right)^{0.672}$$

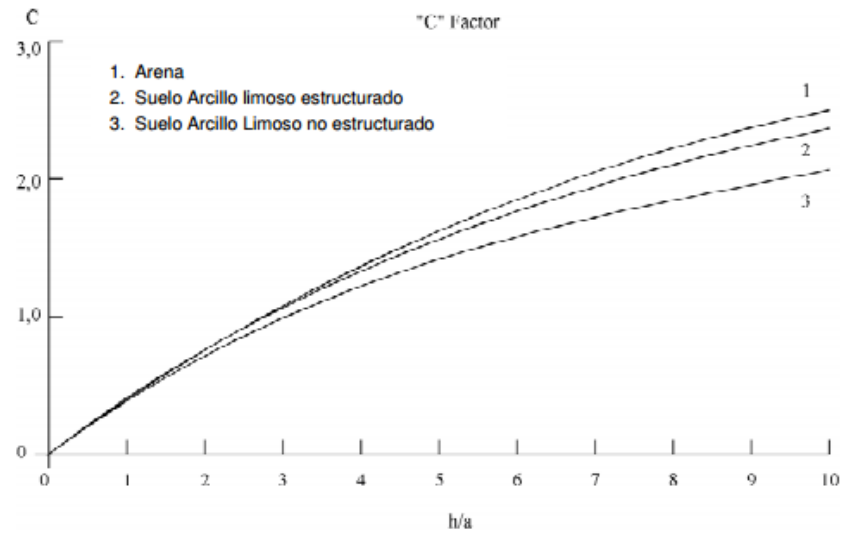
Cuando se mide el flujo estable para dos diferentes (cargas) de agua aplicadas secuencialmente a la superficie, la conductividad hidráulica saturada de campo puede estimarse mediante la siguiente expresión:

$$K_{fs} = G_2 Q_2 - G_1 Q_1$$

Donde:

$$G_1 = \frac{H_2 C_1}{\pi(2H_1 H_2 (H_2 - H_1) + a^2 (H_1 C_2 - H_2 C_1))}$$

$$G_1 = \frac{H_1 C_2}{\pi(2H_1 H_2 (H_2 - H_1) + a^2 (H_1 C_2 - H_2 C_1))}$$



**Figura 20.** Escala del factor C en función de h/a (Reynolds y Elrick, 1987).

## VI. RESULTADOS Y DISCUSION

De acuerdo a las clases de conductividad hidráulica saturada del suelo que presenta la Soil Survey Division Staff (1993), los resultados de este estudio se encuentran entre moderadamente alta y moderadamente baja en los tres sistemas labranzas.

**Cuadro 4.** Valores de conductividad hidráulica saturada para diferentes texturas del suelos.

CLASE	mm h <sup>-1</sup>
Muy alta	>360
Alta	36 – 360
Moderadamente alta	3.6 – 36
Moderadamente baja	0.36 – 3.6
Baja	0.036 – 0.36
Muy baja	<0.036

En el Cuadro 5 se muestra que el valor de la conductividad hidráulica a saturación (K) en el cultivo de frijol con labranza convencional (LC), se ubica en el rango de 3.6 a 36 mm h<sup>-1</sup>, y los sistemas de labranza vertical (LV) y labranza cero (NL) en un rango de valores de 0.36 a 3.6 mm h<sup>-1</sup> indican estar dentro de la clase moderadamente baja. Vega y Muñoz (2014) señalan que en un estudio realizado a mediano plazo (seis años) con maíz y frijol el sistema radicular de los cultivos mejora la estructura del suelo y asociado con las prácticas de conservación, aumenta la capacidad de infiltración de agua en el perfil del suelo.

De igual manera los valores de K observados en el cultivo de maíz, se encuentran en un rango de valor más bajo de 1.623 mm h<sup>-1</sup> en NL y el más alto de 6.673 mm h<sup>-1</sup> en LC, los cuales indican estar dentro de la clase moderadamente alta y baja respetivamente. Al respecto (Ruiz y López, 2014) mencionan que las leguminosas tienen capacidad de producir follaje y al incorporarse al suelo mejoran la estructura del suelo, y por consiguiente, aumentan la

conductividad hidráulica en comparación con las gramíneas donde la descomposición de la materia orgánica es menor y más lenta.

**Cuadro 5.** Valores de conductividad hidráulica (K) en cada parcela y tipo de cultivo.

	sistemas de labranza	Mejorador	Repetición	Frijol k (mm h <sup>-1</sup> )	Maíz (mm h <sup>-1</sup> )
1	LC	SIN	R1	10.825	2.106
2	LC	CON	R1	4.26	4.574
3	LC	SIN	R2	11.74	6.673
4	LC	CON	R2	2.641	6.184
5	LC	CON	R3	4.175	2.964
6	LC	SIN	R3	11.282	8.57
7	NL	SIN	R1	2.862	1.623
8	NL	CON	R1	2.346	2,106
9	NL	SIN	R2	3.444	5.136
10	NL	CON	R2	2.586	3.353
11	NL	CON	R3	2.106	3.731
12	NL	SIN	R3	2.106	4.226
13	LV	CON	R1	3.353	2.596
14	LV	SIN	R1	1.875	4.513
15	LV	CON	R2	3.750	2.356
16	LV	SIN	R2	1.990	4.942
17	LV	SIN	R3	2.106	4.083
18	LV	CON	R3	2.642	2.836
Valores promedio por cultivo =				4.227	4.032

### 6.1 Conductividad hidráulica del suelo después de la cosecha del cultivo frijol

.Después de la cosecha del cultivo de frijol, la K fue mayor en el sistema de labranza cero con respecto a la labranza convencional y vertical (Cuadro 6) (Tukey  $\leq 0.05$ ). En la labranza cero los agregados del suelo no se destruyen, manteniendo una continuidad en la porosidad, sistema radicular de la planta y el incremento de la materia orgánica. Por ejemplo, Martínez *et al.* (2006) en un estudio en la producción de frijol indican que con cero labranza no perturban los agregados y se mantiene una continuidad en la porosidad formada por la estructura del suelo, además las raíces de las plantas y los microorganismos mejoran la velocidad de infiltración del mismo. También Sánchez de P *et al.* (2010) mencionan que el uso de leguminosas desarrolla raíces profundas y fuertes que aflojan el suelo, incrementan el contenido de materia orgánica, la estabilidad de agregados y dejan pequeños canales para la ventilación del suelo y la

filtración del agua. Sin embargo, Lampurlanés y Cantero (2006) enfatizan que bajo labranza cero puede haber una disminución de la conductividad hidráulica debido a que la porosidad y distribución del tamaño de poros se reduce, debido a la compactación. Por otro lado Delgado *et al.* (2010) demostró que en un suelo sembrado con frijol bajo labranza convencional y siembra directa, el sistema conservacionista incrementa la biomasa (aproximadamente 55%) lo cual aumenta la materia orgánica, velocidad de infiltración y retiene mayor cantidad de agua aprovechable para las plantas.

**Cuadro 6.** Valores promedio de la conductividad hidráulica a saturación del suelo (K) en tres sistemas de labranza, después de la cosecha de un cultivo frijol.

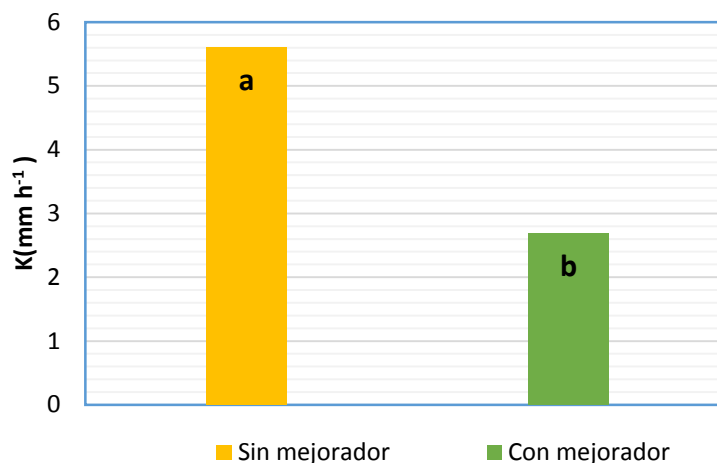
Tratamientos	k(mm/h)
No Labranza	7.585 <sup>a</sup>
Labranza Convencional	2.553 <sup>b</sup>
Labranza Vertical	2.429 <sup>b</sup>

\* Medias con diferente letra en la misma columna son estadísticamente diferentes (Tukey  $\leq 0.05$ ).

Algunas investigaciones mencionan que el uso de leguminosas como coberturas es una opción viable para mejora la fertilidad del suelo. La cero labranza, según Govaerts *et al.* (2007), combinada con retención de residuos mejora la estructura del suelo, incrementa el contenido de materia orgánica, infiltración y la capacidad de almacenamiento de agua.

La aplicación del mejorador de suelo no incrementó la conductividad hidráulica del suelo saturado (Tukey  $\leq 0.05$ ) (Figura 21). Esto probablemente se debió a que el efecto de mejorador en aplicación líquida y baja concentración (1 L/ha), requiere de varios ciclos de aplicación para que pueda modificar las propiedades físicas del suelo, tener efecto en la conductividad hidráulica. Al respecto, McLaughlin, *et al.* (2002) afirma que la estructura del suelo con mejoradores orgánicos generalmente se da en el largo plazo (ocho años).

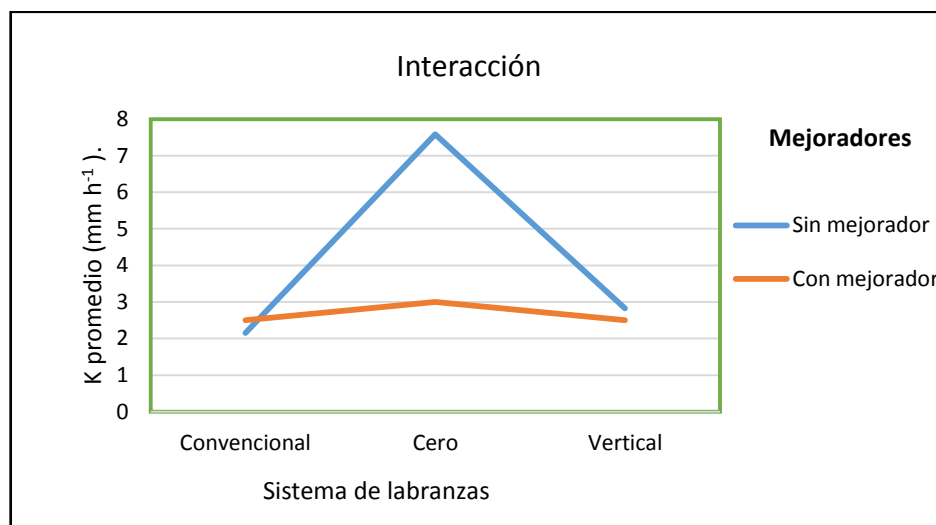
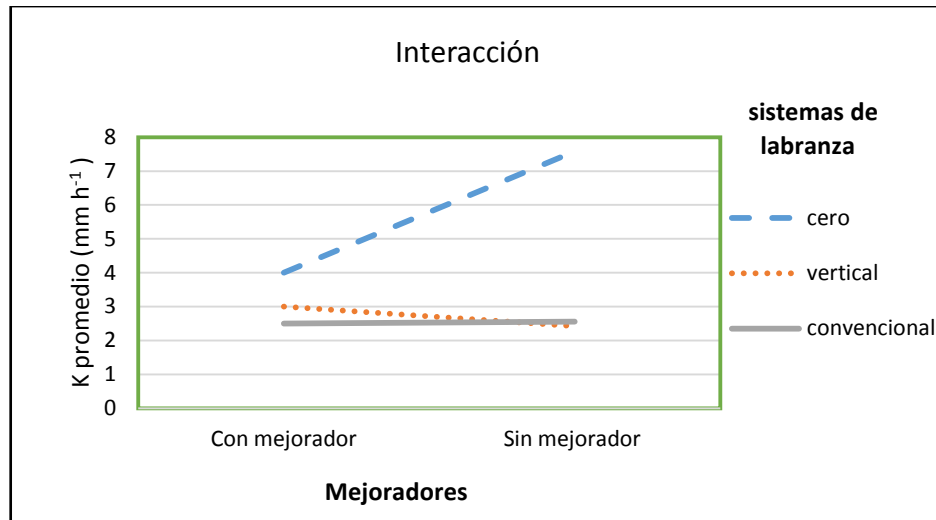




\* Medias con diferente letra son estadísticamente diferentes (Tukey  $\leq 0.05$ )

**Figura 21.** Conductividad hidráulica del suelo a saturación (K) después de la cosecha del cultivo de frijol con y sin aplicación del mejorador de suelo.

La aplicación del mejorador no tuvo efecto en la K ni en la labranza vertical ni en la convencional, mientras que con labranza cero, el mejorador redujo la K del suelo (Figura 22). Esto probablemente se debió a que con el mejorador se aumenta la aglomeración de partículas que aumenta la proporción de micro poros del suelo respecto a lo macro poros, dando como resultado una reducción en la conductividad hidráulica del suelo. Rivero y Pérez (2011) señalan que las prácticas de fertilización orgánica y la aplicación constante de ellos, con el tiempo, mejora las propiedades físicas del suelo. Con la labranza cero, no se altera la aglomeración ni el arreglo de las partículas, por lo que el efecto del mejorador se mantiene. La incorporación de abonos orgánicos aumenta la agregación de partículas (macro poros), un suelo bien aglomerado permite buena entrada de agua en el suelo e incrementa la conductividad hidráulica saturada (Eusufzai y Fujii, 2012).



**Figura 22.** Interacción de tres sistemas de labranza (labranza convencional, labranza de conservación, labranza vertical) con y sin la aplicación de un mejorador de suelo. En un cultivo de frijol.

## 6.2 Conductividad hidráulica del suelo saturado después de la cosecha de un cultivo Maíz

Después de la cosecha del cultivo de maíz, la conductividad hidráulica a saturación fue mayor con la labranza convencional que con labranza vertical y cero labranza (Cuadro 7) (Tukey  $\leq 0.05$ ). La labranza convencional tuvo una mayor conductividad hidráulica ya que en esta se perturba el suelo generando espacios porosos a comparación con el sistema de labranza cero donde se aplica la siembra directa. Aguilar (2014) obtuvo en sus resultados, valores altos de

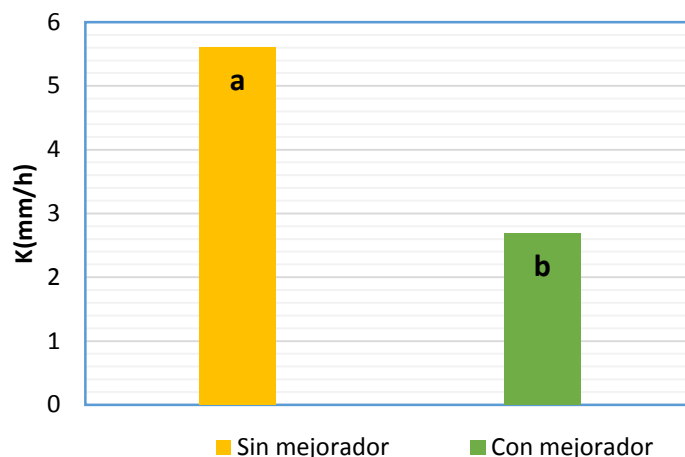
conductividad hidráulica saturada, con el sistema de labranza convencional (11.92 mm/h) por la menor densidad del suelo y mayor espacio poroso, sin mostrar mucha diferencia entre la labranza vertical y cero labranza (10 mm/h y 7.387 mm/h) mostrando diferencia significativa con este estudio. Eynard *et al.* (2004) mencionan que la labranza convencional reorganiza el espacio poroso y suelos bien agregados proporcionan mayor retención de agua, fácil penetración de raíces y una buena permeabilidad.

**Cuadro 7.** Conductividad hidráulica promedio del suelo en tres sistemas de labranza después de la cosecha de un cultivo de maíz.

Tratamientos	k(mm/h)
Labranza Convencional	5.013 <sup>a</sup>
No Labranza	3.872 <sup>ab</sup>
Labranza Vertical	3.554 <sup>b</sup>

\* Medias con diferente letra en la misma columna son estadísticamente diferente (Tukey  $\leq 0.05$ )

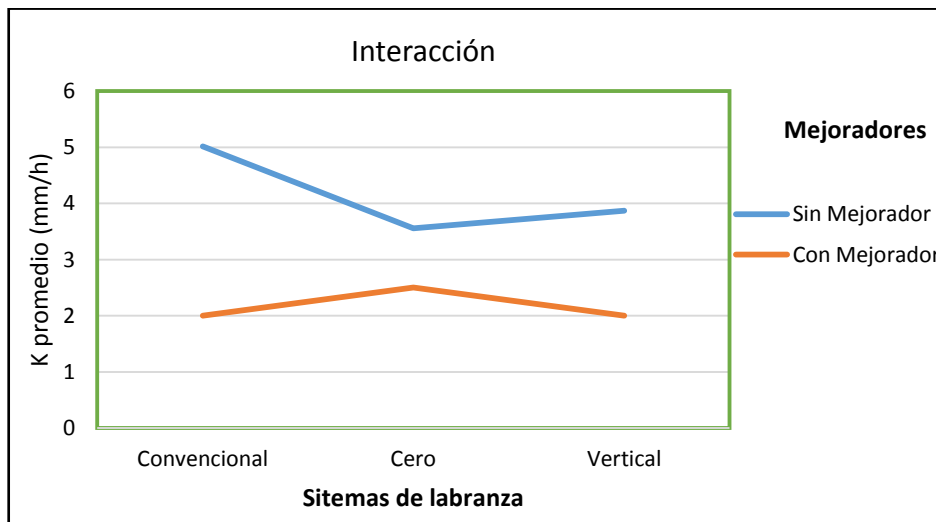
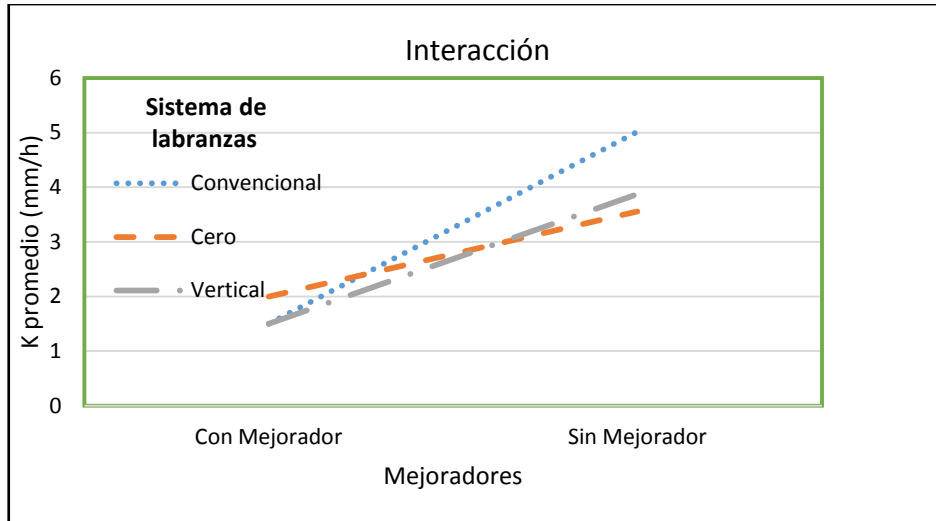
De igual forma que en el cultivo de frijol, la aplicación del mejorador de suelo no aumento la conductividad hidráulica del suelo (Figura 23) (Tukey  $\leq 0.05$ ). El utilizar alga enzimas como biofertilizantes en baja concentración no mejora las estructura del suelo, necesita aplicaciones constantes, para mejorar las propiedades físicas del suelo. López et al. (2000) menciona que después de un año de aplicación de derivados de algas marinas y dos años de labranza de conservación se empiezan a manifestar cambios en las propiedades físicas de un suelo sin necesidad del paso de maquinaria agrícola.



\* Medias con diferente letra entre las columnas son estadísticamente diferente (Tukey  $\leq 0.05$ )

**Figura 23.** Conductividad hidráulica del suelo a saturación (mm/h) después de la cosecha del cultivo de frijol con y sin la aplicación del mejorador de suelo.

Al evaluar el efecto de las interacciones (Figura 24) se observó que la aplicación del mejorador de suelo tiende a reducir el valor de la conductividad hidráulica del suelo en los tres sistemas de labranza en el cultivo de maíz (la K es menor con el mejorador en los tres sistemas de labranza). Esto nuevamente se debió a que el mejorador aumentó la aglomeración de las partículas lo que incremento la proporción de micro poros del suelo, que redujo el valor de la conductividad hidráulica del suelo. Según Bastida *et al.* (2007) los efectos de una baja dosis de mejoradores orgánicos disminuye la actividad biológica en suelo, reduciendo la conductividad hidráulica. La magnitud del cambio en la distribución del espacio poroso depende del tipo y la cantidad de fertilizante orgánico incorporado y del tiempo transcurrido, ya que los efectos de algunos residuos no son persistentes (Cuevas *et al.*, 2006).



**Figura 24.** Interacción de tres sistemas de labranza (Labranza convencional, labranza de conservación, labranza vertical) con la aplicación de mejorador (con mejorador, sin mejorador o testigo) en un cultivo de maíz.

## VII. CONCLUSION

Después de la cosecha del cultivo de frijol, la conductividad hidráulica del suelo (K) fue mayor en el sistema de no labranza, ya que la incorporación de las raíces de las plantas al suelo aumentó la capacidad de infiltración. Mientras que, en el cultivo de maíz, K fue mayor en el sistema de labranza convencional, debido al afloje del suelo por el laboreo.

La aplicación del mejorador de suelo aumentó la aglomeración de las partículas lo que incrementó la proporción de micro poros del suelo, dando como resultado una tendencia a menor conductividad hidráulica del suelo en los tres sistemas de labranza: convencional, vertical y no labranza.

## VIII. LITERATURA CITADA

- Altieri, M. A.** (1999). Agroecología, bases científicas para una agricultura sustentable, Miguel A. Altieri.
- Amézquita, E.** 1998. Propiedades físicas de los suelos de los llanos orientales y sus requerimientos de labranza. En: Memorias Encuentro Nacional de Labranza de Conservación. Romero G. et al editores. Villavicencio. pp: 145- 174.
- Alarcón, A., & Cerrato, R. F. (2012).** Biofertilizantes: importancia y utilización en la agricultura. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 26(2), 191-203.
- Almeida et al, 2005.** SEÇÃO I-FÍSICA DO SOLO. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 29(2), 161-168.
- Alvarado Ochoa, S. A., Jaramillo R., Valverde F., Parra R.**2011. Manejo de nutrientes por sitio específico en el cultivo de maíz bajo labranza de conservación para la provincia de Bolívar. Boletín técnico No.150. Quito, Ecuador., pp27.
- Aguilar Zavala, J. J., & Cadena Zapata. (2014).** efecto de tres sistemas de labranza en la conductividad hidráulica, densidad aparente y porosidad de un suelo franco-arcilloso.
- Bouwer, H.,** 1978. Groundwater Hydrology. New York, Mc.Graw-Hill Book Company, 480 p.
- Bouwer, H.,** 1986. Intake rate: Cylinder infiltrometer. En: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods.* American Society of Agronomy, Monograph No 9, Madison, p 825-844.
- Benites, J. R. (1992).** Manual de sistemas de labranza para América Latina. *Boletín de Suelos*, 66.
- Bastida, F., Moreno, J. L., Hernández, T., & García, C. (2007).** The long-term effects of the management of a forest soil on its carbon content, microbial biomass and activity under a semi-arid climate. *Applied Soil Ecology*, 37(1), 53-62.
- Bravo, C., & Andreu, E. (2011).** Propiedades físicas y producción de maíz (*Zea mays* L.) en un Alfisol del estado Guárico, Venezuela, bajo dos sistemas de labranza. *Venesuelos*, 3(2), 62-68.
- Benites, J. J. R. y Bot, A. (2013).** Agricultura de Una práctica innovadora con beneficios económicos y medioambientales. Editorial. Agrosaber. Lima, Perú, 2013. Pag. 79-83

**Bravo, A. N., Sandoval, B. F., Chaparro, V. M. O., & Cossio, F. V. G.** (2000). Efecto de la labranza sobre la estructura del suelo, la germinación y el desarrollo del maíz y frijol. *Terra Latinoamericana*, 18(1), 61-69.

**Blanco-Canqui, H., Gantzer, C. J., Anderson, S. H., & Alberts, E. E.** (2004). Tillage and crop influences on physical properties for an Epiaqualf. *Soil Science Society of America Journal*, 68(2), 567-576.

**Bajwa, A. A.** (2014). Sustainable weed management in conservation agriculture. *Crop Protection*, 65, 105-113.

**Baker, C. J., Saxton, K. E., Ritchie, W. R., Chamen, W. C. T., Reicosky, D. C., Ribeiro, M. F. S., ... & Hobbs, P. R.** (2008). Siembra con labranza cero en la agricultura de conservación. FAO, Roma (Italia).

**Castro, H.** 1996. Bases técnicas para el conocimiento y manejo de los suelos del Valle cálido del Alto Magdalena. Corpoica Regional 6. Ibagué. 107 p

**Canales, L. B.** (2001). Uso de derivados de algas marinas en la producción de tomate, papa, chile y tomatillo. Investigador de la empresa Palau Bioquim, SA de CV, fabricante de derivados de algas marinas para el uso en la agricultura.

**Cuevas, B. J.; Seguel, S. O.; Ellies, S. A.; y Dörner, F. J. M.** 2006. Efectos de las enmiendas orgánicas sobre las propiedades físicas del suelo con especial referencias a la adición de lodos urbanos. *Rev. Cien. Suelo Nutr. Veg.* 6(2):1 - 12.

**Camacho-Tamayo, J. H., y Rodríguez, G. A.,** (2007). Evaluación de implementos de labranza a diferentes velocidades de operación y contenidos de agua del suelo. *Agricultura técnica*, 67(1), 60-67.

**Clapp R.B.; Homberger G.M.,** 1978. Empirical equations for some soil hydraulic properties. *Water Resources Res.* 14: 601.

**Calvache Ulloa, M.** (2005). Utilización de las sondas nucleares en física de suelos. In PHI-VI Documentos técnicos en hidrología (Vol. 71, pp. 1-5). UNESCO

**DEL VALLE, P.R., ARJONA, E., BUENO, G. y OLESCHKO, L.K.** Modelación de procesos del régimen hídrico del suelo. *Terra Latinoamericana*. Vol. 27, 2009, pp. 161-168.

**Elrick, D. E., Reynolds, W. D., and Tan, K. S.** 1989. Hydraulic conductivity measurements in the unsaturated zone using improved well analyses. *Ground Water Monit. Rev.* 9: 184-193

**Elrick, D.E.; Reynolds,W.D.** 1992. Infiltration from constant head well permeameters and infiltrometers. En: G.C.Topp, W.D.Reynolds and R.E. Green, (Eds.) *Advances in measurement of soil physical properties: bringing theory into practice.* SSSA Spec. Publ. 30. Soil Science Society of America, Madison, WI. p 1-24,



**Espinoza, Y., Lozano, Z., & Velásquez, L. (2007).** Efecto de la rotación de cultivos y prácticas de labranza sobre las fracciones de la materia orgánica del suelo. *Interciencia*, 32(8), 554-559.

**Eusufzai, M. K., & Fujii, K. (2012).** Effect of organic matter amendment on hydraulic and pore characteristics of a clay loam soil.

**Friesen DK; Rao IM; Oberson A; Sanz JI.** 1997. Phosphorus acquisition and cycling in crop and pasture systems in low fertility tropical soils. *Plant and Soil* 196:289–294.

**FAO.2000.**Manual de prácticas integradas de manejo y conservación de suelos. Boletín de tierras y aguas de la FAO.8:220p.

**FAO.2000.**Manual de prácticas integradas de manejo y conservación de suelos. Boletín de tierras y aguas de la FAO.8:59-69

**FAO.2001.** Conservation agriculture Case studies in Latin America and Africa. *FAO SOILS BULLETIN*.78:89p.

**Gómez-Tagle, CH.A., Gómez-Tagle, R.A.F., Batlle-sales, J., Zepeda, C.H., guevara, S.M.A., Maldonado, L.S. y Pintor, A.J.** Conductividad hidráulica saturada de campo: uso de un infiltrómetro de carga constante y anillo sencillo. *Terra Latinoamericana*. Vol. 26, 2008, pp. 287-297.

**Gomero, O., & Velasquez, A. (2010).** Manejo ecológico de suelos: Conceptos, experiencias y técnicas.

**Gabriels, D., Lobo, D., y Pulido, M.** 2011. Métodos para determinar la conductividad hidráulica saturada y no saturada de los suelos. *Venesuelos*, 14(1), 7-22.

**Galantini, J. A. y Kleine Cristian.** 2013. Efectos de largo plazo de la siembra directa en el SO Bonaerense: Producción de los cultivos y balance de nutrientes. Comisión de investigación Científicas Gobierno de la Provincia de Buenos Aires.Pp. 10-16

**Hartmann, R.** 2000. *Soil Physics*. Lecture notes, Dept of Soil Management and Soil Care, Ghent University, Belgium.

**Hillel, D. (2003).** *Introduction to environmental soil physics*. Academic press.

**Herencia, J. F., Ruiz, J. C., Melero, S., Galavís, P. G., & Maqueda, C. (2008).** A short-term comparison of organic v. conventional agriculture in a silty loam soil using two organic amendments. *The Journal of Agricultural Science*,146(06), 677-687.

**Izaurrealde, R.C., W.B. McGill, J.A. Robertson, N.G. Juma, and J.J. Thurston. 2001.** Carbon balance of the Breton Classical Plots over half a century. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65:431-441.

- Jaramillo, J. D. F.** 2002. Introducción a la ciencia del suelo. Universidad Nacional de Colombia facultad de ciencias Medellín. Pág. 257-262
- Jiang, Y., & Shao, M. A.** (2014). Effects of soil structural properties on saturated hydraulic conductivity under different land-use types. *Soil Research*,52(4), 340-348.
- Kargas, G., Kerkides, P., Sotirakoglou, K., & Poulouvassilis, A.** (2016). Temporal variability of surface soil hydraulic properties under various tillage systems. *Soil and Tillage Research*, 158, 22-31.
- Leitón S., y Santiago, J.**1985. Riego y drenaje. Primera edición. Editorial EUNED. San José de Costa Rica.Pp.153.
- Lopez-Santos, A., González-Cervantes, G., Cadena-Zapata, M. y González-Barrios, J.L.** Effect of primary Tillage on the Physical Quality of Soil, as Evaluated by Disk Permeameter. *Water Technology and Sciences*. Vol. 3, No. 4, 2012, pp. 127-141.
- Lampurlanés, J., & Cantero-Martínez, C.** (2006). Hydraulic conductivity, residue cover and soil surface roughness under different tillage systems in semiarid conditions. *Soil and Tillage Research*, 85(1), 13-26.
- Navarro, B. A., Figueroa, S. B., Ordaz, C. V. M. y González, C. F. V.** 2000. Efecto de la labranza sobre la estructura del suelo, la germinación y el desarrollo de maíz y frijol. Colegio de post graduados. Montecillo México. Terra Latinoamericana, ISSN (Versión impresa): 1870-9982.
- Navarro Bravo, A., Figueroa Sandoval, B., Martínez Menes, M., González Cossio, F., & Osuna Ceja, E. S.** (2008). Indicadores físicos del suelo bajo labranza de conservación y su relación con el rendimiento de tres cultivos.*Agricultura técnica en México*, 34(2), 151-158.
- Oliveira, M.L.; Ruiz, H.A.; Costa, L.M.; schaefer, C.E.G.R.** 2005. Flutuações de temperatura e umidade do solo em resposta à cobertura vegetal. Rev. Bras. Engenharia Agrícola e Ambiental (Campina Grande). 9(4):535-539.
- Ohep, C., Felipe, M., Spiridione, P. y Colenárez, C.** 2002. Efectos de la labranza conservacionista en los atributos físicos del suelo que influyen sobre el rendimiento del maíz. Bioagro. Barquisimeto. Venezuela. 14(1): 37-45.
- MCLAUGHLIN, N. B., E. G. GREGORICH, L. M. DWYER and B. L. MA:** Effect of organic and inorganic soil nitrogen amendments on mouldboard plow draft, *Soil and Tillage Research*, 64(3), 211-219, 2002.

- Mesquita, M. D. G. B. D., y Moraes, S. O. (2005).** Densidad de probabilidad como herramienta en la caracterización de la conductividad hidráulica saturada de los suelos. In PHI-VI Documentos técnicos en hidrología (Vol. 71, pp. 1-6). UNESCO.
- Martínez-Gamiño, M. A., Jasso-Chavarría, C., & Huerta-Díaz, J. (2006).** Fertirriego y labranza de conservación en la producción de frijol. *Terra Latinoamericana*, 24(3), 367-374.
- Murillo, J., Rodríguez, G., Roncallo, B., Amparo Rojas, L., & Bonilla, R. R. (2014).** Effect of the application of sustainable practices on the physical, chemical and microbiological characteristics of degraded soils. *Pastos y Forrajes*, 37(3), 270-278.
- Reynolds, W.D.; D.E. Elrick.** 1990. Poned infiltration from a single ring: I. Analysis of steady flow. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 1233-1241.
- Reynolds, W.D.; D.E. Elrick; E.G. Youngs; A. Amoozegar; H.W.G. Booltink; J. Bouma.** 2002. Saturated and field-saturated water flow parameters. In: *Methods of Soil Analysis, Part 4—Physical Methods*, Dane, J.H. & Topp, G.C. (Eds). Soil Science Society of America. Madison, USA. p. 797-878.
- Romero, C. G.** 2002. Fundamentos básicos en la utilización de máquinas y equipos para laboreo del suelo, establecimiento y mantenimiento de cultivos. Puerto Carreño Vichada, Colombia. Pág. 34 y 37.
- Riquelme, J.** 2004. Capítulo 2. Sistema de preparación de suelo para el Establecimiento de trigo. En: *Boletín de trigo 2004/Manejo Tecnológico*. Editor: Mario Mellado. Boletín INIA N114. Chillan. P.27-47.
- Rivero, C., Lobo, D., & Pérez, A. L. (2011).** Efectos de la incorporación de residuos orgánicos sobre algunas propiedades físicas de un Alfisol degradado. *Venezuelos*, 6(1 y 2), 29-33.
- Roncallo, B., Murillo, J., Rodríguez, G., Bonilla, R. R., & Garrido, M. F. (2012).** Forage production and animal response in soils in the Cesar valley under a recovery process. *Revista Corpoica-Ciencia y Tecnología Agropecuarias*, 13(1), 89-96.
- Ruiz, E., & López, D. L. M. (2014).** Revisión de literatura sobre beneficios asociados al uso de coberturas leguminosas en palma de aceite y otros cultivos permanentes. *Revista Palmas*, 35(1), 53-64.
- Perroux, K.; White, I.** 1988. Designs for disc permeameters. *Soil Science Society of America Journal*, 52:1205-1215
- Stephens D.B.** 1996. *Vadose zone hydrology*. Lewis Publisher. USA. 347p

**Six, J., K. Paustian, E.T. Elliot y C. Combrink. 2000.** Soil structure and organic matter. I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate associated carbon. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 681-689.

**Sotomayor-Ramírez, D., Y. Espinoza y R. Ramos-Santana. 2007.** Short-term tillage practices on soil organic matter pools in a tropical Ultisol. *Australian J. Soil Research* 44: 687-693.

**Schuller, P., Walling, D. E., Sepúlveda, A., Castillo, A., & Pino, I. (2007).** Changes in soil erosion associated with the shift from conventional tillage to a no-tillage system, documented using <sup>137</sup>Cs measurements. *Soil and Tillage Research*, 94(1), 183-192.

**Sasal, M. C., Andriulo, A. E., & Taboada, M. A. (2006).** Soil porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in Argentinian Pampas. *Soil and Tillage Research*, 87(1), 9-18.

**Osunbitan, J. A., Oyedele, D. J., & Adekalu, K. O. (2005).** Tillage effects on bulk density, hydraulic conductivity and strength of a loamy sand soil in southwestern Nigeria. *Soil and Tillage Research*, 82(1), 57-64.

**Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R., & Polasky, S. (2002).** Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 418(6898), 671-677.

**Youngs, E. G. (2001)** Hydraulic conductivity of saturated soils. Chapter 4 in *Soil and environmental analysis*. Edited by K. A. Smith y C. E. Mullins. Marcel Dekker, Inc. New York, USA.

**Uribe, H. C., & Rouanet, J. L. M. (2002).** Effect of three tillage systems on moisture content in the soil profile.

**Van Beers, W.F.J. 1958.** The auger-hole method. International Institute for Land Reclamation and Improvement, Bull 1. H. Veenman & Zonen, Wageningen, The Netherlands, 32 p.

**Venialgo, Crispín A., Gutierrez, N. C, Corrales, A., Drganc, D., Asselborn, A. 2002.** Estabilidad de agregados y resistencia a la penetración en series de suelos con distintos usos en el Sudoeste del Chaco. Comunicaciones Científicas y Tecnológicas CD-ROM

**Vega, J., & Muñoz, R. (2014).** El manejo del suelo y sus repercusiones en los factores agronómicos y económicos del sistema de producción maíz y frijol en relevo. *REVISTA CEIBA*, 33(1A), 128-133.

**Wiley, J., and Sons, Inc. 1985.** Irrigation principles and practices (3 edition). New York, U.S.A. pp. 348

## **PAGINA WEB CONSULTADA**

SAGARPA. 2014. Rotación de cultivos.

<http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/Documents/fichasaapt/Rutaci%C3%B3n%20de%20cultivos.pdf> (4, marzo, 2016).FAO.2015. STATE RESOURCES LAND AND WATER WORLD FOR FOOD AND AGRICULTURE.