

Propuesta de Metodología para el Desarrollo de Modelos de Labranza

Parte II. Índices de caracterización fisicomecánica del suelo y desarrollo de un modelo de labranza

Fernando Lozano Osorno,* Bernardo Castillo Herrán,**

RESUMEN

Se presentó una propuesta para la elaboración de modelos de labranza que permite tomar decisiones sobre sistemas de preparación de suelos (incluyendo la opción de cero labranza) a partir de mediciones de la condición de éstos. Luego de seguir un plan de muestreo de diversos parámetros fisicomecánicos del suelo y de un proceso estadístico de correlación, se eligieron como variables representativas: la densidad aparente, el índice de cono, el contenido de humedad y la cohesión (caja de torsión, prueba *in situ*); tales parámetros no solo están bien relacionados entre sí, sino que además hacen posible estimar adecuadamente otras variables de interés como la porosidad total, la macroporosidad, la conductividad hidráulica y en general la resistencia del suelo, lo cual hace viable elegir métodos de remoción del suelo en función del estado inicial del mismo. En el caso probado se pudo verificar la posibilidad de establecer sistemas de reducción de labranza.

INTRODUCCIÓN

Para cualquier lugar específico de producción de cultivos y de acuerdo con sus características agroecológicas propias, es posible establecer las relaciones entre sistemas de preparación del suelo y la respuesta de la especie vegetal de interés. No obstante, el proceso antes descrito indicaría la necesidad de realizar procedimientos dispendiosos y costosos de experimentación para encontrar los sistemas de labranza óptimos o al menos los aparentemente mejores para cada caso particular.

Dentro del marco anterior, la mayoría de las investigaciones sobre preparación de suelos agrícolas, llevadas a cabo hasta el momento, tanto en Colombia como en diversos países del mundo, se han dedicado a establecer contrastes entre diferentes prácticas de labranza de acuerdo con algunas características físicas del suelo, casi siempre no más de tres o cuatro parámetros, incluyendo por ejemplo densidad aparente y porosidad total del suelo.

Sin embargo, el estado del suelo agrícola, en su relación con el desarrollo de especies vegetales y con los implementos mecánicos de labranza, puede ser descrito por muchas otras variables físicas, particularmente aquellas relacionadas con el movimiento y la dinámica del agua en el suelo y por características mecánicas, principalmente su resistencia al corte.

De esta contraposición de incluir más parámetros del suelo en los estudios de la labranza y el requerimiento de simplificar los procedimientos de selección de sistemas de preparación de suelos surge la propuesta de realizar trabajos metodológicos iniciales para la elaboración de modelos de labranza, en los cuales puedan formularse unos parámetros indicativos de la condición fisicomecánica del suelo, de fácil, rápida y económica instrumentación y que puedan insertarse de acuerdo según unos referentes de agroecología de las especies vegetales en los modelos propuestos.

A. MODELAMIENTO DE LA LABRANZA EN FUNCIÓN DE LA CONDICIÓN DEL SUELO

Cuando un implemento o grupo de implementos de labranza son utilizados en el suelo, éste cambia sus características físicas y de resistencia (Gill y Vanden Berg; 1967). Koolen y Kuipers (1983) encontraron que las reacciones básicas del suelo agrícola frente a fuerzas mecánicas son: compactación, deformación, desplazamiento como cuerpo rígido y falla o rotura. Las reacciones anteriores se reflejan en la distribución de aire y agua, resistencia a la penetración de raíces, erosión y control de malezas característicos al final de las operaciones de labranza, cuyo éxito se mide por el crecimiento del cultivo y el rendimiento a bajo costo, por la minimización de la potencia consumida y del deterioro del suelo (Anazodo, *et al.*; 1991).

El anterior razonamiento muestra una fuerte relación de la condición fisicomecánica del suelo con los implementos de labranza y la economía de la producción agropecuaria. Así se

*Ingeniero Agrícola. Programa Nacional de Maquinaria Agrícola y Postcosecha. CORPOICA

**Ingeniero Agrícola M.Sc. Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Agrícola Universidad Nacional de Colombia

sustenta la posibilidad y la necesidad de hacer modelos de labranza dentro de sistemas de producción.

1. REQUISITOS ESPECÍFICOS DE UN MODELO DE LABRANZA

Conforme con lo estudiado en varias referencias se ha deducido que un modelo de labranza debería tener las siguientes características:

- Debe ser posible identificar los parámetros por medio de un pequeño número de pruebas simples del material (Prevost 1987, citado por Schafer, et al.; 1991).
- Los modelos tienen que ser desarrollados para diferentes suelos y zonas agroecológicas (Anazodo *et al.*; 1991). Quiroga (sf) también admite el anterior planteamiento al mencionar la influencia de la granulometría en la extrapolación de resultados experimentales en ensayos de labranza, fertilización y comportamiento de los cultivos.
- El modelamiento por ajuste a curvas se restringe en su aplicación y no es válido fuera de los límites de los datos usados para desarrollarlo (Schafer, *et al.*; 1991). Así, en una aproximación para el desarrollo de modelos con ecuaciones empíricas debería primero delimitarse el rango de aplicación para el tipo y condiciones relevantes del suelo para ese caso específico, luego manipularse esta información con las herramientas de ingeniería y por último desarrollarse ecuaciones constitutivas manejables (Murphy; 1946, citado por los mismos Schafer *et al.*).

Se debe reconocer la condición física actual del suelo en primera instancia para la selección de las prácticas de manejo. Así, los suelos con condiciones físicas deficientes, como consecuencia del uso intensivo y degradación, van a tener mayores exigencias de manejo para alcanzar y mantener las propiedades físicas en un rango favorable para el desarrollo de los cultivos (Quiroga; sf).

Puesto que se ha admitido como un paso importante en el desarrollo de modelos de labranza encontrar relaciones empíricas entre diversos parámetros del suelo, se hizo una revisión orientada (según el alcance y el objeto de este estudio) de estas relaciones en dos niveles: entre propiedades físicas y entre parámetros de resistencia del suelo y propiedades físicas (véanse cuadros 1 y 2, respectivamente).

Respecto a las propiedades de resistencia de los suelos agrícolas hay opiniones diversas. Greacen (1960) afirma que la resistencia de un suelo cultivado está relacionada con su contenido de agua y otros factores, pero dado que estas relaciones son poco conocidas, la utilidad de las mediciones de resistencia es limitada. Por otra parte, en relación con la

cohesión C y la fricción interna ϕ , varios autores citados por Ayers (1987) mencionan que éstos aumentan con la densidad aparente. El mismo Ayers (1987) complementa que en suelos arenosos y contenidos de humedad bajos, la cohesión y la fricción interna de los suelos son más sensibles a los cambios de densidad aparente, en comparación con lo que ocurre en suelos finos y altos contenidos de humedad, al tiempo que en este último caso C y ϕ se reducen si la densidad aparente disminuye. En suelos francolimosos, Wells y Treesuwan (1978) encontraron un aumento lineal de ϕ con el contenido de humedad pero independiente de la densidad aparente. Ayers (1987) citando a Ali - Hassan y McKyes (1983) menciona que no existe una relación definida entre ϕ y el contenido de humedad.

Cuadro 1. Relaciones entre propiedades físicas del suelo relevantes en este estudio.

Variable dependiente	Variable (s) independiente(s)	Forma de la ecuación	Autor (es)
1. IC	DA, CH	$IC = (a * DA^b) / (c + (CH - d)^2)$	Ayers y Perumpral (1982)
2. IC	DA, CH	$\log IC = a * \log DA + b * \log CH + \log c$	Bennie (1986) citado por Busscher y Sojka (1987)
3. IC	DA, CH, CA	$IC = a + b * DA + c * CH + d * CH^2 + e * (DA * CH) + f * CA$	Canarache (1990) citado por Ekwue y Stone (1995)
4. IC	CH	$\ln IC = a + b * \ln CH$	Collins (1971) citado por Perumpral (1987)
5. IC	DA, CH, CA, MO	$IC = a + b * DA + c * CA + d * MO + e * (\log CH)^2 + f * (\log CH)^3$	Wells y Baird (1978) citados por Perumpral (1987)
6. DA	IC	$DA = a * IC^b$	Oni (1991)
7. K	MP	$K = a * MP^b$	Ahuja <i>et al.</i> (1989)

a, b, c, d, e, f : coeficientes de estimación para cada caso.

CH: contenido de humedad gravimétrica.

CA: contenido de arcillas.

DA: densidad aparente.

IC: índice de cono.

K: conductividad hidráulica saturada.

MP: macroporosidad.

MO: contenido de materia orgánica.

2. SISTEMA ÓPTIMO

Se ha observado que diferentes sistemas de labranza satisfacen diferentes tipos y condiciones de suelo (Lal; 1985 y Patterson; 1982, citados por Anazodo *et al.*; 1991). Es importante que para una región dada puedan ser evaluadas diferentes opciones de labranza, a fin de determinar cuál es el mejor sistema; tal sistema debe asegurar optimización de la empresa de producción mediante la maximización de la rentabilidad de los cultivos que van a ser plantados, mientras que produzcan un daño mínimo. La última condición asegura la conservación del suelo y del agua y un mínimo consumo de potencia. Según lo expuesto por Anazodo *et al.* (1991) para el sistema óptimo deben cumplirse las siguientes condiciones:

- Maximizar la producción.
- Minimizar el costo de producción.
- Maximizar la utilidad neta.
- Minimizar la resistencia del suelo.
- Maximizar la porosidad del suelo.
- Minimizar la disturbación del suelo.

Los primeros tres criterios son probablemente los más importantes para el productor, mientras que los tres últimos deben ser manejados para la conservación del suelo a largo plazo.

Cuadro 2. Algunas relaciones entre parámetros de resistencia y propiedades físicas del suelo.

Variable dependiente	Variable (s) independiente(s)	Forma de la ecuación	Autor (es)
1. C, \emptyset	DA, CH	$C, \emptyset = a + b * DA + c * DA^2 + d * DA^3 + e * CH + f * CH^2 + g * CH^3 + h * DA * CH + i * DA^2 * CH + j * DA * CH^2$	Ayers y Bowen (1987) Ayers (1987)
2. RC	DA, CH, CA	$RC = a + b * DA + c * CH + d * CH^2 + e * DA * CH + f * CA$	Ekweue y Stone (1995)
3. RC	CH	$RC = a / CH^b$	Bakhtin <i>et al.</i> (1968)

a, b, c, d, e, f.: coeficientes de estimación para cada caso.

CA: contenido de arcilla.

CH: contenido de humedad.

C: cohesión.

DA: densidad aparente.

RC: resistencia al corte.

\emptyset : ángulo de fricción interna.

De acuerdo con lo anterior, Anazodo *et al.* (1991) propusieron el siguiente diagrama de flujo:

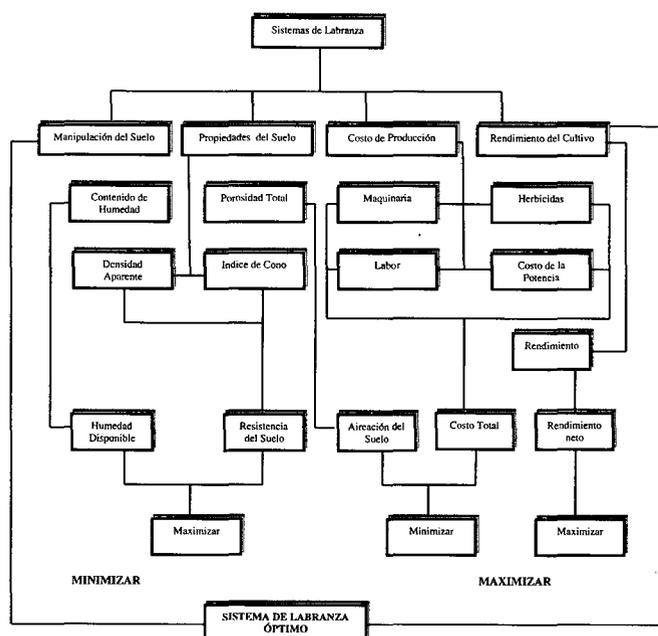


Figura 1. Esquema para selección de sistema de labranza óptimo. Tomado de Anazodo *et al.* (1991).

I. METODOLOGÍA

Los procedimientos metodológicos de este ensayo ya fueron expuestos en la parte 1 del presente artículo. Se incluye aquí una síntesis de los apartes más relevantes para la parte 2. Esta

investigación se realizó en Tibaitatá, municipio de Mosquera (Cundinamarca), la zona agroecológica es Fa con temperatura promedio de 13°C y humedad relativa media de 80%, precipitación promedio anual de 650 mm/año; la textura del suelo del lote de prueba: francolimoso.

A. TRATAMIENTOS DE LABRANZA.

Se establecieron seis sistemas de labranza que imponían diferentes grados de disturbación sobre el suelo; desde cero remoción hasta bien mullido con el tamaño de los agregados resultantes muy pequeño. Entre estos dos estados límites se definieron cuatro intermedios.

Tratamiento 1: desyerbada con guadañadora, un (1) pase de arado de discos, dos (2) pases de rastra excéntrica, dos (2) pases de rastrillo pulidor (tándem), un (1) pase de arado rotativo, siembra de maíz, una (1) desyerbada manual, dos (2) controles mecánicos de malezas con cultivadora de escardillos.

Tratamiento 2: desyerbada con guadañadora, un (1) pase de rastrillo excéntrico, dos (2) pases de rastrillo pulidor (tándem), siembra de maíz, una (1) desyerbada manual, dos (2) controles mecánicos de malezas con cultivadora de escardillos.

Tratamiento 3: desyerbada con guadañadora, un (1) pase de arado de cincel, un (1) pase de rastrillo excéntrico, siembra de maíz, una (1) desyerbada manual, dos (2) controles mecánicos de malezas con cultivadora de escardillos.

Tratamiento 4: desyerbada con guadañadora, un (1) pase de rastrillo excéntrico, un (1) pase de rastrillo pulidor (tándem), siembra de maíz, una (1) desyerbada manual, dos (2) controles mecánicos de malezas con cultivadora de escardillos.

Tratamiento 5: aplicación de un herbicida (glifosato), un (1) pase de rastrillo excéntrico, siembra de maíz, dos (2) desyerbadas manuales, dos (2) controles mecánicos de malezas con cultivadora de escardillos.

Tratamiento 6: labranza cero. Aplicación de un herbicida (glifosato), siembra de maíz, dos (2) desyerbadas manuales con azadón en el periodo de desarrollo del cultivo, dos (2) controles mecánicos de malezas con cultivadora rotativa.

El área seleccionada para cada tratamiento fue de 80m * 20m (1.600 m²), resultando un área total de experimento de 0,96 ha.

B. ECUACIONAMIENTO DE LAS VARIABLES

Los análisis de relación entre variables se realizaron teniendo en cuenta el comportamiento observado en las gráficas correspondientes de una variable contra la otra, y con base en los estudios anteriores citados en la introducción.

Para las regresiones se utilizó el paquete estadístico SAS con el procedimiento GLM (Modelo Lineal General) para regresión, intercalando variables dependientes e independientes de acuerdo con el interés de cada relación en particular.

Dentro del análisis estadístico, cada forma de función se consideró como un modelo; por tanto, aunque se conservó esta denominación al citar las funciones desarrolladas, no se debe confundir con el concepto modelo de labranza que es objeto de este estudio.

II. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. RELACIÓN ENTRE VARIABLES

1. TODAS LAS VARIABLES FÍSICAS

En la figura 2 se muestra el modelo inicial, relacionando todos los parámetros físicos del suelo y a partir del cual se hicieron otras regresiones. Existe una buena relación entre todas las variables; sin embargo, el análisis estadístico indica que la relación es más fuerte entre: densidad aparente, porosidad total e índice de cono, en forma potencial. La ecuación 1 corresponde a la regresión obtenida; se incluyen, además, algunos indicadores estadísticos de esta regresión.

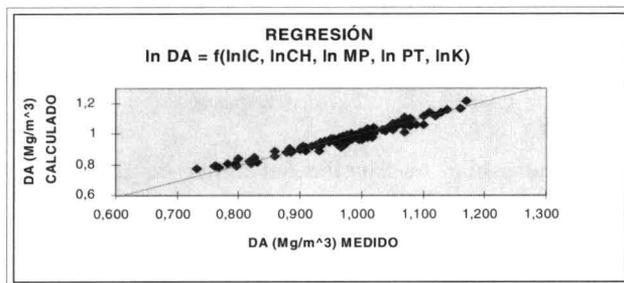


Figura 2. Estimación de la densidad aparente en función de otras variables físicas.

$$DA = 174,228938 * IC^{0,008764108} * CH^{-0,02898035} * MP^{-0,00494569} * PT^{-1,254183558} * K^{0,000029391} \quad (1)$$

Indicadores estadísticos: $r^2 = 0,9487$;

F del modelo = 377,02;

$Pr > F = 0,0001$ y $n = 108$; expresando que el modelo explica el comportamiento de la variable densidad aparente significativamente. En la ecuación 1, IC en MPa, CH en %, MP en %, PT en %, K en cm/h y DA en Mg/m^3 .

2. ÍNDICE DE CONO COMO FUNCIÓN DE OTRAS VARIABLES

• Índice de cono en función del contenido de humedad

Según este análisis, el índice de cono es relativamente sensible a los cambios de humedad, variando más linealmente que cuadrática o cúbicamente. Como se aprecia en la figura 3, para un rango entre un 30% y 50% de humedad el índice de cono sufre relativamente grandes variaciones, y para cambios de humedad después del 50% el índice de cono prácticamente no varía con valores alrededor de 1 MPa.

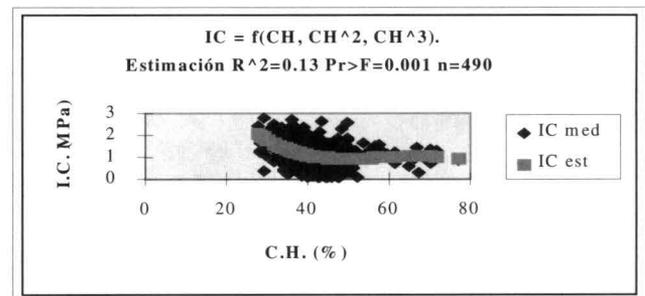


Figura 3. Índice de cono del suelo en función del contenido de humedad.

$$IC = 10,00783533 - 0,4853737 * CH + 0,00850221 * CH^2 - 0,00004853 * CH^3 \quad (2)$$

• Índice de cono en función de la densidad aparente y el contenido de humedad:

La mejor regresión corresponde a: $\ln IC = f(\ln DA, CH^2)$, debido a la relación IC - CH^2 del modelo anterior. Esto concuerda en parte con los modelos propuestos por Bennie (1986) citado por Busscher y Sojka (1987) y por Oni (1991), y sigue más marcadamente el modelo propuesto por Ayers y Perumpral (1982).

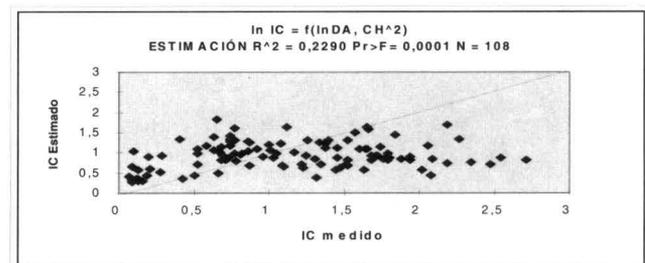


Figura 4. Índice de cono (MPa) en función de la densidad aparente (Mg/m^3) y del contenido de humedad (%).

$$IC = 0,81856719 * \exp^{0,000087161 * CH^2} * DA^{4,200792015} \quad (3)$$

Como se advierte en la ecuación 3, el índice de cono varía más marcadamente con la densidad aparente que con el contenido de humedad. La variación con la densidad aparente es de tipo potencial; por tanto, un pequeño cambio en la densidad aparente determina cambios acentuados en el índice de cono.

• Índice de cono en función de la resistencia al corte según el ensayo de compresión inconfínada y el contenido de humedad

En la figura 5 se muestra la relación probada. El índice de cono puede estar bien relacionado con la resistencia al corte del suelo en la prueba de compresión inconfínada, probablemente porque en la prueba de penetración estática con penetrómetro de cono, una fracción de la resistencia reportada podría depender de la resistencia a la compresión del suelo.

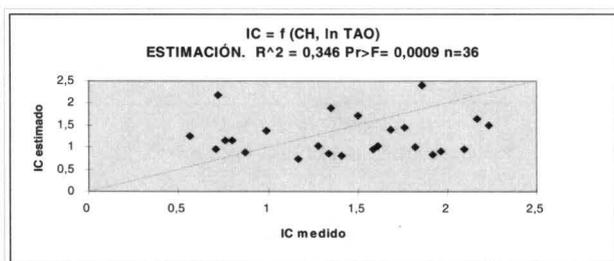


Figura 5. Índice de cono (MPa) en función del contenido de humedad y de la resistencia al corte en compresión inconfínada (MPa).

$$IC = 3,83437554 * \exp^{-0,004823056*CH} * TAO^{0,465776084} \quad (4)$$

Donde TAO: resistencia al corte en el ensayo de compresión inconfínada.

3. CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA EN FUNCIÓN DE OTRAS VARIABLES

• Conductividad hidráulica en función de la densidad aparente y del índice de cono

Con la ecuación 5 se puede notar que la conductividad hidráulica depende más de la densidad aparente que del índice de cono.

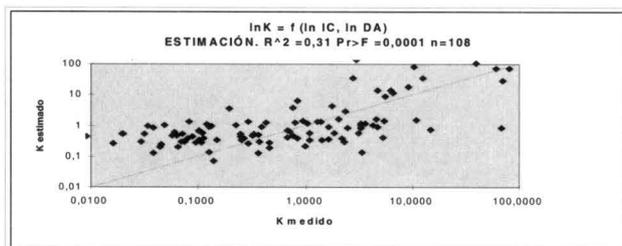


Figura 6. Conductividad hidráulica (cm/h) en función del índice de cono (MPa) y de la densidad aparente (Mg/m³).

$$K = 0,422733514 * IC^{-0,690908223} * DA^{-7,431513155} \quad (5)$$

• Conductividad hidráulica en función de la porosidad total, del índice de cono y del contenido de humedad

Se obtuvo la ecuación 6 que corresponde a la figura 7.

$$K = 2,49798 * 10^{-21} * PT^{11,87547721} * \exp^{(-0,02156199*CH*IC)} \quad (6)$$

Se muestra, según este modelo, que los cambios en la conductividad hidráulica se deben en su mayoría a los ocurridos en la porosidad total, es decir, un pequeño cambio en la porosidad total causarían un fuerte cambio en la conductividad hidráulica.

No es de extrañar la relación entre la conductividad hidráulica y la porosidad total, ya que esta última depende del valor de densidad aparente, con el cual la conductividad hidráulica está muy bien relacionada. Pero sorprende no haber encontrado una relación estrecha con la macroporosidad (poros grandes por donde puede fluir el agua del suelo), tal como lo sustentan Ahuja *et al.* (1989).

Se introduce aquí el término $CH * IC$, variables que están relativamente bien relacionadas entre sí pero que según la ecuación 6 no causan mayor efecto en la conductividad hidráulica. Los valores del contenido de humedad involucrados en este modelo son los medidos en el lote en el momento de extracción de las muestras, aunque la prueba de conductividad hidráulica se realiza en condiciones de saturación en laboratorio.

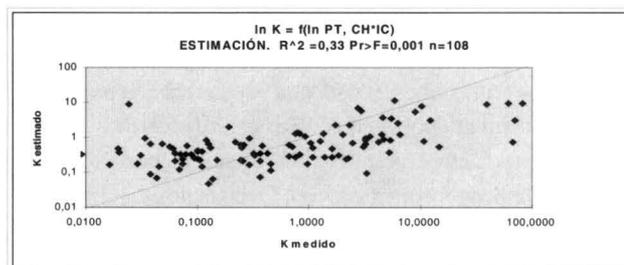


Figura 7. Conductividad hidráulica (cm/h) en función de la porosidad total (%), del contenido de humedad (%) y del índice de cono (MPa).

4. MACROPOROSIDAD EN FUNCIÓN DE OTRAS VARIABLES

• Macroporosidad en función del índice de cono y de la porosidad total

La relación entre la macroporosidad y la porosidad total es más o menos evidente en razón de que la macroporosidad se obtiene a partir del valor de porosidad total menos el valor de retención de humedad a 1/3 bar (véanse ecuación 7 y figura 8).

$$MP = 0,0097368 * \exp^{-0,12022253*IC} * PT^{1,885407958} \quad (7)$$

Según se nota en este modelo, la macroporosidad está relacionada con las mediciones de resistencia a la penetración del penetrómetro de cono, de tal forma que con aumentos del índice de cono hay una cierta disminución de la macroporosidad.

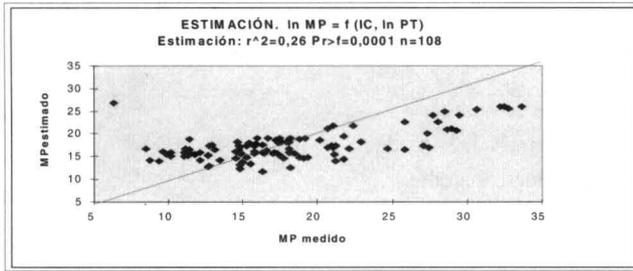


Figura 8. Macroporosidad (%) en función del índice de cono (MPa) y de la porosidad total (%).

5. PARÁMETROS MECÁNICOS EN FUNCIÓN DE OTRAS VARIABLES

• Resistencia al corte del suelo en la prueba de compresión inconfiada en función del contenido de humedad

En general, la resistencia al corte de un suelo depende de su estado de compactación, de su textura y de su contenido de humedad principalmente. Para esta relación se encontró el siguiente modelo, según la ecuación 8 y la figura 9:

$$TAO = 10,53892929 - 0,47862788 * CH + 0,00547078 * CH^2 \quad (8)$$

Esta ecuación concuerda parcialmente con la relación polinómica de Ayers (1987) en la que se relacionan parámetros de resistencia con valores de densidad aparente hasta grado 3 y de contenido de humedad hasta grado 3. También concuerda con la relación entre la resistencia al corte y una potencia del contenido de humedad reportada por Canarache (1990), citado por Ekwue y Stone (1995).

Como es de esperarse, la resistencia de un suelo depende de su contenido de humedad, que facilita o dificulta el acomodamiento de las partículas para que se dé el mecanismo de la falla. De tal forma que, de acuerdo con la ecuación 8 un cambio de contenido de humedad ocasiona cambios notables en la resistencia del suelo.

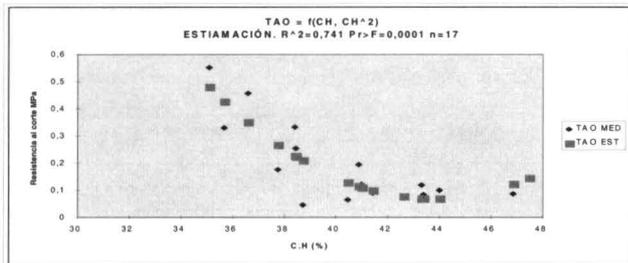


Figura 9. Resistencia el corte (MPa) en función del contenido de humedad (%).

• Resistencia al corte función de la densidad aparente y del contenido de humedad

Conforme con el modelo expuesto por Ayers (1987), se obtuvo el siguiente modelo (véanse ecuación 9 y figura 10):

$$TAO = 53,51409323 - 73,90140886 * DA - 31,37216897 * DA^2 + 62,76391784 * DA^3 - 2,02677513 * CH - 0,00732927 * CH^2 - 0,00007345 * CH^3 + 4,81090672 * DA * CH - 3,42019484 * DA^2 * CH + 0,01936653 * DA * CH^2. \quad (9)$$

De acuerdo con la ecuación 9, existe una estrecha dependencia entre la resistencia a la compresión inconfiada, no sólo con el contenido de humedad, sino también con la densidad aparente. Así, los aumentos en la densidad aparente tienen un fuerte efecto de aumento en la resistencia al corte, en virtud de las potencias cuadráticas y cúbicas.

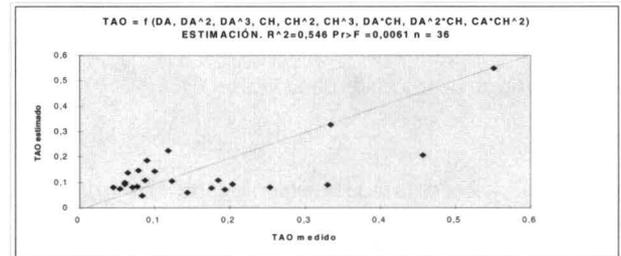


Figura 10. Resistencia al corte (MPa) en función del contenido de humedad (%) y de la densidad aparente (Mg/m³).

• Cohesión medida in situ en función del contenido de humedad y del índice de cono

Según la expresión 10 y la figura 11, existe una dependencia similar con el índice de cono que con el contenido de humedad. De tal forma que cambios en estos dos parámetros producen cambios importantes en la cohesión medida con la caja de torsión.

$$CIS = 0,0053219 * IC^{0,603782482} * CH^{0,828898028} \quad (10)$$

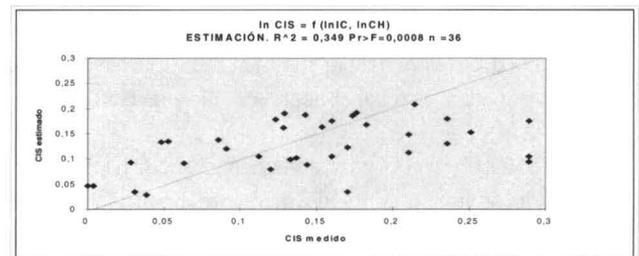


Figura 11. Cohesión de la prueba in situ (MPa) en función del contenido de humedad (%) y del índice de cono (MPa).

B. SELECCIÓN DE ÍNDICES DE CARACTERIZACIÓN PARA EL ESTUDIO ACTUAL

Conforme con el esquema planteado por Schafer, et al. (1991), debe comenzarse por un análisis de los datos de laboratorio y del desempeño de los datos de campo para ser luego involucrados dentro de un modelo de comportamiento del suelo.

Los datos que resultan del muestreo en campo y procesamiento en laboratorio y que además presentaron relaciones significativas son:

- Densidad aparente (DA).
- Macroporosidad (MP).
- Conductividad hidráulica (K).
- Contenido de humedad (CH) (método de la estufa).
- Resistencia al corte en compresión confinada (TAO).

Los datos de muestreo y proceso en campo, con relaciones significativas son:

- Índice de cono (IC).
- Cohesión en la prueba de corte *in situ* (CIS).

A pesar de haber realizado pruebas de corte directo del suelo se halló una gran dispersión de estos datos y según el análisis de correlación se obtuvo un pobre relacionamiento con otras características; por tanto se descartaron estos resultados.

Del mismo modo se encontró que el ángulo de fricción interna para las pruebas que posibilitan su medición no presenta una tendencia aparente con respecto a alguna otra característica; por tanto se desechó su uso.

El análisis de correlación estableció el grado de interrelación de unas características en función de otras y además las tendencias de cambios mutuamente influenciados; por tanto, en este paso debe decidirse qué variables medir para determinar las otras.

En este análisis se encontró que las características CH, IC, DA están involucradas en todos las relaciones; por tanto, su determinación debe ser obligada. También debe tenerse en cuenta que su determinación es relativamente sencilla y de bajo costo.

La determinación de DA es relativamente fácil de hacer usando el método del volumen conocido mediante algún elemento de paredes delgadas que no cause una perturbación del suelo y cuyas dimensiones sean conocidas. A partir de este dato y valiéndose de cartas de densidad real para la región, podría determinarse PT en el momento del muestreo.

El contenido de humedad también es relativamente fácil de medir, siempre y cuando se cuente con una balanza de buena precisión y una estufa. Para la determinación del índice de cono se requiere el penetrómetro de cono. Aun la prueba de corte *in situ* es relativamente fácil de realizar y no requiere muchos conocimientos del operario.

En resumen se establecieron cuatro mediciones sencillas (además de textura y características químicas que se espera sean conocidas de antemano por análisis regionales) que afortunadamente están

bien relacionadas con el resto de propiedades. Tales mediciones son entonces:

- Índice de cono.
- Contenido de humedad.
- Densidad aparente.
- Prueba de corte *in situ* (con caja de torsión).

C. SISTEMA DE LABRANZA ÓPTIMO PARA ESTE ESTUDIO

También de acuerdo con Schafer *et al.* (1991), debe analizarse el comportamiento suelo-máquina, que a la luz de esta investigación se hace como estado del suelo después de un grado dado de perturbación - procedimiento de perturbación (tratamiento de labranza). Ese estado del suelo puede valorarse según una calificación de los parámetros DA, PT, MP, K, IC, CH, CIS y TAO, medidos justo después de la aplicación de las máquinas (sistemas de labranza) y en el período de cosecha para tener además una idea de la estabilidad de la condición del suelo con el paso del tiempo. Para realizar esta valoración más sistemáticamente, en el cuadro 3 se presenta un estado de referencia de lo que se pueden considerar valores favorables y valores restrictivos de las variables del suelo para el crecimiento y desarrollo de las especies agrícolas típicas de la región (según referencias bibliográficas y experiencia de investigaciones y mediciones previas en la zona de prueba); en el cuadro 4 se muestra una síntesis de la calificación alcanzada por cada uno de los tratamientos de labranza en las dos profundidades y en los dos tiempos mencionados por cada uno de los parámetros considerados. Los valores de estos parámetros se encuentran en la parte 1 de este artículo.

De acuerdo con las calificaciones de el cuadro 4, para la condición del suelo resultante después de la labranza, los mejores sistemas serían los tratamientos 3 y 5 que, aunque no siempre están en el primer lugar de valoración de las características estudiadas, sí cumplen mejor que algunos otros todas las características de labranza óptima según Anazodo *et al.* (1991). También se nota que el tratamiento 1 presenta una condición más o menos favorable.

Cuadro 3. Valores de referencia para la condición del suelo en la zona de estudio.

	Valores favorables	Valores restrictivos
DA (mg/m ³)	0,75 – 1,00	> 1,30
PT (%)	55 – 65	<40
MP (%)	20 – 30	<10
K (cm/h)	1,6 – 18,0	<0,5
IC (MPa)	0,2 – 2,0	>3,0
CH (%)	40 – 50	<35 ó >55
CIS (MPa)	0,01 – 0,08	>0,12
TAO (MPa)	0,02 – 0,10	>0,15

De otra parte, y en lo referente a la conservación de la estructura del suelo con el tiempo para los primeros 15 cm del perfil, reflejada por los valores de densidad aparente, porosidades y conductividad hidráulica, los mejores tratamientos son el 4, el 5 y el 6, es decir, los tratamientos de reducción en la perturbación del suelo incluyendo

Es decir, si lo que se busca es economía en la producción del cultivo, puede pensarse en aplicar el tratamiento de labranza 5, con mayores producciones que el 6, pero con costos solo un poco mayores.

D. FORMULACIÓN DEL MODELO

Conforme con lo relacionado en la sección *Modelamiento de la labranza en función de la condición del suelo*, se particulariza que el presente modelo aplica a las condiciones de suelo y agroecología de la región que fueron señalados en la metodología (parte 1 y parte 2) de este artículo. Se hace énfasis que el suelo tiene textura francolímoda, índice de plasticidad promedio de 35%, límites líquido y plástico medios de 52% y 34%, respectivamente, y mostrando una alta compresibilidad.

Pasos principales:

1. Medición de las características: DA, IC, CH y CIS.
2. Verificación de las medidas realizadas según las relaciones entre variables.
3. Estimación de un valor indicativo de las propiedades: PT, MP, K Y TAO.
4. Recomendación del sistema de disturbación del suelo, superficial y profunda, mediante la aplicación de un implemento o grupo de ellos en una secuencia definida.

Especificación de los pasos:

1 y 2: medir IC y CH. Mediante la ecuación 2 se verifica la representatividad de estas mediciones; se recuerda que hay un rango – para este suelo- de valores de CH (>50%) que no ejercen una influencia importante sobre IC, a la vez que para el rango de 30% – 50% la dependencia es notoria. Simultáneamente medir DA y CIS (prueba de caja de torsión, *in situ*). Con las ecuaciones 3 y 10 se comprueba la bondad de las relaciones entre los cuatro parámetros medidos. La simultaneidad de estas mediciones se justifica en previsión a posibles variaciones por adensamientos posteriores ocasionados por cualquier clase de tráfico sobre el terreno de estudio. Se resumen las ecuaciones citadas en estos dos pasos, así:

- Ecuación 2: $IC = f(CH)$.
- Ecuación 3: $IC = f(CH, DA)$.
- Ecuación 10: $IC = f(CH, CIS)$.

3: establecer la condición del suelo, previa a la aplicación de un sistema de preparación conforme con las variables medidas en los pasos 1 y 2 y según los parámetros estimados de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

- PT: con $PT = (1 - DA/DR) * 100$, donde DR: densidad real.
- MP: ecuación 7.
- K: ecuaciones 5 y 6.
- TAO: ecuaciones 4, 8 y 9.

En el caso de K y TAO, donde se puede obtener más de un valor, deberá juzgarse si se usa el promedio o si es factible desechar alguno por estar fuera de los rangos esperados.

5: para recomendar la aplicación de alguna combinación de implementos de preparación de acuerdo con la condición del suelo (según los ocho parámetros antes aludidos) es preciso conocer el tipo de acción de cada uno de ellos, por lo demás, en este caso concreto se pueden usar los resultados obtenidos con cada uno de los tratamientos de labranza, mostrados en la parte 1 del artículo.

E. EJEMPLO DE USO DE LAS ECUACIONES PARA EL CÁLCULO DE LA CONDICIÓN DEL SUELO Y LA TOMA DE DECISIÓN DE UN SISTEMA DE LABRANZA

Supóngase una condición del suelo en la zona de estudio, en la que probablemente por efectos acumulados de labores en varios períodos de cultivo, se tienen las siguientes características medidas para los niveles de 0 cm – 15 cm y 15 cm – 30 cm de profundidad (datos regionales indican una densidad real, $DR = 2,16 \text{ Mg/m}^3$)

Característica medida	Profundidad: 0 cm – 15 cm	Profundidad: 15 cm – 30 cm
CH (%)	38	35
IC (MPa)	1,00	2,30
DA (Mg/m^3)	0,95	1,20
CIS (MPa)	0,120	0,180

1. PARA LA PROFUNDIDAD DE 0 CM – 15 CM:

Pasos 1 y 2: con la anterior información se verifica lo siguiente:

- Ecuación 2: (con CH = 38%). $IC = 1,18 \text{ MPa}$
- Ecuación 3: (con CH = 38% y $DA = 0,95 \text{ Mg/m}^3$). $IC = 0,75 \text{ MPa}$
- Ecuación 10: (con CH = 38% y $CIS = 0,120 \text{ MPa}$). $IC = 1,18 \text{ MPa}$

Con lo cual se nota que el valor medido de IC se encuentra en los valores esperados para el modelo propuesto.

Paso 3:

- (Para $DR = 2,16 \text{ Mg/m}^3$ y $DA = 0,95 \text{ Mg/m}^3$). $PT = 56,0\%$
- Ecuación 7: (con $IC = 1,00 \text{ MPa}$ y $PT = 56,0\%$). $MP = 17,1\%$
- Ecuación 5: (con $IC = 1,00 \text{ MPa}$ y $DA = 0,95 \text{ Mg/m}^3$). $K = 0,619 \text{ cm/h}$
- Ecuación 6: (con $PT = 56,0\%$; $CH = 38\%$ e $IC = 1,00 \text{ MPa}$). $K = 0,634 \text{ cm/h}$
- Ecuación 4: (con $CH = 38\%$ e $IC = 1,00 \text{ MPa}$). $TAO = 0,083 \text{ MPa}$
- Ecuación 8: (con $CH = 38\%$). $TAO = 0,251 \text{ MPa}$
- Ecuación 9: (con $CH = 38\%$ y $DA = 0,95 \text{ Mg/m}^3$). $TAO = 0,120 \text{ MPa}$

Para tener una idea de lo que significan tanto los valores medidos (pasos 1 y 2) como los parámetros estimados (paso 3) en términos de la valoración de la condición del suelo es conveniente disponer de valores de referencia como los citados en el cuadro 3.

Paso 4: aunque el suelo en este nivel de profundidad presenta una condición aceptable (no hay ningún parámetro en situación restrictiva) podría pensarse en aumentar un poco la macroporosidad y la conductividad hidráulica para mejorar la aireación y el movimiento del agua del suelo, a la vez que disminuir un tanto la resistencia al corte del suelo para beneficiar el desarrollo de raíces del cultivo. Esto podría conseguirse con un solo pase de rastra excéntrica conforme con lo observado con los tratamientos 3, 4 y 5 de este estudio.

2. PARA LA PROFUNDIDAD DE 15 CM – 30 CM:

Pasos 1 y 2: se comprueba que:

- Ecuación 2:(con CH = 35%). IC = 1,35 MPa
- Ecuación 3:(con CH = 35% y DA = 1,20 Mg/m³).IC = 1,96 MPa
- Ecuación 10:(con CH = 35% y CIS = 0,180 MPa).IC = 2,59 MPa

En este caso, el IC no se muestra con la misma precisión del caso anterior, pero sí expresa la compactación presente con un IC estimado promedio del orden de 2 MPa.

Paso 3:

- (Para DR = 2,16 Mg/m³ y DA = 1,20 Mg/m³).PT = 44,4%
- Ecuación 7:(con IC = 2,30 MPa y PT = 44,4%).MP = 9,4 %
- Ecuación 5:(con IC = 2,30 MPa y DA = 1,20 Mg/m³).K = 0,061 cm/h
- Ecuación 6:(con PT = 44,4%; CH = 35% e IC = 2,30 MPa).K = 0,016 cm/h
- Ecuación 4:(con CH = 35% e IC = 2,30 MPa).TAO = 0,480 MPa
- Ecuación 8:(con CH = 35%).TAO = 0,489 MPa
- Ecuación 9:(con CH = 35% y DA = 1,2 Mg/m³).TAO = 3,197 MPa

Las estimaciones de TAO, además de representar los endurecimientos o compactaciones con altos valores de resistencia al corte, están por fuera de los valores esperados y de lógica como en el último caso.

Paso 4: en esta profundidad la mayoría de parámetros del suelo se encuentran en condiciones desfavorables. Es así como se prevé un espacio de poros deficiente tanto para el intercambio gaseoso como para el fácil flujo del agua hacia las raíces, este último aspecto resaltado por los valores de conductividad hidráulica considerados como muy lentos, lo mismo que resistencias al corte del suelo bastante elevadas, sugiriendo un ambiente restrictivo para el desarrollo de raíces y para el crecimiento adecuado del cultivo. En consecuencia, debería utilizarse un implemento agrícola de una acción agresiva de

rompimiento o “estallamiento” de esta capa de suelo a fin de aumentar PT a un valor similar al de la profundidad de 0 cm – 15 cm, aumentar también MP a una cifra como mínimo del 15%, y por tanto, alcanzar una mejoría en K y reducir los parámetros de resistencia: IC, CIS y TAO a valores cercanos a los señalados como favorables en el cuadro 3. Este efecto puede conseguirse con la aplicación de un pase de arado de cincel hasta una profundidad de 35 cm – 40 cm. No debería usarse arada profunda con discos, pues se podría aumentar el problema de compactación entre los 20 cm – 30 cm del perfil o probablemente se llevaría parte del estrato compacto al nivel superficial.

Uniendo las selecciones de equipos para los dos niveles de profundidad se recomienda un sistema de preparación de suelo para este terreno consistente en un pase de arado de cincel seguido de otro con rastra excéntrica. Conviene señalar que las operaciones de labranza deberían realizarse con contenidos de humedad de alrededor del 30% (un poco menor que el límite plástico); además, las operaciones o paso de tractores y equipos no debe ser frecuente para evitar la compresión en niveles inferiores del perfil debido a la alta compresibilidad del suelo.

CONCLUSIONES

Para el terreno de prueba es posible establecer la condición del suelo con fines de labranza en función de cuatro parámetros medidos simultáneamente: densidad aparente, contenido de humedad, índice de cono y cohesión; y cuatro características estimadas: porosidad total, macroporosidad, conductividad hidráulica y resistencia a la compresión confinada. En el caso estudiado, por ejemplo, se toma la decisión de realizar un pase de arado de cincel para roturar una capa endurecida de suelo de los 15 cm a los 30 cm del perfil que ha sido detectada por un índice de cono de 2,3 MPa, con un contenido de humedad de 35% y una densidad aparente de 1,2 Mg/m³ además de una cohesión de 0,18 MPa; de no romper dicha capa, se estima que con una porosidad total de 44%, una macroporosidad del 9%, una conductividad hidráulica menor de 0,06 cm/h y una resistencia a la compresión confinada mayor de 0,5 MPa habría un pobre desarrollo en la mayoría de los cultivos posibles de la región

Las propiedades físicas del suelo tales como: densidad aparente, proporción de poros y movimiento y cantidad de agua en el suelo muestran una fuerte relación con las características mecánicas del suelo: cohesión, resistencia al corte y a la penetración; esto resalta la importancia de estudiar y analizar conjuntamente el comportamiento físico y mecánico del suelo a fin de establecer la relación suelo / planta/ máquina en los sistemas de labranza.

Los tratamientos de preparación con bajos o nulos niveles de remoción conducen al suelo al final del período vegetativo del cultivo a parámetros físicomecánicos más estables en comparación con aquellos de remoción intensa. Esta situación debe tenerse en cuenta en la selección de sistemas de labranza.

RECOMENDACIONES

Dada la importancia de la condición física del suelo en la producción de especies vegetales y la necesidad de conservar su buen estado se justifica la realización de este tipo de estudios, que aseguren que esté aplicándose únicamente el nivel de disturbación necesario; por tanto, se recomienda que se hagan estudios similares, siguiendo la metodología mostrada en este trabajo, en otras regiones de Colombia, que tengan suelos y regímenes climáticos diferentes.

Dentro de los parámetros estudiados, debería incluirse la estabilidad estructural, siempre y cuando se encuentre un método de fácil, rápida y económica instrumentación, que no dificulte el análisis de los resultados encontrados.

Es conveniente que en futuras investigaciones la porosidad total del suelo se subdivida en macro, meso y microporosidad.

Para evaluar la versatilidad de los modelos escogidos deberían hacerse estudios de la influencia de las labranzas sobre otros cultivos, y determinar qué tanto sirve un mismo tratamiento para diferentes especies vegetales.

BIBLIOGRAFÍA

1. AHUJA, L. R. *et al.* "Evaluation of spatial distribution of hydraulic conductivity using effective porosity data". *Soil Science*. Vol. 148., No. 6. Dec. 1989, pp.404-411.

2. ANAZODO, U. G. N., ONWUALU, A. P., WATTS, K. C. "Evaluation of alternative tillage systems in the absence of herbicides for maize production in a savannah loamy sand". *Journal of Agricultural Engineering Research*. Vol. 49., 1991, pp. 259 - 272.

3. AYERS, P. D. "Moisture and density effects on Soil shear strength parameters for coarse grained soils". *Transactions of the ASAE*. Vol. 30., No. 5. Sep./Oct. 1987, pp. 1282-1287.

4. AYERS, P. D., BOWEN, H. D. "Predicting soil density using cone penetration resistance and moisture profiles". *Transactions of the ASAE*. Vol. 30., No. 5., Sep./Oct. 1987, pp. 1331-1336.

5. AYERS, P. D., PERUMPRAL, J. V. "Moisture and density effect on cone index". *Transactions of the ASAE*. Vol. 25., No. 5., 1982, pp. 1169-1172.

6. BAKHTIN, P. U., *et al.* "Resistance of soils in the USSR to deformation and ploughing". *Ninth International Congress of Soil Science*. Vol. 1., 1968, pp. 781-792.

7. BUSSCHER, W. J., SOJKA, R. E. "Enhancement of subsoiling effect on soil strength by conservation tillage". *Transactions of the ASAE*. Vol. 30., No. 4. Jul./Aug. 1987, pp. 888-892.

8. EKWUE, E. I., STONE, R.J. "Organic matter effects on the strength properties of compacted agricultural soils". *Transactions of the ASAE*. Vol. 38., No. 2. Mar./Apr. 1995, pp. 357-365.

9. GILL, W. R., VANDENBERG, G. E. "Soil dynamics in tillage and traction". *Agricultural Handbook 316*, USDA, 1967.

10. GREACEN, E.L. "Water content and soil strength". *Journal of Soil Science*. Vol. 11., No. 2., 1960, pp. 313-333.

11. KOOLEN, A. J., KUIPERS, H. *Agricultural Soil Mechanics*. Springer-Verlag, Berlin. 1983.

12. ONI, K.C. "Traffic compaction and tillage effects on the performance of maize in sandy soil of Nigeria". *Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*. Vol. 22., No. 2., 1991, pp. 27-31.

13. PERUMPRAL, J. V. "Cone penetrometer applications: A review". *Transactions of the ASAE*. Vol. 30., No. 4. Jul./Aug. 1987, pp. 939-944.

14. QUIROGA, R. A. *Influencia de las labranzas sobre propiedades de los suelos estrechamente relacionadas con la productividad*. Estación Experimental Agrícola del INTA, Facultad de Agronomía de UNL Pampa, Argentina. sf, pp.1-18.

15. SCHAFER, R.L., *et al.* "A rationale for modeling soil compaction behavior: an engineering mechanics approach". *Transactions of the ASAE*. Vol. 34., No. 4. Jul./Aug. 1991, pp. 1609-1617.

16. WELLS, L. G., TREESUWAN, O. "The response of various soil strength to changing water content and bulk density". *Transactions of the ASAE*. Vol. 23., No. 5., 1978, pp. 854-861.