Conservación de los recursos naturales para una **Agricultura** sostenible

Soluciones para la compactación del suelo

Degradación de la estructura del suelo

El enemigo oculto

Efectos de la degradación de la estructura del suelo

Como determinar la degradación de la estructura del suelo

Mejoramiento de suelos con enraizamiento limitado
Métodos biológicos
Soluciones mecánicas
Soluciones químicas

Bibliografía

Degradación de la estructura del suelo

La degradación de la estructura del suelo, muchas veces llamada compactación del suelo, es considerada la forma más seria de degradación de la tierra causada por las prácticas de labranza convencional. Paradójicamente, de todos los tipos de degradación de tierras, la degradación de la estructura del suelo es reversible y su ocurrencia es previsible o al menos controlable.

La degradación de la estructura del suelo es un problema mundial que ocurre en todos los suelos y niveles de producción agrícola. Algunos ejemplos del gran costo de la degradación de la estructura del suelo son:

- En un área agrícola de Australia, la cuenca de Murray - Darling, la degradación de la estructura del suelo ha causado daños estimados en Aus$ 144 millones (Fray, 1991).
- En los Estados Unidos de América las pérdidas del rendimiento de los cultivos causadas por la degradación de la estructura del suelo se estimaban en 1 000 millones de dólares estadounidenses anuales (Lal, 1994).

La degradación de la estructura del suelo no está limitada a las grandes fincas mecanizadas. Los equipos de tiro humano y animal pueden también causar la degradación de la estructura del suelo. Por ejemplo:

- Hay informes sobre la degradación de la estructura del suelo en empresas agrícolas de subsistencia tanto en Malawi (Douglas *et al.*, 1999) como en Bangladesh (Brammer, 2000).
- El pisoteo de caballos y bueyes produce presiones sobre la tierra de hasta 150 kPa y 250 kPa, respectivamente (Soane y Van Ouwerkerk, 1994). Estas presiones son al menos iguales o mayores que las causadas por un tractor de ruedas.

Para agravar el problema, la degradación de la estructura del suelo es comúnmente considerada como el tipo de degradación de tierras más difícil de localizar y reconvertir. La razón es que la degradación de la estructura del suelo es un fenómeno sub-superficial.

LÁMINA 1
Esta lámina muestra un campo compactado por la presión reiterada de las ruedas. El problema se identificó solamente cuando la erosión laminar removió toda la parte superior del suelo.
McGarry

A diferencia de la erosión y la salinización que dan una fuerte evidencia superficial del fenómeno, la degradación de la estructura del suelo requiere análisis físicos antes de ser revelada e identificadas su extensión, naturaleza y causa. La combinación del alto costo y la «invisibilidad» hacen de la degradación de la estructura del suelo un gran riesgo para el desafío de la seguridad alimentaria global.

¿Qué es la estructura del suelo y porqué es importante para las plantas?

La estructura del suelo es la arquitectura del suelo, o sea, la forma en que están ordenados las partículas sólidas y los espacios. La descripción de la estructura del suelo se refiere al tamaño y forma de las unidades de suelo o agregados y los espacios de aire o poros dentro y entre ellos. Los agregados están constituidos por partículas de suelo individuales ligados con materia orgánica, arcilla y hierro. Diferentes suelos tienen diferentes tipos de estructuras formadas en el transcurso de los años como una parte natural del proceso de la formación del suelo.

Los espacios de aire entre y dentro de las unidades son los más importantes. No solo distribuyen el aire, el agua y los nutrientes a través del suelo, sino que además son usados por las raíces de las plantas para anclar y sostener un cultivo sano. Los buenos suelos tienen una mezcla de microporos y macroporos: los macroporos para la entrada de agua y el drenaje, los microporos para el almacenamiento del agua.

Leer más en poros del suelo

El enemigo oculto

La degradación de la estructura del suelo es una reducción del espacio poroso entre los agregados. El suelo compactado no proporciona espacio adecuado para el almacenamiento o movimiento del aire y el agua del suelo. Más importante aún es que los grandes poros continuos del suelo se pierden o se reducen en sus dimensiones conduciendo a un movimiento lento del agua y a una aireación reducida. El crecimiento de las raíces y de la fauna del suelo también se reducen.

Las principales causas de la degradación de la estructura del suelo son las fuerzas de las ruedas de la maquinaria y los implementos agrícolas, especialmente cuando el suelo está húmedo o saturado, momento en que suelo es más propenso a la deformación. Hay un potencial máximo para la compactación del suelo en los sistemas de cultivo convencional debido a que la mayoría de los cultivos se hacen en suelo húmedo. Esto es o bien para combatir las malezas o para preparar la tierra para la siembra después del período de barbecho. En ambos casos hay un fuerte riesgo de compactación del suelo, ya que el suelo húmedo es débil y fácilmente degradable.

En los sistemas de cultivo mecanizado el uso continuo de implementos de labranza, especialmente los arados y rastras de discos, los arados de vertedera y los rotovadores durante largos períodos, frecuentemente repercuten en la formación de pisos de arado densos que contienen pocos poros grandes capaces de ser penetrados por las raíces de los cultivos. El piso de arado se desarrolla debajo de la profundidad a la cual el suelo es labrado y con frecuencia presenta superficies superiores lisas con poros sellados causados por la acción de frotación de la reja y el talón de los arados de vertederas. El grado de compactación depende de la presión ejercida por los implementos sobre el suelo.

LÁMINA 2
La capa compactada generada por las ruedas del tractor en la temporada anterior, redujo el rendimiento del cultivo de algodón en 50 por ciento – ca. $EE.UU. 1 250/ha perdidos en una sola temporada.
(*D. McGarry*)

La preparación de la tierra, cuando los suelos tienen un contenido de humedad mayor que el óptimo para la labranza, promueve la compactación del suelo, ya que los suelos son más propensos a la compresión. Es probable que ocurra en suelos con drenaje deficiente o que son difíciles de labrar en seco sin pulverizarse debido a su consistencia muy dura (p. ej. suelos pesados). También es probable que la compactación ocurra cuando los agricultores usan muchos pases de maquinaria para preparar la cama de siembra, o cuando disponen de

una potencia limitada de tractor y no pueden usar equipos de gran ancho de trabajo; por lo tanto, producen surcos compactados por las ruedas en espacios estrechos. La compactación puede también desarrollarse en el subsuelo por el pasaje de maquinaria pesada como cosechadoras y camiones cargados, especialmente en condiciones húmedas. El grado de compactación dependerá de la carga total de la maquinaria.

La compactación del suelo se puede desarrollar también en la labranza manual. Pisos delgados de azada de 2 - 3 cm de espesor se pueden desarrollar debajo del nivel de penetración de la azada y, por lo tanto, limitar la penetración de las raíces. Cuando se forman camellones todos los años, la combinación de cavar con la azada a la misma profundidad y el tráfico de las personas entre los surcos en condiciones húmedas pueden acentuar la compactación.

LÁMINA 3

Suelo completamente compactado entre los montículos en una *shamba* en Uganda.
D. McGarry

La formación de la compactación del suelo en esta forma es típica de la «espiral descendente» de la degradación de tierras cuando se usan prácticas agrícolas convencionales: el tráfico y la labranza en los suelos húmedos causan la compactación y es necesario más trabajo para remover la compactación y así sucesivamente.

La porosidad de la superficie del suelo puede haber sido reducida por la obstrucción de los poros con partículas desprendidas de los agregados del suelo bajo el impacto de las gotas de lluvia, o por la deposición de las partículas desprendidas sobre la superficie del suelo como costras o sellado que impermeabiliza el suelo.

La formación de costras de suelo no solo incrementa la pérdida del agua de lluvia, sino que puede además restringir severamente la germinación de las plántulas. En situaciones donde el encostramiento hace necesaria una resiembra, habrá costos adicionales de preparación de tierras, siembra y resiembra, junto con la reducción del rendimiento que resulta de la plantación tardía. Los costos del encostramiento pueden ser importantes; en 1984 en Santa Cruz, Bolivia, el costo de la resiembra de algodón en suelos severamente encostrados fue de $EE.UU. 340/ha.

El encostramiento y la escorrentía se acentúan por la excesiva labranza, la cual conduce a la pulverización del suelo y a una progresiva pérdida de materia orgánica del suelo; esto es perjudicial ya que la pérdida de materia orgánica favorece la desintegración de los agregados del suelo. La facilidad con que son destruidos los agregados del suelo en partículas más pequeñas depende de la estabilidad de los agregados. Los suelos arcillosos con alto contenido de materia orgánica generalmente poseen alta estabilidad.

La porosidad del suelo subyacente puede ser naturalmente baja, o puede haber sido reducida por la compactación y las prácticas de labranza que han desestabilizado o destruido los espacios de poros, causando una zona de baja permeabilidad en la base de la capa labrada. El grado de reducción de la porosidad del suelo causada por la labranza es en general suficiente para limitar la penetración de las raíces, pero raramente es tan severa como para que la permeabilidad al agua disminuya en forma significativa.

Con respecto al rendimiento, la reducción del espacio de poros puede ser al menos tan importante como la pérdida de partículas del suelo. Esta afecta el movimiento del agua y la tenacidad de los suelos para la retención de agua, la expansión de las raíces y el intercambio gaseoso de O_2 y CO_2 con la atmósfera. Este daño es similar a la pérdida de espacios en un bloque de apartamentos cuando estos son demolidos: permanece la misma cantidad de materiales, pero se pierde el valor de la arquitectura debido a que no hay espacios vacíos usables, en este caso, habitaciones. No se puede presumir que los suelos poco profundos sean necesariamente más propensos a la escorrentía que los suelos más profundos, ya que la permeabilidad dependerá de la velocidad a la cual el material parental del suelo puede aceptar el agua. Algunos materiales parentales son más bien impermeables, mientras que otros son altamente permeables debido a su naturaleza porosa o a la presencia de grietas y fisuras.

Los suelos compactados son menos productivos comparados con los mismos suelos con buena estructura debido a la reducción de la aireación para el buen crecimiento de las raíces y de la absorción de nutrientes para el máximo rendimiento del cultivo. Esto ocurre especialmente en regiones áridas y semiáridas donde las condiciones de estructura de suelo óptimas son necesarias tanto para maximizar la entrada de agua en el suelo como el almacenamiento de agua durante el barbecho. En temporadas secas, el crecimiento de las raíces debe ser óptimo y es necesaria una estructura fina para mejorar la proliferación de raíces y poder absorber completamente las reservas de agua que permitan incrementar la cosecha.

Efectos de la degradación de la estructura del suelo

La compactación del suelo, debido al colapso o disminución de los espacios de poros, es la causa mas común de restricción física para el crecimiento y desarrollo de las raíces. Una vez que los poros han sido compactados hasta 0,2 - 0,3 mm de diámetro, es difícil que las raíces de los cultivos puedan penetrar libremente en el suelo.

Si bien la resistencia de las capas compactadas decrece a medida que aumenta el contenido de agua, un alto contenido de agua puede rápidamente limitar el suministro de oxígeno a las raíces; por lo tanto, esas raíces limitan su crecimiento por falta de oxígeno. Ciertos cultivos como el algodón y el girasol parecen ser más susceptibles que otros a las limitaciones del crecimiento de las raíces a través de las capas compactadas.

La compactación a menudo reduce las dimensiones de los poros lo suficiente como para inhibir la penetración de las raíces pero no suficientemente como para afectar el drenaje del agua a través del suelo. Los poros de 0,2 - 0,3 mm de diámetro pueden limitar el crecimiento de las raíces pero el agua puede drenar por gravedad a través de poros de solo 0,01 mm de diámetro.

Un efecto similar a la compactación puede ocurrir cuando suelos estructuralmente inestables conocidos como suelos pesados, se hunden y se convierten en suelos saturados por las intensas lluvias para formar capas densas. Cuando se seca la capa densa de suelo se endurece y resiste a la penetración de las raíces.

La limitación del enraizamiento también puede ser causada por horizontes densos formados naturalmente que contienen pocos poros suficientemente grandes que permitan la penetración de las raíces. Estos horizontes pueden ser encontrados en suelos formados por sedimentos de ríos, de lagos o volcánicos y en zonas áridas y semiáridas donde son formados horizontes de yeso y calcáreos químicamente cementados.

En algunas situaciones las limitaciones de las raíces pueden ser causadas por una fluctuación del nivel de la capa de agua freática. Durante la temporada de lluvia las raíces de los cultivos son confinadas a las zonas superficiales inmediatamente por encima de la capa freática. Si el nivel de la capa freática desciende durante la temporada seca y las raíces del cultivo ya han completado su desarrollo, permanecerán cerca de la superficie sin acceso al agua disponible más profundamente. Las raíces también pueden ser limitadas a bajas profundidades por factores químicos, tales como la presencia de aluminio y manganeso tóxicos, o por severas deficiencias nutricionales en el subsuelo.

LÁMINA 4
La capa freática alta y las inundaciones limitarán el desarrollo y crecimiento de las raíces y, por lo tanto, impedirán la producción.
FAO

Con el acceso de las raíces a la humedad del suelo limitada a una capa superficial por encima de la capa compactada, las plantas tenderán a sufrir de estrés de agua después de unos pocos días de tiempo seco.

Los arados de vertederas, rastrillos y cinceles de pata de pato que ejercen fuertes presiones horizontales sobre el suelo, pueden causar el alisado de la superficie del suelo. Esto cierra los poros, rompe la continuidad de los poros dentro del suelo y reduce la tasa de infiltración.

Una reducción del tamaño de los poros reduce enormemente la velocidad de infiltración de la lluvia. Si un poro se reduce diez veces de tamaño, la cantidad de agua que puede fluir a través del mismo en un tiempo dado será 10 000 veces menor que antes de ser reducido. Esto destaca el efecto perjudicial de la compactación sobre la tasa de infiltración del agua de lluvia.

La infiltración depende de que haya suficiente porosidad en la superficie del suelo para que el agua de lluvia se infiltre y en el subsuelo y en el material parental (si es poco profundo) para que el agua de lluvia percole. Cuando la porosidad de la superficie del suelo es demasiado baja para aceptar la lluvia caída, o la porosidad del subsuelo es demasiada baja para permitir la percolación (es decir, la permeabilidad es demasiado baja), la infiltración será limitada y el agua de lluvia se perderá como escorrentía. Una mala comprensión de estas relaciones frecuentemente lleva a tomar acciones inapropiadas para detener la erosión, tales como la construcción de obras físicas o abuso de fertilizantes.

LÁMINA 5
El agua de lluvia que no se infiltra en el suelo genera surquillos en su superficie.
S.F. Shaxon

Como determinar la degradación de la estructura del suelo

El estado de la estructura del suelo es un indicador primario de la «salud» de los suelos. La observación de la estructura del suelo indica si las prácticas de manejo están mejorando y optimizando el ambiente del suelo o si están causando degradación.

El indicador más obvio del enraizamiento limitado de las plantas se observa en la distribución de las raíces del cultivo. Cuando las raíces están físicamente limitadas por una capa densa que contiene pocos poros, las raíces pueden desarrollar formas de crecimiento características inmediatamente por encima de la capa limitante del crecimiento. Lo más común es el cambio abrupto de la dirección del crecimiento, de la vertical a la horizontal, y un engrosamiento de las raíces encima de los límites de la capa limitante.

LÁMINA 6

Crecimiento típico de la raíz de la planta de soya en un suelo compactado. Hay un desarrollo de pocas raíces verticales y muchas raíces laterales.
D. McGarry

En la agricultura mecanizada, los pisos de arado se forman generalmente a 12 - 30 cm de profundidad, dependiendo del implemento usado y de su profundidad normal de trabajo. Las capas densas formadas naturalmente pueden ocurrir a cualquier profundidad. El momento óptimo para observar las raíces es después de la floración cuando la mayoría de las raíces habrán completado su crecimiento.

Cuando no hay un cultivo sembrado, es más difícil identificar la existencia de capas potencialmente limitantes del crecimiento de las raíces en el suelo. Sin embargo, la forma de enraizamiento de las malezas maduras que permanecen en el campo después que el cultivo ha sido cosechado, arraigadas o no, puede ser usado para revelar la existencia de capas limitantes del crecimiento de las raíces.

Cuando no hay cultivos ni malezas la presencia de la capa densa de suelo de alta resistencia y conteniendo muy pocos poros visibles es un indicador útil. La presencia de capas densas es a menudo revelada cuando cavando con una pala o azada se encuentra un abrupto aumento de la resistencia, lo que indica que se llegó a la capa densa. Sin embargo, un súbito incremento de la resistencia del suelo puede también ser encontrado cuando el suelo cambia de húmedo a seco. Para evitar este problema, es aconsejable humedecer el suelo hasta 30 cm de profundidad dos días antes de llevar a cabo el examen del campo.

Físicamente, las capas limitantes pueden ser identificadas por la carencia de poros visibles. El poro más pequeño visible a simple vista (0,1 mm de diámetro) coincide razonablemente bien con los poros más pequeños dentro de los cuales pueden penetrar las raicillas de los cereales (0,1 a 1 mm) y las raíces de las dicotiledóneas (0,3 a 10 mm). Cuando la densidad de los poros visibles observados en fragmentos de la capa densa en un hoyo en el suelo es menor de aproximadamente seis en un área de 10 x 10 cm, la limitación al crecimiento de las raíces es probablemente muy severa y la respuesta, cuando se rompa la capa limitante, es muy probable que sea positiva.

LÁMINA 7
Solo después de excavar un hoyo en el suelo, la capa compacta «invisible» es evidente. En este caso se observa una capa compactada desarrollada naturalmente a causa de la dispersión del suelo de la capa arable.
D. McGarrv

Otros indicadores de las capas potencialmente limitantes del crecimiento de las raíces que pueden ser usados en el campo en ausencia de un cultivo, son la resistencia determinada con el penetrómetro y la densidad aparente determinada en muestras de un volumen conocido de suelo no alterado. Los valores de la resistencia crítica del penetrómetro y la densidad aparente a los cuales las raíces de la mayoría de los cultivos anuales son limitadas y han sido establecidos para suelos de diferentes texturas.

Mejoramiento de suelos con enraizamiento limitado

El tipo de solución a ser aplicada dependerá de la causa de la limitación del crecimiento de las raíces. La causa más frecuente es la compactación del suelo debida a la ausencia de poros lo suficientemente grandes para ser fácilmente penetrados por las raíces o que puedan ser ensanchados por el crecimiento de las mismas. Esta situación ocurre en las capas densas, tales como los pisos de arado formados por la labranza; además, naturalmente, ocurren capas densas como las encontradas en los suelos pesados. La restricción al enraizamiento puede ser superada, al menos temporalmente, mediante medios mecánicos y biológicos. Además de erradicar las causas de las limitaciones de las raíces, es importante evitar una reaparición del problema mediante, por ejemplo, la introducción de la Agricultura de Conservación en los casos en que las capas densas han sido formadas por la labranza.

Las causas menos comunes del enraizamiento limitado son de origen químico y debidas a la presencia de concentraciones de niveles tóxicos de aluminio o manganeso, alta salinidad o severa deficiencia de nutrientes, especialmente de fósforo. La ausencia de oxígeno debido a las fluctuaciones del nivel de agua también puede limitar el desarrollo de las raíces. Cuando la capa freática es alta, el desarrollo de las raíces de la mayoría de los cultivos estará limitado a la capa de suelo inmediatamente por encima del nivel superior del agua pero el cultivo no sufrirá por falta de humedad. Si el nivel de la capa freática cae en forma relativamente rápida a un nivel significativamente más bajo, por ejemplo en la floración cuando el cultivo aún tiene que alcanzar la madurez fisiológica pero las raíces han cesado de crecer, las raíces pueden ser bloquedas en el suelo seco sin acceso a la humedad de las capas más profundas.

Las causas citadas de un enraizamiento limitado, en ciertos casos, pueden ser superadas mediante la aplicación de cal, o cal y yeso que es más móvil, con el fin de: erradicar las toxicidades de aluminio y manganeso, favorecer la percolación para reducir los riesgos de salinidad, aportar los fertilizantes para rectificar las deficiencias nutricionales o mejorar el drenaje para solucionar la ausencia de oxígeno debido a la fluctuación del nivel de agua.

Métodos biológicos para superar las capas limitantes del crecimiento de las raíces

El método principal de restauración de la porosidad de las capas limitantes del crecimiento de las raíces es utilizar las raíces de la vegetación natural o de cultivos de cobertura plantados para actuar como subsoladores biológicos que penetren en los horizontes densos. La estabilidad de los canales creados por las raíces de las plantas será mayor que aquella de canales formados por métodos mecánicos, ya que la liberación de sustancias orgánicas de las raíces estabiliza las superficies internas de los canales. Una vez que las raíces se han muerto y contraído, estos poros serán lo suficientemente grandes y estables para permitir que penetren las raíces del cultivo siguiente.

La tierra puede ser dejada en barbecho por 2 - 3 años para su regeneración con arbustos naturales o vegetación forestal. Alternativamente, la siembra de especies seleccionadas efectivas en la regeneración de la estructura del suelo pueden enriquecer el barbecho natural. Un cultivo de cobertura puede ser sembrado para que sirva como un barbecho sembrado. Las especies promisorias de cultivos de cobertura que han dado muestras de ser potenciales subsoladores biológicos son el pasto Bahía (*Paspalum notatum*), *Festuca elatior,* el pasto Guinea (*Panicum maximum*), la alfalfa (*Medicago sativa*), el gandul (*Cajanus cajan*) y el caupí (*Vigna unguiculata*).

El rábano forrajero (*Raphanus sativus*) y los arbustos fijadores de nitrógeno *Tephrosia vogelii, Sesbania sesban* y *Gliricidia sepium* han sido también identificados como potencialmente útiles. Algunas malezas con raíces principales fuertes, como *Amaranthus* spp., pueden tener potencial para actuar como subsoladores biológicos, como han observado los agricultores mennonitas de Bolivia que encontraron rendimientos más altos en suelos compactados después de infestaciones fuertes de *Amaranthus*.

LÁMINA 8
Ejemplo de una raíz muy visible de rábano penetrando en el suelo. El tamaño de la raíz principal indica lo beneficioso del rábano como «herramienta» biológica de descompactación. Cuando se practica la AC, esta raíz descompuesta dejará un bioporo en el suelo a través del cual el agua de lluvia podrá fácilmente infiltrarse.
A. Calegari

Los métodos biológicos son generalmente mucho más económicos de ejecutar y sus beneficios son de más larga duración que los métodos mecánicos. Una ventaja importante de los barbechos vegetativos es que mejoran sensiblemente la fertilidad física, química y biológica del suelo debido

a la gran cantidad de materia orgánica producida y agregada al suelo. Los barbechos de árboles pueden ser beneficiosos suministrando leña, materiales de construcción y otros productos, siempre que la recolección de estos materiales no reduzca los efectos beneficiosos del barbecho sobre la fertilidad química del suelo.

La principal desventaja son los 2 o 3 años que se requieren para que los barbechos naturales sean efectivos, período en que las tierras están fuera de producción mientras ocurre la recuperación. Una desventaja de los barbechos de árboles es la dificultad de retornar al cultivo anual después del período de barbecho, debido a que será necesario extraer las raíces y tocones de los árboles; en este caso, mientras más largo sea el período de barbecho más difícil será su extirpación. Sin embargo, en Zambia, la extracción de las raíces de *Sesbania* después de dos años de barbecho no ha sido un problema. Además, es necesario proteger la vegetación del pastoreo del ganado, la quema y la cosecha durante los 2 - 3 años del período de barbecho, lo cual puede causar costos adicionales para el cercado.

Los barbechos plantados con cultivos de cobertura de raíces principales profundas pueden ser difíciles debido a la falta de semillas disponibles y a su costo; es necesaria una población alta para asegurar una adecuada densidad de raíces principales que penetren la capa limitante del crecimiento de las raíces. Para capas limitantes muy densas, inclusive *Cajanus cajan* puede tener un efecto limitado.

El uso de barbechos de cultivos de cobertura es muchas veces un proceso rápido que posibilita que la tierra retorne más rápidamente a la producción. Los barbechos naturales en el que hay una regeneración de la vegetación de árboles tienen mayores probabilidades de ser adoptados por los agricultores que desean cambiar el uso de sus tierras del área recuperada a forestales o cultivos de árboles perennes.

Los factores que acentúan los métodos biológicos son:
- Labranza cero
- Tráfico controlado
- Neumáticos flotantes

Labranza cero

La labranza cero, que es uno de los componentes básicos de la Agricultura de Conservación, es comúnmente recomendada y practicada para el control de la erosión. Sin embargo, la labranza cero también es una herramienta vital para prevenir la compactación del suelo, ya que reduce en forma notoria la incidencia del contacto del metal de las herramientas con el suelo. Es obvio que el cultivo es más fácil en suelos húmedos (menos requerimiento de potencia, menor uso y desgaste del equipo y proceso más rápido). Pero, lamentablemente, en estas condiciones el suelo está más propenso a la degradación de su estructura.

La práctica de la labranza cero reduce enormemente el riesgo de cultivar con un contenido incorrecto de agua (que compacta el suelo) mediante la eliminación de las operaciones de labranza excepto la siembra.

LÁMINA 12
Un sistema de labranza cero depende de la siembra directa, en este caso una sembradora-fertilizadora de tres hileras. Las semillas y el fertilizante caen en un surquillo abierto sobre la cobertura del suelo.
T. Friedrich

Especialmente en los suelos limosos y arenosos, el aumento de los niveles materia orgánica es importante para incrementar la fertilidad y la capacidad de retención del agua, reduciendo el riesgo de compactación. Inclusive, muy pequeños incrementos del contenido de materia orgánica pueden reducir la compactibilidad al aumentar la resistencia a la deformación y/o gracias al auemento de la elasticidad del suelo.

Los cultivos de cobertura y las rotaciones de cultivos tienen un impacto que va más allá del incremento de los niveles de materia orgánica y la reducción el riesgo de erosión: proporcionan tipos y formas de raíces que se alternan en el suelo que, en forma similar a los macroporos de las lombrices de tierra, rompen las capas compactadas y acentúan la infiltración del agua. Además, la alfombra de residuos amortigua el efecto de compactación de la maquinaria pesada en la superficie del suelo.

Tráfico controlado

La finalidad del control del tráfico es mantener las ruedas de todos los equipos siempre en la misma huella, año tras año, y mantener estas zonas de tráfico separadas de las zonas de cultivo, manejando cada zona separadamente. El tráfico al azar de tractores y otros rodados puede, potencialmente, cubrir toda el área de un campo en una temporada.

Al igual que en la labranza cero, el tráfico controlado es una herramienta vital para realizar la Agricultura de Conservación, principalmente por el control permanente de la localización de la compactación del campo. El tráfico ocasional es reemplazado por senderos permanentes para rodados, denominados «vías». Un fuerte apoyo e impulso a la aceptación y uso del tráfico controlado es una práctica novedosa en la finca.

El tráfico controlado y la labranza cero trabajan en forma conjunta. La compactación del suelo puede continuar siendo un problema bajo la labranza cero, ya que el suelo no es rutinariamente aflojado por la labranza y además el suelo continúa siendo sometido al paso de varios equipos potencialmente pesados en condiciones de suelo de húmedas a saturadas.

El hecho de confiar exclusivamente en el potencial de formación de porosidad por las lombrices de tierra y otra macrofauna del suelo como ocurre especialmente bajo la labranza cero, es considerado como un escenario de alto riesgo; el número de animales de la fauna del suelo puede ser severamente afectado por el clima, los productos químicos y los ciclos de los cultivos. Por ello, un sistema más sostenible usaría la sinergia de la labranza cero con el control del tráfico, como ocurre en algunas fincas en Australia. En ese sistema, el tráfico controlado limita la compactación producida por el tráfico en las vías, por lo tanto, se obtiene un beneficio completo por la mejora de la estructura del suelo y la situación de la materia orgánica beneficiada, incluyendo la actividad de las lombrices de tierra en la labranza cero.

LAMINA 13
Cartel en la puerta de la finca de Trevanna Downs, al norte de Goondiwindi, Australia. El agricultor ha logrado una combinación de labranza cero y tráfico controlado y está obteniendo beneficios como una excelente capacidad de retención del agua en sus suelos, ha mejorado el contenido de materia orgánica, obtiene mejores cosechas y maneja un sistema agrícola más predecible y remunerador. *D. McGarry*

Neumáticos flotantes

Los neumáticos flotantes son un importante recurso para enfrentar la degradación de la tierra y ayudar a los agricultores a lograr la Agricultura de Conservación. La función principal de los neumáticos flotantes es reducir la compactación del suelo inducida por el tráfico. Sin embargo, mejoran el rendimiento del cultivo y los márgenes de ganancia de la finca.

Los neumáticos de la agricultura convencional compactan el suelo, principalmente mediante una tensión normal y cortante. Hay seis factores documentados inherentes al diseño de los neumáticos de flotación que proporcionan muchas respuestas a la capacidad compactadora de los neumáticos agrícolas:

(i) Baja presión de inflado – los neumáticos flotantes comúnmente ruedan hasta con solo un quinto de la presión de inflado de los neumáticos agrícolas normales.
(ii) Baja presión promedio sobre el suelo – considerado el factor más importante en la reducción de la capacidad compactadora de los neumáticos. Bajo ciertas condiciones la presión sobre el suelo esta relacionada con la presión de inflado del neumático. Los neumáticos flotantes están diseñados para rodar a presiones bajas de inflado.
(iii) Baja carga del neumático – considerado el segundo factor más importante en la determinación de la capacidad compactadora del neumático. La amplia huella uniforme de la goma asegura que la carga del equipo es distribuida más ampliamente, reduciendo la presión de contacto sobre el suelo por unidad de superficie.
(iv) Baja rigidez del neumático – los neumáticos flotantes están diseñados con paredes más resistentes y gruesas que los neumáticos de la agricultura convencional, asegurando una distribución uniforme de la presión y una mayor flexibilidad (sin hinchamientos ni agrietamientos y sin que salte el aro de las llantas)
(v) Bajo resbalado de la rueda – particularmente en la labranza cero hay un menor requerimiento de fuerza de tracción. La mayoría de los neumáticos son ahora de

rodamiento, ya que la necesidad de fuerza de tracción ha sido reducida por la eliminación de las operaciones de rotura, subsolado y cultivo.

(vi) Bajas bandas de agarre – vinculado a la menor necesidad de tracción para la labranza cero, los neumáticos flotantes tienen solo pequeñas bandas de agarre al suelo. Un estudio australiano de la compactación producida por neumáticos de cosechadoras con bandas de agarre pronunciadas mostró que la compactación en estas condiciones fue significativamente mayor (hasta 17 por ciento) que los neumáticos sin área de agarre y que el efecto se extendió hasta 15 cm de profundidad.

Los neumáticos flotantes proporcionan otras ventajas, además de una reducción de la compactación. Dos ejemplos han demostrado que usando neumáticos flotantes relacionados con la combinación de baja presión sobre el suelo y de la distribución uniforme de la presión y mejoramiento de la oportunidad del trabajo, se incrementa el rendimiento y se mejoran los márgenes de ganancia de la finca.

(i) En Holanda, un estudio de tres años en un campo arable de 60 hectáreas con suelos limosos arcillosos, demostró que un sistema de neumáticos flotantes completo, usado en toda la finca y comparado con el sistema de tráfico de alta presión comúnmente usado, llevó a un incremento promedio del rendimiento de 4 por ciento en cultivos de raíces. El análisis de los márgenes brutos y la rentabilidad demostró una mejor rentabilidad anual con los neumáticos flotantes, a pesar del alto precio de estos neumáticos. El aumento de los rendimientos y los bajos costos corrientes pagaron los neumáticos.

(ii) Un estudio de 14 años de duración en 3 200 hectáreas de tierra arable en Alemania mostró un 30 por ciento de incremento en el rendimiento promedio de cultivos de granos en los que se usaron neumáticos flotantes. El beneficio provino específicamente de la oportunidad de las operaciones en primavera.

Soluciones mecánicas a la restricción física de las raíces

Tradicionalmente, los métodos mecánicos son usados para romper las capas limitantes del crecimiento de las raíces, naturalmente densas o compactadas, con el fin de crear poros más grandes a través de los cuales puedan penetrar las raíces. Esto es hecho, generalmente, levantando ligeramente el implemento y rompiendo la capa densa o compactada. La operación puede ser llevada a cabo en todo el campo, o solamente a lo largo de las hileras de siembra. Esta última operación, conocida como subsolado en hilera, es más rápida y requiere menos potencia de tracción, pero la siembra debe ser precisa y directamente sobre las hileras removidas. El método más apropiado dependerá de la profundidad de la capa limitante del crecimiento de las raíces, de su espesor y dureza y de la fuente disponible de potencia.

Las capas poco profundas limitantes del crecimiento de las raíces, como los pisos de azada se encuentran típicamente de 5 a 8 cm de profundidad; el medio más fácil para romperlos es con subsoladores tirados por bueyes o arados de cincel montados sobre tractor. La mayoría de los agricultores que usan la labranza manual probablemente tendrán que usar herramientas de mano para romper los pisos de azada mediante métodos como la doble excavación, con la desventaja de que esta es intensiva y laboriosa. Para romper las capas compactadas en la temporada seca, cuando el suelo está muy duro, pueden ser necesarias herramientas robustas diferentes de aquellas que el agricultor normalmente usa para la labranza, tales como, la piocha, la piqueta, la azada de tres picos o una barreta larga.

Las capas más profundas limitantes del crecimiento de las raíces, tales como los pisos de arado, se forman a partir del límite inferior de labranza del suelo lo que, por lo general, ocurre en los 20-25 cm de su perfil superior. Los pisos de arado formados por los implementos tirados por animales generalmente pueden ser rotos haciendo dos pases de subsolador, mientras que aquellos formados por implementos tirados por tractor casi siempre requieren un subsolador montado sobre tractor o un «paraplow».

LÁMINA 9
Subsolador montado en un tractor, usado para romper capas compactadas.
T. Friedrich

Los «paraplow» son similares a los subsoladores excepto que la púa o brazo está inclinada lateralmente en la dirección del movimiento, lo cual permite que el suelo fluya por encima de la pata. Son preferibles a los subsoladores comunes, ya que arrastran pocos terrones a la superficie, requieren menos fuerza de tracción y causan menos incorporación de residuos, los que idealmente deben ser dejados sobre la superficie. Los arados de discos son menos apropiados debido a que invierten el suelo, incorporan la mayoría de los residuos del cultivo y malezas y suben terrones del subsuelo hacia la superficie, por lo que necesitan una labranza adicional.

Si la capa limitante del crecimiento de las raíces debe ser desintegrada en todo el campo, el subsolador o el «paraplow» debe penetrar, como mínimo, hasta 1,5 veces la profundidad del límite inferior de la capa limitante del crecimiento de las raíces y el espacio entre brazos o púas no debe ser mayor que este valor. Por ejemplo, si la capa se encuentra a 10 - 24 cm de profundidad, los brazos del subsolador o el «paraplow» deben penetrar hasta 36 cm y el espacio entre los brazos no debe ser mayor de 36 cm. Si los brazos están más espaciados, existe la probabilidad que la capa no sea completamente removida en el centro de la distancia entre los brazos. Para evitar la compactación de las ruedas del tractor, los brazos deben ser colocados inmediatamente detrás de la huella de las ruedas. Para un subsolado en el surco, los brazos deben solo penetrar hasta el límite inferior de la capa limitante del crecimiento de las raíces y el espaciado de los brazos debe coincidir con el espacio entre hileras del cultivo.

El subsolado debe ser llevado a cabo en forma perpendicular a la dirección normal de labranza y el suelo debe estar seco a la profundidad de subsolado para obtener una buena rotura. Si el suelo está húmedo o saturado, no habrá rotura, sino solamente la formación de canales por donde han pasado las puntas del subsolador.

La compactación del subsuelo a 40 cm de profundidad o más es causada por la pasada de equipos muy pesados con altas cargas de al menos 6 toneladas por eje, tales como cosechadoras y camiones cargados con grano. A esta profundidad el uso de subsoladores convencionales para aflojar las capas profundas compactadas es difícil y costoso debido a la necesidad de muy alta potencia de tracción. Los subsoladores vibratorios o balanceantes, en los cuales los puntos del subsolador vibran o se balancean usando la potencia del tractor pueden trabajar hasta 80 cm de profundidad, pero requieren una potencia de 75 – 100 HP. Se han desarrollado nuevos implementos empleando cuchillas de movimiento elíptico o azadas rotatorias, los cuales utilizan un mecanismo rompedor-aflojador para desintegrar las capas compactadas. Pueden ser usados a profundidades de 60 hasta 120 cm y en suelos con mayor contenido de humedad que los subsoladores convencionales, pero son caros y requieren alta potencia de tracción.

El rompimiento y levantamiento de las capas limitantes del crecimiento de las raíces por medios mecánicos crea espacios de poros más grandes a través de los cuales pueden penetrar las raíces, permitiendo que alcancen y tomen ventajas de la humedad del suelo y de los nutrientes almacenados en las capas más profundas. De esta manera, los cultivos son capaces de hacer un uso más eficiente del agua de lluvia. El principal efecto del subsolado es usualmente la promoción de un crecimiento más profundo de las raíces, pero si las capas limitantes del crecimiento de las raíces son tan densas que además se limita el movimiento del agua, el subsolado puede también facilitar la percolación del agua de lluvia a capas más profundas.

El mejor desarrollo de las raíces con frecuencia aumenta los rendimientos de los cultivos y las pasturas. En el Distrito de Babati, Tanzanía, la rotura del piso de arado mediante el subsolado ha casi triplicado los rendimientos del maíz y cuadruplicado su producción de materia seca. El incremento de rendimiento por el subsolado es más probable en áreas donde los rendimientos están limitados por la lluvia; mientras más seca sea la temporada mayor será la probable respuesta al subsolado.

El subsolado en hileras, especialmente cuando es combinado con la plantación en una sola pasada, es particularmente beneficioso para los suelos pesados que después de saturarse con la lluvia, se secan al formar rápidamente capas limitantes del crecimiento de las raíces. Esta técnica tiene mas probabilidad de éxito cuando esta asociada con la plantación de precisión y el tráfico controlado, en el cual el movimiento de todas las ruedas de la maquinaria es

restringido a vías permanentes. Los beneficios del subsolado son probablemente mayores cuando es seguido inmediatamente por el establecimiento de un cultivo de cobertura denso con un fuerte sistema radical que ayude a estabilizar los nuevos espacios de poros creados. El cultivo de cobertura debe entonces ser seguido por un sistema de Agricultura de Conservación, en el cual la ausencia de labranza reduce la posibilidad de fomentar la compactación.

La principal desventaja de la rotura mecánica de las capas de suelos limitantes del crecimiento de las raíces es el alto requerimiento de potencia, ya sea manual, animal o mecánica. Dado que la mayoría de los agricultores no tienen acceso a más equipos de los que usan para la preparación de tierras, el proceso es inevitablemente lento.

Algunos suelos se vuelven tan extremadamente duros durante la temporada seca, que la potencia de tiro normal de que disponen los agricultores es incapaz de penetrar en el suelo y romper la capa limitante del crecimiento de las raíces. En ese caso es necesario esperar el comienzo de las lluvias para humedecer y ablandar el suelo y para que así sea posible romper la capa compactada; sin embargo, esto puede coincidir con el tiempo crítico de preparación de tierras y siembra. Este problema puede suceder igualmente a agricultores que usan tracción animal o tractores como los que usan herramientas manuales como fuente de energía. Las operaciones de subsolado son inefectivas cuando las capas compactadas o densas están mojadas o muy húmedas, ya que no tendrá lugar la rotura y ocurrirá aún una mayor compactación.

Los agricultores muchas veces carecen de los implementos necesarios, ya sean picos para uso manual, cinceles para tracción animal, o subsoladores o «paraplow» para la agricultura mecanizada. El uso de implementos normales de preparación de tierras difícilmente será satisfactorio. Por ejemplo, los arados de discos pueden ser usados para romper el piso de arado, pero además incorporan los residuos de los cultivos y malezas, cuando idealmente estos deben ser dejados como una capa protectora sobre la superficie del suelo.

El uso repetido, especialmente de gradas de discos pesadas, puede producir un piso compactado casi impermeable en solo unas pocas temporadas. Estos pisos han sido la causa de la erosión y la escorrentía severa y cada vez mas acelerada de millones de hectáreas en Brasil, antes de que el uso del equipo de discos fuera abandonado en favor de la labranza mínima con púas, y posteriormente seguidos por sistemas de no labranza.

L#MINA 10
Severa escorrentía en un área con terrazas cultivadas en Brasil.
A. Calegari

Cuando se dejan residuos voluminosos de los cultivos sobre la superficie, especialmente residuos rígidos de maíz, sorgo y algodón, el funcionamiento de los subsoladores y «paraplows» es más dificultoso salvo que los equipos tengan discos frontales de corte.

Si el subsolado es seguido por una labranza convencional, los efectos beneficiosos persistirán probablemente solo por dos o tres años; en estos casos el subsolado debe ser repetido regularmente. La velocidad con la cual la capa limitante del crecimiento de las raíces se forma de nuevo dependerá del número de labranzas y otras operaciones de campo, el contenido de humedad del suelo en el momento de estas operaciones y la susceptibilidad del suelo a la compactación. Los suelos limosos y los arenosos finos y aquellos con imposibilidad de drenar son los más susceptibles a la compactación.

La adopción de los métodos mecánicos para vencer las restricciones físicas al crecimiento de las raíces será favorecida cuando los rendimientos están limitados por la escasa lluvia. Bajo tales condiciones es importante lograr que toda la lluvia posible sea almacenada dentro del perfil del suelo y que las raíces de los cultivos tengan acceso a toda la humedad almacenada en el suelo. Los métodos mecánicos serán preferidos cuando los agricultores tienen acceso a tractores y subsoladores o «paraplows», y donde la tierra no puede ser sacada de producción y colocada bajo barbecho por dos o tres años. Otros métodos con soluciones mecánicas para prevenir y recuperar las capas de suelo restringentes de raíces se incluyen en Labranza estratégica.

Labranza estratégica

La labranza estratégica es un tipo de labranza mínima que en ciertos cultivos puede ser útil para llegar a establecer un sistema de Agricultura de Conservación. Hasta el momento, su aplicación se limita a la producción de caña de azúcar y de cultivos de raíces.

La finalidad de la labranza estratégica es concentrar la labranza solo en el área de la hilera y dejar inalterada la tierra entre hileras. Esto sigue la lógica de los sistemas de tráfico controlado, donde los campos están demarcados dentro de las zonas de crecimiento de las plantas y las zonas de tráfico. Cada campo es mantenido separado y tratado en forma diferenciada, ya que cada uno mejora en razón de su uso específico: el cultivo en un suelo bien estructurado y todo el tráfico sobre vías bien compactadas.
Los resultados han demostrado que:

- la labranza convencional fue considerablemente ineficaz para la eliminación de los viejos entresurcos del campo de caña de azúcar
- la labranza convencional requirió el doble de combustible y una tercera parte más de horas de tractor que el procedimiento de la labranza estratégica
- el rendimiento de caña y el contenido de azúcar de la planta de caña de azúcar no fueron reducidos por los métodos de labranza estratégica de remoción de las cepas. En realidad en una de las parcelas experimentales el tratamiento de la labranza estratégica mejoró el rendimiento.

LÁMINA 14
Un ejemplo de labranza estratégica en caña de azúcar, en Bundaberg, Australia. Después de 7 u 8 cosechas, la cepa vieja de la caña de azúcar es removida desbrozando los tocones y los renuevos de los camellones de los surcos usando un motocultor para desmenuzar la cepa vieja. Este procedimiento es seguido por tres cinceles subsoladores en "V" que profundizan solo en el camellón. En esta forma los entresurcos densos se mantienen intactos y el camellón es preparado para plantar de nuevo caña de azúcar.
D. McGarry

La labranza estratégica tiene buen potencial para reducir los altos costos del establecimiento de los cultivos establecidos sin afectar negativamente la producción. El cultivo de solo el área del surco da como resultado una mejoría física y un costo más eficiente con la ventaja adicional que la alta densidad del entresurco se mantiene, lo que es una característica atractiva para la cosecha en suelo mojado.

Soluciones químicas para el crecimiento limitado de las raíces

El crecimiento de las raíces a veces es limitado por condiciones químicas del suelo desfavorables como son las deficiencias nutricionales severas, la toxicidad de manganeso y aluminio y la salinidad. El nutriente que mas comúnmente limita el desarrollo de las raíces es el fósforo y la aplicación de fertilizantes fosfatados para suplir su deficiencia en los suelos, frecuentemente estimula un enraizamiento más profundo que permite al cultivo acceder a más humedad del suelo y por lo tanto incrementar la productividad.

LÁMINA 11
Aplicación superficial de cal para ajustar la acidez del suelo.
A. Calegari

La aplicación de cal sin o con yeso reducirá las concentraciones de aluminio y/o manganeso hasta niveles no tóxicos y, por lo tanto, se estimulará un enraizamiento más profundo. La mayor solubilidad del yeso, en comparación con la cal, hace que sea más conveniente para suelos con problemas de toxicidad de aluminio o manganeso en el subsuelo, mientras que la cal poco soluble es más efectiva en la capa superficial del suelo. Cuando altas concentraciones de sal inhiben el desarrollo de las raíces en suelos regados, debe ser aplicada abundante agua suficiente para lavar las sales fuera de la zona radical del cultivo.

Bibliografía

Brammer, H. 2000. Ploughpans and tillage problems. *In: Agroecological aspects of agricultural research in Bangladesh.* p.151-158. Dhaka: UPL.

Douglas, M.G. S.K. Mughogho, A.R. Saka, T.F. Shaxson, y G. Evers. 1999. *Report on an investigation into the presence of a cultivation hoe pan under smallholder farming conditions in Malawi*. Investment centre division FAO/World Bank cooperative programme. Washington, D.C. World Bank.

Fray, P. 1991. On fertile ground? The sustainable agriculture debate. *Habitat Australia* **19**:4-8.

Lal, R. **1994.** Minimum tillage systems. *In: Subsoil management techniques, Advances in Soil Science*, p.1-33. Eds. N.S. Jayawardane and B.A. Stewart. Londres: Lewis Publishers.

Soane, B.D. and C. y Ouwerkerk. 1994. Soil compaction problems in world agriculture. *In*: *Soil compaction in crop production*, p. 1-21. Eds. B.D. Soane y C. van Ouwerkerk. Países Bajos. Elsevier Science.