

SEP

SECRETARÍA DE  
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO  
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE PABELLÓN DE ARTEAGA



INSTITUTO TECNOLÓGICO<sup>®</sup>  
de Pabellón de Arteaga

**ATEC**

# Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga

Departamento de Investigación

## TESIS PROFESIONAL

### DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN REÓMETRO PARA DETERMINAR PARÁMETROS VISCOPLÁSTICOS DE SUELOS

*PRESENTA:*

**Juan José Reyes Ramírez**

*Como requisito para obtener el título de:*

**INGENIERO MECATRÓNICO**

*DIRIGIDO POR:*

**M.C. FRANCISCO GARIBALDI MÁRQUEZ**



SECRETARÍA DE  
EDUCACIÓN PÚBLICA  
INSTITUTO TECNOLÓGICO  
DE PABELLÓN DE ARTEAGA  
C.T. 01DIT0001Z

Pabellón de Arteaga, Ags., México. Diciembre del 2016

Esta tesis titulada “**DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN REÓMETRO PARA DETERMINAR PARÁMETROS VISCO-PLÁSTICOS DE SUELOS**” fue realizada por el C. Juan José Reyes Ramírez bajo la dirección del Ing. Jorge Fernando Carmona Espinoza y el M.C. Francisco Garibaldi Márquez, aprobado por el comité revisor indicado y aceptada para obtener el título de INGENIERO MECATRÓNICO.

Asesor Principal Interno



---

Ing. Jorge Fernando Carmona Espinoza

Asesor Principal Externo



---

M.C. Francisco Garibaldi Márquez

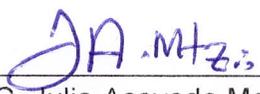
Asesor



---

Dra. Nivia Iracemi Escalante García

Asesor



---

M.C. Julio Acevedo Martínez



# AGRADECIMIENTOS

A lo largo de mi vida, un gran número de personas han contribuido en mi formación. Me han brindado sus consejos, tiempo y palabras de aliento cuando más lo he necesitado. A todas esas personas les agradezco su grandísimo apoyo y les guardo un gran cariño.

Le agradezco a Dios por que fue mi guía en todas las adversidades de la vida, iluminándome por el camino hasta llegar a culminar esta etapa de mi vida.

Al Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga (mi Alma Mater) y sus profesores, por permitirme realizar mis estudios de licenciatura. En especial al Ing. Jorge Fernando Carmona Espinoza, M.C. Julio Acevedo Martínez, Dra. Nivia Iracemi Escalante García, Dr. José Ernesto Olvera González e Ing. Diego Jacob Dondiego Jaime por apoyarme incondicionalmente en el desarrollo de este proyecto y revisión del presente documento. Sin ustedes no lo hubiera logrado. Además, me enorgullece saber que confiaron en mí para emprender este comienzo en el desarrollo de investigación bajo este instituto tan reconocido. Fue un placer haber realizado este proyecto con ustedes, espero no haberlos defraudado y en verdad MUCHAS GRACIAS POR TODO.

Al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campo Experimental Pabellón, por permitirme el desarrollo profesional al realizar este trabajo. En especial al M.C. Francisco Garibaldi Márquez por el esfuerzo brindado, su paciencia y por el tiempo dedicado en el asesoramiento de este proyecto. Es un orgullo saber que estuve a cargo de un maestro tan preparado, que compartió su sabiduría para mi desarrollo profesional. Me llevo demasiadas enseñanzas y experiencias que me ayudarán a ser un gran profesional. También, quiero agradecer a su esposa Ing. Diana Lizbeth Azcona Cózar, al Ing. Raúl Vidal García Hernández, Ing. Miguel Ángel Galaviz Cleto y al C. Juan Manuel Aguilera por brindarme su amistad y apoyo en la realización del presente proyecto y por compartirme sus conocimientos durante mi estancia en el CEPAB. También agradezco a todos los trabajadores de este instituto que compartieron su amistad haciendo mi estancia muy comfortable. A todos ellos GRACIAS.

Personalmente agradezco el apoyo que me brindaron mis asesores a lo largo del desarrollo de este proyecto al M.C. Francisco Garibaldi Márquez e Ing. Jorge Fernando Carmona Espinoza. No sé cómo pagar todo lo que hicieron por mí. Solo espero haber cumplido satisfactoriamente sus expectativas. MUCHAS GRACIAS.

# DEDICATORIAS

## A MIS PADRES

*Rita Ramírez Hernández y Juan José Reyes Trinidad*, les dedico este trabajo, porque sé que siempre se preocuparon por darnos lo mejor, y sé que me dieron todo lo que estuvo a su alcance. Además, por sus consejos, educación y enseñanzas, me formaron lo que ahora soy. Gracias por su comprensión y por todo el cariño que me han dado. No saben cómo estoy orgulloso de ustedes porque a pesar de las adversidades de la vida han salido adelante. Los quiero a mi lado para siempre. Espero también con esto, recompensarles un poco de lo mucho que me dieron, GRACIAS PADRES.

## A MI ESPOSA E HIJO

*Blanca Citlali Calzada Alvarado y Juan Jacob Reyes Calzada*, a ti mi amor por los sacrificios que tuvimos que pasar para lograr cumplir esta meta, por los buenos momentos y malas experiencias de la vida que hemos pasado. Sé que siempre has dado la vida por mí, sacrificando muchas cosas para poder darme fuerza y valor. En verdad eres maravillosa, porque en todo momento me has aguantado y apoyado para llegar hasta este lugar. A ti hijo que eres mi motor de la vida para luchar día con día para salir adelante. Espero que algún día al ver esto te sientas orgulloso de mí. Por todo esto les agradezco que sean una pieza fundamental en que yo lograra ser Ingeniero. SIEMPRE SE LOS AGRADECERÉ.

## A MIS HERMANOS

*Fatima, Luis Antonio y Brayan ulices*, ustedes han sido mis primeros amigos en los que gaste horas en juegos, pláticas, en peleas, en buenos momentos. Aunque nosotros casi nunca demostramos nuestros sentimientos de hermanos, yo les quiero decir que los quiero mucho y que sin ustedes nada hubiese sido igual. Espero ser un buen ejemplo para ustedes, que siempre piensen en sus metas y que nunca me dejen de querer a pesar de los regaños que les hago. LOS QUIERO MUCHO.

## A MI FAMILIA

Ustedes que siempre esperaron lo mejor de mí, apoyándome y dándome ánimos para salir adelante. A mis abuelas Agapita y Justina que me alentaban para no rendirme. A mi abuelo Guadalupe<sup>†</sup> que siempre creyó en mí para seguir estudiando. A mis suegros Sanjuana y Pedro y su familia, por su apoyo incondicional, que nunca nos han dejados solos en esto. A mis tíos y tías por sus consejos, su apoyo, sobre

todo los ánimos y la satisfacción que me hacen sentir el saber que soy el primero de la familia en lograr esta meta. MUCHAS GRACIAS A TODOS.

#### A MIS COMPAÑEROS DE GRUPO

A Heriberto Campos (el solitillo) que pasamos tantos sacrificios, desveladas y experiencias juntos. Diego Galaviz (el herrera) que aunque era muy corajudo siempre nos hacía reír. A los primos Oscar y José Esparza (los pintos) mis respetos unas inminencias para la escuela. A Javier Calvillo (el Javis) que al inicio muy aplicado, pero después pura barra jaja. A Gustavo Ríos (el Tavo), el de la carrilla por su equipo malísimo. Al Gustavo Rosales (el Gus) que siempre se esforzaba por aprender. A Miguel Ponce (el Luismi) el de la suerte. Al barrio de los de San Luis (el Peña, Rafa, Chesgar, el Güero, el Chato y Julio) los vale chili jaja. A Daniel Sánchez, que compartimos el reto de la famosa tesis. A Jairo Humberto (el lento), Erick Murillo, Rodrigo Marín y Jaime Richkarday, los de Rincón que se acoplaron a nuestra generación. A todos ellos gracias por haberme brindado su amistad, esos momentos inolvidables de convivencia y sacrificios a lo largo de la carrera.

#### COMPAÑEROS DE TRABAJO

Principalmente a mis compañeros de trabajo de “El Restaurant el Mirador” que trabajan día con día. Algunos de ellos al igual que mi persona, trabajar y estudiar para tener un futuro mejor y poder salir adelante; disciplina que muy pocos hacemos y que es de admirarse. Al C. Netzahualcóyotl Hernández Ramos por haberme ayudado en estos años y por aceptarme ser parte de su empresa como trabajador, por lo que me es grato reconocer que inicié mi desarrollo laboral en este lugar.

## RESUMEN

La labranza del suelo demanda alrededor del 35% de la energía en la producción de un cultivo, a causa de la gran cantidad de fuerza que demanda el suelo a las herramientas de labranza. Conocer la fuerza que demandarán estas herramientas para su operación antes de su construcción, resulta favorable para optimizar su diseño. Bajo este enfoque, se desarrolló un reómetro para determinar los parámetros viscoplásticos del suelo de manera *in situ*, con base en una veleta de corte bajo las especificaciones de la norma ASTM D2573 – 01.

Posteriormente, se obtuvo los esfuerzos de fluencia de un suelo agrícola con este dispositivo a las velocidades de corte 1/60, 1/30, 1/18, 1/9 y 1/6 rpm, en los perfiles 0–10 cm, 10–20 cm y de 20–30 cm. Con estos datos se estimó la viscosidad plástica y el esfuerzo de fluencia característico de cada perfil de suelo con el modelo de Bingham. Después, en el mismo suelo, se determinó la fuerza a la barra de tiro por medio de una celda de carga de las geometrías Subsuelo Biomimético 1 (SB1), Subsuelo Biomimético 2 (SB2) y Subsuelo Recto (SR) para labranza vertical. Posteriormente, las tres geometrías se modelaron por Dinámica de Flujo Computacional con el modelo de Bingham, considerando el suelo como un fluido no newtoniano, en el que se introdujeron los parámetros viscoplásticos obtenidos con el reómetro. En este caso, se monitoreó la fuerza horizontal que demandan las geometrías para el corte del suelo.

Se observó que el comportamiento de las fuerzas de las tres geometrías obtenidas experimentalmente y por medio del modelado numérico fueron similares; es decir, en todos los casos la fuerza se incrementó con forme incrementó la velocidad de trabajo. La fuerza del SB1 se incrementó en 0.3013 kN y 2.3102 kN por cada kilómetro de aumento en la velocidad, de manera experimental y modelado, respectivamente. Para el SB2, la fuerza se incrementó 0.805 kN experimentalmente y 2.3245 kN con el modelado, por cada kilómetro de aumento en la velocidad. Por último, en el SR la fuerza aumentó 0.3614 kN y 3.1312 kN experimental y modelado, respectivamente, por cada kilómetro de aumento en la velocidad. Sin embargo, las fuerzas que demandó el SR fueron más altas en ambas evaluaciones que el SB1 y el SB2 por efecto de su forma geométrica.

Por lo que se puede concluir que el modelado de herramientas para labranza del suelo por medio de Dinámica de Flujo Computacional es una alternativa potencial para predecir la fuerza que demandarán dichas herramientas en operación.

**Palabras clave:** Labranza del suelo, fuerza, herramientas de labranza, parámetros viscoplásticos, reómetro, esfuerzos de fluencia, esfuerzos de corte, velocidad de trabajo, modelado numérico.

## ABSTRACT

Do to the great deal of force that soil demand to be cutting by tillage tools, tillage labor consumes around 35% of energy in a crop production. Knowing the force that tillage tools would consumes for its operation before its construction, it would be propitious for its design optimization. Therefore, it was developed a rheometer for *in situ* soil visco-plastic parameters determination, rely on a cut vane based on specifications of the norm ASTM D2573 – 01.

Then, it was obtained the yield stress of an agricultural soil through this device at the shear rates 1/60, 1/30, 1/18, 1/9 y 1/6 rpm, in the profiles 0–10 cm, 10–20 cm and 20–30 cm. These data were used to estimate the plastic viscosity and the particular yield stress of each soil profile using the Bingham model. Furthermore, at the same soil, it was determined the draft force through a load cell of the tools biomimetic subsoiler 1 (SB1), biomimetic subsoiler 2 (SB2) and a straight subsoiler (SR). Additionally, the three tool geometries were modeled by Computational Fluid Dynamics, considering the soil as a non-newtonian fluid, in which were loaded the soil visco-plastic parameters gotten by the use of the rheometer. In this case was programmed to get the horizontal force that the geometries need for the cut of the soil.

It was observed that the force behavior of the three subsoiler geometries gotten experimentally and by the numerical model were similar; that is, in all cases the force rose when the work velocity rose. The SB1's force rose 0.3013 kN and 2.3102 kN for each kilometer that velocity increased, experimentally and modeled, respectively. For the SB2's force rose 0.805 kN experimentally and 2.3245 kN modeled, for each kilometer that velocity increased. Finally, the SR's force raised 0.3614 kN and 3.1312 kN experimentally and modeled, respectively. However, the force demanded by SR was always highest in both evaluations than SB1 and SB2 by its geometry effect.

In conclusion, soil tillage modeled by Computational Fluid Dynamics is a potential option to predict the force that would demand these tools in operation.

---

# CONTENIDO GENERAL

CONTENIDO DE FIGURAS .....	iii
CONTENIDO DE TABLAS .....	v
NOMENCLATURA .....	vi
INTRODUCCIÓN .....	1
OBJETIVOS .....	3
CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES .....	4
1.1. Breve historia de la viscosidad.....	4
1.2. Interacción suelo-herramienta de labranza. ....	7
CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA .....	11
2.1. Clasificación de los fluidos. ....	11
2.2. Fluidos no newtonianos.....	12
2.2.1. Fluidos independientes del tiempo. ....	12
2.2.2. Fluidos no-newtonianos dependientes del tiempo. ....	13
2.2.3. Fluidos viscoelásticos. ....	14
2.3. Modelo plástico de Bingham. ....	14
2.4. Reómetros.....	17
2.5. Fuerzas que intervienen en una herramienta de corte de suelo. ....	18
2.6. Método experimental para determinar la fuerza a la barra de tiro. ....	22
CAPÍTULO 3. DISEÑO DEL REÓMETRO .....	24
3.1. Condiciones generales.....	24
3.2. Componentes del reómetro.....	25
3.2.1. Veleta de corte.....	26
3.2.2. Sistema de transmisión. ....	28
3.2.3. Sensor de torque. ....	30
3.2.4. Sistema para adquisición de datos. ....	30
3.2.5. Chasis.....	32
CAPÍTULO 4. EVALUACIONES EXPERIMENTALES .....	34
4.1. Parámetros viscoplásticos del suelo. ....	36
4.2. Evaluación de las geometrías de cuerpos subsoladores. ....	40
CAPÍTULO 5. MODELADO DE HERRAMIENTAS DE LABRANZA.....	44

CAPÍTULO 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	47
6.1. Reómetro. ....	47
6.2. Parámetros viscoplásticos del suelo. ....	47
6.3. Fuerzas resultantes.....	53
6.3.1. Fuerzas experimentales.....	53
6.3.2. Fuerzas de modelado numérico. ....	55
6.3.3. Comparativo de fuerzas .....	56
CONCLUSIONES.....	59
BIBLIOGRAFÍA .....	60

## CONTENIDO DE FIGURAS

Figura 1. Concepto de gradiente de velocidad en un fluido Newtoniano.....	11
Figura 2. Comportamiento reológico de algunos fluidos. ....	14
Figura 3. Modelo plástico de Bingham. ....	15
Figura 4. Esquema de reómetro capilar. ....	17
Figura 5. Esquema de reómetro rotacional. ....	18
Figura 6. Modelo de Mckyes y Ali (1977) con la herramienta tridimensional.....	20
Figura 7. Fuerzas y parámetros que actúan sobre la herramienta. ....	21
Figura 8. Determinación de carga en el subsolador agrícola. ....	23
Figura 9. Geometría y dimensiones de la veleta. ....	24
Figura 10. Bosquejo del diseño del reómetro. ....	26
Figura 11. Veleta de corte. ....	27
Figura 12. Esquema de la veleta de corte. ....	28
Figura 13. Geometría transversal del brazo telescópico. ....	28
Figura 14. Moto-reductor.....	29
Figura 15. Transmisión de velocidad.....	29
Figura 16. Transductor de torque. ....	30
Figura 17. Puente de Wheatstone.....	30
Figura 18. Amplificador de Instrumentación INA125P.....	31
Figura 19. Circuito para adquirir datos con puentes de resistencias. ....	32
Figura 20. Vista del circuito para adquirir datos. ....	32
Figura 21. Chasis del reómetro; a) Vista frontal, b) Vista lateral. ....	33
Figura 22. Vista frontal y lateral del reómetro.....	33
Figura 23. Puntos muestreados para obtención de humedad.....	34
Figura 24. Pesado de las muestras húmedas. ....	35
Figura 25. Calibración del sensor de torque.....	37
Figura 26. Ubicación de los puntos de prueba con el reómetro. ....	37
Figura 27. Recorrido de la veleta hasta los 90°.....	39
Figura 28. Veleta introducida en el suelo. ....	40
Figura 29. Subsuelo Biomimético 1.....	41
Figura 30. Subsuelo Biomimético 2.....	41
Figura 31. Geometría de Subsuelo Recto. ....	42
Figura 32. Volumen de control. a) Dimensionamiento del volumen de control, b) Mallado del volumen de control.....	44
Figura 33. Condiciones de frontera del volumen de control. ....	46
Figura 34. Vistas del reómetro. a) Dibujo en Software CAD, b) Vista física. ....	47
Figura 35. Restos de suelo después de extraer la veleta.....	48
Figura 36. Gráfica de calibración.....	49
Figura 37. Valores de esfuerzos cortantes en el perfil 0-10 cm.....	49
Figura 38. Valores de esfuerzos cortantes en el perfil 10-20 cm.....	50

Figura 39. Valores de esfuerzos cortantes en el perfil 20-30 cm..... 50

Figura 40. Relación entre el esfuerzo cortante y las velocidades de corte en cada perfil del suelo. a) 0 a 10 cm, b) 10 a 20 cm y c) 20 a 30 cm. .... 52

Figura 41. Gráfica de calibración de la celda de carga. .... 53

Figura 42. Fuerza experimental resultante de los cuerpos subsoladores (ESB1: Experimental Subsuelo Biomimético 1, ESB2: Experimental Subsuelo Biomimético 2, ESR: Experimental Subsuelo Recto)..... 54

Figura 43. Fuerzas resultantes en el modelado de los cuerpos subsoladores (MNB1: Modelado Numérico Subsuelo Biomimético 1, MNSB2: Modelado Numérico Subsuelo Biomimético 2, MNSR: Modelado Numérico Subsuelo Recto). .... 56

Figura 44. Comparación de fuerzas experimental y modelado. .... 57

## CONTENIDO DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de los fluidos según su comportamiento reológico.....	11
Tabla 2. Valores de velocidad establecidos para el reómetro. ....	38
Tabla 3. Tiempo de prueba para cada velocidad de corte. ....	39
Tabla 4. Número de nodos y elementos de cada modelo. ....	45
Tabla 5. Parámetros viscoplásticos del modelado. ....	45
Tabla 6. Valores de velocidad de trabajo. ....	46
Tabla 7. Valores de humedad, densidad aparente y resistencia a la penetración. ....	47
Tabla 8. Valores de esfuerzos de fluencia en los diferentes perfiles y velocidades de corte. ....	51
Tabla 9. Comparación de fuerzas obtenidas. ....	58

## NOMENCLATURA

SB1	Subsuelo Biomimético 1.
SB2	Subsuelo Biomimético 2.
SR	Subsuelo Recto.
$\tau$	Esfuerzo cortante (Pa).
$\mu$	Viscosidad (Pa.s).
$\frac{d\gamma}{dt}$	Velocidad de corte ( $s^{-1}$ ).
$\tau_0$	Esfuerzo de fluencia (Pa).
w	Ancho de la punta (m).
$\beta$	Ángulo que se forma con respecto a la horizontal ( $^{\circ}$ ).
r	Radio de la media luna de perturbación (m).
$\rho$	Ángulo de la media luna respecto a la cara lateral de la herramienta ( $^{\circ}$ ).
d	Profundidad de trabajo de la herramienta (m).
$\gamma$	Densidad del suelo ( $kg.m^{-3}$ ).
$\phi$	Ángulo de fricción interna ( $^{\circ}$ ).
$\delta$	Ángulo de fricción del suelo/metal sobre la superficie de la herramienta ( $^{\circ}$ ).
c	Cohesión del suelo ( $N.m^{-2}$ ).
q	Presión de carga de la superficie (Pa).
$T_{max}$	Torque máximo (Nm).
D	Diámetro de la veleta (m).
P <sub>H</sub>	Porcentaje de humedad (%).
m <sub>1</sub>	Masa del suelo húmedo (g).
m <sub>2</sub>	Masa del suelo seco (g).
R	Resistencia a la penetración (kPa).
N	Número de impactos.
M	Masa de la pesa (kg).
G	Valor de la gravedad ( $9.81 m.s^{-2}$ ).
SD	La distancia que se desliza la masa (m).
A	EL área de la superficie del cono ( $m^2$ ).
PD	La distancia de penetración (m).
da	Densidad aparente ( $kg.m^{-3}$ ).
P <sub>s</sub>	Peso del suelo seco (kg).
V <sub>c</sub>	Volumen del cilindro ( $m^3$ ).

---

# INTRODUCCIÓN

La agricultura es el conjunto de actividades y prácticas que son llevadas a cabo para producir alimentos. En este sentido, se han empleado diversas técnicas para incrementar la productividad de los cultivos bajo la labranza del suelo. Sin embargo, éstas técnicas afectan directamente las propiedades físicas de este recurso natural y al mismo tiempo causa efectos negativos al medio ambiente por su degradación. No obstante, existen alternativas para mitigar este efecto, uno de ellos es el caso de la labranza vertical comprendida en la agricultura de conservación que ha demostrado un efecto favorable (FAO, 2000).

En este contexto, existen registros que mencionan que la preparación del suelo puede llegar a demandar hasta el 35% de la energía total del proceso de producción de un cultivo a causa de las magnitudes de fuerza que requieren las herramientas de labranza para su operación (Adewoyin y Ajav, 2013). Particularmente, la fuerza demandada al tractor se incrementa con herramientas para labranza vertical, y este comportamiento depende de su geometría, condiciones de suelo, profundidad y velocidad de operación (Karmakar *et al.*, 2005b; Godwin, 2007).

Por lo tanto, por su importancia, la interacción suelo-herramienta de labranza se ha estudiado a lo largo de los años con modelos característicos que han permitido optimizar el diseño de las geometrías y reducir la demanda de energía (Karmakar *et al.*, 2005a). Los primeros estudios se realizaron con métodos analíticos (Mckyes y Ali, 1977; Mckyes, 1984) y experimentales (Godwin *et al.*, 1981). Sin embargo, estos métodos resultaban difíciles de adaptarse a geometrías de herramientas complejas, por lo que recientemente se han realizado esfuerzos para mejorar este tipo de análisis mediante el Método de Elemento Finito (Albo-helmor *et al.*, 2003), Método de Elemento Discreto (Obermayr *et al.*, 2011) y Dinámica de Flujo Computacional (Karmakar *et al.*, 2007; Barker, 2008; Garibaldi *et al.*, 2015); que principalmente se ha estudiado la fuerza a la barra de tiro, la fuerza ejercida sobre la superficie de la herramienta y los esfuerzos presentes en las diferentes secciones de la misma.

Es por ello que en este trabajo se planteó el objetivo de construir y evaluar un reómetro para determinar las propiedades viscoplásticas de suelos (que se comporta como sólido y como líquido) de manera *in situ* (en el lugar), con el fin de emplearlos para realizar modelados numéricos de la interacción suelo-herramientas de labranza para predecir la fuerza a la barra de tiro de tractores agrícolas.

Así, el presente trabajo se organizó en seis capítulos.

En el capítulo uno se hizo una revisión histórica del estudio de los fluidos y el desarrollo del concepto de viscosidad. También se incluye las teorías y modelos de las fuerzas ejercidas sobre herramientas de labranza a causa de su interacción con el suelo.

El capítulo dos muestra la clasificación de los fluidos de acuerdo a su comportamiento viscoso, además algunas de las ecuaciones analíticas para determinar la fuerza a la barra de tiro en tractores.

El capítulo tres describe el procedimiento de diseño y los elementos de un reómetro para determinar propiedades viscoplásticas de suelos.

En el capítulo cuatro se muestra la metodología para determinar los parámetros viscoplásticos del suelo y la evaluación experimental de la fuerza a la barra de tiro que demandan tres geometrías de cuerpos subsoladores.

En el capítulo cinco se muestra el modelado en Dinámica de Flujo Computacional para determinar la fuerza a la barra de tiro de los cuerpos subsoladores con los parámetros previamente obtenidos con el reómetro.

Y por último, en el capítulo seis se discuten los resultados de los parámetros viscoplásticos del suelo, así como el resultado de la fuerza que demandan las tres geometrías de cuerpos subsoladores a la barra de tiro del tractor, obtenidas experimentalmente y mediante modelado numérico.

---

# OBJETIVOS

## Objetivo general.

- Diseñar, construir y evaluar un reómetro para determinar las propiedades viscoplásticas de suelos de manera *in situ*, como herramienta para predecir la fuerza a la barra de tiro que demandan las herramientas de labranza a los tractores agrícolas.

## Objetivos específicos.

- Diseñar un reómetro con base en las especificaciones de la norma ASTM D2573 – 01.
- Determinar las propiedades viscoplásticas de un suelo agrícola por medio del reómetro para modelados de herramientas de labranza vertical por Dinámica de Flujo Computacional.
- Determinar la fuerza a la barra de tiro de herramientas de labranza vertical de manera experimental por medio de una celda de carga.

---

# CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

## 1.1. Breve historia de la viscosidad.

Los fluidos son aquellos cuerpos cuyas moléculas tienen poca coherencia entre sí, y toman la forma del recipiente que los contiene. En los materiales líquidos y gaseosos las moléculas se desplazan unas respecto de otras, de modo que el fluido cambia fácilmente de forma cuando se ve sometido a esfuerzos externos que provocan esfuerzos cortantes entre las moléculas; de este modo nace el concepto de viscosidad (Mott, 1994; García, 2008; Pasinato, 2008).

Los primeros estudios de los fluidos se le imputan a un pueblo que descendió de Asia Central en Mesopotamia, antes del año 5000 A.C., en la zona entre los Ríos Tigris y Éufrates. Esos registros muestran que tenían suficiente manejo ingenieril de los ríos como para realizar sistemas de irrigación y así, conseguir mejorar la producción de sus plantaciones. No obstante, los egipcios también realizaron verdaderas obras de ingeniería en cuanto al manejo del Río Nilo, debido a sus crecidas a lo largo de cada año. A ellos se les atribuye haber realizado las primeras obras de lo que hoy se conoce como ingeniería hidráulica. Por tal motivo, se produjo especial interés en el estudio de las propiedades y el comportamiento de los fluidos, y en caso particular el agua (Doraswamy, 2002; Pasinato, 2008; Viscardy, 2010).

En esencia, se puede decir que fueron las civilizaciones que se desarrollaron en las regiones que hoy en día ocupan China, India, Mesopotamia, Babilonia y Egipto, quienes dieron origen al conocimiento sobre el manejo del agua y por lo tanto de los fluidos.

Amenemhet en el antiguo Egipto en 1600 A.C., sin aún definirse el concepto de viscosidad, realizó una corrección de  $7^\circ$  en el ángulo de drenaje de un reloj de agua; así que, analizó las variaciones de los parámetros de este fluido con la temperatura. Por otra parte, Arquímedes en 212-287 A.C., desarrolló el tornillo que lleva su nombre; una máquina para elevación de agua que se utilizó para diversos propósitos, aunque su principio era basado en fluidos ideales. Después, en el siglo I A.C., el soldado e ingeniero romano Sexto Julio Frontino quien era encargado del

abastecimiento urbano de las fuentes y los acueductos en Roma, publicó un libro titulado "De Aquaeductibus urbis Romae". En uno de sus temas trataba de la observación de la cantidad de agua que era descargada a través de un orificio en un intervalo de tiempo dado, y concluyó que no dependía sólo del tamaño del orificio, sino también de la profundidad por debajo de la superficie del agua (Doraswamy, 2002; Pasinato, 2008; Viscardy, 2010).

Sin embargo, las grandes contribuciones en el estudio de los fluidos iniciaron en el siglo XVII, cuando Robert Hooke en 1678 publicó "La Verdadera Historia de la Elasticidad"; donde estableció la proporcionalidad entre la deformación y el esfuerzo aplicado en los sólidos. Él dedujo que cuando los sólidos son sometidos a una carga externa sufren una cierta deformación, y esta deformación se mantiene a pesar de retirar la fuerza externa; sin embargo, algunos materiales tienen la capacidad de recuperar su forma original. Afirmó que estos esfuerzos estaban muy relacionados también con las sustancias líquidas (Doraswamy, 2002).

Después, en 1687 Isaac Newton prestó atención a los líquidos en el escrito "Philosophice Naturalis Principia Mathematica", donde describe el concepto de viscosidad como un sinónimo de fricción interna, siendo la viscosidad una constante de proporcionalidad entre el esfuerzo aplicado y la velocidad de corte causada (Pasinato, 2008; García, 2008; Viscardy, 2010;).

De tal modo que se puede atribuir el concepto de viscosidad a Isaac Newton, cuando afirmó que la resistencia que ejerce un fluido a deslizarse bajo una fuerza externa es proporcional a la velocidad entre las capas del mismo. De este modo, se establece la proporcionalidad existente entre el esfuerzo por unidad de área ( $F/A$ ) necesario para producir un gradiente de velocidad en un fluido, siendo la constante de proporcionalidad un factor que describe "la capacidad de deslizamiento de un fluido". Más tarde esta constante de proporcionalidad fue llamada viscosidad. Los fluidos que se comportan de acuerdo con esta ley de proporcionalidad, se denominan fluidos Newtonianos, siendo el agua y la glicerina los más comunes que siguen este comportamiento (Rojas, 1999; Doraswamy, 2002; Mott, 2006; García, 2008).

A principios del siglo XVIII fue desarrollada la hidrodinámica, gracias en gran parte a los estudios clásicos de Bernoulli basados en los fluidos ideales. Sin embargo, 17 años más tarde Euler añadió las fuerzas de viscosidad a las fuerzas de presión, como parte de las fuerzas de interacción de tipo superficial entre las distintas capas del fluido, mediante la introducción del nuevo y principal concepto de partícula de fluido (Pasinato, 2008; Viscardy, 2010).

Navier en 1823 trabajó sobre las leyes de movimiento para un fluido real con viscosidad finita. Luego de varios años, Hagen en 1839 fue el primero en retomar el estudio de la viscosidad en los líquidos. Él determinó que la poca presión para el flujo capilar se debe a los parámetros de viscosidad y energía cinética. Dos años después, Poiseuille hizo un estudio empírico sobre la capilaridad en tubos angostos. Estos mostraban que la velocidad de flujo era proporcional al gradiente de presión dependiendo el tamaño del radio del tubo (Doraswamy, 2002).

Sin embargo, Sir Gabriel Stokes en 1845 retomó las ecuaciones que Navier había desarrollado sobre los fluidos reales, dando origen a las ecuaciones llamadas Navier-Stokes. Estas ecuaciones predecían la distribución de la velocidad y el flujo entre cilindros rotatorios y tubos cilíndricos; en fluidos de densidad y viscosidad constante. No obstante, fue hasta 1856 cuando Wiedemann mostró el acuerdo sobre las predicciones de Navier-Stokes y los datos de Hagen-Poiseuille. Él concluyó que el valor de la viscosidad obtenida, usando un cilindro concéntrico y un flujo de tubo idéntico, era intrínseca con las propiedades del material (Doraswamy, 2002; Viscardy, 2010).

Después, Reynolds estudió la importancia de las fuerzas viscosas y de inercia de los líquidos en tuberías, clasificando su comportamiento como: laminar o turbulento (Doraswamy, 2002).

Los experimentos mostraron que en algunos fluidos, la viscosidad varía con el gradiente de tensión que se le aplica; es decir, que no presentan linealidad entre la viscosidad y esfuerzo cortante. A estos fluidos se les llamó fluidos no Newtonianos. Así que, su viscosidad a temperatura y presión dadas están en función del gradiente

de velocidad o velocidad de corte (Ibarrola, 2009; Doraswamy, 2002; Sánchez, 2008).

Los estudios sistemáticos de algunos materiales que no eran regidos por la ley de Hooke sobre los sólidos, ni la ley de Newton sobre la viscosidad, iniciaron en 1835. Estos se llevaron a cabo por Weber, quien había observado cualitativamente un fenómeno llamado viscoelasticidad en hilos de seda; es decir, su comportamiento era tanto viscoso como elástico, incluso antes de los resultados sobre el flujo de Poiseuille y el trabajo de Stokes sobre líquidos viscosos. Luego Maxwell 32 años después, propuso un modelo matemático para describir los fluidos que poseen propiedades elásticas; es decir, elementos asociados a la respuesta de un sólido. También, Fick trató de describir los mecanismos del transporte de sustancias alimenticias en la sangre, y por tal motivo propuso un experimento para el transporte difusivo de dichas sustancias (Doraswamy, 2002).

Schwedoff en 1890, al trabajar con solución de gelatina coloidal en un dispositivo giratorio encontró una no linealidad en el torque y la velocidad angular. Hess en 1910 y Hatchek en 1913, fueron otros pioneros en afirmar que la viscosidad está en función de la velocidad de corte, basados en los resultados de Schwedoff para gelatina coloidal. Este tipo de comportamiento de los fluidos se asoció después con Bingham. Él describió el flujo de pinturas y sólidos en suspensión en líquidos, y propuso un límite elástico basándose gráficamente en su comportamiento. Observó que las tensiones tangenciales inferiores a un valor característico se comportaban elásticamente, y superado ese valor mostraban un comportamiento similar al de un fluido newtoniano (Doraswamy, 2002; Viscardy, 2010). Así, se puede decir que los fluidos no Newtonianos se caracterizan porque las tensiones tangenciales dependen únicamente de la velocidad de corte.

### **1.2. Interacción suelo-herramienta de labranza.**

En la labranza hay poco que presumir de tener un implemento que requiera poca fuerza a la barra de tiro para lograr tener el patrón de falla de suelo requerido; sin embargo, teniendo la adecuada forma geométrica del implemento puede ayudar

a reducir esta demanda de fuerza (Godwin *et al.*, 1981; Smith *et al.*, 1989; Godwin, 2007).

Por esta razón se han realizado considerables esfuerzos de investigación sobre las fuerzas resultantes de la interacción suelo-herramientas de labranza. Los reportes indican que las primeras investigaciones datan de la década de 1920 a 1930, desarrolladas desde la clásica mecánica de suelos de Mohr-Coulomb, y la clásica teoría elástica de Boussines.

No obstante, se ha reportado la existencia de varias variables que tienen un efecto directo con la fuerza que demanda una herramienta de labranza a la barra de tiro del tractor, entre ellas está el tipo de suelo y su humedad, la geometría y el ángulo de ataque de la herramienta, el filo de la punta, la profundidad y la velocidad de trabajo; así como los aditamentos del implemento y su configuración (Godwin *et al.*, 1984; Mckyes, 1985; Wheeler y Godwin, 1996; Karmakar *et al.*, 2005; Godwin, 2007; Cadena *et al.*, 2012).

En particular, las propiedades tribológicas y mecánicas del suelo como la cohesión, adhesión, fricción, resistencia a la penetración y la resistencia al corte, tienen un efecto significativo sobre las herramientas de labranza. Además la presión que ejerce el suelo y su distribución sobre la herramienta, son factores importantes para el diseño de éstas respecto a su desgaste y demanda de fuerzas (González, 1995; Karmakar *et al.*, 2007). Es por eso que investigadores como Godwin *et al.* (1981), Godwin *et al.* (1984), Mckyes (1985), Wheeler y Godwin (1996), Karmakar *et al.* (2007), Obermayr *et al.* (2011), entre otros, dedicaron mucho tiempo en analizar algunos modelos matemáticos y series de ecuaciones, simulando la fuerza de tracción que resulta durante la falla del suelo (Romantchik *et al.*, 2009).

En este sentido, Cadena *et al.* (2012) menciona que es muy importante el desarrollo geométrico de las herramientas de labranza, ya que las geometrías adecuadas ayudan a disminuir la demanda de energía en operaciones de labranza, contribuyendo a la reducción de costos y a tener un menor uso de combustibles fósiles en los sistemas de producción. Al inicio, el estudio de este parámetro sólo se hacía con modelos experimentales basados en el comportamiento de falla del suelo.

Como Godwin *et al.* (1981), quienes realizaron pruebas de campo con un arado topo a varias profundidades, llegando a concluir que a más profundidad se requiere más fuerza de arrastre, y por tanto, más fuerza a la barra de tiro.

También se desarrollaron modelos analíticos para el cálculo de la fuerza vertical y horizontal, basados en parámetros que intervenían al momento de la labranza. Mckyes y Ali (1977) y McKyes (1985) realizaron análisis matemáticos para predecir los efectos de velocidad de corte sobre las fuerzas de corte y el área de tierra removida por geometrías de herramientas de labranza. Por otro lado Godwin *et al.* (1984) desarrollaron un modelo para predecir las fuerzas que actúan sobre combinaciones de puntas similares, situadas a diferente separación entre cuerpos y diferente profundidad de trabajo, basándose en el modelo matemático Mohr-Coulomb.

Sin embargo, los métodos analíticos no se adaptan a geometrías de herramientas complejas. Por lo tanto, recientemente este tipo de análisis se está realizando con enfoque hacia los métodos numéricos como el Método de Elemento Finito, Método del Elemento Discreto y Dinámica de Flujo Computacional.

Así, Chi y Kushwaha (1990) desarrollaron un modelo de Elemento Finito para estudiar la falla del suelo con herramientas de labranza. También Fielke (1999) usó este método haciendo modelos bidimensionales respecto a la forma geométrica de la herramienta. Experimentó con puntas aladas para un cuerpo subsolador e hizo cambios de ángulos en sus bordes laterales, con el propósito de observar la falla del suelo en las medias lunas que generaban. Por otro lado *Albo-helmor et al.* (2003), analizaron la dinámica del suelo bajo los efectos de la velocidad, aceleración y fuerzas de corte sobre el suelo-herramienta, haciendo un estudio tridimensional dinámico. Concluyeron que se generaba una zona de falla progresiva sobre el campo de desplazamiento y una distribución de tensiones a lo largo de la superficie del suelo. Esto les permitió observar con mayor detalle la falla a lo largo de la trayectoria.

Respecto al Método de Elemento Discreto (DEM), fue utilizado por Obermayr *et al.* (2011 y 2013). Ellos analizaron el comportamiento de la herramienta de labranza

simulándola en un material granular. Los resultados arrojaron que este modelo reproduce bien las variaciones de la fuerza de tiro para diferentes anchos de corte y profundidades. Así mismo, se puede aplicar a problemas donde se involucren geometrías de herramienta más complejas.

Finalmente, el método de Dinámica de Flujo Computacional (CFD) para el estudio de la interacción suelo-herramienta ha sido empleado por Karmakar *et al.* (2007), Barker (2008) y Garibaldi *et al.* (2015). Ellos estudiaron el comportamiento del suelo alrededor de la herramienta según su forma geométrica, las presiones del suelo sobre la herramienta y la fuerza a la barra de tiro. El suelo lo caracterizaron por su comportamiento reológico como material de Bingham. Por tal caso emplearon el software ANSYS CFD®. Los resultados indicaron que la deformación del suelo y las presiones sobre la herramienta está directamente relacionada con la geometría de la misma; además, reportan que la fuerza a la barra de tiro incrementa conforme aumenta la velocidad y profundidad de trabajo.

Finalmente, con los modelados numéricos se ha estudiado la fuerza a la barra de tiro, la fuerza ejercida sobre la superficie de la herramienta y los esfuerzos presentes en las diferentes secciones de la misma. Los modelos tridimensionales son creados y basados en el método de modelización ascendente (Mollazade *et al.*, 2010), por lo que pueden ser útiles para reducir costos al optimizar equipos para labranza de suelos (Garibaldi *et al.*, 2015).

# CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA

## 2.1. Clasificación de los fluidos.

Los fluidos se caracterizan de acuerdo al comportamiento del esfuerzo cortante respecto a la velocidad de corte. En este sentido, en la Tabla 1 se muestra la clasificación de los fluidos de acuerdo con esa peculiaridad (Rojas, 1999; Doraswamy, 2002; Ibarrola, 2009; Viscardy, 2010):

Tabla 1. Clasificación de los fluidos según su comportamiento reológico.

<b>Newtonianos</b>	Su esfuerzo cortante es proporcional a la velocidad de corte	
<b>No Newtonianos</b>	Independientes del tiempo	Pseudoplástico (Shear Thinning)
		Dilatante (Shear thickening)
		Fluido ideal o de Bingham
	Dependientes del tiempo	Tixotrópicos
		Reopécticos
Viscoelásticos		

Los fluidos newtonianos son aquellos que al aplicarle una fuerza, su esfuerzo cortante es proporcional a la velocidad con que se deforma. Este comportamiento se ejemplifica en la Figura 1 (Peña, 2012). Todos los fluidos que siguen este comportamiento se dice que están regidos por la ley de Newton sobre la viscosidad.

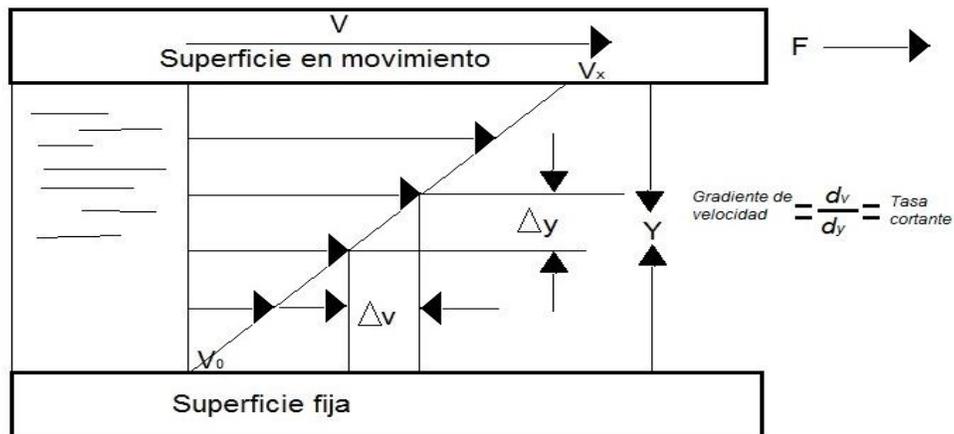


Figura 1. Concepto de gradiente de velocidad en un fluido Newtoniano.

El fenómeno anterior se describe con la Ecuación siguiente.

$$\tau = \mu \frac{d\gamma}{dt} \dots\dots\dots (1)$$

**2.2. Fluidos no newtonianos.**

Por otro lado, se les llama fluidos no newtonianos a aquellos que no comparten la relación de la ley de Newton sobre la viscosidad; es decir, la relación entre el esfuerzo y la velocidad de corte no es proporcional, ya que la viscosidad a una temperatura y presión dadas está en función del gradiente de velocidad; lo que se denomina tasa de corte (García, 2008; Sánchez, 2008; Ibarrola, 2009).

Por lo anterior, estos fluidos se clasifican dentro de las siguientes categorías:

- Comportamiento independiente del tiempo.
- Comportamiento dependiente del tiempo.
- Viscoelásticos.

**2.2.1. Fluidos independientes del tiempo.**

Estos fluidos se caracterizan porque los esfuerzos cortantes dependen únicamente de la velocidad de corte. Además, los cambios de viscosidad aparente están en función de la velocidad de corte. Estos fluidos se caracterizan en tres subcategorías (García, 2008; Ibarrola, 2009):

- *Plástico ideal o de Bingham.*

En esta categoría se encuentran las sustancias o fluidos que se comportan como los sólidos y/o como líquidos, es decir, con esfuerzos cortantes inferiores a un valor característico se comportan bajo la ley de Hooke elásticamente, y superado ese valor muestra un comportamiento similar al de un fluido newtoniano (Karmakar, 2005a; Sánchez, 2008).

- *Fluidos pseudoplásticos.*

Los fluidos pseudoplásticos no tienen una tensión de fluencia para que comiencen a deformarse, pero la viscosidad medida por la pendiente de la curva de tensión tangencial es alta para bajas velocidades de corte, y decrece con el incremento de estas mismas, hasta alcanzar un valor asintótico constante. La relación más simple que describe el comportamiento de los fluidos pseudoplásticos es la denominada ley potencial o de Ostwald (García, 2008; Ibarrola, 2009).

- *Fluidos dilatantes*

Los fluidos dilatantes al igual que los pseudoplásticos no tienen una tensión de fluencia inicial, pero el coeficiente disminuye al aumentar el gradiente de velocidad hasta que para grandes valores de éste adquiere un valor asintótico constante. Los fluidos dilatantes son mucho menos comunes que los pseudoplásticos. Ejemplo de ellos que exhiben este comportamiento son la manteca, las arenas movedizas y las suspensiones de almidón (Doraswamy, 2002; Maestro, 2002; García, 2008; Ibarrola, 2009).

### **2.2.2. Fluidos no-newtonianos dependientes del tiempo.**

Este tipo de fluidos son más complejos, debido a que su viscosidad aparente depende no sólo de la velocidad de corte, sino también del tiempo durante el cual actúa la tensión tangencial. Se clasifican en dos grupos (Doraswamy, 2002; Sánchez, 2008):

- *Fluidos tixotrópicos.*

En los fluidos tixotrópicos la tensión tangencial disminuye con el tiempo.

- *Fluidos reopéticos.*

En estos fluidos la tensión tangencial aumenta con el tiempo.

La relación entre la velocidad de corte y el esfuerzo cortante que muestra la Figura 2 indica el comportamiento general de los fluidos antes mencionados. En ella se

puede observar el comportamiento del suelo que es analizado con el modelo de Bingham (Ibarrola, 2009).

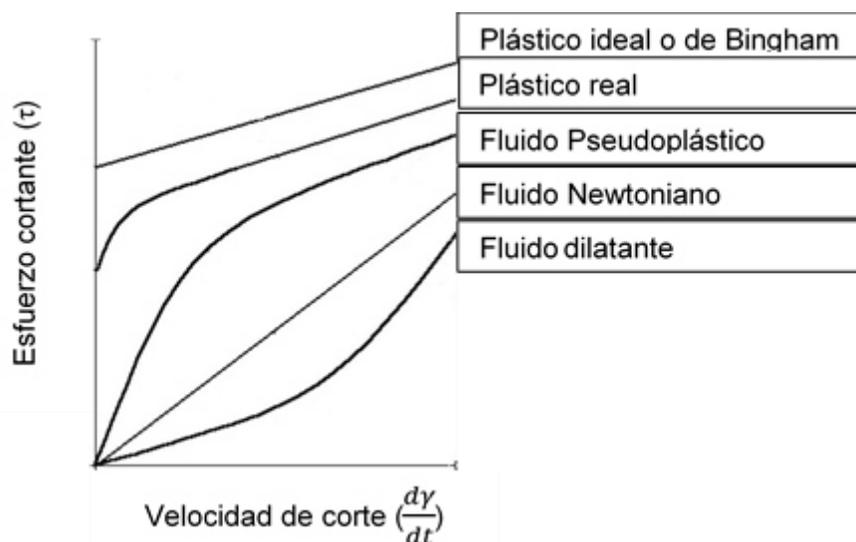


Figura 2. Comportamiento reológico de algunos fluidos.

### 2.2.3. Fluidos viscoelásticos.

Son fluidos en los que a diferencia de los viscosos, la energía de deformación es disipada totalmente, esa energía puede recuperarse como sucede en los sólidos elásticos. Los materiales viscoelásticos exhiben propiedades elásticas y viscosas. La descripción más simple, es que desde el punto de vista de la viscosidad se comportan como newtonianos, y en lo referente a su elasticidad siguen la ley de Hooke (Maestro, 2002).

Rojas (1999) menciona que en los fluidos no-newtonianos, la temperatura tiene una enorme importancia, ya que a menudo, pequeñas variaciones de temperatura pueden modificar notablemente el comportamiento reológico de un fluido de este tipo.

### 2.3. Modelo plástico de Bingham.

El modelo que mejor describe el comportamiento de los fluidos viscoplásticos, donde se encuentra clasificado el suelo, es el modelo de Bingham. Este modelo describe el esfuerzo cortante en función de la resistencia de fluencia, además de la viscosidad respecto a la velocidad de corte (Karmakar *et al.*, 2005a).

La Figura 3 muestra el comportamiento típico de un fluido visco-plástico, donde se describe la relación entre el esfuerzo cortante y la velocidad de corte. Entonces, considerando un fluido en reposo, y al aplicarle un esfuerzo inicial, éste se comportará como un sólido en cuanto los esfuerzos no alcancen la magnitud del esfuerzo de fluencia, una vez que el esfuerzo cortante aplicado exceda el esfuerzo de fluencia, este fluirá como un líquido.

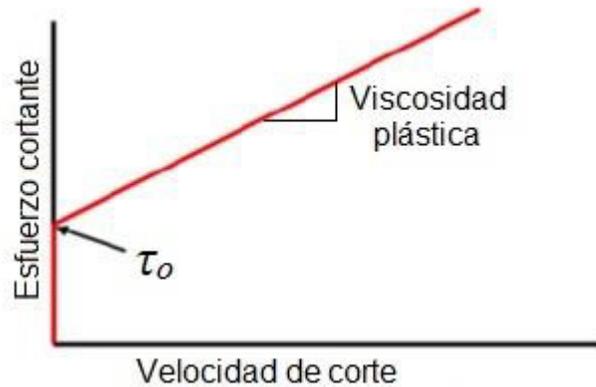


Figura 3. Modelo plástico de Bingham.

La Ecuación siguiente describe el modelo plástico de Bingham (Karmakar y Koshwaha, 2005b; Barker, 2008):

$$\tau = \tau_0 + \mu \frac{d\gamma}{dt} \text{ Cuando } |\tau| > \tau_0 \dots\dots\dots(2)$$

$$\frac{d\gamma}{dt} = 0 \text{ Cuando } |\tau| \leq \tau_0$$

Donde:

$\tau$ : Esfuerzo cortante (Pa).

$\tau_0$ : Esfuerzo de fluencia (Pa).

$\frac{d\gamma}{dt}$ : Velocidad de corte ( $s^{-1}$ ).

$\mu$ : Viscosidad (Pa.s).

La Ecuación 2 define el valor del esfuerzo cortante en función del esfuerzo de fluencia y la velocidad de corte. La ventaja de este modelo es su simplicidad, ya que al emplear una veleta de corte se puede obtener la viscosidad aplicando varias tasas

de corte, después, por cada una de ellas se determina el esfuerzo de fluencia (Karmakar y Koshwaha, 2006; Barker, 2008).

Las propiedades dinámicas del suelo se ponen de manifiesto a través de su movimiento (Terzaghi, 1943). La deformación de éste se comporta como una no-linealidad entre el esfuerzo-deformación, con la interacción de las herramientas de labranza (Kushwaha y Shen, 1994). En cambio Ashburner y Sims (1984), mencionan que la resistencia del suelo a la deformación por compresión y deformación cortante están determinadas por su resistencia mecánica, que consiste de dos componentes: resistencia cohesiva y resistencia friccional. Los valores varían considerablemente y dependen del contenido de humedad, tamaño de las partículas, tamaño y forma de los agregados, además del grado de consolidación. Sin embargo, la resistencia a la falla de un suelo depende del esfuerzo cortante máximo que éste pueda resistir, lo que es una función de la magnitud de la deformación y del esfuerzo normal sobre la superficie.

Por otro lado, González (1995) menciona que las propiedades dinámicas del suelo de mayor interés para los estudios de labranza y tracción son la cohesión, adhesión y fricción. La cohesión la describe como partículas pequeñas del suelo que en conjunto con el agua ejercen una atracción. A mayor presencia de agua, el distanciamiento entre las partículas aumenta y se reduce la fuerza de atracción. También, es importante el conocimiento y medición de la fuerza de cohesión entre las partículas, esto cuando el suelo se seca es un parámetro importante a considerar por su relación con la resistencia, la roturación y la tendencia a formar terrenos duros. La adhesión la define como la fuerza resultante de la atracción entre las moléculas diferentes. La tensión de humedad y la tensión superficial parecen explicar el comportamiento de las fuerzas de adhesión, es decir, que está directamente influenciada por la tensión superficial. La fricción la asemeja con el estado de ruptura o la pulverización del suelo, cuando está sometido a esfuerzos cortantes.

## 2.4. Reómetros.

Hoy en día existen diversos dispositivos para determinar la viscosidad de los fluidos. Los más conocidos son los viscosímetros y reómetros. Estos dispositivos tienen un comportamiento similar; la única diferencia es que el reómetro somete al fluido a varias velocidades de corte. En este sentido, podemos definir que el reómetro es el instrumento que permite cuantificar los parámetros inherentes al proceso, obteniendo mediante gráficas la relación entre el esfuerzo cortante y la velocidad de corte del fluido (Rojas, 1999). Estos dispositivos se clasifican en: capilares y de rotación.

Los capilares son basados en la extrusión controlada de un fluido (Figura 4). En este sentido, el fluido es sometido en un tubo a presiones altas y a temperatura controlada, con una boquilla para la salida del flujo. Sobre ésta, tiene montado sensores de presión, así que, con la velocidad a la que se somete el fluido para generar la presión y el flujo que resulta a la salida de la boquilla se determina la viscosidad (EIA, 2009).

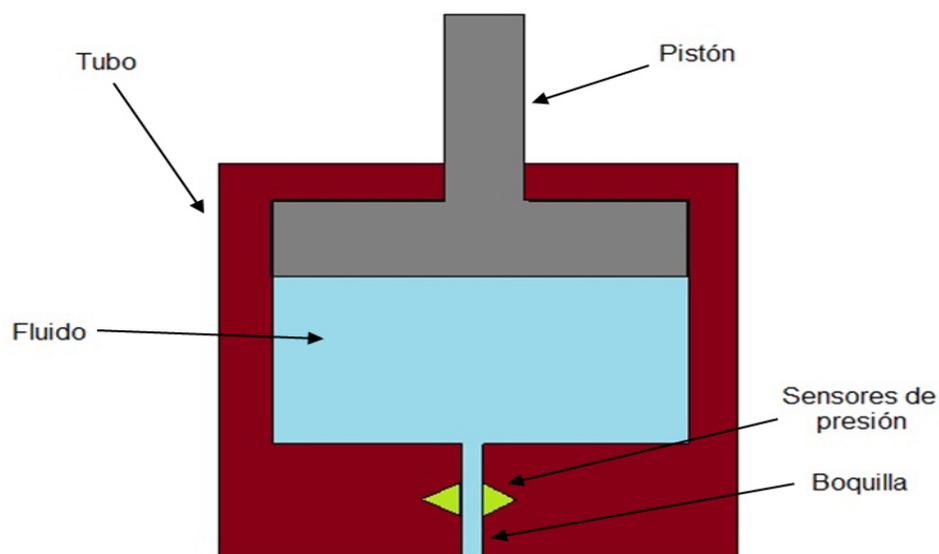


Figura 4. Esquema de reómetro capilar.

Los dispositivos rotacionales se basan en obtener la fuerza requerida para rotar dos cilindros concéntricos inmersos en un fluido (Figura 5). Los cilindros se hacen girar a una velocidad determinada produciendo un torque (Rojas, 1999; Sánchez, 2008; EIA, 2009).

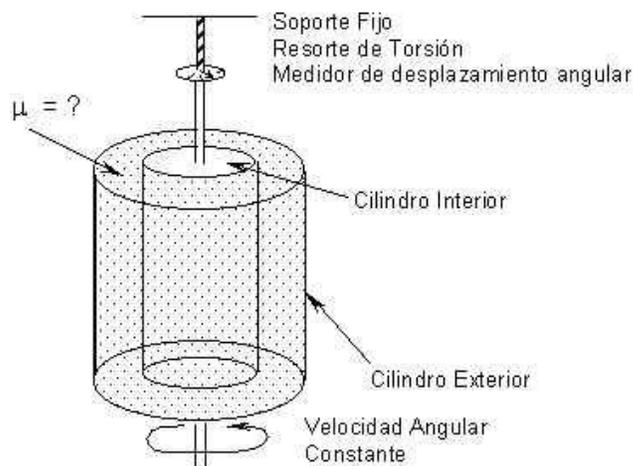


Figura 5. Esquema de reómetro rotacional.

## 2.5. Fuerzas que intervienen en una herramienta de corte de suelo.

En la agricultura, la mayor parte de las herramientas de labranza trabajan en deslizamiento con el suelo, y en esta interfaz suelo-herramienta resultan fuerzas de valor fundamental al estar la mayoría de éstas fabricada con metales (Ashburner y Sims, 1984; Godwin, 2007). Godwin (2007) considera dos componentes de fuerza provocado por la labranza:

- La fuerza horizontal o de arrastre: Es la cantidad de fuerza necesaria para tirar o empujar el implemento a través del suelo.
- Fuerza vertical: Es la fuerza que evita la penetración de la herramienta en el suelo.

En este sentido, Godwin y Spoor (1977) encontraron que los principales parámetros que tienen un efecto significativo en la demanda de fuerza al momento de la labranza son:

- La profundidad de trabajo y el ángulo de ataque de la herramienta.

En operación, la fuerza horizontal que demandan los cuerpos para labranza vertical se incrementa con forme se incrementa el ángulo de ataque y la profundidad de trabajo. En su caso, la fuerza horizontal alcanza su punto máximo en un ángulo de 90°, en condiciones uniformes del suelo. Del mismo modo, la fuerza vertical

presenta el mismo comportamiento que la fuerza horizontal, pero generalmente de menor magnitud. Por lo que él asumió que:

- Nunca se debe trabajar el equipo a más profundidad de lo necesario.
- Las pequeñas reducciones en la profundidad de trabajo, pueden hacer una muy significativa diferencia en la magnitud de la fuerza horizontal.

- Tipo de punta.

Este parámetro a medida que aumenta la anchura de la punta, las fuerzas horizontales y verticales aumentan en proporción. Estos resultados lo demostraron Romantchik *et al.* (2009) al evaluar una punta simple tipo formón y otra punta alada, al comparar las fuerzas resultantes a la barra de tiro, esta última aumentó 31% respecto a la punta tipo formón.

Todos estos parámetros influyen en la fuerza a la barra de tiro ya que depende de ellos el comportamiento de la falla del suelo en una comprensión tri-axial, como los modelos hechos por Fielke (1999).

La demanda de fuerza a la barra de tiro llamó la atención de Mckyes y Ali (1977), quienes propusieron un método analítico tridimensional para determinar la fuerza vertical y horizontal resultante sobre una herramienta de labranza. Por lo tanto, partieron de la media luna circular de suelo removido frente a la herramienta, como se observa en la Figura 6. La media luna circular se consideró a los costados, curvas AB y CD situadas en los bordes de una recta frontal BC, que tiene el mismo ancho (W) que la punta.

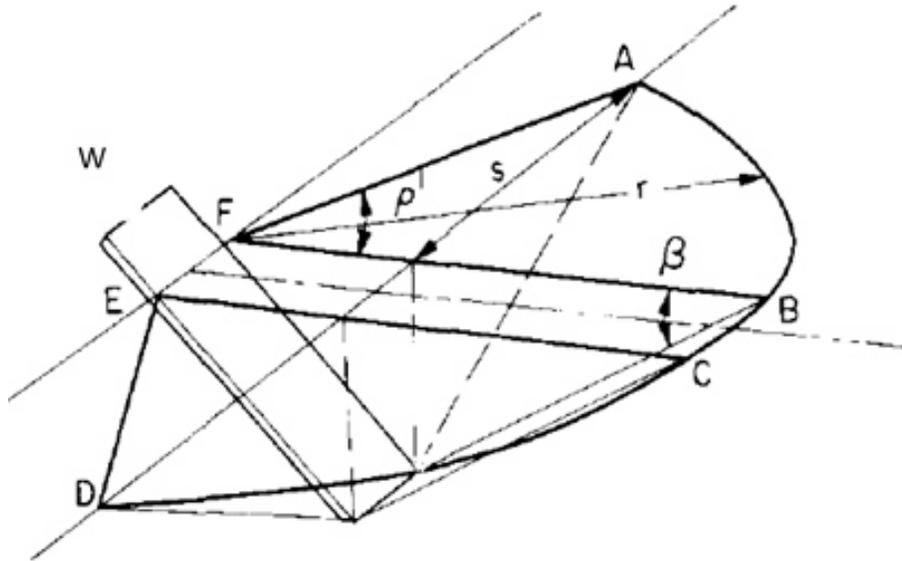


Figura 6. Modelo de Mckyes y Ali (1977) con la herramienta tridimensional.

Donde  $\beta$  es el ángulo que se forma con respecto a la horizontal,  $r$  es la distancia de perturbación del suelo frente a la herramienta o al radio de la media luna de perturbación,  $\rho$  es el ángulo máximo de la media luna respecto a la cara lateral de la herramienta y  $d$  es la profundidad de trabajo de la herramienta. Las fuerzas que actúan sobre los segmentos del suelo, incluyen los efectos de la densidad del suelo  $\gamma$ , el ángulo de fricción interna  $\phi$ , el ángulo de fricción del suelo/metal sobre la superficie de la herramienta  $\delta$ , la cohesión del suelo  $c$  y la presión de carga de la superficie  $q$ .

Mckyes y Ali supusieron que la ruptura del suelo era delante de la herramienta y estaba determinada por los ángulos  $\alpha$ ,  $\beta$  y la profundidad de trabajo  $d$ , la cual se podría expresar con la Ecuación siguiente.

$$r = d(\cot \alpha + \cot \beta) \dots \dots \dots (3)$$

Donde  $\beta$  (el ángulo de falla) es desconocido.

La sección central sobre la zona de falla, el movimiento del suelo se analizan en dos dimensiones y las fuerzas pueden ser resueltas por las Ecuaciones 4 y 5.

*Fuerzas horizontales.*

$$P1 \sin (\alpha + \delta) = R1 \sin (\beta + \phi) + \frac{c w d \cos \beta}{\sin \beta} \dots \dots \dots (4)$$

Fuerzas verticales.

$$P1 \cos (\alpha + \delta) + R1 \cos (\beta + \phi) = \frac{\gamma drw}{2} + \frac{c wd \sin \beta}{\sin \beta} + qrw \dots\dots\dots (5)$$

Las fuerzas horizontales y verticales dan origen a la componente H<sub>1</sub> (Ecuación 6) de fuerza horizontal sobre la herramienta de labranza, expresada de la siguiente manera:

$$H1 = \frac{\{\gamma d^2 \frac{r}{2d} + cd[1 + \cot \beta \cot (\beta + \phi)] q d \frac{r}{d}\} w}{\cot (\alpha + \delta) + \cot (\beta + \phi)} \dots\dots\dots (6)$$

Y la perturbación del suelo en forma de media luna, da origen a otra componente de fuerza (Ecuación 7), como se muestra a continuación:

$$H2 = \frac{\{\frac{1}{6} \gamma dr^2 + \frac{1}{2} cdr[1 + \cot \beta \cot (\beta + \phi)] + \frac{1}{2} qr^2\} \text{sen } \rho'}{\cot (\alpha + \beta) + \cot (\beta + \phi)} \dots\dots\dots (7)$$

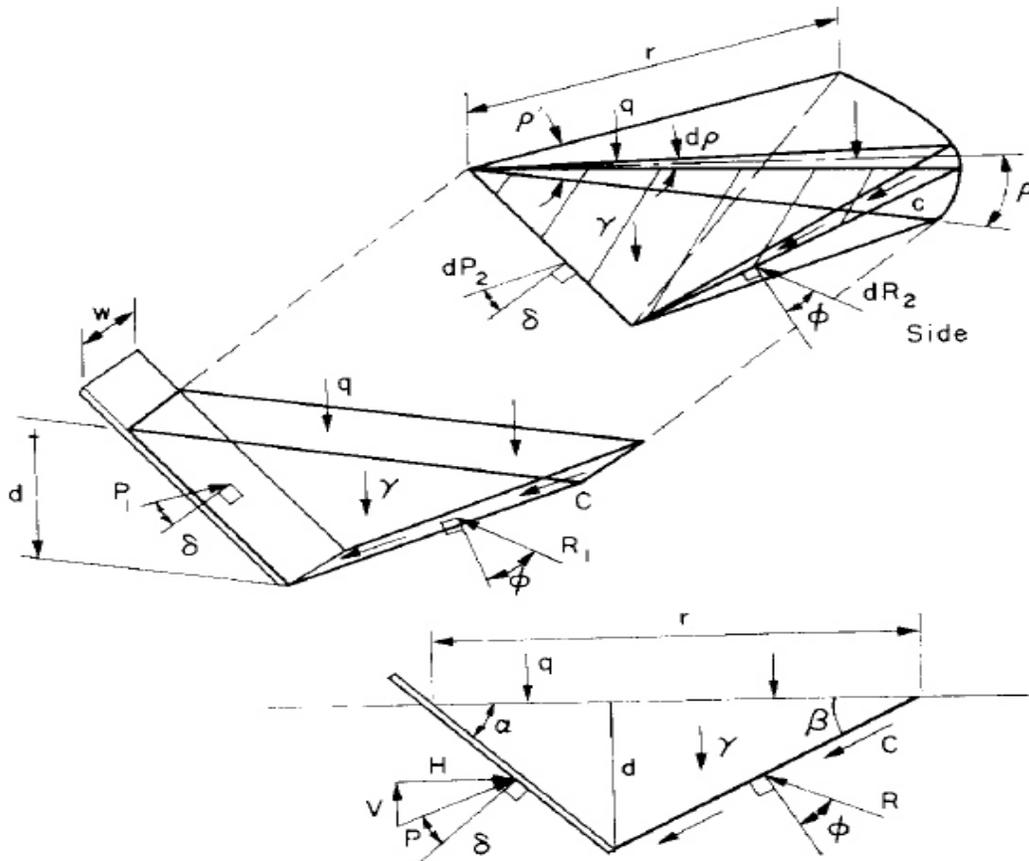


Figura 7. Fuerzas y parámetros que actúan sobre la herramienta.

La fuerza a la barra de tiro o la fuerza horizontal total es la suma de la fuerza de la sección central  $H_1$ , más dos veces la fuerza de avance  $H_2$  de cada una de la media luna a sus laterales, teniendo la Ecuación que se muestra a continuación:

$$H = H_1 + 2H_2 \dots \dots \dots (8)$$

Sustituyendo la Ecuación 6 y 7 respectivamente, tenemos:

$$H = \left\{ \gamma d^2 \frac{rw}{2d} \left[ 1 + \frac{2r}{3w} \operatorname{sen} \rho' \right] + cdw \left[ 1 + \cot \beta \cot(\beta + \phi) \right] \left[ 1 + \frac{r}{w} \operatorname{sen} \rho' \right] + \right. \\ \left. qwd \left[ 1 + \frac{r}{w} \operatorname{sen} \rho' \right] \right\} \left\{ \frac{1}{\cot(\alpha + \delta) + \cot(\beta + \phi)} \right\} \dots \dots \dots (9)$$

La Ecuación 9 también es reconocible como la misma forma utilizada para calcular las fuerzas totales sobre láminas anchas quedando como la Ecuación siguiente (Recee, 1965):

$$H = P = (\gamma d^2 N\gamma + cdNc + qdNq)w \dots \dots \dots (10)$$

En este caso, el componente horizontal se ha encontrado con las Ecuaciones 11, 12 y 13, ya que los factores son equivalentes y se expresan de la siguiente forma:

$$N\gamma H = \frac{\frac{r}{2d} \left[ 1 + \frac{2r}{3w} \operatorname{sen} \rho' \right]}{\cot(\alpha + \delta) + \cot(\beta + \phi)} \dots \dots \dots (11)$$

$$NcH = \frac{\left[ 1 + \cot \beta \cot(\beta + \phi) \right] \left[ 1 + \frac{r}{w} \operatorname{sen} \rho' \right]}{\cot(\alpha + \delta) + \cot(\beta + \phi)} \dots \dots \dots (12)$$

$$NqH = \frac{\left[ 1 + \frac{r}{w} \operatorname{sen} \rho' \right]}{\cot(\alpha + \delta) + \cot(\beta + \phi)} \dots \dots \dots (13)$$

Y para determinar el ángulo  $\beta$  de la falla del suelo, se hacen iteraciones a prueba y error en la Ecuación 11, encontrando el valor mínimo esto con respecto a la horizontal que se genera.

**2.6. Método experimental para determinar la fuerza a la barra de tiro.**

Se realiza bajo la norma NMX-O-203-SCFI (2004): “Tractor agrícola– Determinación de potencia y fuerza de tracción a la barra de tiro–Método de

prueba”. Consiste en enganchar un implemento agrícola a un tractor, después el tractor es tirado mediante una cadena o cable por otro tractor que funge como tractor motriz. Entre tractor y otro se coloca una celda de carga. Los datos arrojados por ésta son almacenados y procesados posteriormente para relacionarlos con la fuerza a la barra de tiro. Un esquema se observa en la Figura 8 (Garibaldi, 2014):

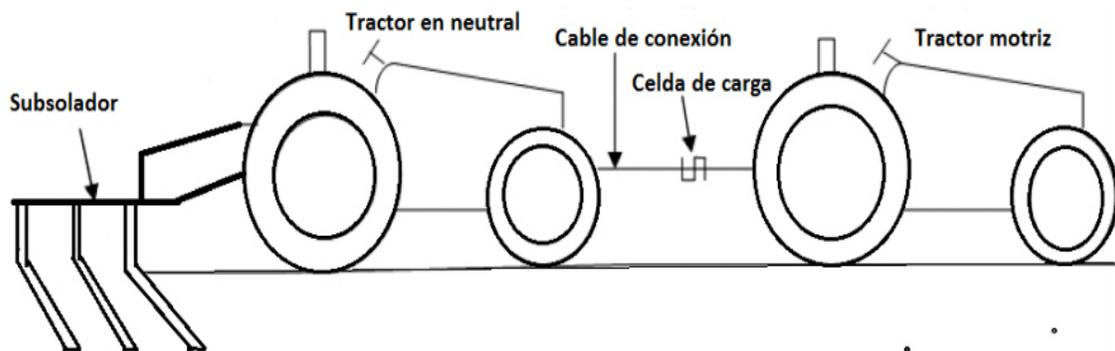


Figura 8. Determinación de carga en el subsolador agrícola.

## CAPÍTULO 3. DISEÑO DEL REÓMETRO

### 3.1. Condiciones generales.

Para determinar los parámetros viscoplásticos del suelo, viscosidad y esfuerzo de fluencia característica, es necesario encontrar otros esfuerzos de fluencia del mismo en diferentes velocidades de corte. Este procedimiento está regido por la norma ASTM D2573-01, que indica principalmente el diseño de una veleta de corte y sus velocidades de rotación. La Figura 9 ilustra dos geometrías de la veleta de corte y sus dimensiones principales (ASTM, 2016).

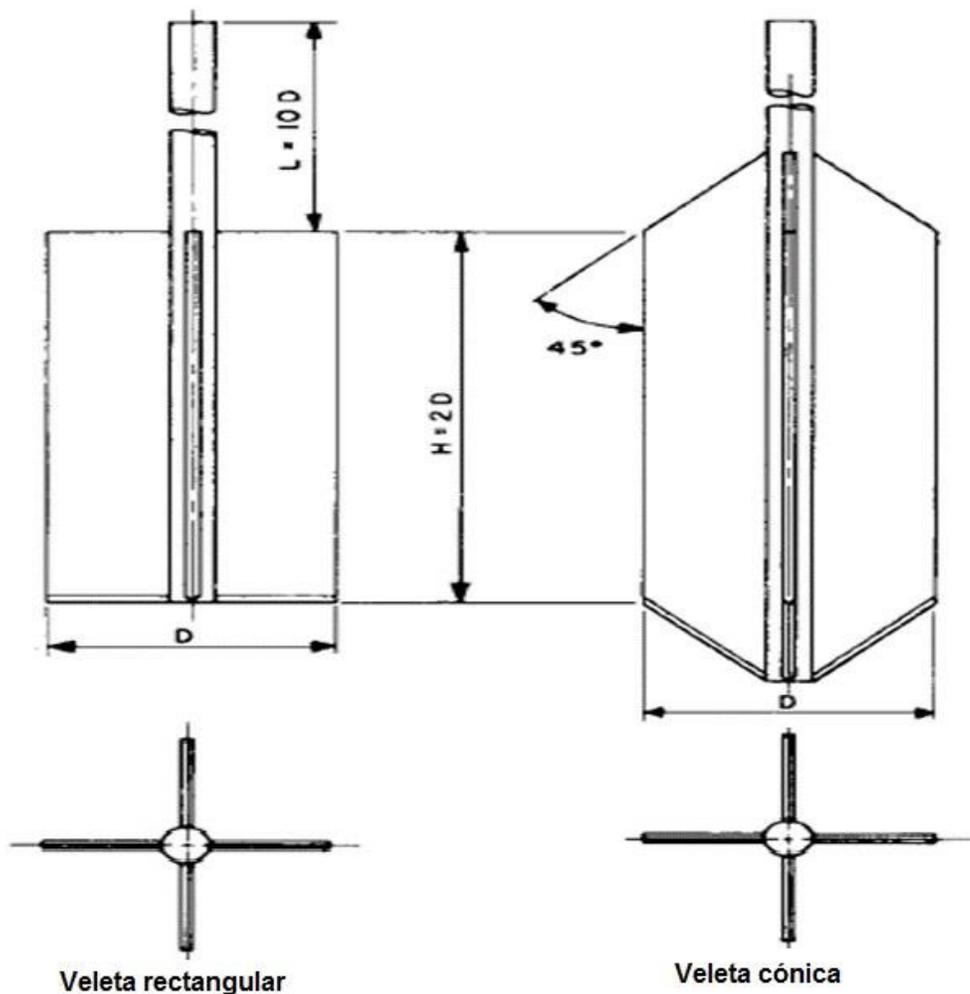


Figura 9. Geometría y dimensiones de la veleta.

En este caso, el espesor de ésta debe ser de 2 a 3 mm, el diámetro ( $D$ ) puede ser de 35 a 100 mm (1.5 a 4 in) y la altura ( $H$ ) igual a  $D$  como mínimo y 2.5 veces  $D$  como máximo. Sin embargo, la característica que tiene mayor impacto en los datos

es la velocidad de giro, que debe estar en un rango de 6° (0.01667 rpm) a 12° (0.033 rpm) por minuto.

Por lo tanto, para obtener el esfuerzo de fluencia de un determinado suelo debe registrarse el torque necesario para cortar el suelo, a una velocidad constante de giro de la veleta. Los valores del torque se grafican respecto al tiempo; después se localiza el valor de torque máximo y se sustituye en la Ecuación 14 para obtener el esfuerzo de fluencia.

$$\tau_0 = \frac{0.86T_{max}}{\pi D^3} \dots\dots\dots(14)$$

Donde:

$\tau_0$  : Esfuerzo de fluencia (Pa).

$T_{max}$ : Torque máximo (Nm).

$D$ : Diámetro de la veleta (m).

### 3.2. Componentes del reómetro.

Se partió de la condición de que el reómetro tenía que ser capaz de trabajar a velocidades bajas de rotación de la veleta, para estar dentro de norma. Además, se consideró que debía ser portátil para determinar parámetros de suelos directamente en campo. Por lo tanto, se consideró analizar los siguientes elementos y sistemas de debían componer el dispositivo:

- a) Veleta de corte.
- b) Sistema de transmisión.
- c) Sensor de torque.
- d) Sistema para adquisición de datos.
- e) Chasis.

En la Figura 10 se observa un bosquejo del acople de los componentes y sistemas que debían formar parte de reómetro.

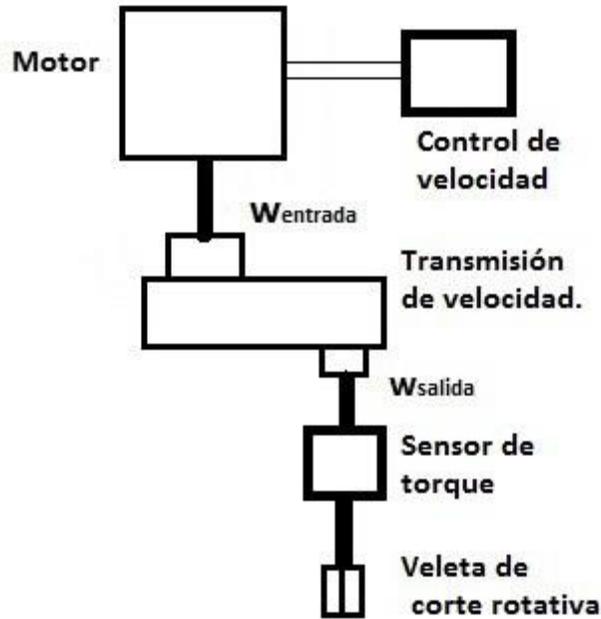


Figura 10. Bosquejo del diseño del reómetro.

A continuación se describe a detalle el diseño de cada uno de los elementos que integran el dispositivo.

### 3.2.1. Veleta de corte.

Se diseñó de acuerdo a las condiciones que determina la norma. La veleta está compuesta por un soporte acoplador y un brazo telescópico. Estos elementos se unieron formando un solo conjunto. En la Figura siguiente se observa un despiece de los elementos.

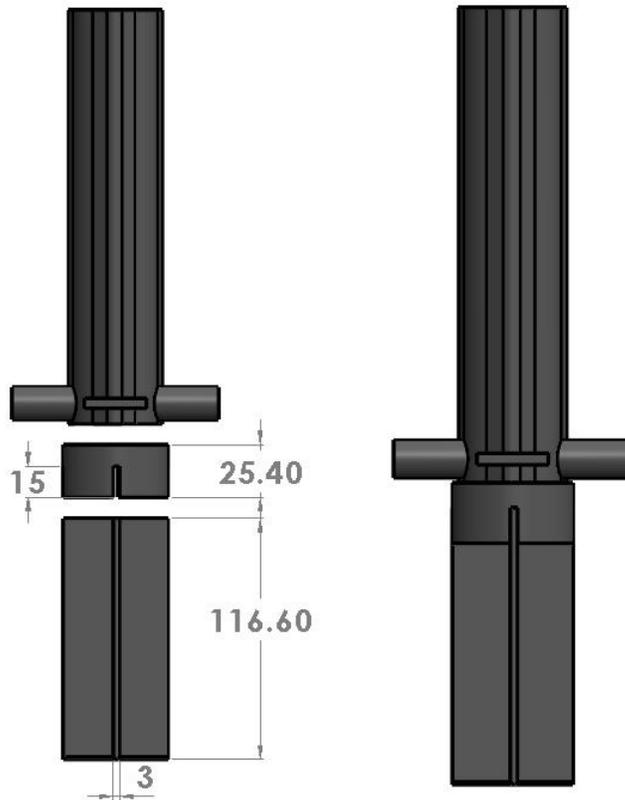


Figura 11. Veleta de corte.

La veleta principal se construyó de acero AISI 4140 con resistencia de fluencia de 415 MPa, módulo de elasticidad de 200 GPa y relación de Poisson de 0.27. Tiene 50.8 mm de diámetro, 3 mm de espesor y 116.6 mm de largo. De esta última dimensión, 15 mm se consideraron para su ensamble con el soporte acoplador. En la Figura 12 se observa a detalle la geometría de la veleta con una vista frontal, inferior e isométrica.

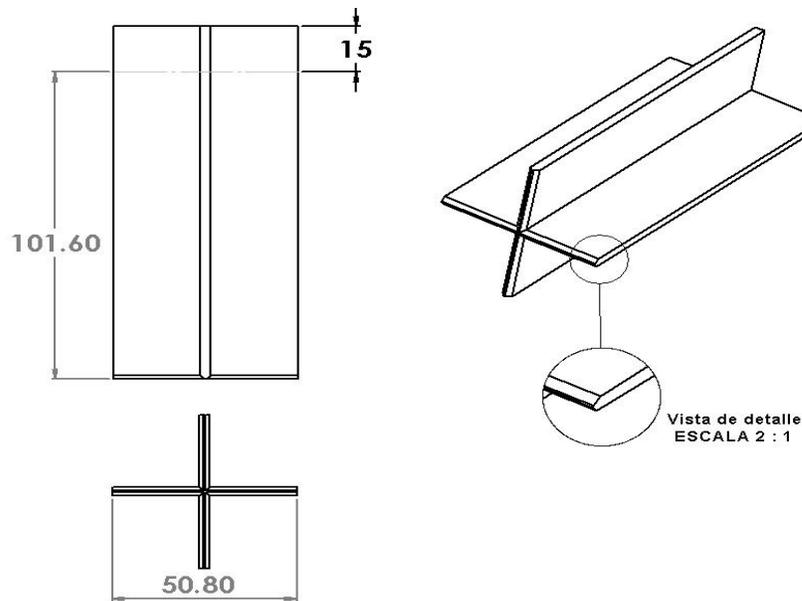


Figura 12. Esquema de la veleta de corte.

El brazo telescópico permite que la veleta se introduzca dentro del suelo a una profundidad máxima de 30 centímetros, esto con el fin de determinar los esfuerzos cortantes a diferentes profundidades. La forma geométrica del brazo (Figura 13) hace que prevalezca el torque a lo largo de su longitud.



Figura 13. Geometría transversal del brazo telescópico.

### 3.2.2. Sistema de transmisión.

Este sistema es clave para lograr las velocidades deseadas de rotación de la veleta. Por lo tanto, se adquirió un moto-reductor con motor trifásico de un hp; se alimenta con 220VCA y entrega 12 rpm a la salida (Figura 14). Así mismo, se adquirió una transmisión de velocidad con relación 1:65 (Figura 15).



Figura 14. Moto-reductor.



Figura 15. Transmisión de velocidad.

Utilizando únicamente estos elementos fue posible obtener 0.185 rpm en la veleta, como se muestra en el siguiente análisis.

$$12 \times \frac{1}{65} = 0.185 \text{ rpm}$$

Por lo tanto, para bajar aún más las revoluciones de la veleta, se utilizó un variador de frecuencia de la marca Schneider Electric, modelo ATV12H075F1. Este equipo se alimenta de 120VCA monofásico y entrega 220VCA trifásico a la salida, lo necesario para alimentar el moto-reductor. De tal modo se manipuló la frecuencia del moto-reductor considerando la relación de transmisión previamente realizada.

### 3.2.3. Sensor de torque.

El esfuerzo cortante del suelo está en función del torque que genera el suelo al ser cortado por la veleta, como lo indica la Ecuación 14. Por consiguiente, se acopló al sistema de transmisión un transductor de torque de la marca Westland Company (Figura 16). Este equipo tiene capacidad máxima 2000 Lb ft (2712Nm) y se alimenta a 5VCD.



Figura 16. Transductor de torque.

La característica particular del sensor de torque es que tiene cimentado un puente de Wheatstone con galgas extensiométricas sobre su eje (Figura 17). Entonces, al aplicarle un esfuerzo torsional se deforma, convirtiéndose en una señal eléctrica; es decir, el valor de la resistencia del puente Wheatstone cambia, produciendo variación del voltaje.

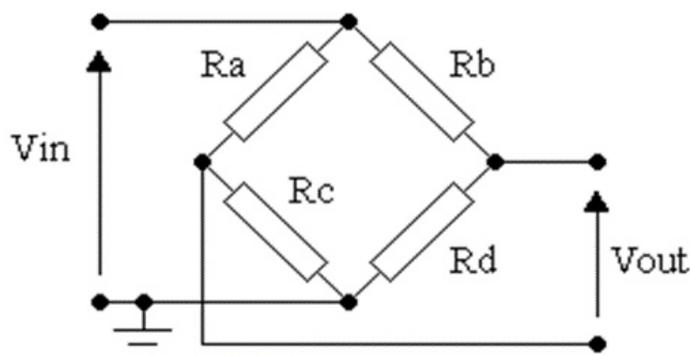


Figura 17. Puente de Wheatstone.

### 3.2.4. Sistema para adquisición de datos.

Para leer y almacenar los datos arrojador por el sensor de torque, se construyó un circuito acondicionador de señal.

En este caso, considerando el funcionamiento del puente de Wheatstone, el circuito se hizo contemplando sus divisores de tensión. Primero fue necesario acondicionar los dos voltajes de salida transformándolos a una sola señal, para ello se utilizó el amplificador de instrumentación INA125P (Figura 18), que está diseñado específicamente para este tipo de circuitos. Una vez acondicionados los voltajes, se utilizó el microcontrolador ARDUINO UNO para su lectura.

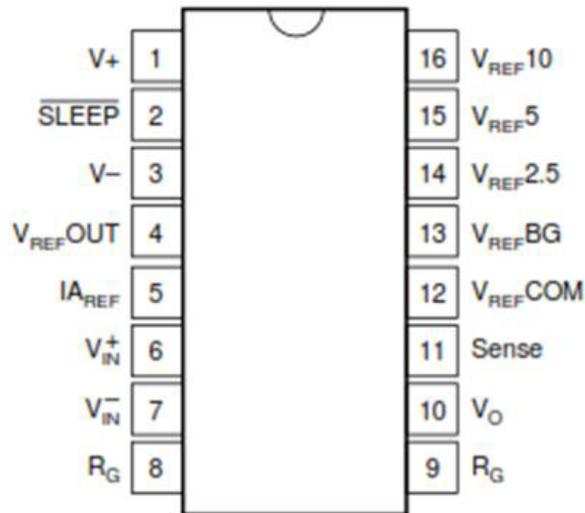


Figura 18. Amplificador de Instrumentación INA125P.

Después, para almacenar los datos se utilizó la shield SD de Arduino, una tarjeta que permite guardar datos en una memoria SD. Esta se configuró y programó para guardar los datos en un archivo con extensión “xls”. La Figura 19 muestra un esquema del circuito para la adquisición de datos, y la Figura 20 muestra una vista física del mismo (Arduino, 2016).

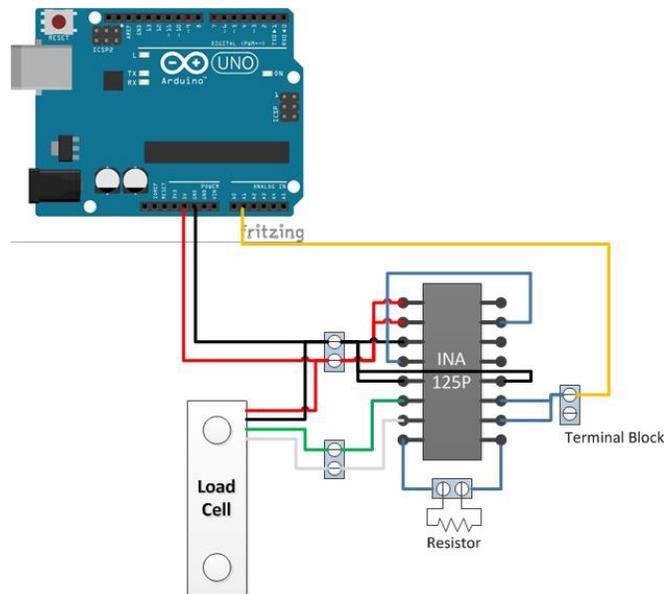


Figura 19. Circuito para adquirir datos con puentes de resistencias.

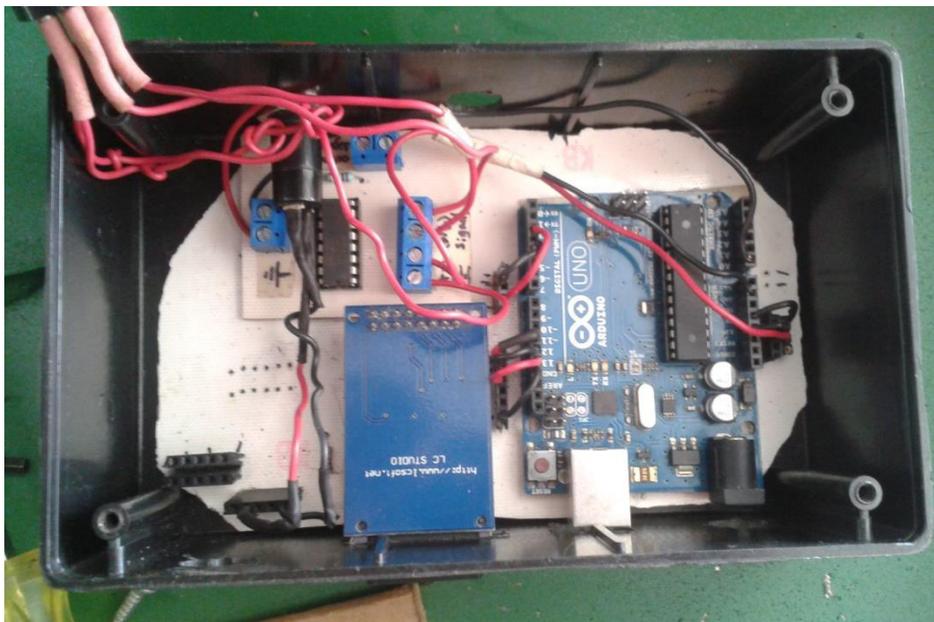


Figura 20. Vista del circuito para adquirir datos.

### 3.2.5. Chasis.

El chasis se dibujó en el software SolidWorks 2016, y cumple la función de soportar e integrar el reómetro como un solo dispositivo. Para transportar el reómetro a campo agrícola, al chasis se le diseñó un enganche para tractores agrícolas categoría dos, basado en la norma ASAE S217.12 (1994). Éste está fabricado de perfil tubular cuadrado de 2 1/2" cédula 30, y para el soporte del moto-

reductor y la transmisión se utilizó placa de 1/2" de espesor. Además, para la nivelación en campo se le acoplaron tornillos sin fin (Figura 21).

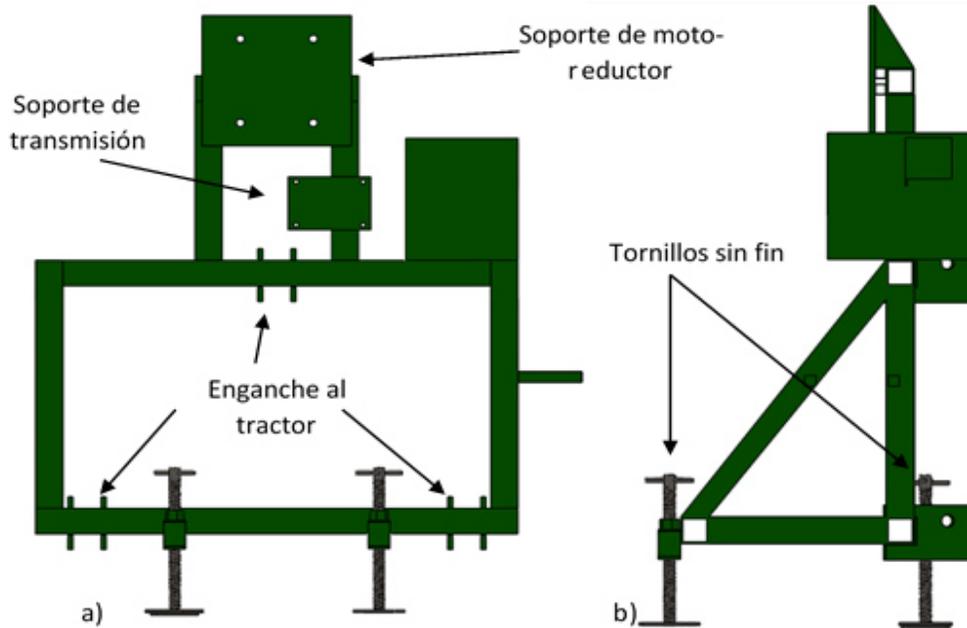


Figura 21. Chasis del reómetro; a) Vista frontal, b) Vista lateral.

La Figura 22 muestra un ensamble de los diferentes componentes y sistemas sobre el chasis, los que forman en conjunto el reómetro.

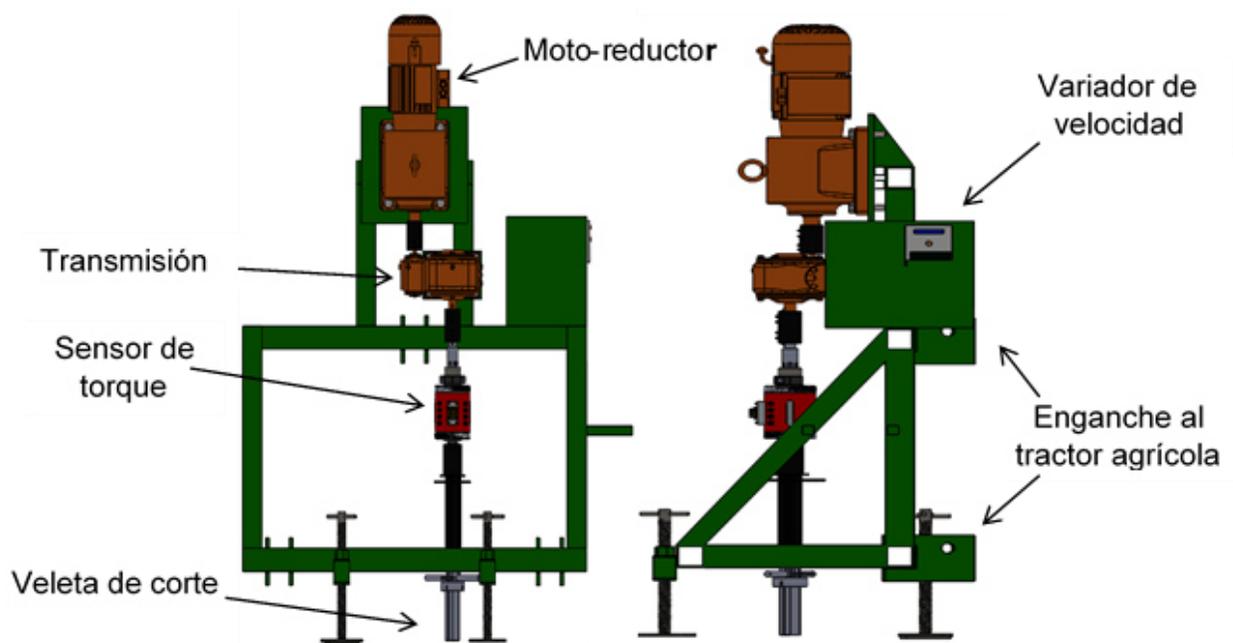


Figura 22. Vista frontal y lateral del reómetro.

---

## CAPÍTULO 4. EVALUACIONES EXPERIMENTALES

Este capítulo describe la evaluación del reómetro en terreno agrícola para obtener las propiedades visco plásticas del suelo. También se describe la evaluación de tres herramientas de labranza vertical para determinar la fuerza a la barra de tiro en el tractor. Por lo tanto, se delimitó un terreno de 50 m x 100 m y se caracterizó el suelo con los porcentajes de arena, limo y arcilla. Previo a las evaluaciones se determinó su contenido de humedad (%), resistencia a la penetración (kPa) y densidad aparente ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ).

El contenido de humedad se obtuvo por medio del método gravimétrico en las capas 0-10 cm, 10-20 cm y 20-30 cm, con cuatro repeticiones. Los puntos se muestrearon en una diagonal principal del terreno, como se observa en la Figura (23).

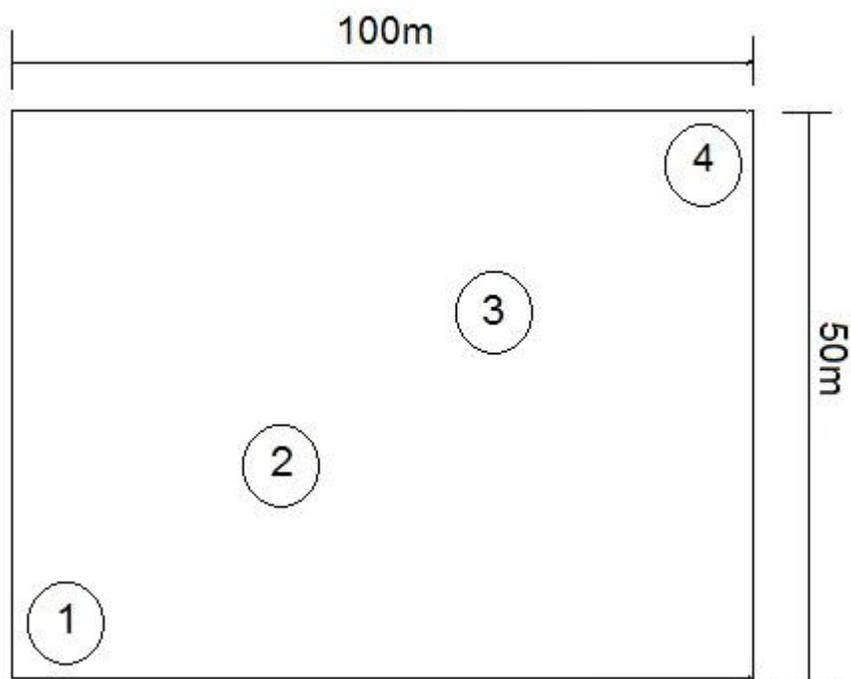


Figura 23. Puntos muestreados para obtención de humedad.

Para la extracción de las muestras de suelo, se utilizó una barrena y una pala recta. Después, el suelo se depositó en contenedores de aluminio, y éstos a su vez en bolsas de plástico para evitar pérdidas de humedad (Figura 24). Posteriormente se pesaron con una báscula con sensibilidad de 1 gramo.

Como lo indica el método gravimétrico, las muestras se introdujeron en una estufa de secado a 105 °C por 48 horas. Después se obtuvo el peso de suelo seco y peso de suelo húmedo descartando el peso de los botes de aluminio y las bolsas de plástico. Así, el porcentaje promedio de humedad en cada uno de los perfiles del suelo se determinó a sustituir los datos en la Ecuación 15.

$$P_H = \left( \frac{m_1 - m_2}{m_2} \right) \times 100 \dots\dots\dots(15)$$

Donde:

P<sub>H</sub>: Porcentaje de humedad (%).

m<sub>1</sub>: Masa del suelo húmedo (g).

m<sub>2</sub>: Masa del suelo seco (g).



Figura 24. Pesado de las muestras húmedas.

La resistencia a la penetración del suelo se obtuvo con un penetrómetro dinámico, con base en la metodología y recomendaciones del CIMMyT (2013). Al igual que la humedad, se ubicaron cuatro puntos en una diagonal principal del área delimitada. Las características del penetrómetro son: masa deslizante de 3.839 kg, distancia de deslizamiento de 26.4 cm, ancho y altura de cono de 20 mm y 25 mm, respectivamente.

Por lo tanto, los datos de resistencia se determinaron a los 10, 20 y 30 cm de profundidad desde la superficie del suelo. Para tal caso se registró el número de golpes necesarios para alcanzar dichas profundidades. Después, con los datos

característicos del penetrómetro y el número de golpes se obtuvo la resistencia a la penetración con la Ecuación que se muestra a continuación:

$$R = \frac{(NxMxgxSD)}{(AxPD)(1000)} \dots\dots\dots(16)$$

Donde:

R: Resistencia a la penetración (kPa).

N: Número de impactos.

M: Masa de la pesa (kg).

g: Valor de la gravedad (9.81 ms<sup>-2</sup>).

SD: La distancia que se desliza la masa (m).

A: EL área de la superficie del cono (m<sup>2</sup>).

PD: La distancia de penetración (m).

En el caso de la densidad aparente de cada perfil del suelo, se determinó con el método del cilindro (Rubio, 2010). Se contempló el volumen conocido de los contenedores de aluminio (donde se almacenaron las muestras) y el peso del suelo seco, y por medio de la Ecuación 17 se obtuvieron los valores.

$$da = \frac{Ps}{Vc} \dots\dots\dots (17)$$

Donde:

da: Densidad aparente (kg.m<sup>-3</sup>).

Ps: Peso del suelo seco (kg).

Vc: Volumen del cilindro (m<sup>3</sup>).

#### 4.1. Parámetros viscoplásticos del suelo.

Previamente a la obtención de datos en campo, se obtuvo la curva de ajuste del sensor de torque en función del torque de entrada y el voltaje de salida. Para esto se le aplicaron trece magnitudes de torque conocidas con un torquímetro de trueno de la marca urrea, modelo 6014-3, quien tiene un rango de capacidad de 75 Nm a 332 Nm. El voltaje de salida se leyó con el sistema de adquisición de datos expuesto previamente (Figura 25).



Figura 25. Calibración del sensor de torque.

Una vez se tenía el sensor calibrado, se procedió a determinar las propiedades visco-plásticas del suelo. La muestra de datos se obtuvo de cinco puntos ubicados en las diagonales principales de un área de un metro cuadrado, ubicado en la parte central del terreno. La Figura 26 representa la distribución de los cinco puntos muestreados. Entonces, para estas pruebas el tractor se posicionó con el reómetro en el punto deseado.

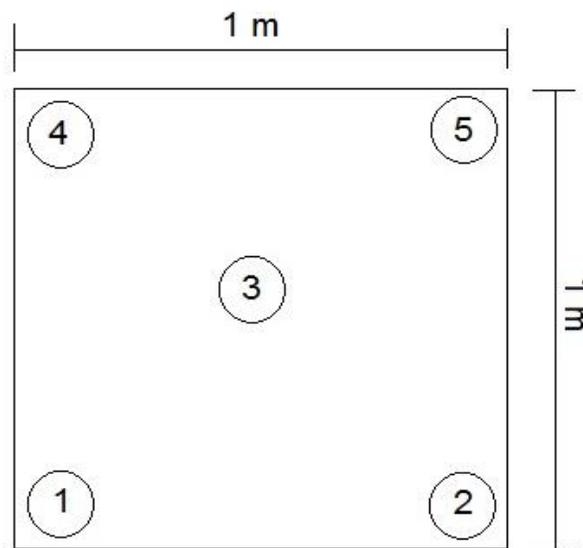


Figura 26. Ubicación de los puntos de prueba con el reómetro.

La fuente de energía de los elementos eléctricos del reómetro se hizo con un generador a gasolina marca Thunder. Este generador entrega un voltaje de salida

de 120 VCA monofásico a 60 Hz, potencia de 4,000 Watts y una corriente nominal de 30 A adecuado para la alimentación del variador de frecuencia.

Por cuestiones prácticas, cada punto se analizó con la misma velocidad de corte en los perfiles 0-10 cm, 10-20 cm y 20-30 cm. Las cinco velocidades de corte para la veleta se establecieron previamente, las que se observan en la Tabla 2. Para obtener dichas velocidades se manipuló la frecuencia del moto-reductor por medio del variador.

Tabla 2. Valores de velocidad establecidos para el reómetro.

<b>Velocidad</b>	<b>Frecuencia para el variador (Hz)</b>	<b>Velocidad a la salida del moto-reductor (rpm)</b>	<b>Velocidad de la veleta (rpm)</b>
1	5.41	1.083	1/60
2	10.8	2.167	1/30
3	18.0	3.611	1/18
4	36.1	7.222	1/9
5	54.2	10.833	1/6

Sin embargo, se decidió trabajar a tres velocidades de corte que rebasan el rango recomendado por la norma, con el propósito de observar un rango más amplio de los esfuerzos de fluencia.

El registro de datos se hizo cuando la veleta giró de 0° a 90° por cada velocidad de corte (Figura 27). Considerando que el suelo comienza a fallar de 20° a 30° (Barker, 2008) al utilizar una veleta rotativa.

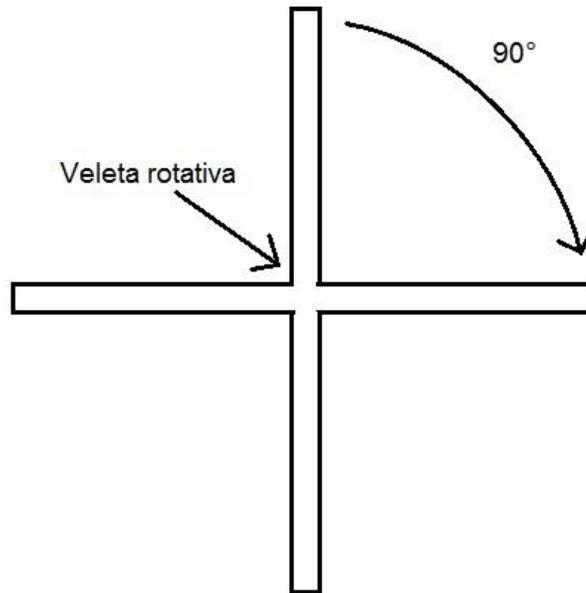


Figura 27. Recorrido de la veleta hasta los 90°.

En este sentido, la Tabla 3 proporciona el tiempo que le tomó a la veleta girar los 90°.

Tabla 3. Tiempo de prueba para cada velocidad de corte.

Velocidad de la veleta (rpm)	Tiempo (s)
1/60	900
1/30	450
1/18	270
1/9	150
1/6	90

La veleta se introdujo golpeándola con un mazo, procurando no remover el suelo para no afectar los datos de torque. La Figura 28 proporciona una vista de la veleta introducida en un punto a muestrear.



Figura 28. Veleta introducida en el suelo.

Después, las propiedades visco plásticas del suelo se analizaron por cada perfil. Entonces, con los datos de torque obtenidos se determinaron los esfuerzos cortantes para cada una de las velocidades de corte. Posteriormente se ubicó el esfuerzo de fluencia por cada velocidad de corte, y se hizo con ellos una gráfica de dispersión. La pendiente de la curva de ajuste representó la viscosidad del suelo, y la intercepción de la misma con el eje “Y” representó el esfuerzo de fluencia para la viscosidad específica.

#### **4.2. Evaluación de las geometrías de cuerpos subsoladores.**

Se evaluaron las tres geometrías de cuerpos subsoladores para labranza vertical del suelo que se observan en las Figura 29, 30 y 31. Las geometrías de las Figuras 29 y 30 fueron diseñadas con base en biomimetismo por Garibaldi *et al.* (2016), investigador del programa de mecanización del INIFAP-Campo Experimental Pabellón. Principalmente definieron la curvatura de ataque con el suelo, con el propósito de reducir la fuerza a la barra de tiro. La geometría de la Figura 31 es la que comúnmente usan los productores en el equipo multiarado. Estas geometrías están equipadas con puntas “Yeoman” para formar una cavidad en el suelo a su paso, la que facilita la retención de humedad, aireación y desarrollo de raíces (Garibaldi *et al.*, 2015).

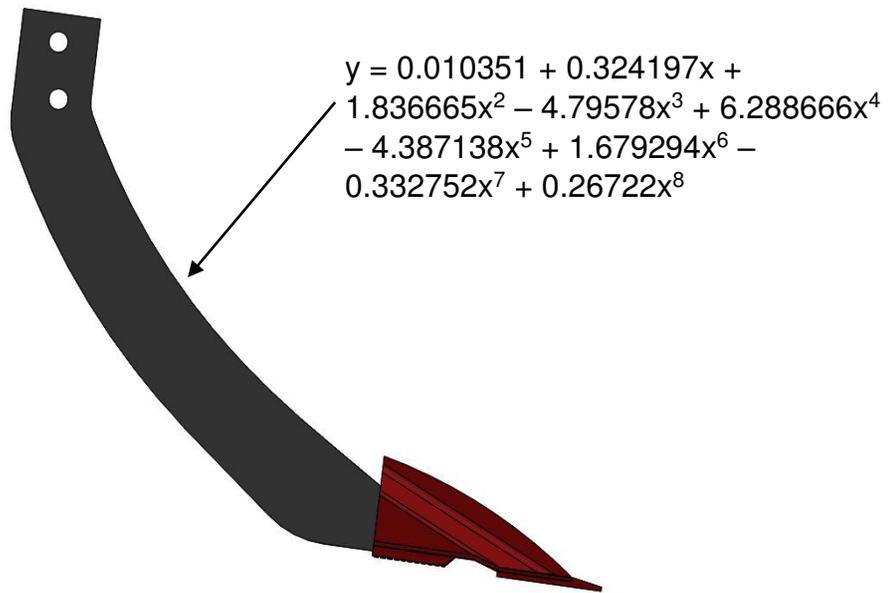


Figura 29. Subsuelo Biomimético 1.

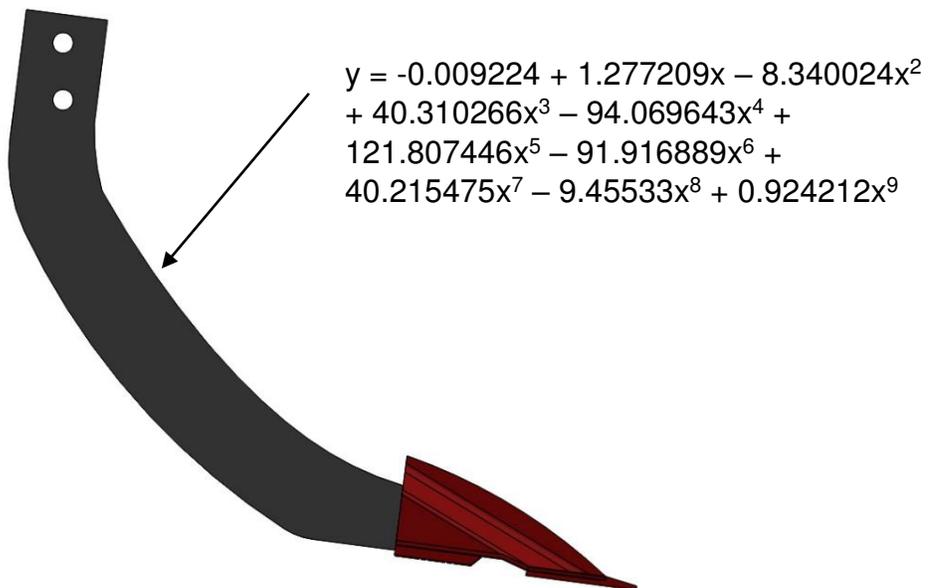


Figura 30. Subsuelo Biomimético 2.



Figura 31. Geometría de Subsuelo Recto.

Para determinar la fuerza a la barra de tiro, se utilizó una celda de carga modelo F204 marca Novatech, con capacidad máxima de 5000 kg. Previamente a las pruebas, se obtuvo una ecuación de ajuste de la carga y el voltaje de salida. Para ello se colocó la celda de carga en una viga horizontal y se le colgaron masas de 25 kg de forma gradual, haciendo dos repeticiones. Los datos se visualizaron con un multímetro.

Las geometrías se montaron en un chasis de manera individual. Después, el chasis se enganchó a un tractor New Holland 5610 de 80 hp, el que fungió como tractor freno, con posición neutra en la caja de cambios. Éste se tiró con otro tractor John Deere 5415 4WD de 77 hp mediante una cadena, el que fungió como tractor motriz. Por lo tanto, entre ambos tractores se colocó la celda de carga. Cada geometría se trabajó con carga a tres velocidades diferentes, y por cada velocidad se hicieron tres repeticiones en tramos de 100 m. Para determinar la velocidad de trabajo se registró el tiempo con un cronómetro. Después se obtuvieron datos con las herramientas suspendidas.

Una vez concluidas las pruebas de fuerza, se determinó la profundidad de trabajo de cada geometría obteniendo un promedio de siete repeticiones. Los datos de salida de la celda de carga fueron grabados con una cámara digital. Posteriormente

se procesaron en computadora registrando los voltajes en intervalos de un segundo. De este modo, los voltajes se sustituyeron en la ecuación de ajuste para obtener la fuerza con carga y sin carga. Finalmente, por diferencia se llegó a la fuerza neta que demandó cada herramienta.

---

## CAPÍTULO 5. MODELADO DE HERRAMIENTAS DE LABRANZA

Para comparar las fuerzas que demandaron las tres geometrías de cuerpos subsoladores evaluados en campo agrícola, se realizó un modelado numérico de las mismas por Dinámica de Flujo Computacional. Por lo tanto, se utilizó el software Ansys Workbench y Ansys CFD. Primero se importaron las geometrías dibujadas en CAD al módulo “Workbench Design Modeler” para definir un volumen de control por cada una de ellas.

El volumen de control (Figura 32a) para todas las herramientas se consideró axisimétrico para reducir el tiempo de cálculo. Las dimensiones de este fueron 2.5 m de largo (L), 0.75 m de altura (H), 0.75 m de ancho (W). La distancia (P) es la profundidad de trabajo de las geometrías obtenidas experimentalmente, las que fueron 32.1 cm para el Subsuelo Biomimético 1, 29.8 cm para el Subsuelo Biomimético 2 y 24.3 cm para el Subsuelo Recto.

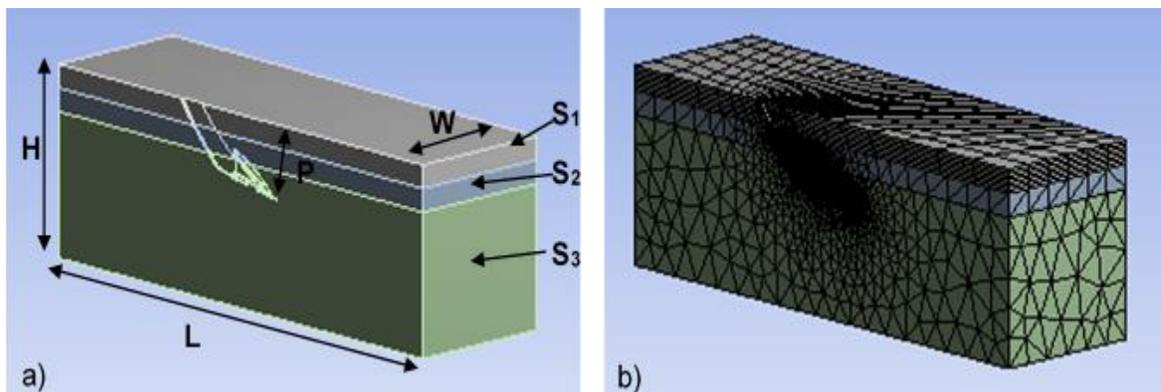


Figura 32. Volumen de control. a) Dimensionamiento del volumen de control, b) Mallado del volumen de control.

Para asemejar el modelado lo más apegado a las condiciones reales, el volumen de control se dividió en tres perfiles (Figura 32a). El perfil superior representó el perfil del suelo de 0-10 cm, el perfil intermedio representó el perfil de 10-20 cm del suelo. Sin embargo, por cuestiones prácticas, las propiedades del perfil 20-30 cm del suelo, se consideró el volumen restante del modelo.

El mallado se hizo con elementos tipo tetraedros (Figura 32b) y en las caras de la herramienta se realizó un refinamiento de malla con el método “dimensionamiento de cara”. Por lo tanto, el número de elementos y nodos resultantes en el mallado de cada modelo se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Número de nodos y elementos de cada modelo.

<b>Biomimético 1</b>		<b>Biomimético 2</b>		<b>Subsuelo Recto</b>	
No. Nodos	No. Elementos	No. Nodos	No. Elementos	No. Nodos	No. Elementos
36 429	189 017	36 610	190 073	33 831	175 371

Después, los modelos mallados se importaron al módulo Ansys CFD donde se establecieron las condiciones iniciales, de frontera y de solución.

El suelo se consideró como el modelo plástico de Bingham. Por lo tanto, los parámetros viscoplásticos que se introdujeron fueron los obtenidos experimentalmente con el reómetro (Tabla 5).

Tabla 5. Parámetros viscoplásticos del modelado.

<b>Parámetros</b>	<b>Perfil 1</b>	<b>Perfil 2</b>	<b>Perfil 3</b>
Esfuerzo de fluencia (kPa)	59.66	60.293	70.56
Viscosidad (kPa.s)	56.537	93.683	132.03
Densidad (kg.m <sup>-3</sup> )	1,380	1,360	1,390
Compactación (kPa)	673.97	1,289.73	1,523.75

Las condiciones de frontera aplicadas a las diferentes caras del volumen de control fueron (Figura 33): salida de material a temperatura constante de 25 °C, la cara superior se contempló abierta a presión constante de 0 Pa y temperatura de 25 °C. La cara donde se ubica la herramienta se consideró como simetría; y las caras de la herramienta, la cara exterior e inferior se consideraron como paredes de deslizamiento libre.

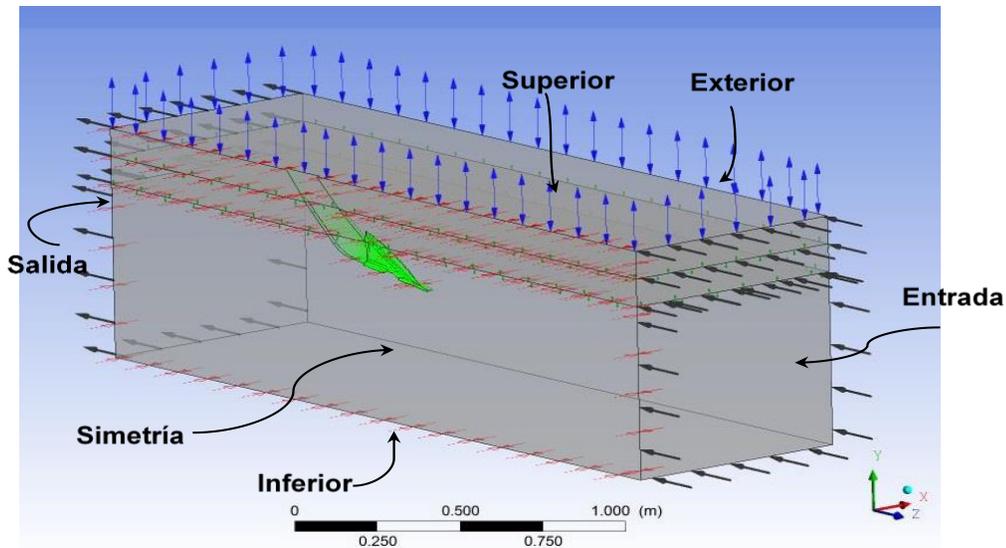


Figura 33. Condiciones de frontera del volumen de control.

En la entrada, se programó el flujo de material a las diferentes velocidades de trabajo obtenidas experimentalmente, las que se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Valores de velocidad de trabajo.

Geometría	Velocidad	Velocidad (km·h <sup>-1</sup> )
Subsuelo Biomimético 1	1	2.6
	2	4.0
	3	5.8
Subsuelo Biomimético 2	1	2.7
	2	4.1
	3	5.8
Subsuelo Recto	1	2.7
	2	4.1
	3	5.9

Por lo tanto, para determinar la fuerza horizontal, se programó su monitoreo en las caras de la herramienta. El resultado y comportamiento de las fuerzas obtenidas a través del modelo, se compararon con las obtenidas experimentalmente.

## CAPÍTULO 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1. Reómetro.

En seguida en la Figura 34 se presenta una vista isométrica en 3D del reómetro y una vista física del dispositivo sobre terreno agrícola. Se estima un peso total de 110 kg y puede ser enganchado al tractor por una sola persona.

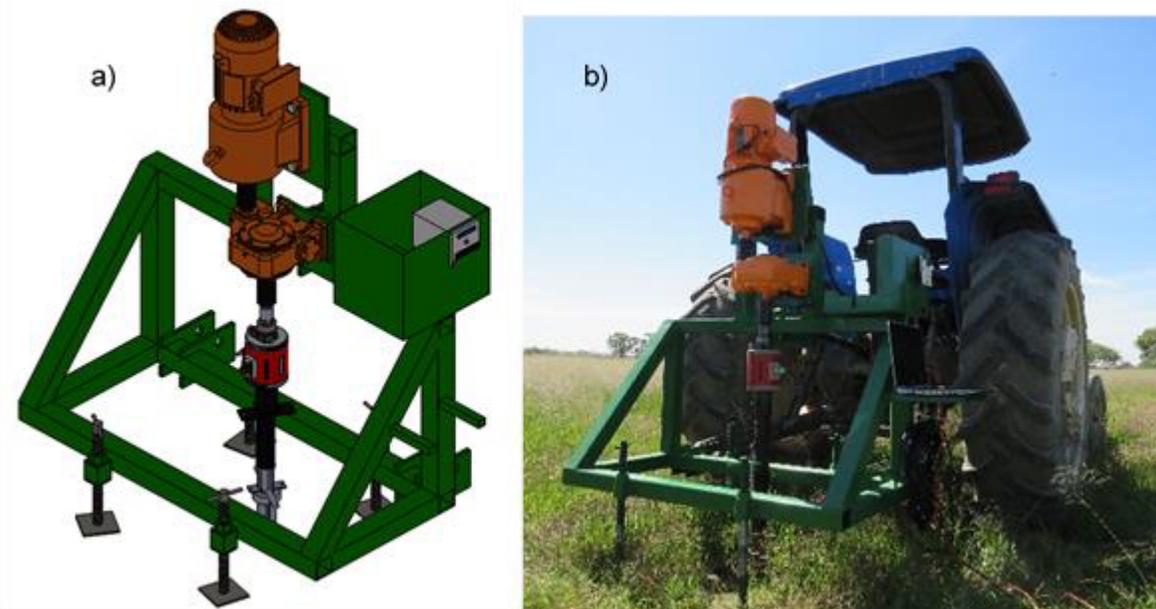


Figura 34. Vistas del reómetro. a) Dibujo en Software CAD, b) Vista física.

### 6.2. Parámetros viscoplásticos del suelo.

El suelo del terreno donde se realizaron las evaluaciones presentó una textura franco arenoso con 55.24 % de arena, 26.0 % de limo y 18.76 % de arcilla.

Los contenidos de humedad, densidad aparente y resistencia a la penetración en los tres perfiles del suelo se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7. Valores de humedad, densidad aparente y resistencia a la penetración.

Perfil (cm)	Porcentaje de humedad (%)	Densidad aparente ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	Compactación (kPa)
0 a 10	14.0	1380	673.97
10 a 20	14.55	1360	1289.33
20 a 30	14.32	1390	1523.75

Como se observa, la humedad fue parecida en los tres perfiles. No obstante en las pruebas con el reómetro el porcentaje de humedad era considerable ya que al extraer la veleta, esta tenía incrustado suelo muy húmedo y compactado, tal como se muestra en la siguiente Figura.



Figura 35. Restos de suelo después de extraer la veleta.

Sin embargo, la resistencia a la penetración se incrementó conforme se incrementó la profundidad. Este efecto puede atribuirse al resultado que la labranza convencional provoca en los suelos; es decir, por el tráfico de maquinaria por labores separadas.

La calibración del sensor de torque arrojó una línea de dispersión con pendiente positiva, de la interacción torque aplicado (Nm) y voltaje de salida (mV). La Figura 36 muestra la regresión lineal. Por lo tanto, el 99 % de los datos de torque se explicó mediante esta regresión para los respectivos voltajes de salida.

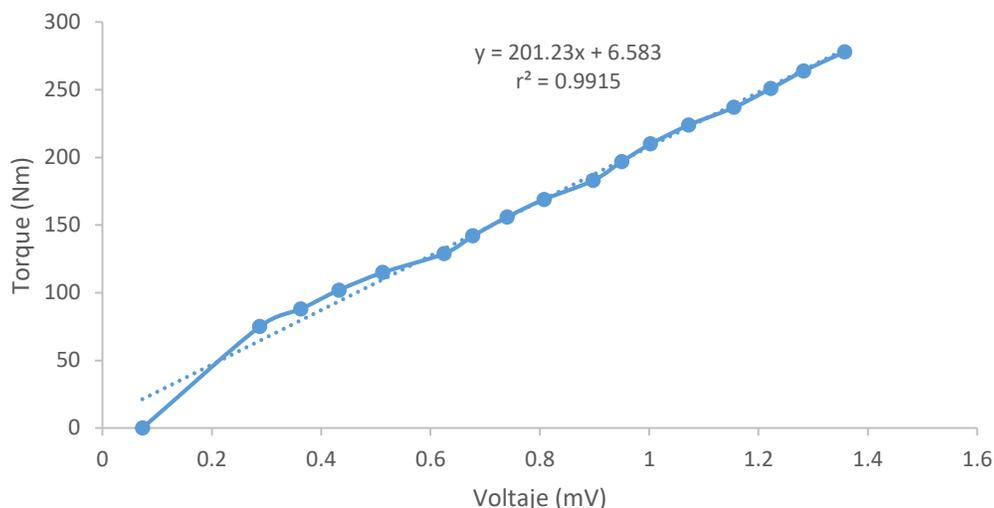


Figura 36. Gráfica de calibración

De manera general, por cada unidad de mV que se incrementa, el torque se incrementa en 201.23 Nm.

Los valores de torque respecto al tiempo se obtuvieron con el reómetro para después obtener los esfuerzos cortantes. Por lo tanto, en las Figuras 37, 38 y 39 se observa el comportamiento de los esfuerzos cortantes respecto al tiempo transcurrido de la prueba, esto para cada velocidad de corte de la veleta en el perfil de 0-10, 10-20 y 20-30 cm, respectivamente.

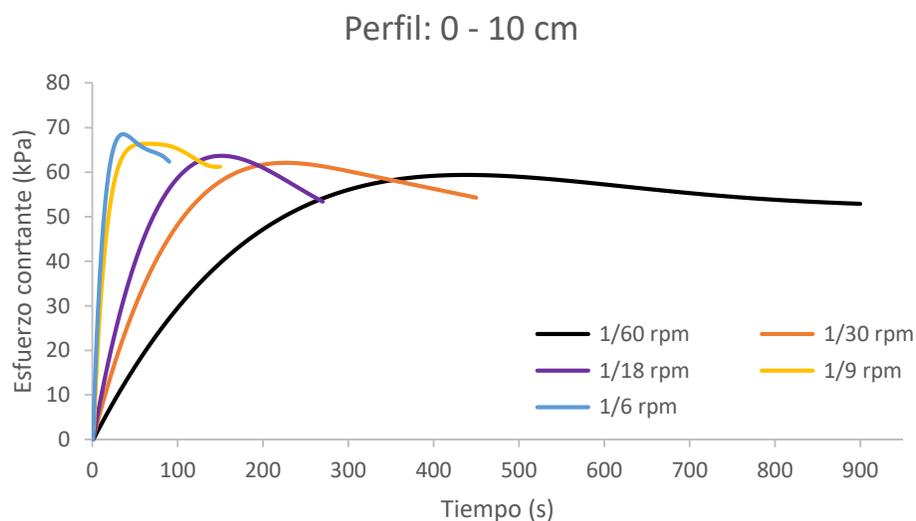


Figura 37. Valores de esfuerzos cortantes en el perfil 0-10 cm.

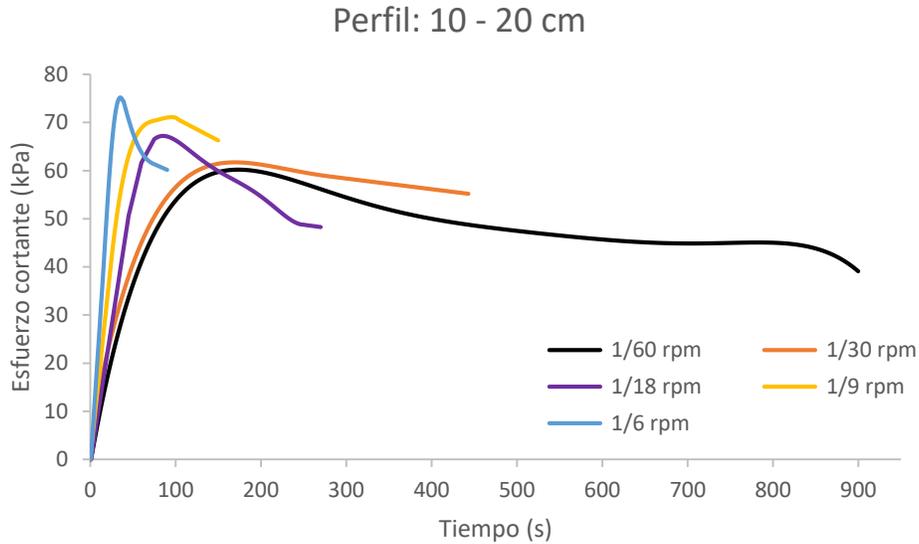


Figura 38. Valores de esfuerzos cortantes en el perfil 10-20 cm.

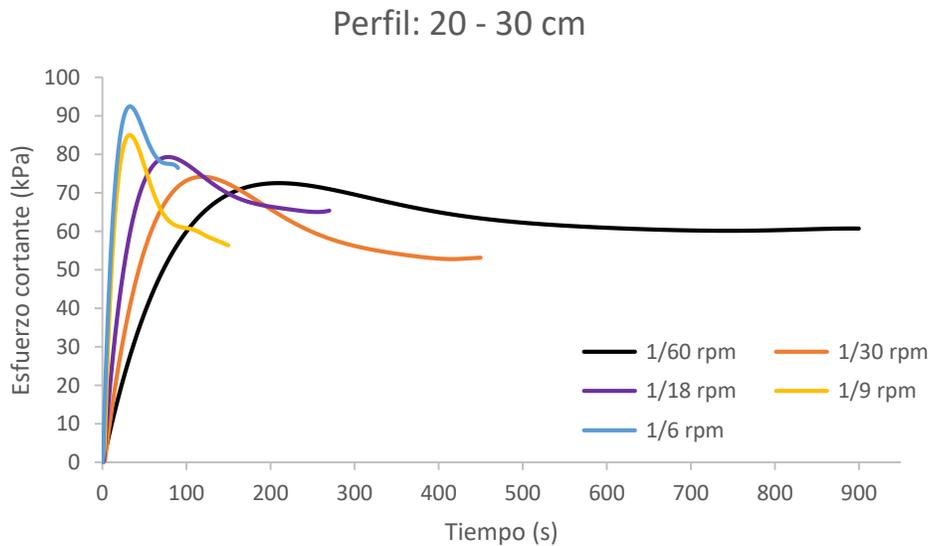


Figura 39. Valores de esfuerzos cortantes en el perfil 20-30 cm.

Se aprecia que a menor velocidad de corte el esfuerzo de fluencia se alcanza en mayor tiempo. Sin embargo, cuando se incrementa la velocidad de corte el tiempo para la falla se reduce, y la magnitud del esfuerzo de fluencia se incrementa.

En la Tabla 8 se muestran los valores de esfuerzos de fluencia obtenidos en relación a la velocidad de corte en cada perfil del suelo. El incremento de la magnitud de los esfuerzos de fluencia del perfil superior al perfil inferior puede atribuirse al nivel de

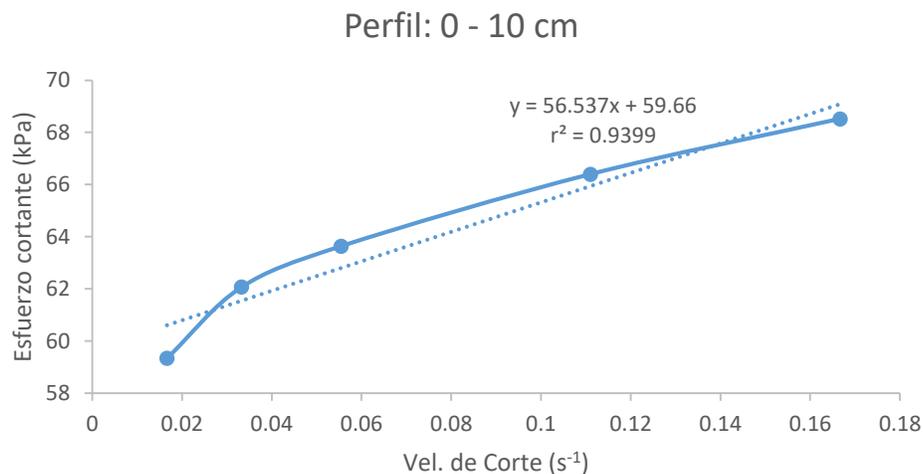
compactación del suelo. Por ejemplo, al analizar la velocidad de corte cinco sobre los esfuerzos de fluencia, en el perfil 0-10 cm se obtuvo 68.52 kPa, en el perfil 10-20 cm 75.18 y en el perfil 20-30 cm se obtuvo 92.44 kPa, así que los valores muestran claramente un aumento con forme aumenta la profundidad.

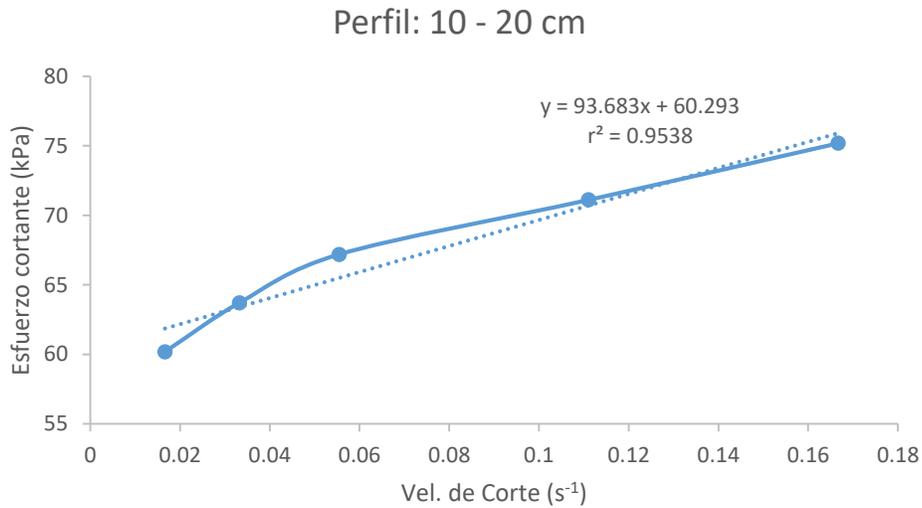
Este mismo efecto fue reportado por Karmakar *et al.*, (2005a) y Barker (2008), al realizar estudios en condiciones de laboratorio con diferentes valores de compactación y diversas velocidades de corte.

Tabla 8. Valores de esfuerzos de fluencia en los diferentes perfiles y velocidades de corte.

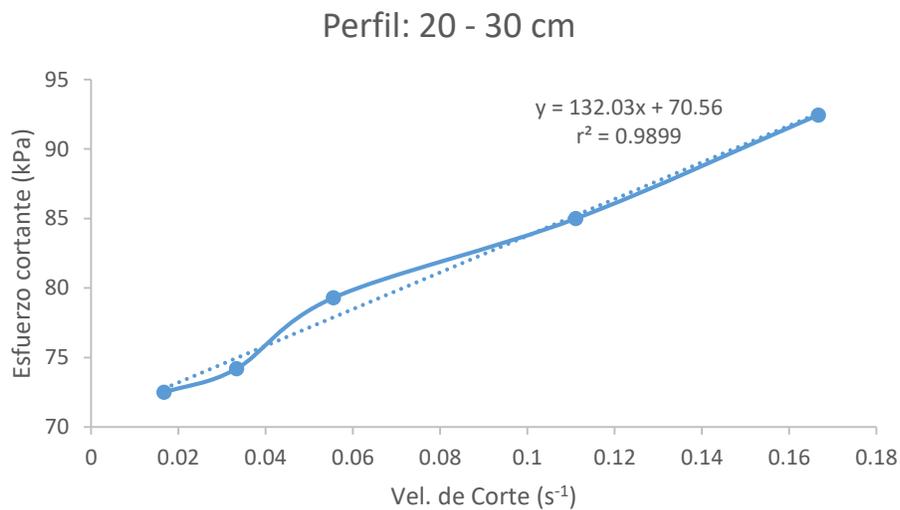
Velocidad de corte (rpm)	Esfuerzos cortantes (kPa)		
	Perfil 0-10 cm	Perfil 10-20 cm	Perfil 20-30 cm
0.01667	59.34	60.18	72.49
0.0333	62.07	63.71	74.19
0.0555	63.64	67.19	79.29
0.1111	66.4	71.11	84.99
0.1667	68.52	75.18	92.44

La regresión lineal aplicada a los datos de velocidad de corte y esfuerzos de fluencia, arrojaron la solución del modelo plástico de Bingham para los tres perfiles de suelo analizados. En todos los casos se obtuvo una línea de ajuste de pendiente positiva donde más del 90% de los datos se explican por sí solos (Figura 40).





b)



c)

Figura 40. Relación entre el esfuerzo cortante y las velocidades de corte en cada perfil del suelo. a) 0 a 10 cm, b) 10 a 20 cm y c) 20 a 30 cm.

La línea de ajuste para el perfil 0-10 cm arrojó una viscosidad de 56.537 kPa.s y esfuerzo de fluencia de 59.66 kPa. En su caso, en el perfil de 10-20 cm la viscosidad fue de 93.683 kPa.s y esfuerzo de fluencia de 60.293 kPa. Finalmente, en el perfil 20-30 cm la viscosidad obtenida fue de 132.03 kPa.s y esfuerzo de fluencia de 70.56 kPa.

Como se observa, la viscosidad incrementó con forme incrementó la profundidad de los perfiles de suelo. Este efecto también se atribuye a la resistencia a la penetración que tenía el suelo, ya que fue necesario aplicar mayor torque para alcanzar los esfuerzos de fluencia en cada una de las pruebas para que el material se comporte como un fluido.

### 6.3. Fuerzas resultantes.

La calibración de la celda de carga para determinar la fuerza que demandaron las herramientas se observa en la Figura 41. La línea de ajuste indicó que por cada 1 mV de salida, la fuerza se incrementa en 418.92 kg.

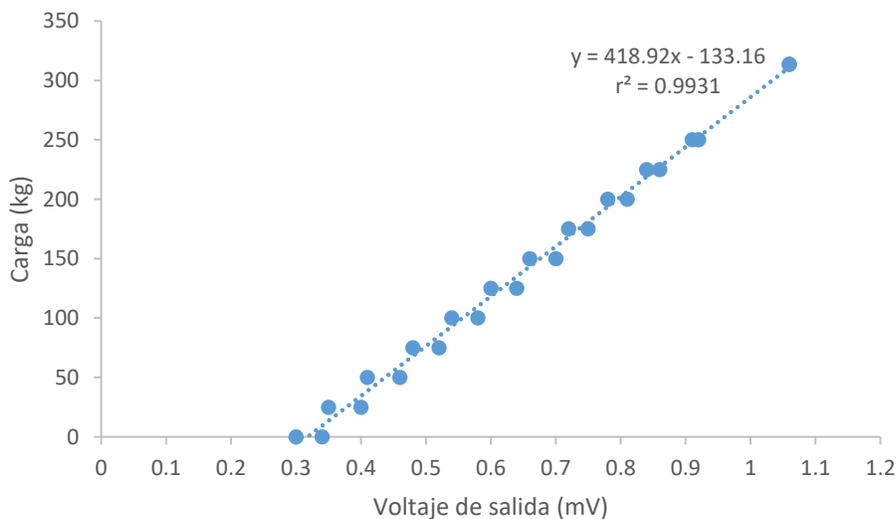


Figura 41. Gráfica de calibración de la celda de carga.

#### 6.3.1. Fuerzas experimentales.

En la siguiente Figura 42 se encuentran graficados los valores de fuerza a la barra de tiro que demandaron los Subsuelo Biomimético 1, Biomimético 2 y Recto. En el eje de las abscisas se encuentra la velocidad de trabajo y en el de las ordenadas la fuerza en Newton.

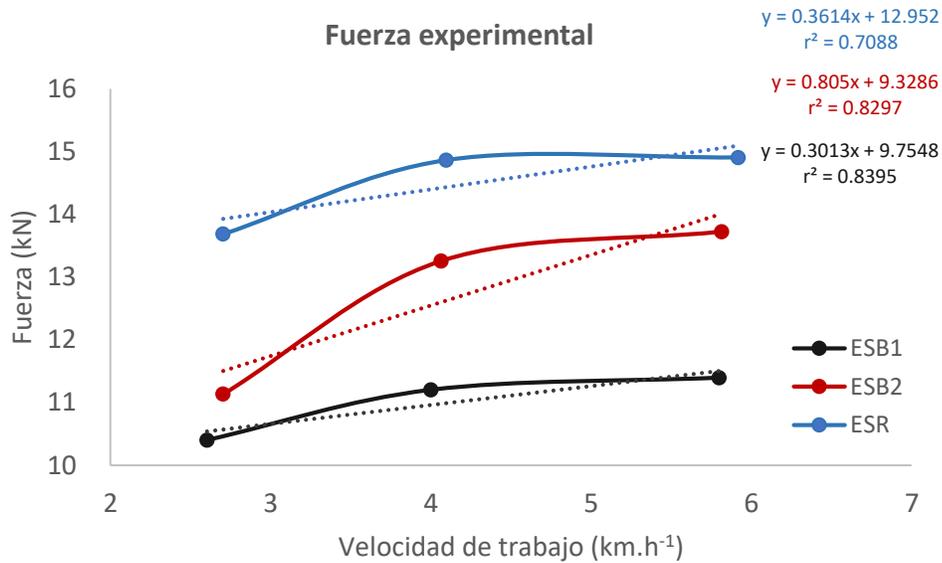


Figura 42. Fuerza experimental resultante de los cuerpos subsoladores (ESB1: Experimental Subsuelo Biomimético 1, ESB2: Experimental Subsuelo Biomimético 2, ESR: Experimental Subsuelo Recto).

En general, la fuerza resultante del Subsuelo Biomimético 1 se incrementa en 0.3013 kN por cada kilómetro de incremento en su velocidad de trabajo. El Subsuelo Biomimético 2 presentó el mismo comportamiento; sin embargo, en éste la fuerza se incrementa en una tasa de 0.805 kN. Finalmente, la fuerza en el Subsuelo Recto se incrementa en 0.3614 kN por cada kilómetro.

Por ejemplo, al analizar la velocidad de trabajo inicial en las tres geometrías se tiene que la fuerza del Subsuelo Biomimético 1 fue de 10.402 kN, el Subsuelo Biomimético 2 de 11.136 kN y el Subsuelo Recto de 13.685 kN. Este comportamiento se mantuvo en las tres velocidades evaluadas; es decir, la fuerza promedio a la barra de tiro en las geometrías se encontró que el Subsuelo Biomimético 1 requirió menos fuerza para su operación en las tres velocidades evaluadas. Por lo tanto, de acuerdo a esta velocidad el Subsuelo Biomimético 2 se elevó 15.5% y el Subsuelo Recto aumentó hasta 31% de fuerza a la barra de tiro.

Por ejemplo, al analizar la velocidad de trabajo inicial en las tres geometrías se tiene que la fuerza del Subsuelo Biomimético 1 fue de 10.402 kN, el Subsuelo

Biomimético 2 de 11.136 kN y el Subsuelo Recto de 13.685 kN. Es decir, la fuerza a la barra de tiro se incrementó en 15.5% para el Subsuelo Biomimético 2 y 31% para el Subsuelo Recto, respecto al Subsuelo Biomimético 1. Este comportamiento se mantuvo en las tres velocidades evaluadas. Por lo tanto, el Subsuelo Biomimético 1 fue el que presentó un mejor comportamiento desde el punto de vista agronómico, y el Subsuelo Recto fue el que demandó mayor fuerza en las tres velocidades evaluadas.

Este último comportamiento converge con investigaciones hechas por Nichols y Reaves (1958) y Smith y Williford (1988), quienes demostraron que las geometrías curvas demandan menos fuerza a la barra de tiro del tractor, en comparación con geometrías rectas o en forma de L.

### **6.3.2. Fuerzas de modelado numérico.**

Ahora, al analizar los resultados de la fuerza a la barra de tiro obtenidas del modelado numérico, se aprecia que la fuerza del Subsuelo Recto tiende a ser más alto que la fuerza de los Subsuelos Biomimético 1 y 2. En el mismo sentido, las fuerzas del Subsuelo Biomimético 1 fueron inferiores a las otras dos geometrías (Figura 43). El comportamiento de las rectas muestra linealidad debido a que en este tipo de análisis las propiedades del suelo permanecen constantes, lo que no sucede en suelo agrícola.

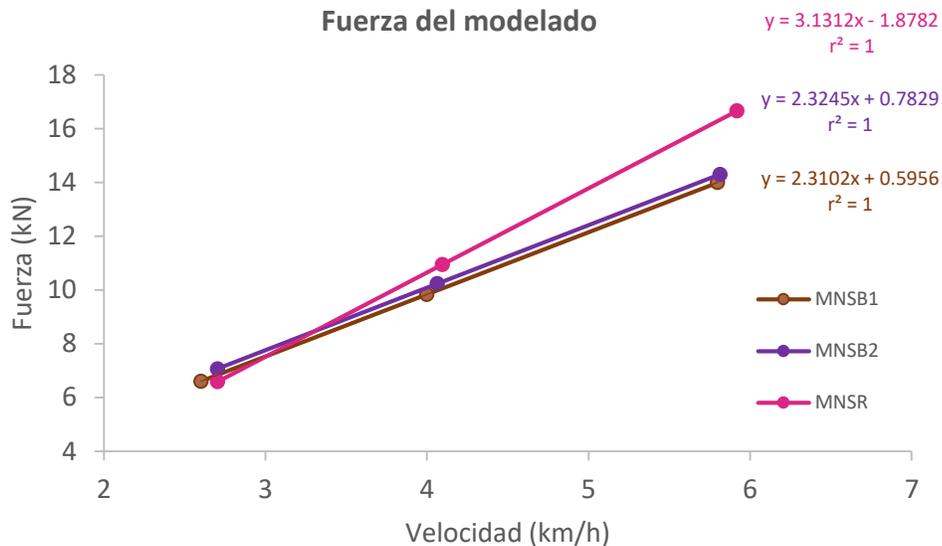


Figura 43. Fuerzas resultantes en el modelado de los cuerpos subsoladores (MNSB1: Modelado Numérico Subsuelo Biomimético 1, MNSB2: Modelado Numérico Subsuelo Biomimético 2, MNSR: Modelado Numérico Subsuelo Recto).

Se aprecia que la fuerza de los tres subsoladores a la velocidad  $3.2 \text{ km.h}^{-1}$  aproximadamente es casi similar. Lo cual indica que no existirían diferencias al trabajar cualquiera de las geometrías. Sin embargo, aunque la pendiente de la línea de fuerza del Subsuelo Recto es mayor a las restantes, debajo de los  $3.2 \text{ km.h}^{-1}$  ésta demanda menor fuerza a la barra de tiro.

Considerando la tercera velocidad de trabajo, el subsuelo Biomimético 1 demandó menor fuerza a la barra de tiro con  $13.994 \text{ kN}$ , para el Subsuelo Biomimético 2  $14.298 \text{ kN}$  y finalmente el Subsuelo Recto  $16.653 \text{ kN}$ . Estos valores muestran que el Subsolador Biomimético 2 se elevó solo 2% respecto al Subsolador Biomimético 1, Sin embargo, la fuerza en el Subsuelo Recto aumentó hasta en 19% en relación al Biomimético 1.

### 6.3.3. Comparativo de fuerzas

En la Figura 44 se observa la comparación de las fuerzas obtenidas experimentales y del modelado numérico. Se aprecia claramente que la fuerza a la barra de tiro aumenta a medida que incrementa la velocidad de trabajo, tal como lo mencionan Wheeler y Godwin, (1996). Sin embargo, el modelado numérico indicó

que la fuerza se incrementó más rápidamente conforme se incrementó la velocidad, para las tres geometrías.

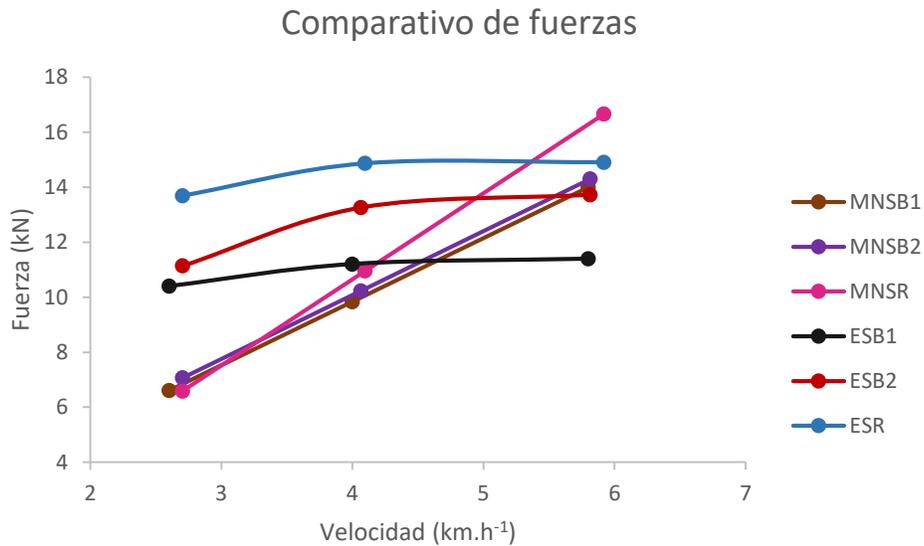


Figura 44. Comparación de fuerzas experimental y modelado.

En ambos métodos, el Subsuelo Recto siempre demandó mayor fuerza a la barra de tiro en velocidades altas en comparación con los Subsuelos Biomiméticos 1 y 2.

Por otro lado, al comparar los valores de la fuerza a la barra de tiro en la velocidad intermedia evaluada de 4 km.h<sup>-1</sup>, en la fuerza experimental el Subsuelo Biomimético 1 demandó 11.203 kN y en la fuerza del modelado 9.835 kN; en el Subsuelo Biomimético 2 la fuerza experimental fue de 13.255 kN y en el modelado 10.230 kN y por último en el Subsuelo Recto a 4.1 km.h<sup>-1</sup>, la fuerza experimental fue de 14.862 kN y en el modelado 10.950 kN. En esta velocidad es el punto donde los Subsueladores comienzan a variar de acuerdo a las líneas de ajuste en las fuerzas experimentales y del modelado.

Se muestra una variación entre los resultados de ambas fuerzas resultantes que se debe al campo de prueba donde se obtuvieron, es decir, que en campo existen diversos factores que causan inestabilidad en la realización de las pruebas, como son: la humedad, la porosidad del suelo, la maleza y los efectos de compactación. Todos ellos son incontrolables por su exposición al medio ambiente y por

fenómenos físicos en el instante. Y en el modelado numérico las condiciones para la obtención de la fuerza a la barra de tiro se consideran siempre ideales.

La Tabla 9 muestra los valores de las fuerzas obtenidas experimentalmente y en simulación.

Tabla 9. Comparación de fuerzas obtenidas.

<b>Geometría</b>	<b>Velocidad (km.h<sup>-1</sup>)</b>	<b>Fuerzas experimentales (kN)</b>	<b>Fuerzas con modelado (kN)</b>
Subsuelo Biomimético 1	2.6	10.402	6.608
	4.0	11.203	9.835
	5.8	11.396	13.994
Subsuelo Biomimético 2	2.7	11.136	7.067
	4.0	13.255	10.230
	5.8	13.722	14.297
Subsuelo Recto	2.7	13.685	6.587
	4.1	14.862	10.950
	5.9	14.905	16.653

Se observa que las fuerzas experimentales siempre fueron superiores al modelado numérico, sin embargo el comportamiento es similar en los resultados de cada velocidad de trabajo evaluadas en ambos métodos; ya que el Subsuelo Biomimético 1 fue el que demandó menor fuerza a la barra de tiro, el Subsuelo Biomimético 2, demandó un porcentaje bajo en comparación al Subsuelo Recto que demandó mayor fuerza a la barra de tiro.

---

## CONCLUSIONES

- Se desarrolló el reómetro que permite obtener de manera *in situ* la viscosidad plástica y el esfuerzo de fluencia del suelo.
- Los parámetros viscoplásticos del suelo se emplearon como parámetros de entrada de un modelo por Dinámica de Flujo Computacional donde se evaluaron tres geometrías de cuerpos subsoladores para determinar la fuerza que requiere para su operación, y se compararon con evaluaciones experimentales en campo.
- El resultado de las fuerzas obtenidas experimentalmente y mediante modelado numérico fueron de magnitudes similares para las tres geometrías. Y se observó que con forme incrementó la velocidad de trabajo, las fuerzas también incrementaron. Sin embargo, las pendientes de las líneas de ajuste obtenidas con el modelado numérico fueron mayores a las obtenidas experimentalmente.
- Se encontró que en ambos métodos, los cuerpos subsoladores biomiméticos demandaron menor fuerza respecto a la geometría recta.
- Finalmente, se puede decir que los modelados por Dinámica de Flujo Computacional de herramientas para labranza del suelo pueden ser útiles para predecir la fuerza que demandan éstas a la barra de tiro de los tractores previo a su construcción.

---

## BIBLIOGRAFÍA

Adewoyin, A. O., and Ajav, E. A. (2013). Fuel consumption of some tractor models for ploughing operations in the sandy-loam soil of Nigeria at various speeds and ploughing depth. *Agric Eng Int: CIGR Journal*, 15(3): 67–74.

Albo-helmor, M., Hamilton, R. and Boyle, J. T. (2003). 3D dynamics analysis of soil-tool interaction using Finite Element Method. *Journal of Terramechanics* 40: 51-62.

Arduino (2016). INA125P voltage output too low. Revisado en línea el 10 de Agosto del 2016 de <https://forum.arduino.cc/index.php?topic=338440.0>

ASAE S217.12 (1994). Three-Point Free-Link Attachment for Hitching Implements to Agricultural Wheel Tractors. DEC01 (ISO+730-1).

Ashburner, J. E. and Sims, B. G. (1984). Elementos de diseño del tractor y herramientas de labranza. San José, Costa Rica: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. 474 p.

ASTM D 2573-01 (revisado 2016). Standard test method for Field vane shear test in cohesive soil. ASTM International.

Barker, M. E. (2008). Predicting loads on ground engaging tillage tools using computational fluid dynamics. Doctoral thesis. Iowa State University. 187 p.

Cadena, Z. M., Campos, M. S. G., López, S. A. y Zermeño, G. A. (2012). Configuración de herramientas de labranza vertical para reducir demanda de energía. *Terra Latinoamericana*30 (): 279-288.

Chi, L. and Kushwaha, R.L. (1990). A non.linear 3-D finite Element Analysis of Soil Failure with Tillage Tools. *Journal of Terramechanics*, Vol. 27, No4, pp, 343 – 366.

CIMMyT (Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo) (2013). Resistencia a la penetración. Guía útil para comparar las prácticas de manejo de cultivo. 12 p.

Doraswamy, D. (2002). The Origins of Rheology: A Short Historical Excursion. DuPont iTechnologies, Experimental Station Wilmington, DE 19880-0334.

EIA (Escuela de Ingeniería de Antioquía) (2009). Mecánica de fluidos y recursos hidráulicos. Revisado en línea el 11 de noviembre del 2016 en <http://fluidos.eia.edu.co/fluidos/propiedades/viscosidad/rotacionvis.html>.

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación), (2000). Manual de prácticas integradas de manejo y conservación de suelos. Boletín de tierras y aguas de la FAO 8. 234 p.

Fielke, J. M. (1999). Finite Element Modelling of the Interaction of the Cutting Edge of Tillage Implements with Soil. *J. agric. Engng Res.* 74, 91 – 101.

García, Q. J. C. (2008). Fluidos Viscosos. Revisado en línea el 3 de Febrero del 2016 en <http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/3623/1/tema2RUA.pdf>.

Garibaldi, M. F. (2014). Evaluación de esfuerzos en materiales compuestos por métodos ópticos-espectroscópicos. Tesis de Maestría. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico. Cuernavaca, Morelos, México. 116 p.

Garibaldi, M. F., García, H. R. V., Galindo, R. M. A. y Ruíz, A. O. (2015). Dinámica de flujo computacional para predecir fuerza de tiro por labranza del suelo. Memoria de la XXVII Semana Internacional de Agronomía FAZ-UJED. 11 p.

Garibaldi, M. F., García, H. R. V. y Osuna, C. E. S. (2016). Subsólador integral biomimético. Folleto técnico No. 68. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Centro de Investigación Regional Norte Centro. Campo Experimental Pabellón. Pabellón de Arteaga, Aguascalientes, México. 26 p.

Godwin R. J. (2007). A review of the effect of implement geometry on soil failure and implement forces. *Soil & Tillage Research* 97: 331 – 340.

Godwin, R. J., Magalhaes, P. S. G., Miller, S. M., and Fry R. K. (1987). Instrumentation to study the Force Systems and Vertical Dynamic Behaviour of Soil-engaging Implements. *J. Agric. Eng. Res.* 26: 301 - 310.

Godwin, R. J., Spoor, G. and Soomro, M. S. (1984). The Effect of Tine Arrangement on Soil Forces and Disturbance. *J. agric. Engng Res.* 30, 47-56

Godwin, R.J. and Spoor, G. (1977). Soil failure with narrow tines. *J. Agric. Eng. Res.* 22 (3), 213-228.

Godwin, R.J., Spoor, G. and Leeds-Harrison, P. (1981). An Experimental investigation into the force mechanics and resulting soil disturbance of mole ploughs. *J. Agric. Eng. Res.* 26: 486-494.

González, F. G. (1995). *Energía y Mecanización en la Agricultura*. Copyright, Consejo de Desarrollo Científico y humanístico, Universidad Central de Venezuela.

Ibarrola, E. L. (2009). Introducción a los Fluidos No Newtonianos. Cátedra de Mecánica de los Fluidos- UNCor. Revisado en línea el 15 de Marzo del 2016 en <http://www.efn.unc.edu.ar/departamentos/aero/Asignaturas/MecFluid/material/introducci%20F3n%20no%20newtonianos.pdf>

Karmakar, S. and Kushwaha L. R. (2005b). Simulation of soil deformation around a tillage tool using computational fluid dynamics. *Transaction of the ASAE* 48(3): 923-932.

Karmakar, S. and Kushwaha, L. R. (2006). Dynamic modeling of soil-tool interaction: An overview from a fluid flow perspective. *Journal of Terramechanics* 43, 411 – 425.

Karmakar, S., Kushwaha L. R. and Stillig, D. D.S. (2005a). Soil failure associated with crack propagation for an agricultural tillage tool. *Soil & Tillage Research* 84: 119-126.

Karmakar, S., Kushwaha, R. L. and Lague, C. (2007). Numerical modelling of soil stress and pressure distribution on a flat tillage tool using computational fluid dynamics. *Biosystems Engineering* 97: 407-414.

Kees, G. (2008), *Using subsoiling to reduce soil compaction*, Department of Agriculture, Forest Service, Missoula Technology and Development Center: Missoula, MT, U.S.A. p. 14.

Kushwaha, R. L. and Shen. J. (1994). The application of plasticity in soil constitutive modeling. ASAE Paper No. 941072, St Joseph, MI: ASAE.

Maestro, A. G. (2002). Reología de Espesantes Celulósicos para Pinturas al Agua: Modelización y Mecanismo de Espesamiento Asociativo. Tesis Doctoral. Universidad de Barcelona. Facultad de Química, Departamento de Ingeniería Química y Metalúrgica. 76 p.

McKyes E. (1985). Soil Cutting and Tillage. Elsevier Science Publishing Company Inc. New York, NY, U.S.A.

McKyes E. and Ali, O. S. (1977). The Cutting of Soil by Narrow Blades. Journal of Terramechanics 2(14): 43-58.

Mckyes, E. (1984) Prediction and field Measurements of Tillage tool Draft forces and Efficiency in cohesive soils. Soil & Tillage Research (4): 459-470.

MNX-O-203-SCFI., (2004). Tractor agrícola–Determinación de potencia y fuerza de tracción a la barra de tiro – Método de prueba. México, D.F. 35pp.

Mollazade, K., Jafari, A., and Ebrahimi, E. (2010). Application of Dynamical Analysis to Choose Best Subsoiler's Shape using ANSYS. New York Science Journal; 3(3).

Mott, R. L. (1994). Applied Fluid Mechanics, Fourth Edition. Prentice – Hall Inc.

Mott, R. L. (2006). Mecánica de Fluidos, Sexta Edición. Prentice – Hall Inc.

Nichols, M. L., and Reaves, C. A. (1958). Soil reaction to subsoiling equipment. Agricultural Engineering, 39(6): 340-343.

Obermayr, M., Dressler, K., Vrettos, C. and Eberhard, P. (2011). Prediction of draft forces in cohesionless soil with the Discrete Element Method. Journal of Terramechanics 48: 347-358.

Obermayr, M., Kleinert, J. and Balzer, M. (2013). Modeling of large scale granular systems using the Discrete Element Method and the Non-Smooth Contact Dynamics Method: A comparison. ECCOMAS Multibody Dynamics. 1-4 July. University of Zagreb, Croatia.

Pasinato, H. D. (2008). Fundamentos de Mecánica de Fluidos. Regional Académia Confluencia Universidad Tecnológica Nacional – U.T.N. Plaza Huinul. 95 p.

REECE, A. R. (1965). The fundamental equation of earthmoving mechanics, *Syrup. Earthmoving Machin.* 179, Part 3F, Inst. Mech. Eng.

Rojas, G. O. (1999). Introducción a la Reología. Cuaderno FIRP S520-B. Laboratorio FIRP Escuela de Ingeniería Química Universidad de los Andes. Mérida-Venezuela versión: 2. 24 p.

Romantchik, K. E., Sandoval, A. I., Chávez, A. N., Gaytán, R. J. y Mayans, C. P. (2009). Resistencia traccional del subsolador en función del ancho de trabajo. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas* 1(1): 49-53.

Rubio, G. A. M. (2010). La densidad aparente en suelos forestales del parque natural los alcornocales. Proyecto final de carrera. Escuela Universitaria de Ingeniería Agrícola. Universidad de Sevilla. Sevilla. 88 p.

Sánchez, H. B. E. (2008). Viscosímetro de bola. Tesis de licenciatura. Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. México D.F. 92 p.

Smith, D.L.O., Godwin R.J. and Spoor, G. (1989). Modeling Soil Disturbance Due to Tillage and Traffic. *Mechanics and related processes in structured agricultural soils*, pp.121-136.

Smith, L. A., and Williford, R. J. (1988). Power requirements of conventional, triplex, and parabolic subsoilers. *Tractions of the ASAE*, 31(6): 1685-1688.

Terzaghi, K. (1943). *Theoretical Soil Mechanics*. New York, Copyright John Wiley & Sons, Inc.

Viscardy, S. (2010). Viscosity from Newton to Modern Non-equilibrium Statical Mechanics. Preprint submitted to *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*

Wheeler, P.N. and Godwin, R.J. (1996). Soil dynamics of single and multiple tines at speeds up to 20 km/h. *J. Agric. Eng. Res.* 63: 243–250.