1.14 La técnica del Penetrómetro.

Como nos describe Sánchez-Girón 1996 el penetómetro es el aparato que permite determinar la resistencia a la penetración del suelo. Consiste en una punta cónica, cuyas dimensiones han sido normalizadas por la Asociación Americana de Ingenieros Agrónomos (ASAE, 1982), que se introduce en el suelo a una velocidad de 1829 mm/min. La resistencia a la penetración es la presión. (Fuerza por unidad de superficie) necesaria para introducir la punta cónica hasta una cierta profundidad en el perfil del suelo. Mediante un equipo registrador apropiado se puede obtener una representación gráfica de la variación de la resistencia a la penetración con la profundidad del suelo (fig. 17). El índice de cono, IC, a una determinada profundidad del suelo es el valor medio de la resistencia a la penetración encontrada hasta dicha profundidad.

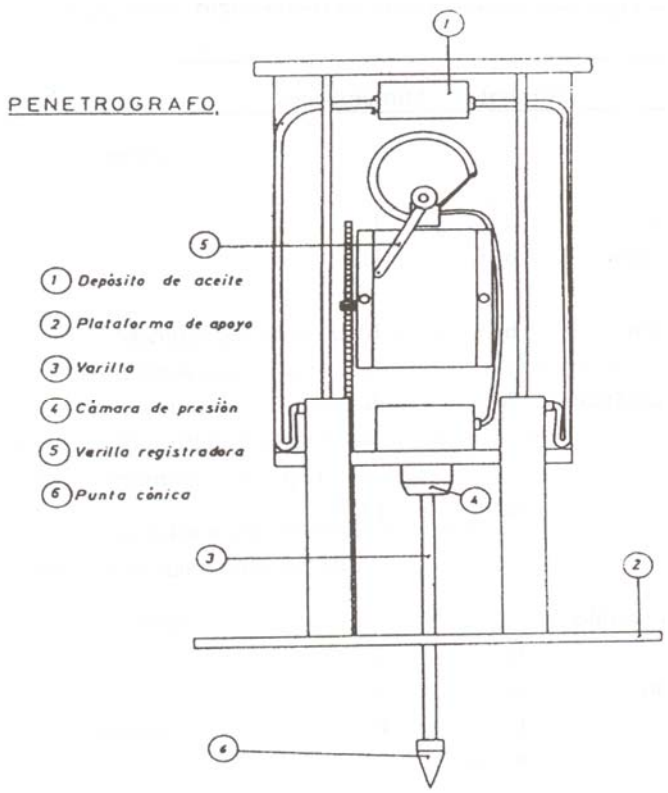

Fig. 17 Esquema de un penetrógrafo.

La técnica del Penetrómetro (índice de cono), descrita por Sánchez-Hermosilla 1997 nos relata que fue estandarizada por ASAE en 1978 según la norma S. 313.1, basándose en los desarrollos originales realizados por la Waterways Experiment Station (WES). Consiste en medir la resistencia que el suelo opone a la penetración de unas puntas cónicas normalizadas.

El valor del "índice de cono" (IC) se define como la medida de la presión que se ejerce sobre el cono que se va introduciendo en el suelo.

En un principio el penetrómetro consistía en un mecanismo portátil construido con una punta cónica de 30^0 y de 3.2 cm^2 de base unida a un eje graduado que terminaba en un dial que indicaba la fuerza necesaria para introducir la punta en el suelo a una velocidad aproximada a 3 cm/s. Fue utilizado por WES para dotar sus servicios de inteligencia y al personal de reconocimiento de un ensayo simple para evaluar la movilidad de los vehículos y la traficabilidad del terreno.

Actualmente la norma S. 313.3, permite el uso de dos tamaños de cono según la resistencia del terreno una es de 3.2 cm^2 de base para suelos sueltos y el otro de 1.3 cm^2 para suelos duros, ambos con el Angulo 30^0. (fig. 19)

Los avances tecnológicos han propiciado la aparición de un gran número de penetrómetros que permiten medir con gran fiabilidad la fuerza que el suelo opone a la penetración. Purempral (1987) hace una revisión de los distintos tipos y modelos de penetrómetros y describe las posibles aplicaciones que puede tener su uso.

Bekker (1969) y Wong (1989) describen en sus trabajos una serie de parámetros que se pueden determinar a partir de la medida de IC y que están relacionados con la interacción suelo – vehículo. Entre esos penetrómetros se encuentra el "el Índice de Remoción" (Remolding Index, RI), que se define como el cociente y el índice de cono de una muestra antes y después de someterla a un ensayo de compactación normalizado por la ASAE. Este parámetro permite evaluar los cambios que tienen lugar en la resistencia del suelo después de pasar repetidas veces con un vehículo. Bekker (1969), Wong (1989), (Sánchez-Hermosilla 1997).

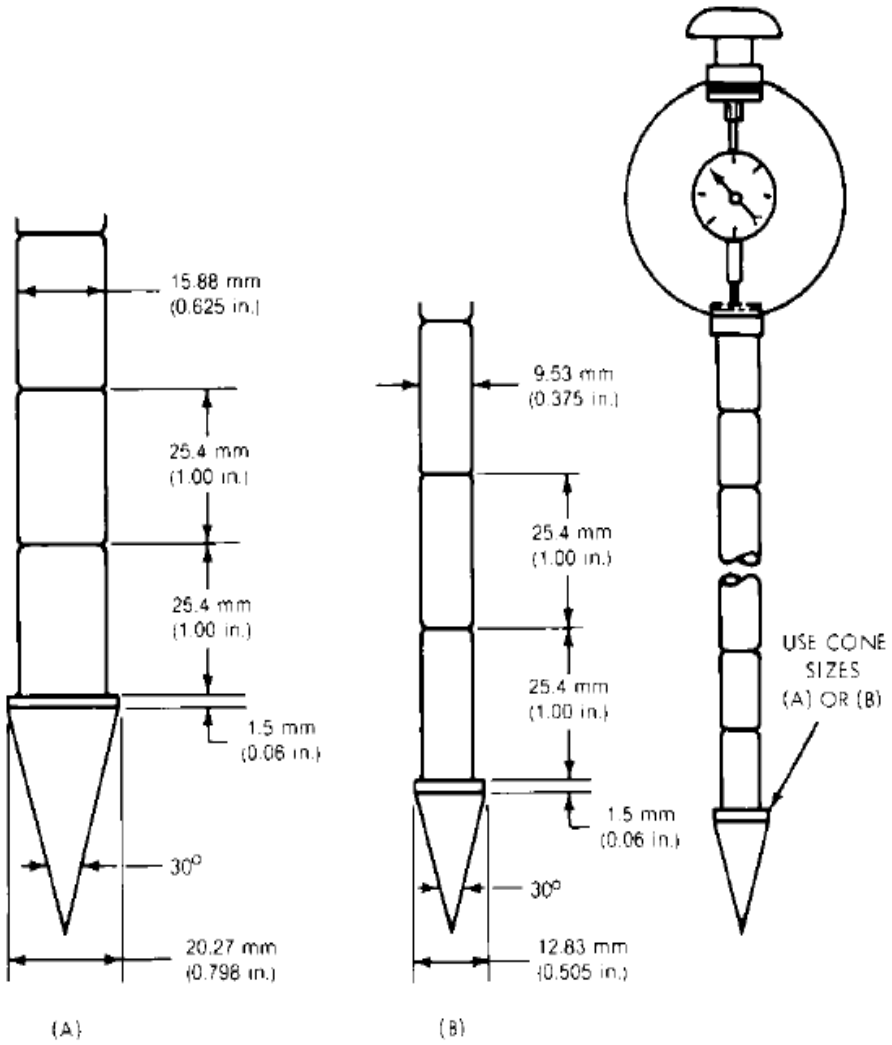

Fig. 18 Penetrómetro de la ASAE.

Otro parámetro referido por estos autores, es el "Índice de cono Estimado" (Ratin Cone Index RCI) y el IC del suelo antes del paso del vehículo. Se emplea para determinar la resistencia del suelo al paso de vehículos.

Debido a su simplicidad la técnica del penetrómetro ha sido muy utilizada en los métodos empíricos del estudio de la movilidad de los vehículos. Pero estos métodos presentan importantes limitaciones ya que las relaciones empíricas que

se establecen solo pueden emplearse bajo las mismas condiciones en que fueron obtenidas.

Esta ha dado lugar al desarrollo de otros modelos basados en las propiedades mecánicas de los suelos (ángulo de rozamiento interno, cohesión, modulo de deformación, entre otros), constituyendo los llamados métodos paramétricos o semiempiricos.

Determinación de las propiedades físico mecánicas del suelo.

De acuerdo a nuestra experiencia y las bibliografías consultadas las principales propiedades a medir son la resistencia a la penetración según la norma de ASAE S. 313.3 y las relaciones presión hundimiento y tensión tangencial deformación según las técnicas del Bevámetro. A partir de estas relaciones deduciremos el índice de cono IC, con el ensayo de penetración, los parámetros característicos del suelo definidos por Bekker (k_c, k_Φ y n) mediante el ensayo de hundimiento y la cohesión (c) y el ángulo de rozamiento interno (Φ) con el ensayo de corte por torsión.

La dificultad de encontrar sistemas móviles que pudieran realizar conjuntamente las medidas necesarias para determinar las propiedades físico-mecánicas del suelo “in situ”, simulando las acciones ejercidas por sistemas de tracción, ha dado lugar al desarrollo de un equipo móvil para este fin. Equipo de medición de las propiedades mecánicas del suelo dispone de elementos mecánicos, hidráulicos y eléctricos montados en un bastidor que se engancha en el tripuntal del tractor (Sánchez-Hermosilla 1997).

1.15 Penetrómetro de cono con múltiples sondas acoplados al tripuntal del Tractor.

(R. L. Raper, B. H. Washington, J. D. Jarrell. 2001) en articulo titulado A Tractor-Mounted Multiple-Probe Soil Cone Penetrometer, nos relata como determinando los perfiles de consolidación del suelo requieren probar los sistemas rápidamente debido a la humedad cambiante. Normalmente para este propósito se usan los penetrómetros de cono, pero realizando muchas lecturas requeridas, la

variabilidad de los datos pueden tomar períodos de tiempo muy largos . Un Penetrómetro de cono con múltiples sondas acoplados al tripuntal del Tractor fue construido y se probó con el propósito de medir los valores de índice de cono a lo largo del perfil de la tierra del medio traficado por una fila de la cosecha. Esta máquina se ha usado con éxito en los numerosos estudios y ofrece la capacidad de obtener la información de resistencia a la penetración del suelo a lo largo de un campo entero en períodos relativamente cortos de tiempo. Algunos han diseñado penetrómetros magnetofónico mano-operado que no requiere a una segunda persona y puede insertarse continuamente en la tierra (Carretero, 1967,; Hendrick, 1969, Prather et al. 1970). También desarrollaron penetrómetros Tractor-montados para eliminar los requisitos, obreros manuales asociados para obtener estas medidas (Williford et al., 1972; Smith y Dumas, 1978, Wilkerson et al., 1982). Determinaron la importancia estadística en las medidas que obtuvieron de un penetrómetro de cono para el suelo, que es difícil la precisión debido a la variabilidad en los datos. Un método eficaz es adquirir una cantidad grande de datos para el análisis de los resultados. Durante un experimento que involucró dos sistemas de tráfico, cuatro sistemas de cultivo, cuatro repeticiones, cinco situaciones dentro de la parcela, y cinco posiciones por fila, más de tres se exigieron, días obtener los 800 juegos de datos de fuerza-profundidad con un aparato de multiples sondas tracto-montados, la publicación fue en octubre 1998; y se aprobó para la publicación por Power & Machinery división de ASAE en abril 1999.

La 313.3 (ASAE, 1998) estandariza el penetrómetro de cono y establece. Dos tamaños del cono disponibles para el uso; 20.27 mm (0.798 in.) diámetro del cono, la varilla es de 15.88 mm (0.625 in.) para suelos sueltos y 12.83 mm (0.505 in.) el diámetro del cono, la varilla es de 9.53 mm (0.375 in.) para suelos duros. A continuación se muestra la (fig. 19) que muestra la parte frontal del MPSCP. En la (fig. 20) se muestra el aparato acoplado al tractor realizando pruebas.

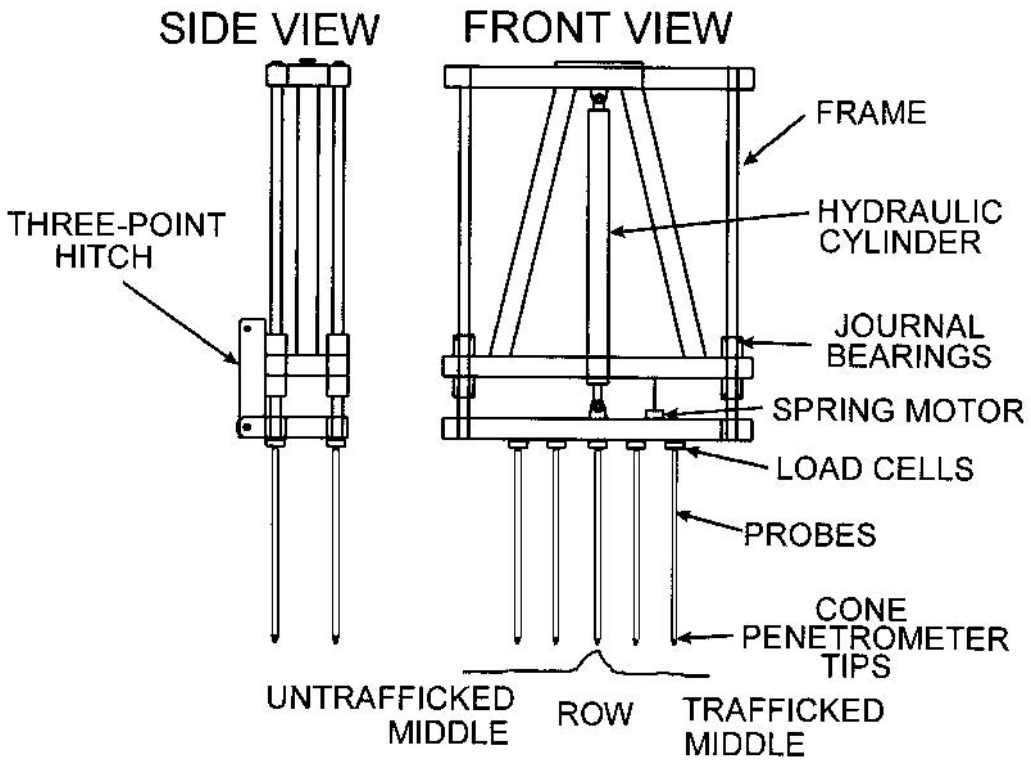

Fig. 19 Esquema del MPSCP.

Los espacios entre las filas son de 1.2 m. Cinco sondas estaban montadas por fila con uno en el medio de la fila en el lado izquierdo, una segunda mitad del camino entre la fila y el medio de la fila, un tercero directamente en la fila, una cuarta mitad del camino entre la fila y el otro medio de la fila, y el quinto en el otro medio de la fila en el lado correcto. Cuando las condiciones de la tierra sumamente duras eran experimentadas, se quitaron el segundo y cuartas sondas para permitir la fuerza aumentada adelante permanecieron tres sondas. La profundidad máxima de penetración se gobernó por la longitud de las sondas y la longitud del golpe del cilindro. Las profundidades típicas de longitud de la sonda han sido 0.91 m o 0.76 m con el marco que tiene una limitación ligeramente de más de 1 m. El MPSCP fue atado y alzado con el tripuntal el sistema hidráulico y rígidamente atado al tractor con dos eslabones adicionales.

Fig. 20 Ingenieros realizando pruebas con el penetrómetro de cono con múltiples sondas (MPSCP) acoplado al tripuntal del Tractor.

Estos eslabones adicionales le impidieron al MPSCP moverse lateralmente o verticalmente mientras el MPSCP estaba insertándose en la tierra. Este procedimiento eliminó errores de profundidad que ocurrieron en las tierras duras si el peso del MPSCP no fuera suficiente las sondas en la tierra. Atando el MPSCP rígidamente al trasero del tractor, el peso adicional del tractor ayudaba obteniendo los valores de índice de cono en las condiciones de tierra donde se pruebe.

El MPSCP se ha usado en muchos estudios del campo para determinar índice del cono o la densidad a granel. Tal estudio involucrado investigando la cacerola de arcilla de Missouri central y determinando las diferencias entre el césped de la pradera y tierra de cosecha de cultivo un grafico se muestra en la (fig. 22) (Alberts et al., 1996). Debido a una falta de lluvia, la fuerza de la tierra era sumamente alta,

se usaron tan sólo tres sondas. En la pradera, se promediaron los datos de las tres sondas juntas debido a la ausencia de tráfico y sistemas del cultivo. Otro estudio involucró, investigando el cultivo y efectos de eliminación de ***cizaña en las pacanas*** (Foshee et al., 1997). Las Trincheras crearon varios años más temprano un cultivo especial y la máquina, también se localizó con el MPSCP (Raper et al., 1998). Determinando el efecto de cultivo y sistemas de tráfico en la consolidación de la tierra ha sido el más utilizado el MPSCP. Desarrollando un sistema de cultivo para el Valle Tennessee Región en Alabama del Norte ha requerido que esa fuerza de la tierra se determine para evaluar los efectos del cultivo poco profundo o profundo y cosechas de la tapa (Raper et al., 1998).

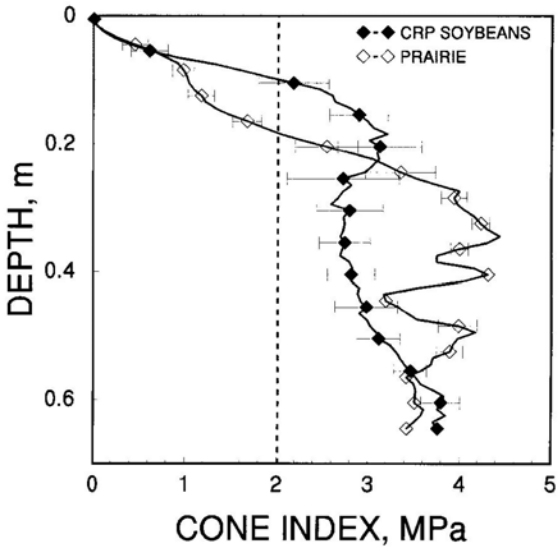

Fig. 21 índice de cono, los perfiles promediaron en el MPSCP por las tres sondas en la pradera y tierras de labranza cultivadas.

Se obtuvieron un grupo de conclusiones como Un método de obtener lecturas múltiples de índice del cono por una fila con una inserción se ha desarrollado con éxito y se ha usado para numerosos estudios que involucran la determinación de los efectos de consolidación del suelo, esta máquina flexible también puede usarse para obtener las muestras del centro para la determinación de la densidad a profundidades múltiples, es muy valiosa se realizan una gran cantidad de

mediciones en un periodo de tiempo mínimo, lo que ha aumentado la capacidad de la investigación.

1.16 Penetrómetro de cono utilizado en áreas militares.

En articulo de Internet publicado por Dave Jones y Matt Kunze, de la Universidad de el Estado de Colorado, del centro de Dirección Medioambiental de Tierras Militares nos describen que el tráfico de vehículos y las pisadas en las áreas de entrenamiento del ejército pueden producir niveles variantes de consolidación de la tierra, dependiendo de los usos, clima, propiedades de la tierra, y humedad de la tierra en momento de impacto. La consolidación de la tierra es caracterizada más a menudo por los cambios en la tierra la densidad , típicamente expresado en Mg/m^3 o g/cc. También se relaciona la densidad y resistencia de la tierra que puede medirse usando un penetrómetro. (Molinero et. al. 2001).

Hay dos tipos fundamentales de penetrómetros de cono portátiles: el penetrómetro estático y el penetrómetro dinámico. Los dos miden la resistencia a la penetración del suelo de manera vertical provistos de una sonda o cono, la distinción entre los dos penetrómetros queda en cómo se aplica la fuerza al cono.

El penetrómetro de cono estático.

Los penetrómetros del cono estáticos miden la fuerza al empujar un cono de metal a través de la tierra a una velocidad constante (fig 22). La fuerza es normalmente moderada por una célula de carga o medida de tensión (por ejemplo, demostrando el anillo) se le acopla un dial analógico o transductor de presión para la lectura (Herrick y Jones, 2002). La fuerza normalmente se expresa en (Kpa), un índice de fuerza del suelo llamado el índice del cono (ASAE, 1999), el equipo realiza la lectura, graba los valores de índice de cono por cada incremento de profundidad a evaluar. Los índices de cono dependen de las propiedades del cono (el ángulo y tamaño) y las propiedades de la tierra (por ejemplo, densidad a granel, textura, y humedad de la tierra) (ASAE, 1999; Herrick y Jones, 2002). el penetrómetro de cono estático tiene un ángulo de 30^0, el cual es el recomendado por la Sociedad Americana de Ingenieros Agrícolas (ASAE).

Los penetrómetros estáticos pueden ser relativamente caros ($ 600.00 USD), particularmente para modelos con la capacidad magnetofónica digital.

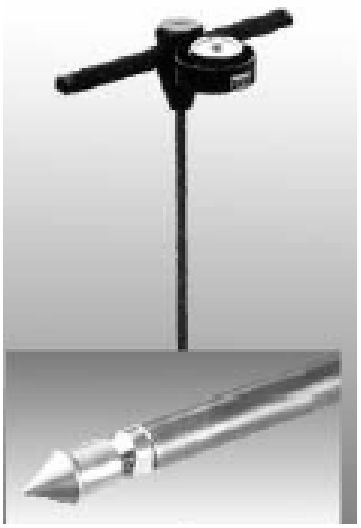

Fig. 22 Penetrómetro de cono estático manual.

. Las ventajas de penetrómetros de cono estático sobre el penetrómetros del cono dinámico incluyen los métodos bien-documentadas según las normas, facilidad de uso, manipulación, sencillez. El penetrómetro de cono dinámico (DCP), se necesita aplicarle una cantidad conocida de energía cinética para penetrar el suelo a una distancia determinada (Herrick y Jones, 2002). Los penetrómetros dinámicos no confían en la velocidad de penetración constante, la mayoría de los penetrómetros dinámicos cuentan con un martillo de masa fija y se lanzan de una altura determinada (fig 23). Pueden calcularse los resultados de índice de cono descrito anteriormente, por el peso del martillo, distancia que cae el martillo, e influencia de ángulo del cono (pudiendo utilizarse dos tipos de cono según la ASAE un para suelos sueltos y otro para suelos duros ambos con ángulo de 30^0). www.geoscience.wes.army.mil

Fig. 23 Ejemplo de Penetrómetro dinámico (sus Partes).

1.17 La penetrometría.

Muchos son los factores que relacionados varían los datos que un Penetrómetro de cono nos entregan, según lo demostrado por Soane *et al.* (1981), Perumpral (1987), Taylor & Burt (1987), Håkansson *et al.* (1988), Chancellor (1994), Jorajuría *et al.* (1995), (1997), Jorajuría y Draghi (1997):

- contenido de humedad presente en el suelo
- densidad del suelo
- ángulo del cono y diámetro de la base
- rugosidad del cono
- tipo de suelo

Por lo tanto la información obtenida, debe ser cuidadosamente interpretada debido a que son muchos los factores asociados. Para Freitag (1968), los siguientes factores inciden incrementando la resistencia a la penetración: diámetro de la varilla, rugosidad del cono y velocidad de penetración. Mientras que otros como el ángulo del cono y el diámetro de la base, inciden inversamente. Según Gill (1968), en cuanto al ángulo, la resistencia a la penetración disminuye si el ángulo está comprendido entre 7,5º y 30º, y luego se incrementa hasta 60°.

Es conocida la influencia de la densidad aparente y de la humedad presente, en el resultado de una evaluación por penetrometría. Sin embargo esta problemática siempre se ha estudiado en suelos con intermedios ó elevados porcentajes de humedad presente, porque son éstas las condiciones que mayores problemas de transitabilidad originan. Estudios hechos por Turnage, (1972), Smith, *et al*., (1967) y Knight & Freitag, (1962) demostraron, trabajando con suelos granulares finos, con humedades entre 20 y hasta 50%, que la resistencia a la penetración disminuye logarítmicamente con el aumento de la humedad para diferentes densidades. Voorhees y Walker (1977), en suelos franco-limosos con humedades presentes entre 20 y 30% encontraron la siguiente relación:

IC (kPa) = 4527,75 – 137,09 hp (%) base seca. Collins, (1971) encontró otra relación: ln IC = a + b(ln hp (%) a y b son constantes para el modelo pero están en función del tipo de suelo. El observó la relación inversa entre hp e IC y también que el % de humedad en el cual se mide un valor determinado de IC, depende del porcentaje de partículas finas y gruesas del suelo. A mayor porcentaje de arcilla, mayor debe ser la humedad presente para alcanzar un valor determinado de IC.

(ASAE 1992), / / (www.unlu.edu.ar)