

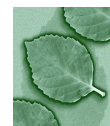
Facultad de Agronomía y Ciencias Agroalimentarias

INGENIERÍA AGRONÓMICA

Cátedra de Manejo y Conservación de Suelos

**Guía para la realización de los
TRABAJOS PRÁCTICOS**

AÑO 2009



TRABAJO PRÁCTICO N°1

Parámetros físicos de los suelos que deben ser considerados en su manejo y conservación

Estructura

Los suelos, además de brindar soporte físico a sus raíces, constituyen la reserva de nutrientes, agua y oxígeno para las plantas.

Las partículas minerales primarias del suelo (arena, limo, arcillas), juntamente con la materia orgánica, se hallan agrupadas formando unidades secundarias de mayor tamaño denominadas agregados.

La agregación es una propiedad importante, desde el punto de vista agrícola, ya que es quien confiere al suelo la coherencia que permite el anclaje de las raíces de las plantas, y determina la formación de poros que alojarán proporciones variables de agua y aire. Podría decirse que la estructura del suelo es quien define sus propiedades físicas, y por lo tanto su funcionamiento.

Los agregados son la base de la estructura del suelo, definiéndose como tal al arreglo de las partículas primarias y secundarias en modelos o patrones estructurales observables a campo (**macroestructura**), o bien mediante instrumentos de aumento, tales como lupas o microscopios, que permiten ver en detalle una organización a escala microscópica (**microestructura**).

En el estudio estructural de los suelos no sólo interesan características tales como tamaño, forma o distribución en el espacio de los agregados, sino también la estabilidad de los mismos.

El espacio poroso del suelo puede estar ocupado por agua y sustancias disueltas en ella, y por aire. Es en él donde se cumple gran parte de los procesos físicos, químicos y biológicos del suelo.

Un suelo bien estructurado posee poros no sólo entre sus agregados, sino también dentro de ellos, y su evaluación permite conocer el funcionamiento del suelo.

La distribución del tamaño de poros del suelo y su continuidad impacta directamente sobre la entrada y difusión de gases (aireación) y de calor, como así también sobre el balance del agua (entradas y salidas del sistema). En función de esto afecta el desarrollo y crecimiento de las raíces de los vegetales, condición indispensable para la nutrición y el sostenimiento de un cultivo.

Las características de la estructura y del sistema poroso del suelo dependen en gran medida de la textura. Los suelos de textura gruesa, en general, tienen valores de porosidad total menores que aquellos de textura fina, sin embargo, tanto el intercambio gaseoso como su drenaje interno, generalmente es mejor en los primeros, debido a una mayor continuidad de sus poros. Los suelos de textura fina, con alta porosidad total pero con poros pequeños, pueden presentar buenas condiciones de aireación, infiltración y conducción hídrica únicamente si poseen una buena estructura.

Una estructura débil puede resultar en la compactación del suelo, con efectos adversos por aumentar el impedimento mecánico al crecimiento de las raíces o por alterar la extensión, configuración y continuidad del espacio poroso.

Métodos de Evaluación

La composición mineralógica básica y la distribución del tamaño de partículas, así como el modo en que las partículas se unen para formar agregados, son factores que pueden cuantificarse fácilmente con procedimientos analíticos estandarizados. Sin embargo, esto no es suficiente para suministrar una descripción del sistema, dada la fuerte interacción de estos factores con el clima, la actividad biológica del suelo y las prácticas agrícolas.

La dificultad principal para la evaluación de la estructura del suelo es su naturaleza altamente dinámica. Esta resulta fácilmente modificada por las labores culturales, la naturaleza de los cultivos, condiciones climáticas, etc. Un evento aislado, tal como una lluvia o el laboreo, puede modificarla drásticamente en muy corto tiempo. En consecuencia, la estructura del suelo debe referirse necesariamente a un determinado marco de tiempo o a una situación estática.

Entre los parámetros que permiten evaluar esta característica del suelo, se encuentra la densidad aparente, la distribución del tamaño de agregados, la porosidad, la permeabilidad al aire y al agua, o la infiltración / percolación.

Entre los métodos que evalúan la estabilidad de la estructura pueden considerarse: estabilidad estructural por tamizado en húmedo, mezcla alcohol-agua y precolación Henin; test de compactación (como el test de Próctor); medida de los límites de consistencia (límites de Atterberg) o resistencia a la penetración.

También se pueden mencionar metodologías que evalúan parámetros de flujo de agua y aire en el suelo. Entre ellas se hallan las que miden conductividad hidráulica en suelos saturados o insaturados (permeámetro, infiltración con doble anillo, simulador de lluvia).

Cualquiera sea el método de evaluación de la estructura seleccionado, se debe prestar especial atención a la toma de muestra, dado que la agregación, como muchas otras características del suelo, varía en función del espacio y del tiempo. Como consecuencia de la heterogeneidad pueden presentarse diferencias significativas entre muestras tomadas del mismo suelo a corta distancia. La variación en el tiempo se refiere a diferencias que se presentan, en muestras obtenidas en un mismo lugar pero en distintos momentos del año (la estabilidad de los agregados aumenta o disminuye por diferencias climáticas y por la actividad biótica del suelo,

Densidad del Suelo

En términos generales se puede definir como la masa de una sustancia contenida en la unidad de volumen a una temperatura dada. La evaluación de la densidad del suelo puede abordar la densidad real o de partícula, que corresponde a la densidad de la fase sólida del suelo, o bien la densidad aparente, que incluye además del volumen de partículas, el volumen del espacio poroso del suelo.

En general para la mayoría de los suelos agrícolas, se pueden considerar valores de densidad de partícula de alrededor de $2,65 \text{ g/cm}^3$. Este es un parámetro que no presenta gran variación entre diferentes suelos, a menos que ellos contengan caliza (carbonato de calcio) o tengan diferencias notables en su composición mineralógica. Dado que prácticamente no existe variación para un mismo tipo de suelo, este parámetro no es evaluado con frecuencia, sin embargo la densidad de partículas es un dato útil para calcular la porosidad total del suelo.

La densidad aparente se refiere a la relación entre el peso seco de una muestra de suelo y el volumen que ocupó dicha muestra a campo, con su ordenamiento natural. Por lo tanto ésta variará en función de la textura, el estado de agregación, el contenido de materia orgánica, el contenido de humedad (sobre todo en suelos con materiales expandibles) o el manejo que recibió el suelo. El muestreo puede efectuarse con anillos, de relación diámetro/altura mayor a 1.

A diferencia de la densidad de partículas, este parámetro es de uso habitual, dada sus múltiples aplicaciones.

Existen numerosos métodos para determinar la densidad aparente. Los más comunes y que requieren extracción de muestra son:

- 1-Método del cilindro
- 2-Método de impermeabilización o del agregado
- 3-Método de excavación

Aplicaciones

Este parámetro permite referir los datos de los análisis de laboratorio a un volumen de suelo en condiciones de campo (ejemplo: cálculo de la cantidad de materia orgánica o de un nutriente por hectárea, de la lámina de agua hasta una profundidad dada o de la porosidad total).

*Cálculo de la masa de la capa arable por hectárea

$$Mca \text{ (Mg)} = \delta a \cdot e \cdot s$$

e: espesor o profundidad considerado en metros

s: superficie de una hectárea en metros

δa : densidad aparente en Mg/m^3

*Cálculo de la porosidad total o espacio poroso

$$Pt\% = 100 \cdot (1 - \delta a / \delta r)$$

Pt: porosidad total

δr : densidad de partículas o densidad real

*Cálculo de la lámina de agua en el suelo

La densidad aparente se utiliza para transformar los porcentajes de humedad gravimétrica del suelo en términos de humedad volumétrica, para el cálculo de lámina de agua.

$$H^{\circ}g (\%) = \frac{\text{masa de suelo húmedo} - \text{masa de suelo seco a } 105^{\circ}\text{C.}}{\text{Masa de suelo seco}} \cdot 100$$

H^og: humedad gravimétrica

$$H^{\circ}v (\%) = \frac{H^{\circ}g \cdot \delta a}{\delta \text{agua}}$$

H^ov: humedad volumétrica

δagua: densidad del agua

$$La = \frac{H^{\circ}v \cdot e (\text{cm o mm})}{100}$$

La: lámina de agua

e: espesor o profundidad de suelo considerado

*Cálculo del espacio aéreo o porosidad de aireación.

Es la porosidad que no retiene agua a capacidad de campo, y por lo tanto da una idea de la proporción de poros de mayor tamaño. A veces se la denomina porosidad efectiva. Se puede estimar restando a la porosidad total la humedad de capacidad de campo expresada como humedad volumétrica.

$$Pa = Pt - H^{\circ}v$$

Pa: porosidad de aireación

*Evaluación del grado de degradación física de suelos sometidos a distintos usos y manejos (un aumento de densidad aparente implica una degradación de la estructura).

*Identificación de capas densificadas antropogénicas (piso de arado) o naturales (fragipanes, duripanes).

Espacio poroso y aireación

En general se considera que un suelo que contenga entre el 10 y el 15% de su espacio poroso ocupado por aire, está bien aireado. Sin embargo debe tenerse presente que el de aireación es un concepto dinámico y que si bien la aireación es definida por las características del sistema poroso, para evaluar el volumen de poros ocupados con aire deberá considerarse un determinado contenido de humedad (generalmente a capacidad de campo), ya que la porosidad con aire variará con el contenido de humedad del suelo.

Un parámetro más ajustado para evaluar las condiciones de aireación de un suelo es la tasa de difusión de oxígeno del suelo. El oxígeno necesario para la respiración de las células radicales y los

organismos del suelo difunde desde la atmósfera a través del espacio poroso, que es ocupado por agua y aire. El oxígeno tiene baja solubilidad en agua (0,039 g L⁻¹ a temperatura y presión normales) y su difusividad es 10.000 veces inferior en agua que en aire. En consecuencia, el suministro de oxígeno a las raíces depende de la existencia de un sistema continuo de poros ocupados por aire. Por consiguiente, el contenido de humedad, la distribución del tamaño de poros y la posición topográfica son propiedades de los suelos que afectan directamente la aireación de las raíces.

La medición de la tasa de difusión de oxígeno, con electrodos de platino insertados en el suelo, es un buen indicador del estado de aireación de un suelo. Los umbrales críticos de este parámetro, por debajo de los cuales la actividad de las raíces es afectada, varían entre 0,2 y 0,3 $\mu\text{g O}_2 \text{ cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$.

Agua del suelo

La disponibilidad de agua es uno de los principales factores que gobiernan el desarrollo de los cultivos. A su vez, el contenido de humedad afecta otras propiedades físicas del suelo, como la tasa de difusión de oxígeno, la temperatura o la resistencia mecánica.

El proceso mediante el cual el agua, proveniente de la lluvia o riego, ingresa al suelo se denomina **infiltración** y requiere que los canales de conducción, poros y grietas, se mantengan abiertos, o sea que la estructura superficial debe ser estable frente al efecto dispersivo del agua. Cuando la tasa de infiltración es menor que la velocidad de aporte de agua el exceso se eliminará por **escurrimiento superficial**, siempre que exista una pendiente, en caso contrario se acumulará en la superficie.

Una vez que el agua ingresa al suelo, su distribución dependerá de propiedades intrínsecas, tales como textura, estructura y su estabilidad, porosidad, contenido de materia orgánica, salinidad, presencia de capas u horizontes densificados. El exceso de agua no retenida por el suelo será eliminado por **drenaje** fuera de la profundidad de absorción radical, mientras que el agua retenida o **almacenada**, se irá consumiendo por **evapotranspiración**, fenómeno que involucra los procesos de evaporación superficial del suelo y transpiración a través de las plantas

Es necesario aclarar que el agua edáfica posee propiedades que la diferencian del agua libre, dado que ésta no es agua pura sino una solución más o menos salina, y por su interacción con la matriz del suelo pierde energía. Esto determina que se reduzca su movimiento. La fuerte atracción que ejerce el suelo sobre las moléculas de agua hace que cuando ésta entra en contacto con partículas de suelo seco, sea succionada (adhesión) y se distribuya sobre ellas como una película de poco espesor (**agua higroscópica**). Al alejarse del campo de atracción de las partículas, comienzan a predominar otras fuerzas, como los enlaces o puentes de hidrógeno entre moléculas de agua (cohesión). Esta película, tiene un nivel de energía mayor y por lo tanto mayor capacidad para moverse. Por otra parte, en los microporos del suelo, se establecen fuerzas de capilaridad (formación de meniscos). Bajo estas condiciones el agua puede desplazarse en contra del potencial gravitatorio (**agua capilar**), constituyendo una de las principales fuentes de suministro de agua para las plantas.

En resumen, el agua almacenada por el suelo se halla alojada en los poros y adsorbida en las partículas de suelo.

Un suelo saturado es aquel donde todos sus poros se hallan ocupados por agua y las raíces de las plantas pueden absorberla sin dificultad. El agua, luego, se irá perdiendo por atracción gravitacional. A medida que se produce el drenaje del agua libre, aumenta la fuerza con que el agua que queda almacenada es retenida por el suelo (fuerzas capilares y de adsorción). El vegetal deberá vencer dichas fuerzas o potenciales para poder tomarla.

La fuerza con que el agua es retenida en el suelo (potencial del agua) se puede definir matemáticamente de la siguiente manera:

$$\Psi_T = \Psi_M + \Psi_O + \Psi_G + \Psi_P$$

Ψ_T = Potencial total

Ψ_M = Potencial mátrico

Ψ_O = Potencial osmótico

Ψ_G = Potencial de gravedad

Ψ_P = Potencial de presión

Si se compara el potencial del agua vinculada a la matriz del suelo con el del agua pura (de referencia), resulta menor, por lo que se considera de signo negativo.

Potencial mátrico: es la suma de las fuerzas de retención capilar y las que retienen al agua que rodea las partículas, o sea que está asociado con la atracción del agua por las superficies sólidas y con la atracción mutua de las moléculas de agua. En la medida que disminuye la cantidad de agua de un suelo, la misma queda retenida en poros de diámetro cada vez menor y al mismo tiempo el espesor de las láminas de agua que rodean las partículas también disminuye. En función de ello la intensidad de las fuerzas que la retienen, y en consecuencia el potencial mátrico del suelo, aumenta.

Este potencial puede ser medido a campo con tensiómetros y en el laboratorio con equipos de placa y membrana de presión.

Potencial osmótico: es generado por las sales solubilizadas en la solución del suelo. Este potencial es muy pequeño y no representa un gran problema para el vegetal en suelos donde no hay exceso de sales, pero se torna problemático en aquellos suelos salinos, donde su valor es significativo y se suma al potencial mátrico

Potencial gravitatorio o de gravedad: representa a las fuerza de gravedad con que el agua es atraída.

Potencial de presión: representa la presión que ejerce el aire o bien el líquido en un suelo saturado. Resulta de importancia cuando se estudia el movimiento de agua a flujo saturado.

Como se expresó anteriormente, no es sólo la cantidad total de poros lo que define el comportamiento hídrico del suelo, sino también la forma, tamaño y distribución de los mismos.

Desde el punto de vista agronómico, el tamaño de poros incide sobre la cantidad de agua que puede retener el suelo, ya que define la energía con que la misma es retenida por la matriz del suelo. El movimiento del agua dentro del suelo y hacia la planta o la atmósfera es regulado por diferencias en su estado de energía.

Para un determinado momento y en función de la energía con que es retenida el agua por el suelo, puede definirse:

a) Humedad de Saturación: es el contenido de agua de un suelo en el que todos sus poros están llenos de agua. Esta situación puede observarse inmediatamente después de una lluvia o riego abundante y se considera que el potencial mátrico, con que el agua es retenida por el suelo, es nulo.

b) Capacidad de Campo (CC): también conocido como límite máximo, es el contenido de agua presente en un suelo luego de drenar libremente durante los 1 o 3 días posteriores a una lluvia o riego intenso. Se estima que corresponde al agua retenida a un potencial mátrico que puede variar entre 0.1 bar para suelos arenosos hasta 0.5 bares para suelos arcillosos. Se puede tomar como valor medio 0.3 bar.

La estimación de la CC en condiciones naturales puede lograrse provocando la saturación del suelo y cubriéndolo con plástico para evitar la evaporación. Se espera entre 24 y 72 horas (más tiempo en suelos arcillosos) y se toma una muestra para determinar su contenido de humedad.

Es posible estimarla en laboratorio, sobre muestras sin disturbar, utilizando la placa u olla de Richard. También puede estimarse a través de la determinación de la **humedad equivalente**, utilizando una muestra de suelo disturbada. En esta determinación hay influencias significativas de la granulometría, los suelos de textura arenosa pierden más agua que los de textura fina.

c) Punto de Marchitez Permanente (PMP): También conocido como límite mínimo, es el contenido de agua de un suelo retenida tan firmemente que las plantas no pueden extraerla, causándoles una marchitez irreversible. En este estado se admite, en general, que el agua está retenida con potenciales mayores a 15 bares.

El PMP depende también de características propias del suelo como su granulometría, su compactación, el contenido de materia orgánica o la profundidad del perfil, entre otros factores. Para estimar la cantidad de agua que un suelo posee en el PMP pueden emplearse membranas de presión u otras metodologías más complejas (biológicas). En general se puede asumir que el valor de PMP de un suelo es aproximadamente el 50 % de la CC del mismo.

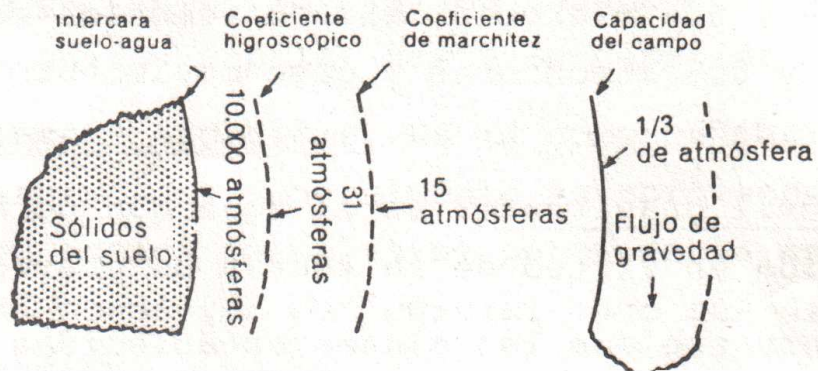
En la utilización de esta información debe tenerse en cuenta que no todas las especies vegetales tiene la misma capacidad para extraer agua del suelo, incluso esta capacidad puede variar según el estado fenológico de la planta.

d) Agua Útil Total (AUT): Es la diferencia entre los contenidos de agua a CC y PMP. Es la que se considera como agua utilizable o potencialmente extractable por las plantas en la zona de crecimiento radical, o sea que de toda el agua presente en el suelo, sólo esta fracción puede ser utilizada por las plantas. El conocimiento de esta información es de gran importancia ya que a partir de ella podremos predecir cuál será el máximo rendimiento al que podremos aspirar con un dado cultivo en un determinado lote.

e) Agua Útil disponible (AU): resulta de la diferencia entre el contenido de agua (humedad gravimétrica o volumétrica) de un suelo en un determinado momento y el punto de marchitez permanente (**PMP**) de dicho suelo.

El valor del agua disponible puede expresarse en términos de lámina o también en términos relativos (%) con el agua útil total.

El siguiente gráfico muestra la relación entre el espesor de la película de agua y la tensión con que el agua es retenida en la interfaz líquido-aire



Para evaluar los parámetros mencionados se pueden construir las curvas de retención de humedad. Estas reflejan la influencia de la estructura, textura, porosidad y naturaleza coloidal, sobre el contenido y estado energético del agua del suelo. Estas se construyen representando en el eje de ordenadas la tensión o succión a la que se somete el suelo y en el de abscisas el contenido de humedad correspondiente.

En la Figura 1 se muestra la relación entre la energía de retención y el contenido del agua en el suelo para distintas texturas. También se muestran las características funcionales del agua asociada al tamaño de poros y a las partículas primarias

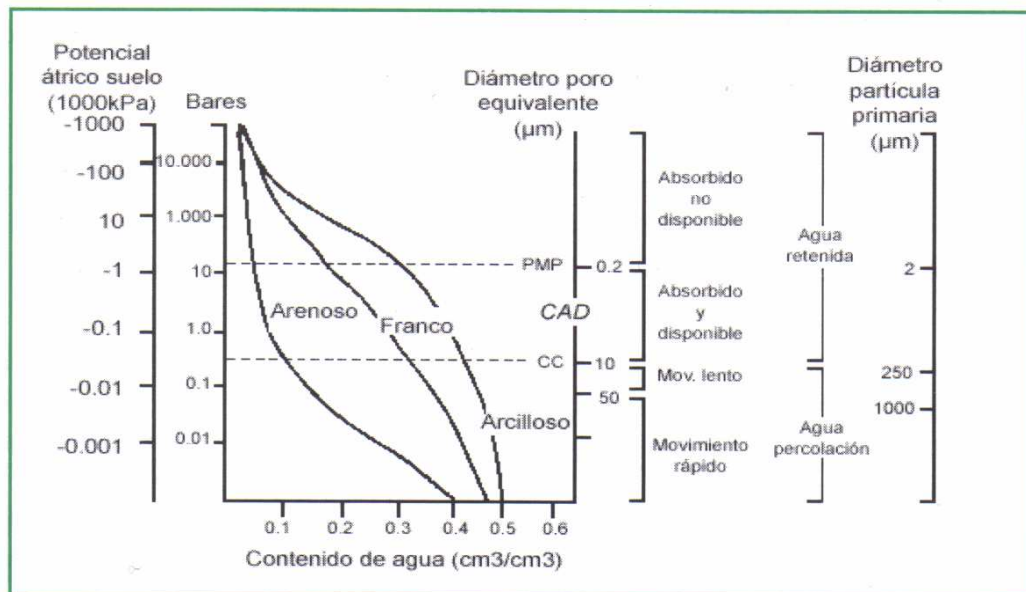


Fig.1: **PMP:** Punto de Marchitez Permanente **CC:** Capacidad de Campo
CAD: agua útil

En el siguiente cuadro se resume cómo, según su tamaño, los poros afectan el movimiento y conservación del agua en el suelo:

Características del sistema poroso en relación al tamaño de partículas primarias y poros, y al estado de energía del agua.

Diámetro de part. primarias (micrones)	Tipo	Diámetro de poros (micrones)	Tensión (atm)	Función
>1000	Macroporos	> 60	0.05	Aireación; Infiltración; Conducción agua grav.
250-1000	Mesoporos	60 – 10	0.05 -- 0.33	Conducción lenta
2-250	Microporos	10 – 0,2	0.33 – 15	Almacenamiento
<2	Microporos	< 0,2	> 15	Agua no disponible

Una buena porosidad, o sea una equilibrada distribución de poros permitirá una adecuada infiltración, un drenaje moderado y suficiente capacidad de retención hídrica, características indispensables para la nutrición y el sostenimiento de un cultivo.

Debe aclararse que los límites mencionados son afectados por un gran número de factores y, en general, la cantidad de agua disponible es menor que la que surge de la diferencia entre capacidad de campo y punto de marchitez.

El concepto de que la capacidad de campo es el contenido de agua ideal para el crecimiento vegetal no siempre es válido, ya que, como sucede en suelos de pobre estructura física, la difusión de oxígeno puede verse impedida. También se debe tener en cuenta que en los procesos de transpiración y crecimiento, la tensión hídrica de la planta, no sólo depende de la tensión hídrica del suelo y del estado de desarrollo del cultivo, sino también de la demanda atmosférica de agua. Esto significa que en días muy secos y con fuertes vientos, las plantas pueden sufrir deficiencias hídricas aunque el suelo esté en las proximidades de la capacidad de campo y, por el contrario, pueden crecer adecuadamente en suelos relativamente secos si la demanda atmosférica es baja.

Por otra parte, el límite inferior de disponibilidad de agua coincide con el punto de marchitez sólo cuando las raíces pueden crecer en contra de la alta resistencia mecánica que presentan los suelos secos. En realidad la distancia desde la cual las raíces pueden extraer agua, en suelo seco, se reduce a unos pocos milímetros, debido al marcado descenso en la conductividad hidráulica del mismo. Es por ello que la extracción de agua a bajos contenidos de humedad depende exclusivamente del desarrollo y la densidad del sistema radical.

En función de lo expresado las constantes hídricas de capacidad de campo y punto de marchitez permanente no deberían ser tomadas con demasiada rigurosidad en el diagnóstico de las relaciones suelo-agua-planta.

Métodos de Evaluación

Determinación de distintos puntos de la curva de retención de agua por el suelo

Principio

La humedad del suelo es removida de la muestra saturada, a presiones crecientes de aire, en un equipo extractor. Una placa cerámica porosa o una membrana de celulosa saturada previamente con agua, permite extraer el agua del suelo sin que el aire atraviese los poros (que se hallan llenos de agua). Cuanto menor es el diámetro de poros del suelo llenos con agua, mayor será la presión que deberá utilizarse para desalojarla. La humedad fluirá de alrededor de cada partícula del suelo y saldrá a través de la placa de cerámica. En el punto de equilibrio hay una relación exacta entre la presión de aire en el extractor y la succión del suelo (y por lo tanto la humedad contenida en las muestras).

Los equipos de placa y membrana de presión difieren en la clase de material semipermeable y en el rango de presión en el cual funcionan. Ambas están limitadas por la presión del aire que pueden soportar sin dejarlo pasar.

Técnica

- Dada la característica de la información a obtener, en los niveles bajos de presión se trabaja con muestras con su estructura natural (sin disturbar). Para determinar el Punto de Marchitez Permanente puede utilizarse la misma muestra (sin disturbar), o bien emplear muestras ya preparadas para el trabajo en laboratorio.
- Dichas muestras son saturadas previamente. Para evitar aprisionar el aire dentro de los poros del suelo o afectar su agregación natural, éste se debe embeber por capilaridad. También debe saturarse la placa porosa o la membrana que se va a utilizar en la extracción.
- Luego de pesadas las muestras saturadas se colocan sobre el plato del extractor de membrana o sobre la placa porosa de la olla de Richard.
- Se cierra la tapa del equipo ajustando los tornillos en forma gradual y homogénea.
- Se controla que el manómetro se halle en 0, se cierran las llaves de purga y se abren las de la línea de presión. Las presiones utilizadas podrán variar desde 0.1 a 15 atm., dependiendo del punto de la curva que interese.
- Se descarta el líquido drenado durante la extracción.
- Para determinar cada punto de la curva se utiliza la misma muestra, por lo que deberá descomprimirse el sistema, pesar la muestra con la humedad remanente luego de haber sido sometida a presión, colocarla nuevamente en el equipo extractor y reiniciar el proceso sometiendo el sistema a una presión mayor.
- Luego de someter a la muestra a la presión más alta (15 atm para PMP) se debe retirar, pesar y colocar en estufa a 105-110°C hasta peso constante.
- Finalmente se pesa la muestra seca.
- La diferencia de peso entre las distintas pesadas y el peso seco de la muestra permite calcular el contenido de humedad que retiene el suelo a las presiones consideradas. Estos valores se expresan en % de humedad gravimétrica.

Aplicaciones

Con esta información se puede calcular:

- Volumen de poros del suelo
- Distribución del tamaño de poros del suelo
- Capacidad de ascenso por capilaridad del agua
- Humedad del suelo en capacidad de campo y punto de marchitez, lo que permitirá obtener el agua que puede ser utilizada por los vegetales.

Para determinar el contenido de humedad a tensiones menores a 0.1 atm, se utiliza la mesa de tensión, ya que tiene mayor precisión en esos niveles.

Movimiento del agua en el suelo en relación a las características del espacio poroso

El movimiento del agua a través del perfil del suelo, es dominado por las características del mismo, y está regido por la fuerza de gravedad y fuerzas capilares. La primera, que opera en condiciones de saturación (**movimiento en flujo saturado**) sobre los poros no capilares (macroporos), determina el flujo hacia abajo del **agua gravitacional**, llamado **percolación**. Las fuerzas capilares o de succión, en cambio, regulan el transporte del agua de regiones de mayor a menor humedad. Este último movimiento del agua ocurre con parte de los poros ocupados por aire (**movimiento en flujo insaturado**) y su dirección puede ser también ascendente o lateral.

La teoría del movimiento del agua en el suelo está basada en una generalización de la Ley de Darcy, deducida para la circulación en un medio poroso, que expresa que "la velocidad de circulación de agua en un medio poroso, es directamente proporcional a la diferencia de presión hidráulica entre dos puntos y a la conductividad del suelo al agua, e inversamente proporcional a la distancia entre los dos puntos".

Este principio es aplicable tanto a flujos saturados como insaturados, aunque en suelos no saturados, la conductividad depende en gran medida del potencial mátrico existente y del tipo de suelo.

En un suelo no saturado el movimiento del agua está dado por la conductividad hidráulica y la sortividad. Como el agua sólo se trasmite a través de los poros, el flujo que circula será proporcional al diámetro de éstos, disminuyendo conforme dicho diámetro se reduce. Pero esta disminución de velocidad, más allá del efecto geométrico, es mayor para los poros pequeños, debido a que la movilidad de las moléculas de agua unidas a las partículas sólidas es muy baja por los efectos de adsorción (sortividad). A medida que el contenido de humedad baja, el potencial mátrico se hace más negativo y la conductividad tiende a disminuir con mayor rapidez.

En condiciones de saturación (o casi saturación), los suelos de textura gruesa presentan una mayor conductividad, como consecuencia del mayor tamaño de sus poros.

La cantidad total de agua que entra en un suelo, es mayor cuando el suelo se encuentra inicialmente seco que cuando está húmedo; no obstante, la velocidad de avance del agua (conductividad) a lo largo del perfil del suelo, es inferior en el caso de suelo seco.

Conductividad hidráulica e Infiltración

Las etapas iniciales del movimiento del agua hacia el interior del perfil, son dominadas por las propiedades capilares del suelo. En un suelo no saturado el movimiento del agua esta dado por la conductividad hidráulica y la sortividad.

* **Conductividad Hidráulica (K):** es una medida de la habilidad del suelo (medio poroso) de conducir agua bajo un gradiente de potencial hidráulico (longitud/tiempo).

* **Sortividad (S):** es una medida de la habilidad que tiene un suelo para absorber agua durante el proceso de humedecimiento. En general cuanto mayor es el valor de **S**, mayor será el volumen de agua que puede ser absorbida en menor tiempo. (longitud/tiempo^{1/2})

* **Infiltración (I):** se refiere a la entrada del agua al perfil del suelo a través de la superficie del mismo. La velocidad de infiltración depende de muchos factores, entre ellos el espesor de la lámina de agua que ingresa, la temperatura del agua y del suelo, la rugosidad de la superficie, la estructura y compactación del suelo, la textura, el contenido de humedad del suelo, la estratificación, agregación y actividades microbianas. Cuando el suelo está seco, la tasa de infiltración inicial es alta debido a la sortividad (alto gradiente de potencial mátrico entre el suelo y la lámina de agua aplicada), pero a medida que transcurre el tiempo la velocidad de infiltración alcanza una tasa constante o "estacionaria", llamada **Infiltración básica**, que se asemeja al valor de Conductividad Hidráulica Saturada.

Métodos de Evaluación

En nuestro país los métodos de laboratorio aplicados sobre muestras de suelo no disturbado siguen siendo muy utilizados y constituyen el patrón de referencia de otras técnicas. Uno de los principales inconvenientes está dado por el volumen relativamente pequeño de la muestra, que no resulta así representativo de los macroporos, grietas y otros detalles de la estructura que se presentan en el campo. Otro inconveniente reside en la forma en que son extraídas las muestras, mediante golpes o aplicando presión, lo que afecta la continuidad de los macroporos y subestima o sobrestima el verdadero valor de la conductividad hidráulica. Estos problemas pueden minimizarse efectuando las mediciones directamente en el sitio de estudio, para lo cual existe una gran variedad de métodos de campo.

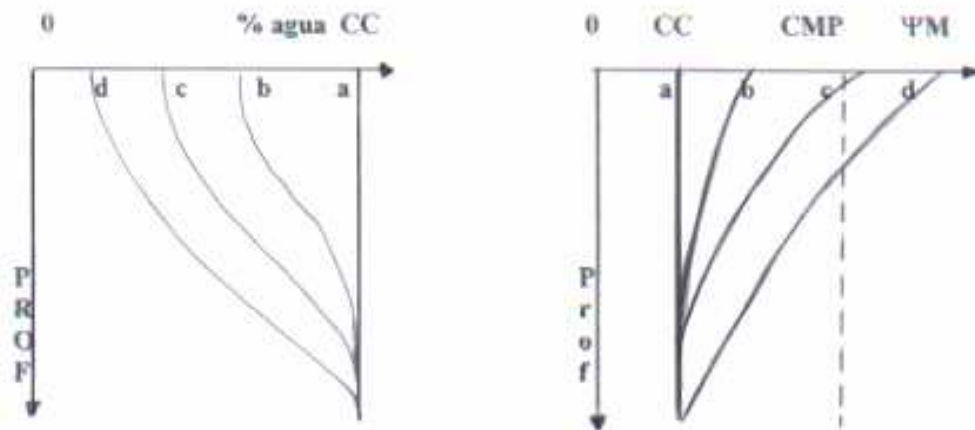
Entre los métodos utilizados para determinar infiltración a campo el más común es el del doble anillo. Este es un instrumental simple que permite determinar la tasa de infiltración como la cantidad de agua por unidad de superficie y de tiempo que penetra al suelo. Como el agua infiltrada verticalmente luego se desplaza hacia los costados, el anillo exterior del infiltrómetro actúa como separación entre el anillo interno y el suelo seco. Es decir que la medición se realiza exclusivamente en el anillo interno, a través del cual el agua penetra verticalmente. Al realizar las mediciones debe tenerse en cuenta algunos factores que pueden afectarlas como la vegetación, la existencia de capas compactadas y el contenido de humedad del suelo. Las mediciones ideales deberían realizarse a capacidad de campo.

El simulador de lluvia es otra herramienta útil que además de proveer información sobre la lámina de agua infiltrada permite evaluar el escurrimiento superficial del agua proveniente de la lluvia simulada, y por lo tanto la susceptibilidad a la erosión del suelo. Con este equipamiento también se puede obtener información de la cantidad y calidad del material del suelo que es transportado con el agua de escurrimiento superficial.

Perfil hídrico

Se denomina perfil hídrico al contenido de humedad de un perfil de suelo en un momento dado. Un suelo mojado hasta saturación, pierde agua gravitatoria hasta llegar a capacidad de campo, pero paralelamente pierde agua por evaporación, por lo que la desecación del suelo en superficie es mucho más veloz que en profundidad, esta situación puede revertirse con el manejo, ya que la presencia de vegetación sombrea el suelo y su sistema radicular lo deseca (esto también presentará diferentes matices debidos al tipo de vegetación, por ejemplo herbácea o arbórea). De igual forma la presencia de rastrojo en superficie modifica el ambiente (temperatura, humedad, aireación) produciendo cambios en los procesos mencionados.

Si se graficara el contenido de agua en distintos momentos (a, b, c, d), en función de la profundidad, luego de una lluvia, al cesar el aporte se obtendrían curvas como las siguientes:



En ambos gráficos, para su simplificación, se han considerado características texturales uniformes, sin embargo para definir el perfil hídrico de un suelo la evaluación del contenido de humedad deberá tener en cuenta las diferencias existentes entre horizontes o capas compactadas, y la profundidad efectiva de raíces, en función del tipo de cultivo y su estado de desarrollo.

Evaluación del contenido de agua del suelo

1-Método gravimétrico: Es el método más simple y consiste en tomar muestras de suelo con el contenido de humedad del momento. Estas muestras se conservan en recipientes que no permitan la pérdida de la humedad que contienen, se pesan húmedas y luego de ser secadas hasta peso constante a 105-110 °C. El contenido de humedad se calcula de la siguiente manera:

$$\frac{Mh - Ms}{Ms} \cdot 100 = \%Hg$$

Mh: masa muestra húmeda

Ms: masa muestra seca

Hg (%): porcentaje de humedad gravimétrica, en base a masa de suelo seco.

Resulta mucho más práctico manejarse con la expresión volumétrica de la humedad del suelo, ya que ésta nos permite calcular el agua contenida en el suelo en forma de lámina.

$$Hv (\%) = Hg (\%) \cdot \delta a / \delta \text{agua}$$

Hv (%): humedad volumétrica

δa : densidad aparente del suelo

δagua : densidad del agua

$$L = \frac{\%Hv \times e}{100} = \frac{\%Hg \cdot \delta a \cdot P}{100}$$

L: lámina de agua

e: espesor de la capa o profundidad considerada

La humedad del suelo se puede medir en forma indirecta con instrumental especializado (sonda de neutrones, tensiómetro, termo-cupla, etc.), sin embargo por la sencillez, practicidad y costo reducido el método gravimétrico aún resulta el más conveniente.

Recomendaciones para el muestreo.

Las muestras deben ser representativas del potrero o lote a muestrear. Se puede trabajar con muestras simples o compuestas. El tipo y número de muestras dependerá de los objetivos y precisión buscados. Toda diferencia dentro de un lote (lomas, bajos, zonas encharcadas, cambios bruscos en la vegetación o el suelo, distinto manejo, diferencias en la distribución de los rastrojos, etc.), debe muestrearse por separado. El crecimiento desparejo de las plantas y una distribución no uniforme de las raíces producen variaciones en el contenido y distribución del agua en el suelo.

La profundidad del suelo sólo se considerará limitada por impedimentos físicos. Por lo tanto, la toma de muestras debe siempre representar a toda la profundidad del perfil que las raíces son capaces de explorar libremente.

La extracción de las muestras se realizará recorriendo el área en zig-zag.

Balance de agua en el suelo

Considerando al perfil del suelo como un reservorio de agua, se puede calcular un balance, considerando el agua que ingresa y la que es perdida desde el suelo:

$$(P+R)-(ET+ES+D)= +/-A$$

P y R: ingresos por precipitación y riego artificial

ET, ES y D: pérdidas por evapotranspiración, escurrimiento superficial y drenaje en profundidad, fuera del alcance del sistema radicular (considerado normalmente a 1-1.2 m de profundidad, dependiendo del cultivo y su estado de desarrollo).

A: Variación del contenido de agua del suelo (inicial-final), en función de la magnitud de los ingresos y las salidas para un período y una profundidad de suelo dada. Su signo es variable en función de la magnitud de los parámetros considerados.

Deduciendo las pérdidas de agua por escurrimiento superficial, se puede calcular el agua que efectivamente ingresa al sistema (infiltración). Todas las vías posibles de pérdida (evaporación desde la superficie del suelo, transpiración por malezas, drenaje en profundidad) deberán ser evaluadas a la hora de manejar eficientemente el recurso agua, buscando maximizar la absorción por el cultivo y la preservación del recurso suelo.

Como se ha expresado, para evaluar las condiciones hídricas de un suelo será necesario conocer **la cantidad de agua, su energía y su movimiento**, y relacionar estos parámetros con otras características hidrológicas del suelo como la relación infiltración/escurrimiento y drenaje.

Resistencia a la penetración

Las raíces crecen a impulso de la presión de turgencia en las células meristemáticas. Para que haya crecimiento, esta presión debe superar dos resistencias: la ofrecida por la rigidez de sus propias paredes celulares, y la impuesta por los sólidos del suelo. Existen investigaciones que indican que la máxima presión que las raíces pueden ejercer es entre 0,7 y 1,3 MPa en la dirección axial, y entre 0,4 y 0,6 MPa en la dirección radial. Por consiguiente, si la resistencia del medio supera dichos límites, sería de esperar que no hubiera crecimiento. Sin embargo, el proceso es en la realidad mucho más complejo debido a la naturaleza porosa y a la heterogeneidad de los suelos. Las raíces penetran poros de diámetro mayor que su ancho, pero también pueden ensanchar poros algo menores por compactación radial, deformando la estructura del medio, además de aprovechar para su crecimiento la presencia de rajaduras.

La **Resistencia a la penetración (RP)** de un suelo depende principalmente de la textura, la densidad aparente y el contenido de humedad. La distribución del tamaño de partículas y el contenido de materia orgánica del suelo, entre otros factores, definen la agregación del mismo y por lo tanto su RP. Debido a su muy alta cohesividad, los suelos arcillosos desarrollan niveles de RP sumamente altos cuando se hallan secos, pero este efecto se atenúa con el incremento de humedad del mismo.

El término **compactación** del suelo se refiere a un aumento en su densidad, o disminución del volumen, debido a fuerzas externas. Esta generalmente es provocada por la combinación del deterioro gradual en los niveles de materia orgánica y de la actividad biológica de los suelos, lo que se traduce en un deterioro de su estructura

Este proceso de degradación estructural de suelos agrícolas puede generarse en el tráfico de maquinarias agrícolas, en el pisoteo de animales o bien ser causado por el laboreo de suelos susceptibles.

En los sistemas tradicionales de producción basados en el laboreo, los problemas de compactación son en cierta forma disimulados, al menos durante breves períodos de tiempo, porque la remoción del suelo favorece la infiltración de agua, la aireación y el desarrollo de raíces. Sin embargo, la mejora en la estructura lograda a través del laboreo es en general transitoria, particularmente en suelos degradados, con bajo contenido de materia orgánica y pobre estabilidad de agregados. La reiteración de las labores en el tiempo conduce a un proceso de degradación de la estructura que se profundiza en el mediano y largo plazo.

En sistemas donde el suelo se deja sin trabajar, como en el caso de la siembra directa, la consolidación natural tiende a incrementar la densidad del suelo.

Los efectos directos de la compactación del suelo son incrementos de la densidad aparente y el descenso de la porosidad total del suelo, con todo lo que ello implica.

La compactación superficial del suelo originada en labranzas o en la destrucción de agregados superficiales por efecto de las gotas de lluvia, conduce a la formación de costras de alta resistencia mecánica que pueden significar un impedimento para la infiltración del agua de lluvia o aún para la emergencia de las plántulas. Este problema se agrava debido a que con su presencia se incrementa el riesgo de erosión. Para el estudio de estos procesos comúnmente se utilizan penetrómetros, que permiten evaluar su resistencia, midiendo la fuerza necesaria para introducir una punta cónica en el suelo.

Si bien la resistencia a la penetración de un cono es una determinación empírica, igualmente integra muchos, aunque no todos, de los factores que regulan la resistencia mecánica del suelo.

A pesar de los inconvenientes relacionados con su rigidez y su diferente forma, tamaño y velocidad de movimiento con respecto a las raíces, los penetrómetros de cono han demostrado ser una valiosa herramienta experimental, que permite obtener satisfactorias estimaciones empíricas de la resistencia mecánica del suelo al crecimiento de raíces, particularmente si se combina con información acerca de la porosidad total y la distribución del tamaño de los poros.

A diferencia de las raíces, los penetrómetros no son capaces de adaptar su forma en función de los obstáculos que el suelo presenta para su movimiento, ni son capaces de reducir su fricción con las partículas del suelo a través de la secreción de lubricantes. Debido a ello, los valores de RP medidos con un penetrómetro son generalmente mayores a los que sufre una raíz creciendo en el mismo suelo.

La humedad del suelo afecta a los tres factores del suelo que determinan la RP: cohesividad, ángulo de fricción interna y compresibilidad. La fricción entre cono y suelo también es afectada por la cantidad de agua en el suelo. Como resultado de ello, los valores mínimos de RP ocurren cuando el suelo tiene los máximos contenidos de humedad. A medida que el suelo se seca, la RP aumenta exponencialmente. A su vez el incremento en la RP debido al secado del suelo es tanto más marcado cuanto mayor es la densidad aparente.

Temperatura del suelo

Este es otro de los parámetros físicos que deben tenerse presentes al evaluar las condiciones de un suelo para el desarrollo de un cultivo.

La superficie del suelo intercepta energía en forma de radiación solar (onda corta) y radiación atmosférica (onda larga), y emite radiación de onda larga a una tasa gobernada por la temperatura del suelo. El balance de estos procesos es la radiación neta, la cual es de signo positivo durante las horas del día, y de signo negativo durante la noche. La energía de radiación neta es almacenada en el suelo

como calor, utilizada para los procesos biológicos, disipada como calor por convección, o disipada como calor latente por la evaporación de agua desde el suelo. Cuando el contenido de humedad del suelo es elevado, la evaporación es el proceso que consume la mayor cantidad de energía, mientras que en condiciones secas, la mayor parte de la energía de radiación neta es utilizada para calentar el suelo y el aire adyacente, y es posteriormente perdida como radiación nocturna hacia la atmósfera. Como consecuencia, la temperatura del suelo es inferior y menos variable en suelo húmedo que en suelo seco.

La proporción de la radiación neta que es utilizada para almacenaje de calor en el suelo depende de la estructura del suelo y de su contenido de humedad. Debido al elevado calor específico del agua, los suelos húmedos son capaces de almacenar grandes cantidades de energía con incrementos relativamente bajos en la temperatura. En estos casos, considerando que el flujo de calor dentro del suelo es impulsado por gradientes de temperatura, el movimiento de calor hacia capas profundas del suelo es limitado.

El efecto de la estructura del suelo sobre su temperatura es evidente, principalmente en suelos relativamente secos. Los minerales del suelo tienen un calor específico inferior al del agua y, por consiguiente, en suelos secos se generan gradientes de temperatura con relativa facilidad, lo que determina que la difusividad térmica sea elevada.

El manejo, con su efecto sobre la cobertura superficial, cambio de microrelieve y color del suelo superficial, y sus influencias sobre el régimen de humedad, es el principal factor que altera el régimen de temperatura del suelo

Influencia del Sistema de Labranza

La adopción de distintos sistemas de manejo influye en el funcionamiento de los suelos, y por ende en su productividad.

La adopción de sistemas sin laboreo del suelo tiene ventajas como la cobertura del suelo y la protección que ésta brinda frente a la acción de agentes erosivos, o el sostenimiento de los niveles de carbono orgánico del suelo por la menor descomposición de los rastrojos y sus efectos positivos sobre la estructura, pero también restricciones, sobre todo físicas, asociadas a procesos comunes en suelos de texturas medias a pesadas, con baja capacidad de infiltración de agua y bajo regímenes climáticos húmedos.

Los cultivos que se desarrollan en suelos no disturbados en condiciones climáticas húmedas, frecuentemente están sujetos a un deficiente contacto entre semillas y suelo, o a frecuentes excesos de humedad, o deficiencias de nutrientes. Si se inicia un sistema de siembra directa en un suelo degradado, la productividad potencial estará limitada por la pobre condición estructural del suelo, y estas condiciones se manifestarían con máxima intensidad durante la transición desde un sistema basado en el laboreo al nuevo sistema sin disturbar. Sin embargo, a lo largo de los años, la estructura del suelo puede ser reconstruida por la acción de agentes naturales y por ello es de esperar que los mencionados efectos tiendan a desaparecer debido a la acción de los procesos de acumulación de materia orgánica, crecimiento y descomposición de raíces, y actividad de la mesofauna del suelo, en el largo plazo. En este caso, aunque el suelo presentara un alto nivel de consolidación, las raíces podrían crecer en un vasto sistema de biocanales y explorar suficientemente el suelo, lo que le permitiría soportar cultivos tan productivos como aquellos que se desarrollan en suelos sin problemas estructurales.

El proceso de reconstrucción de la estructura del suelo puede demandar prolongados períodos de tiempo, especialmente si se parte de situaciones extremas. En estos casos, es necesario encontrar

formas de acelerar dichos procesos de largo plazo, a efectos de asegurar la viabilidad de un sistema de siembra directa. Una de estas formas sería el aflojamiento mecánico del suelo preservando la cubierta de residuos y minimizando los efectos negativos sobre los agentes formadores de biocanales. Otro enfoque para este problema sería la explotación de la capacidad de ciertas especies vegetales para desarrollar sistemas de raíces extensivos en suelos compactados.

En ambientes con menor disponibilidad del recurso agua, el sistema de siembra directa permite, entre otros beneficios, realizar un uso más eficiente de dicho recurso. La no perturbación del suelo y la cobertura aportada por los rastrojos contribuyen a mejorar los niveles de infiltración, aumentar la capacidad de retención hídrica y disminuir la evaporación directa. Sin embargo, debe tenerse en cuenta la pérdida de agua a través del consumo de las malezas, por lo que su incidencia debe reducirse al mínimo posible para que las ventajas anteriores tengan sentido. De nada sirve que ingrese una mayor cantidad de agua, que se aumente la capacidad de retención y que se minimicen las pérdidas por evaporación, si esa agua será consumida por las malezas. Desde esta perspectiva, el objetivo debe ser lograr la máxima acumulación de agua en el perfil para que pueda ser consumida por los cultivos integrantes de la rotación. El manejo de malezas se convierte, entonces, en una herramienta indispensable para lograr dicho objetivo.

De todas las propiedades del suelo, la porosidad es tal vez la más fácilmente alterada por el manejo. Las principales características que se deberían considerar cuando se analiza el funcionamiento del sistema poroso son su geometría y su estabilidad. La geometría del espacio poroso incluye la distribución del tamaño de poros (DTP) y la continuidad de dichos poros. Ambas características son altamente modificables por la existencia o no de labranzas, destacándose el efecto de éstas sobre la actividad biológica.

Algunos estudios, que comparan la siembra directa con los sistemas con laboreo, muestran en las capas más superficiales del suelo, una reducción del volumen de poros de conducción (mayores a 60 micrones), con volúmenes equivalentes en el subsuelo. Por el contrario, otros trabajos manifiestan un aumento de este tamaño de poros en superficie en suelos no disturbados, coincidente con la mayor actividad biológica y la macrofauna, especialmente lombrices. Como resultado de los canales que éstas producen, los que dejan las raíces de los cultivos anteriores y las grietas naturales, el sistema de poros que se genera en un suelo no labrado en un tiempo determinado, puede compensar los efectos negativos de una posible densificación. Generalmente los bioporos de canales de lombrices, insectos del suelo y raíces son más continuos, menos tortuosos y más estables que los macroporos creados por la labranza, resultando más efectivos para el movimiento del agua y del aire y para el crecimiento de nuevas raíces.

Un análisis de la relación entre las propiedades físicas del suelo y la productividad de los cultivos, permite establecer que, aun cuando un gran número de variables (tales como densidad aparente, distribución del tamaño de poros o estabilidad de agregados) tiene influencia en el crecimiento de las raíces, éste es, en última instancia, gobernado por cuatro propiedades fundamentales: la resistencia mecánica y la disponibilidad de agua, oxígeno y energía. Las propiedades medibles asociadas con estos factores son, respectivamente, la resistencia a la penetración (RP), el potencial de agua en el suelo, la tasa de difusión de oxígeno y la temperatura. La determinación del nivel óptimo de estas variables con relación al crecimiento vegetal se dificulta por el hecho de que las mismas están estrechamente correlacionadas entre sí, lo cual se suma a la dificultad ocasionada por su variación en el tiempo y el espacio.

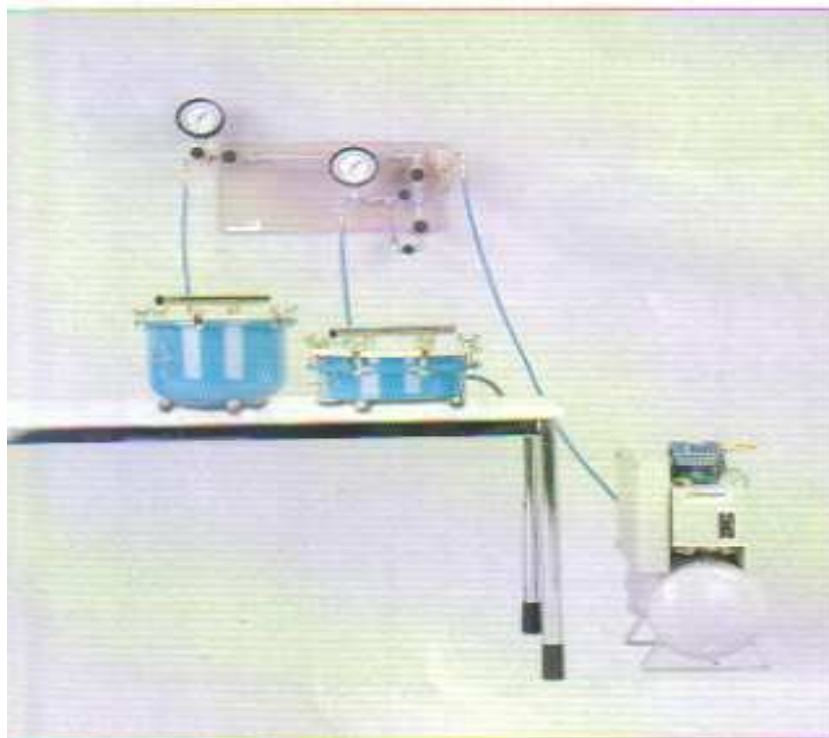
Para que un suelo tenga óptimas condiciones de funcionamiento para el desarrollo de las plantas, debería presentar una estructura estable capaz de permitirle al vegetal la expresión de su potencial de crecimiento, sobre todo del sistema de raíces, sin impedimentos para la exploración del mayor volumen de suelo posible. Parámetros físicos tales como la densidad aparente, humedad

gravimétrica, resistencia mecánica, textura, etc., considerados aisladamente, no resultan suficientes para el diagnóstico cuando se desea evaluar la funcionalidad del suelo, pero un análisis integrado de ellos, junto a otros parámetros físicos o químicos, permite explicar los procesos en el continuo suelo-planta-atmósfera.

Anexo



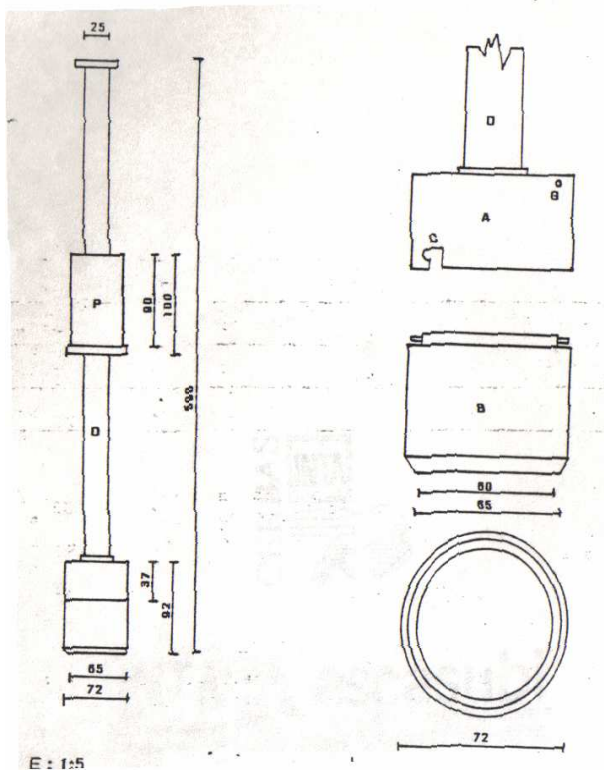
Infiltrómetro de doble anillo



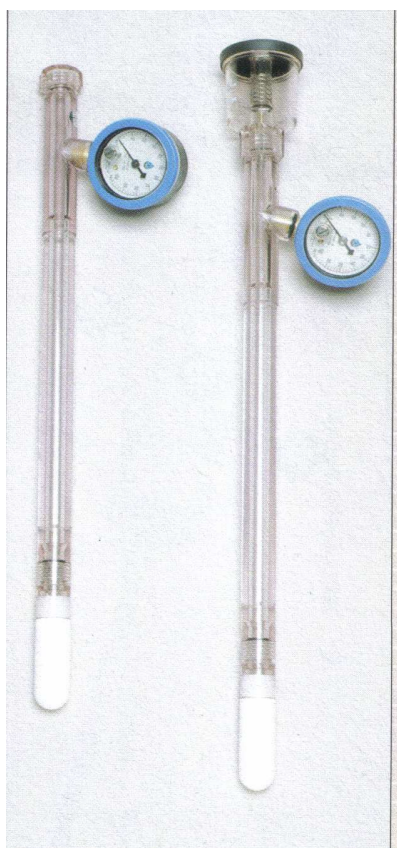
Equipo de placa y membrana



Penetrómetro electrónico



Esquema de equipo auxiliar para obtener muestras sin disturbar (cilindros)



Tensiómetros

Ing. Agr. Miriam Ostinelli



TRABAJO PRÁCTICO N° 2

Manejo de la Fertilización

Nutrientes esenciales para las plantas

Actualmente se acepta la existencia de 16 elementos indispensables para las plantas verdes. Estos cumplen los tres criterios para la condición de esencial: 1) Su ausencia impide a la planta alcanzar su ciclo vital 2) La deficiencia es específica para el elemento en cuestión; es decir no es reemplazable por otro y 3) El elemento está directamente implicado en la nutrición de la planta, por ejemplo como constituyente de un metabolito esencial requerido para la acción de un sistema enzimático.

LOS NUTRIENTES ESCENCIALES					
Carbono	C	Potasio	K	Zinc	Zn
Hidrógeno	H	Calcio	Ca	Molibdeno	Mo
Oxígeno	O	Magnesio	Mg	Boro	B
Nitrógeno	N	Hierro	Fe	Cloro	Cl
Fósforo	P	Manganeso	Mn	(Sodio)	Na
Azufre	S	Cobre	Cu	(Silicio)	Si
				(Cobalto)	Co

El sodio (Na), el silicio (Si) y el cobalto (Co) no han sido establecidos como esenciales elementos para todas las plantas superiores, por eso estos son elementos son mostrados entre paréntesis

El agua y la atmósfera proporcionan carbono, hidrógeno y oxígeno. Los trece elementos restantes la planta debe obtenerlos del suelo. A pesar de que no todos son consumidos en igual cantidad, estos nutrientes deben encontrarse en perfecto equilibrio pues la deficiencia de alguno de ellos evita un aprovechamiento eficiente de los restantes.

Macro y micronutrientes es una división habitual entre los nutrientes vegetales, según la cantidad requerida por las plantas. Las plantas necesitan los macronutrientes en cantidades relativamente elevadas, mientras que los micronutrientes son requeridos en cantidades menores. El contenido de N en los tejidos de las plantas, por ejemplo, es superior en varios miles de veces al contenido del micronutriente Zn. Sin embargo todos son esenciales para el normal desarrollo del vegetal.

Bajo esta clasificación, basada en el contenido de los elementos en el material vegetal, se consideran micronutrientes el Fe, Mn, Cu, Zn, Mo, B y Cl. El Ca, Mg y S se consideran mesonutrientes, mientras que el N, P y K son considerados macronutrientes. Las plantas además contienen elementos no esenciales algunos de los cuales pueden ser tóxicos (Aluminio, Níquel, Selenio y Flúor).

Actualmente se considera al suelo como un sistema vivo, donde tienen lugar una gran cantidad de fenómenos, debido a la presencia de numerosas y variadas especies de microorganismos. Debe

destacarse el papel que éstos desempeñan en la disponibilidad de los elementos nutritivos para las plantas.

Fertilidad del suelo

Es la capacidad que posee un suelo de proporcionar los nutrientes necesarios para un equilibrado desarrollo vegetal. Para efectivizar esta capacidad de brindar nutrientes, el suelo debe poseer adecuadas condiciones físicas, hídricas, de aireación y temperatura. Debe también estar libre de sustancias fitotóxicas y de limitaciones físico-mecánicas que afecten el desarrollo radical.

Los suelos de nuestro país son, en su mayoría, de buena fertilidad. Sin embargo, la utilización de materiales genéticos de mayor potencial de rendimiento, la incorporación de nuevas tecnologías, algunos manejos productivos inapropiados, la no reposición de los nutrientes en relación a la extracción, entre otros, son responsables de que estos suelos vayan perdiendo su alta fertilidad natural, limitando así los rendimientos.

Como la materia orgánica del suelo proviene de seres vivos, contiene prácticamente todos los nutrientes que los vegetales necesitan, pero para que puedan ser aprovechables, debe producirse su mineralización. Si esta transformación es lenta en un suelo rico pueden existir las mismas deficiencias que en un suelo pobre. Por el contrario, un suelo pobre en materia orgánica puede ser relativamente rico en nutrientes si su velocidad de descomposición es mayor. O sea que un suelo fértil no siempre es productivo, mientras que un suelo poco fértil puede serlo.

Por ello, debemos diferenciar:

- **Fertilidad actual:** Se refiere a la capacidad que posee un suelo de proporcionar nutrientes en un momento dado. Depende del contenido de nutrientes inmediatamente asimilables.
- **Fertilidad potencial:** Se refiere a la capacidad de proporcionar nutrientes a lo largo del tiempo. Depende básicamente de la materia orgánica.

Conceptos asociados a la fertilidad de un suelo son:

- **Productividad:** involucra la fertilidad del suelo y los factores extraedáficos, como lluvias, temperatura, luminosidad, malezas, prácticas culturales, etc.. Se define como la capacidad de producción por unidad de superficie cultivada.
- **Sustentabilidad:** puede definirse como la capacidad o habilidad para mantener procesos en forma continua, evitando su decaimiento. La agricultura sustentable debe mantener la producción agropecuaria en niveles necesarios para compatibilizar las necesidades de la economía sin degradar el medio ambiente.

La forma de conocer el estado de fertilidad de un suelo es a través de análisis químicos, físicos y biológicos. Para definir su estado nutricional es primordial establecer la capacidad que tiene el mismo de proporcionar los nutrientes necesarios para el desarrollo equilibrado del vegetal. Dicha capacidad depende de un gran número de factores edáficos y extraedáficos, entre los que se encuentra la dotación de ese suelo.

Dotación es la cantidad de nutrientes disponibles para el vegetal que presenta un suelo.

Cuando esa dotación es insuficiente, se hace necesario cubrir la demanda del cultivo mediante al aporte artificial de nutrientes.

La **fertilización** es una práctica que procura aportar los nutrientes necesarios para el cultivo.

Es importante destacar que la fertilización tendrá un resultado positivo sólo si el resto de los factores que afectan el desarrollo del cultivo (manejo, climáticos, económicos, etc.) son adecuados. Además debe tenerse en cuenta la relación entre los nutrientes en el suelo, ya que el desbalance entre ellos dificulta su absorción por los vegetales.

Fertilizantes

Definiciones

Se considera **fertilizante** a todo producto que, incorporado al suelo o aplicado a los vegetales o sus partes, suministra en forma directa o indirecta sustancias requeridas por aquellos para su nutrición, estimula su crecimiento, aumenta su productividad y mejora la calidad de la producción.

Estos productos podrán ser de naturaleza inorgánica, orgánica o biológica.

Los de naturaleza inorgánica u orgánica deberán contener principalmente elementos nutrientes primarios (N, P, K), y/o elementos nutrientes secundarios (Ca, Mg o S), y/o elementos menores o micronutrientes (B, Zn, Cu, Fe, Mo, Mn, etc.), susceptibles de ser aplicados en forma tal que puedan ser asimilados por los vegetales.

Los productos de naturaleza biológica deberán contener organismos viables que suministren directa o indirectamente nutrientes a la planta o ejerzan una acción beneficiosa para el desarrollo de los vegetales.

Se consideran los siguientes tipos de fertilizantes:

- a) **Simple**s: son aquellos constituidos por una sola sustancia aunque ésta posea uno o más elementos nutrientes.
- b) **Compuestos**: se considera a la mezcla de dos o más fertilizantes simples.
- c) **Biológicos simbióticos**: son aquellos que contienen organismos viables que deben asociarse en forma íntima con otros organismos vivos para ejercer su acción
- d) **Biológicos asimbióticos**: son los que contienen organismos viables que ejercen su acción sin asociarse a otro organismo vivo.
- e) **Biológicos mixtos**: contienen fertilizantes biológicos simbióticos y asimbióticos
- f) **Foliales**: productos que contengan sustancias fertilizantes solubles en agua, susceptibles de ser asimiladas por la parte aérea de los vegetales.

Se considera **enmienda** a toda sustancia o mezcla de sustancias de carácter inorgánico, orgánico o biológico que, incorporada al suelo, modifica favorablemente sus características físicas, físico-químicas, químicas o biológicas, sin tener en cuenta su valor como fertilizante. Se considera dentro de esta definición a los acondicionadores ya sea de acción física o biológica.

La composición de los fertilizantes se expresa mediante su grado. Este expresa el porcentaje en peso, como elemento, de los tres principales nutrientes: nitrógeno (N), fósforo (P), y potasio (K) en ese orden. Otra forma de expresar su composición es la utilizada comercialmente: el N es expresado como elemento, el P como pentóxido (P_2O_5) y el K como óxido (K_2O).

Tipos de fertilizantes

Fertilizantes nitrogenados. Transformaciones en el suelo y uso por los seres vivos.

El nitrógeno puede ser aplicado como urea o sales de amonio (NH_4^+) y/o nitrato (NO_3^-). Este nitrógeno sigue los mismos modelos de reacción que el nitrógeno liberado por los procesos bioquímicos a partir de residuos de plantas. Así, la urea es sometida a la amonificación (formación de NH_4^+) y nitrificación (formación de NO_3^-) previo a su utilización por microorganismos y plantas.

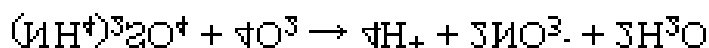
El amonio puede ser utilizado sin cambio por los microorganismos y las plantas, ser fijado por las partículas sólidas del suelo, ser volatilizado o bien ser oxidado a NO_3^- , mientras que los NO_3^- pueden ser absorbidos directamente por microorganismos y plantas o pueden perderse, fundamentalmente por lavado o lixiviación.

Acidificación del suelo por los fertilizantes nitrogenados

Al momento de decidir que fuente de fertilizante conviene utilizar es necesario considerar, entre otras cosas, las características del suelo, y las reacciones y transformaciones de los productos. Entre los fertilizantes nitrogenados de uso más frecuente se encuentran la urea, el nitrato de amonio y el sulfato de amonio. En general los fertilizantes amoniacales provocan mayor acidez en el suelo que aquellos en que el N se encuentra como nitrato, ya que durante el proceso de nitrificación del NH_4^+ del fertilizante a NO_3^- se liberan H^+ . Sin embargo, no se puede generalizar sobre este efecto para todos los suelos, ya que normalmente la capacidad amortiguadora de los suelos arcillosos hace que la acidez inducida sea menor que la que surgiría de la reacción estequiométrica.

El grado de acidez inducida depende de la fuente de N que se utiliza. Es conocido el mayor efecto acidificante del sulfato de amonio respecto del nitrato de amonio y la urea. Si bien la reacción de estos fertilizantes con el suelo da como resultado la producción de igual cantidad de N, el sulfato de amonio libera mayor cantidad de protones.

CCCCCCCC



CCCCCCCCCCCC

El **índice de acidez (IA)** de un fertilizante es el número de partes, en peso (por ejemplo kg) de CaCO_3 necesario para neutralizar la acidez contenida en 100 partes, en peso, de material fertilizante (kg de CaCO_3 /100 kg de fertilizante). Este es un índice teórico que en la práctica desarrollará una acidez mayor o menor de acuerdo a las características del suelo en que se aplique.

El **índice de basicidad (IB)** es el número de partes, en peso, de CaCO₃ que ejercen la misma acción neutralizadora que 100 partes en peso de fertilizante (kg de CaCO₃ que producen una neutralización equivalente a 100 kg de fertilizante).

El **índice salino (IS)** se calcula por el incremento en presión osmótica producido por un peso igual de fertilizante relativo al NaNO₃ (IS: 100)

Desnitrificación

Otro mecanismo de pérdida del N del suelo (tanto el nativo como el incorporado con los fertilizantes) es la desnitrificación. Este proceso se asocia al contenido hídrico del mismo y cobra importancia en suelos anegados, donde las condiciones de déficit de oxígeno, promueven la reducción microbiana de nitratos a formas menos oxidadas de N (N₂O, NO e inclusive a N₂), que se eliminan a la atmósfera. Los óxidos reducidos de N son muy importantes en cuanto a su efecto ambiental negativo, ya que son gases responsables del efecto invernadero. Si este proceso es completo, con liberación de N₂, aunque sigue representando una pérdida económica, no tendrá efectos ambientales negativos.

Volatilización de amoníaco a partir de la urea

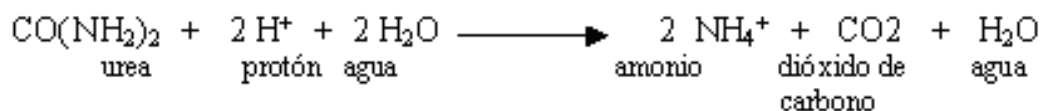
La urea es la fuente de fertilizante más utilizada en la Argentina. Dentro de las razones que explica la generalización de su utilización, se destaca su accesibilidad económica, su elevada concentración de N por unidad de producto (46% de N) y la gran solubilidad en la solución edáfica. Sin embargo, muchas veces se reduce su eficiencia de utilización debido a la ocurrencia de pérdidas de N por volatilización de amoníaco (NH₃). Otro inconveniente se presenta por el uso de dosis elevadas de este fertilizante junto con la semilla, ya que puede provocar fitotoxicidad.

Reacción de la urea en el suelo y proceso de volatilización

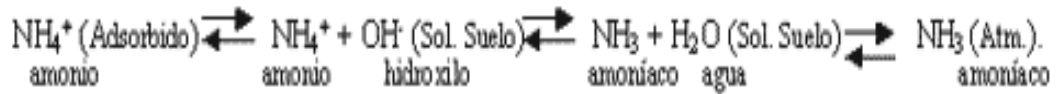
Al aplicar urea en suelos con pH > 6.3, ésta sufre un proceso de hidrólisis, generando como productos de la reacción amonio (NH₄⁺) y bicarbonato (HCO₃⁻)



Si el pH es menor que 6.2, la hidrólisis de la urea es la siguiente:



El amonio liberado en la hidrólisis queda en equilibrio dinámico con el amoníaco de la atmósfera:



En consecuencia, la hidrólisis de la urea genera un incremento significativo del pH alrededor del gránulo, ya que en la reacción se consumen H^+ . Ese incremento del pH desplaza el equilibrio del amonio y amoníaco favoreciendo la volatilización del NH_3 a la atmósfera.

La hidrólisis es catalizada por una enzima denominada *ureasa*. Su actividad es muy importante en los residuos de cosecha y en la superficie de los suelos, ya que ésta sigue el patrón de distribución de la materia orgánica del suelo, o sea que la mayor actividad se concentra en el estrato superficial, reduciéndose con la profundidad.

Factores que regulan la volatilización de amoníaco

El proceso de volatilización de NH_3 se encuentra afectado tanto por factores del suelo como por el manejo de los fertilizantes. En la siguiente tabla se enumeran los factores que mayor impacto tienen sobre dicho proceso.

Factores de Suelo	Factores de Manejo de Fertilización
Actividad ureásica	Fuente y dosis de fertilizante
Temperatura	Método de aplicación
Humedad	Presencia de residuos
PH y capacidad buffer	Uso de inhibidores
Capacidad de intercambio catiónico (CIC)	
Porosidad y Aireación	

Factores de suelo

Obviamente, para que ocurra la reacción inicial de hidrólisis es necesario que exista disponibilidad de **agua en el suelo**. La incorporación de la urea, ya sea mediante alguna práctica de labranza o por acción del agua de lluvia o riego, reduce el N eliminado a la atmósfera como NH_3 , ya que el fertilizante es muy soluble en agua y se desplaza hacia una zona de menor **actividad ureásica**.

La **temperatura** es un regulador de cualquier actividad biológica. Por lo tanto, la actividad microbiana productora de la enzima ureasa depende directamente de este parámetro. Su incidencia puede ser considerable en cultivos de verano, con temperaturas que superan los 18 a 20 °C. Al evaluar la posibilidad de volatilización deben tenerse en cuenta las condiciones predisponentes en general que integran los factores mencionados.

El incremento del **pH** alrededor del gránulo de fertilizante es, sin duda, el factor desencadenante de la volatilización de NH_3 . Aquellos suelos que naturalmente poseen pH alto (suelos alcalinos o salino-alcalinos) volatilizan significativamente más que suelos agrícolas con pH moderadamente ácido. En suelos con mayor capacidad buffer, son menores los cambios en el pH por efecto del fertilizante, y por ende la pérdida de N por volatilización también es menor.

La capacidad de intercambio catiónico (**CIC**) de los suelos afecta la volatilización debido a que el amonio liberado de la hidrólisis de la urea queda retenido en los sitios de intercambio, y por lo tanto es menor la disponibilidad del catión para ser volatilizado.

Factores de manejo de fertilizantes

La selección de la **fuentes** posee gran influencia en la magnitud de la pérdida de N por volatilización de NH_3 . La ocurrencia de este proceso es máxima cuando se utiliza urea o fertilizantes que contienen urea en su composición, como fuente. Las fuentes que contienen amonio o nitratos, en general, no generan volatilización en suelos agrícolas.

Cuanto mayor sea la **dosis de fertilizante**, más amonio será producido, y por lo tanto la volatilización del NH_3 será cuantitativamente más significativa.

El **método de aplicación** es un factor muy importante a considerar sobre todo en sistemas de siembra directa, debido a la gran actividad ureásica de los rastros en superficie. No son recomendables las aplicaciones de urea al voleo en cobertura total, sobre todo si existen otros factores predisponentes a la volatilización. En estos casos se pueden utilizar fuentes que volatilicen menos o que prácticamente no volatilicen, como los fertilizantes que contienen N como nitratos o amonio.

Fitotoxicidad por amoníaco

Si se aplican grandes cantidades de urea junto a la semilla, se puede producir daño de ellas, o inhibir la germinación debido a la acción fitotóxica del amoníaco. Para prevenir este problema, es recomendable agregar no más de 30 kg de N/ha en suelos con alto contenido de materia orgánica y texturas medias, mientras que en suelos de textura gruesa y menor contenido de materia orgánica no debería superarse los 12 a 15 kg de N/ha. Estas son dosis orientativas, y pueden variar dependiendo de otros factores: tipo de semillas, pH y CIC del suelo, contenido hídrico en la aplicación, etc.

Para mejorar la eficiencia de uso de la urea, la EFMA (European Fertilizer Manufacturers Association) recomienda, entre otras medidas:

- Utilizarla preferentemente cuando existen probabilidades de ocurrencia de lluvias o se dispone de riego.
- No realizar las aplicaciones en el momento más caluroso del día.
- Incorporar inmediatamente después de la aplicación, sobre todo cuando se aplica en suelos alcalinos o con altas temperaturas.
- Incorporarla preferentemente durante las operaciones de labranza.
- No aplicar urea si se hubiera realizado encalado.
- En pasturas aplicarla temprano en la estación de crecimiento, durante períodos de lluvia o antes de un riego.
- No aplicar urea al voleo cuando hay residuos, abonos recién agregados, ni nada que reduzca la adsorción de amonio por parte del suelo.
- Dependiendo de las condiciones ambientales locales, fraccionar dosis muy altas, superiores a 250 kg/ha de N.

¿Cuánto N se pierde por volatilización de NH₃ ?

Algunos ejemplos locales (% del N aplicado)

Trigo labranza convencional	0.25%	cuando se aplica a la siembra
	1.5%	cuando se aplica en macollaje, al voleo
Dosis: 120 kg/ha urea. (Videla, 1994).		
Trigo siembra directa	3 al 9% dependiendo del fertilizante, en aplicaciones al voleo (García et.al., 1996)	
Maíz siembra directa	3 al 7%	dosis bajas (70 kg de N /ha)
	6 al 11%	dosis altas (140 kg de N/ha)
(Sainz Rozas et.al. , 1997a).		
Pastura de agropiro: fertilización de otoño con urea en suelo Natracuol Típico (con pH 7 en el horizonte superficial):	12%	dosis de 90 kg de N/ha
	35%	dosis de 180 kg de N/ha
(Barbieri y Hecheverría, 2000)		

Fertilizantes nitrogenados de liberación lenta

Como se ha explicado gran parte del nitrógeno aportado por el abonado no se recupera con la cosecha, debido principalmente a las pérdidas por infiltración en el suelo, pero también por volatilización o fijación del amoníaco en el suelo, o por desnitrificación. Este problema puede solucionarse mediante el aporte de menores cantidades de fertilizantes, y aumentando la frecuencia, o bien por el empleo de abonos de liberación lenta. Estos últimos permiten la disponibilidad progresiva del nitrógeno, de forma que si bien no se eliminan totalmente las pérdidas, éstas se reducen en gran medida.

Los fertilizantes de liberación lenta presentan el inconveniente de su elevado costo por unidad de nitrógeno contenido, por lo que su uso se restringe a cultivos con un período vegetativo largo o aquellos que se desarrollan en climas o suelos que favorecen las pérdidas de nitrógeno (frutales, arroz, césped, pasturas, etc.)

Estos fertilizantes pueden clasificarse en 3 grupos:

- Fertilizantes recubiertos.
- Fertilizantes de baja solubilidad.
- Fertilizantes estabilizados

Fertilizantes recubiertos

Son fertilizantes convencionales que se presentan en forma de gránulos envueltos en una membrana semipermeable que está constituida por una sustancia insoluble o de baja solubilidad en agua. La disolución del fertilizante se produce lentamente conforme el agua va atravesando el recubrimiento. La membrana se va rompiendo, debido al gradiente de presión osmótica (mayor en el interior del gránulo), liberando los nutrientes de forma progresiva. Las sustancias más empleadas como recubrimiento son: azufre, resinas, caucho, parafinas, plástico perforado, etc.

El mayor o menor tamaño de partícula influye en la tasa de liberación del nutriente.

- **Urea-azufre (URA):** es el abono recubierto de uso más extendido. Se obtiene rociando azufre derretido de forma uniforme sobre la urea en un tambor rotatorio. La cantidad de azufre oscila entre el 15 y el 19 % del peso total del producto. A mayor contenido de azufre, más lenta es la liberación de nitrógeno.

Sobre los gránulos recubiertos de azufre se rocía un compuesto (cera microcristalina, polietileno, etc.), que constituye alrededor de un 2 % del peso total.

El contenido de nitrógeno varía entre un 30 y un 37 %, dependiendo de la cantidad de azufre empleado en el revestimiento.

Experiencias llevadas a cabo en diversos países han demostrado la gran utilidad de la urea revestida de azufre en cultivos de larga duración (céspedes, praderas, etc.) y arroz, pero no en aquellos que requieren grandes cantidades de nitrógeno en un período relativamente corto (maíz, trigo, etc.).

- **Otros fertilizantes recubiertos:** de utilización más restringida son el nitrosulfato amónico recubierto de yeso o parafina, el nitrato amónico recubierto de resina, la urea con fosfato amónico-magnésico, la urea con laca en escamas, etc.

Fertilizantes de baja solubilidad

Estos requieren gran cantidad de agua para su completa solubilidad, asegurando una baja concentración de nitrógeno en la disolución nutritiva.

Pueden utilizarse productos orgánicos e inorgánicos. Entre los primeros destacan: urea-formaldehído, isobutilendiurea (IBDU), crotoliden diurea (CDU), oxamida, etc. Los productos inorgánicos generalmente son fosfatos dobles de amonio y un metal, como es el caso del fosfato amónico-magnésico.

- **Compuestos de urea-formaldehído**

Son polímeros resultantes de la condensación de la urea y el formaldehído. La solubilidad depende de la proporción entre la urea y el formaldehído.

Son materiales granulares, con un contenido en nitrógeno que oscila entre el 38 y el 40 %. El contenido mínimo en nitrógeno insoluble debe ser del 35 % y debe asegurarse un índice de actividad mínimo del 40 %.

La "Association of Official Agricultural Chemists" define el **Índice de Actividad (AI)** como:

$$AI = \frac{\%CWIN - \%HWIN}{\%CWIN} \times 100$$

Donde:

% CWIN, es el porcentaje de nitrógeno insoluble en agua fría (25 °C).

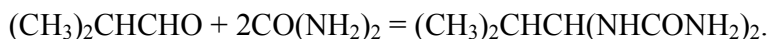
% HWIN, es el porcentaje de nitrógeno insoluble en agua caliente (100 °C).

Hay que tener en cuenta que la fuente de nitrógeno lentamente disponible es el insoluble en agua fría. Por tanto, el efecto del fertilizante se ve afectado por las altas temperaturas y, adicionalmente, por un pH bajo y una elevada actividad microbiana.

- **Isobutilendiurea (IBDU).**

Bajo este nombre se conocen una serie de compuestos formados a partir de la reacción de la urea con aldehídos saturados.

El aldehído es añadido a una solución acuosa de urea ligeramente acidificada:



Este producto es un polvo cristalino blanco que contiene aproximadamente un 32 % de nitrógeno muy poco soluble en agua (0,01-0,1 g/100 ml) y que se hidroliza con mayor rapidez en solución ácida, puede incorporarse a fertilizantes complejos en forma de compuestos granulares, de modo que una proporción considerable del nitrógeno es aportada como IBDU.

La tasa de disolución se ve considerablemente afectada por el tamaño de la partícula, en relación con la superficie expuesta al líquido.

También la temperatura influye en la tasa de transformación de la IBDU, la cual una vez incorporada al suelo, vuelve a hidrolizarse a isobutilaldehído y urea.

A temperaturas cálidas y bajo invernadero, la IBDU puede producir lesiones necróticas en la planta. Funciona bien en exteriores y céspedes, hortícolas, frutales y arroz.

- **Crotoniliden diurea (CDU).**

Se prepara mediante reacción del crotonaldehído con la urea en una proporción molar 1:2, en medio acuoso. Su contenido en nitrógeno es del 28 %, con aproximadamente un 10 % en forma de nitrato.

Este fertilizante proporciona un suministro prolongado y equilibrado de nitrógeno, siendo las pérdidas por infiltración insignificantes

- **Oxamida, (CONH₂)₂**

Es muy poco soluble en agua fría y se ha propuesto como fertilizante de liberación lenta. Contiene un 31,8 % de nitrógeno.

En los suelos se hidroliza liberando NH₃ que luego es nitrificado. Su disponibilidad en el suelo está determinada por la distribución de los tamaños de las partículas en el producto.

- **Fosfatos metal-amonio.**

El fosfato amónico-magnésico, de fórmula MgNH₄PO₄.H₂O, contiene aproximadamente un 8 % de N y un 44 % de P₂O₅. Es una forma de nitrógeno lentamente disponible. Puede aplicarse directamente a los cultivos con poco o ningún daño para las plantas.

Fertilizantes Estabilizados

Las principales pérdidas de nitrógeno cuando se aplican fertilizantes amoniacales y urea, se producen después de su conversión a nitratos. Cuando se añaden al suelo algunas sustancias tóxicas para las bacterias nitrificantes se inhibe temporalmente la nitrificación, reduciendo las pérdidas de nitratos por lixiviación y desnitrificación, y aumentando el rendimiento de los fertilizantes amoniacales.

Sin embargo, la inhibición no debe ser total y estos productos deben actuar selectivamente sobre los microorganismos nitrificantes y no sobre otros microorganismos. Estos productos resultan muy efectivos en suelos arenosos (evitan el lavado de los nitratos) y en suelos encharcados (evitan la desnitrificación).

Son productos derivados de la pirina y la pirimidina, siendo el más empleado la nitrapirina o piridina (N Serve). Se aplica principalmente en cereales (trigo, maíz y algodón) a 0,30-0,55 kg.Ha⁻¹ de producto activo. Su persistencia en el suelo es de 2-3 meses y se elimina por volatilización y degradación a otros compuestos.

Características del		Persistencia	Efecto
----------------------------	--	---------------------	---------------

suelo			
Textura	Gruesa	Menor	Alta volatilización y degradación
Materia orgánica	Alto	Mayor	Retención en materia orgánica Protección
Temperatura	Alta	Menor	Alta velocidad de degradación Alta actividad de nitrificadores

Persistencia de los fertilizantes en función de las características del suelo

Dada su gran volatilidad, este producto debe enterrarse al menos a 5 cm de profundidad, antes de que haya transcurrido una hora desde su aplicación (esto no es necesario cuando se aplica con amoníaco anhidro, ya que la nitrapirina es soluble en éste).

Otros inhibidores de uso menos extendido son: tiourea, dicianidamida, fenil isotiocianato, sulfatiazol, algunas triazinas, etc. Estas sustancias consiguen los mismos resultados, en cuanto a inhibición de la nitrificación, que aquellas que esterilizan parcialmente el suelo, tales como la mezcla de 1,3-dicloropropeno y 1,2-dicloropropano (DD), y 2-amino-4-cloro-6-metil pirimidina.

Los inhibidores de ureasa retrasan la velocidad de conversión de la urea a amonio. Si la tasa de conversión es lenta, se reduce la volatilización del amoníaco. Los fertilizantes con inhibidores de la nitrificación o de la ureasa son llamados fertilizantes estabilizados. En contraste con los fertilizantes de liberación controlada, estos “aditivos” de los fertilizantes se utilizan casi exclusivamente en cultivos agrícolas tradicionales. El incremento de precio de tales productos, entre un 10 y un 15 %, se compensa por ventajas adicionales y normalmente resulta mucho menos costoso para la mayoría de los cultivos agrícolas que los fertilizantes de mayor eficiencia. Sin embargo, aunque su uso es mucho más rentable y económico para los productores, comparados a los fertilizantes de liberación controlada, éste ha sido hasta ahora limitado a cultivos de raíces poco profundas y bajo condiciones climáticas especiales que favorecen las pérdidas por lixiviación del N del fertilizante. Entre los diferentes factores que frenan su adopción se mencionan, la adopción del manejo de aplicaciones divididas, fertilizantes relativamente baratos y escasa preocupación ambiental.

Finalidad de los fertilizantes mejorados:

Reducir las pérdidas de nutrientes que ocurren durante el largo periodo entre la aplicación y su absorción, y problemas de toxicidad causados por dosis altas utilizadas en una única aplicación.

El costo de las aplicaciones divididas fijará el marco para el precio adicional que el productor estará dispuesto a pagar por fertilizantes de mayor eficiencia.

Utilización en Argentina

La utilización de este tipo de productos se encuentra en etapa experimental en la Argentina. Sin duda, el elevado costo de este tipo de sustancias es una limitante severa para su difusión en el ámbito productivo extensivo.

Dentro de la gama de productos mencionada, los inhibidores de la ureasa son los que tienen las mejores perspectivas de desarrollo como alternativa para reducir las pérdidas de N-NH₃ fuera del sistema suelo-planta.

Fertilizantes Fosforados

Por las características de escasa movilidad del P, el fertilizante fosforado debería ser colocado a la siembra, cerca de las semillas. La importante interacción de los fosfatos aportados por el fertilizante con la fase sólida del suelo, hace que el aprovechamiento instantáneo del P aplicado sea realmente escaso. La eficiencia de fertilización varía según el tipo de suelo (fundamentalmente pH y tipo de arcillas); fuente de fertilizante, y técnica de aplicación, pero en términos generales es de alrededor de 10-20%. Sin embargo, el P remanente no se va del suelo, sino que queda en el mismo generando efectos residuales en cultivos posteriores. Esta es una característica muy importante, ya que es posible desarrollar esquemas de fertilización fosfatada variando la dosis de fertilizante en función de la relación de precios insumo/producto.

1. Fertilizantes Fosforados naturales: No son tratados químicamente.

- **Hiperfosfato** es un fertilizante originado en sedimentos marinos, y el más eficiente de todos los de su categoría.

No todos los yacimientos de fosforita son iguales. Existen yacimientos en Túnez, Marruecos, Israel, Rusia, Estados Unidos, Egipto, etc., que disponen de materiales fosforados naturales similares, pero que se diferencian en su estructura y en su riqueza en P.

Características del Hiperfosfato:

- Componentes: además de un importante nivel de fósforo, posee una gran riqueza en calcio y elementos menores que contribuyen a reforzar su valor como fertilizante.

- Friabilidad: La facilidad que tiene la partícula de fosfato para ser molida es una cualidad que permite su micropulverizado.

- Grado de pulverización: La fineza es un factor determinante del valor fertilizante del producto porque promueve un reparto uniforme en el suelo y aumenta la superficie de intercambio sometido a las acciones químicas. Esto produce una mejor utilización del fertilizante por parte de las plantas. Su acción no es brusca, sino que restituye la concentración de la solución del suelo a medida que las plantas lo requieren.

2. Fertilizantes químicos

El material proveniente de yacimientos que se han transformado y se han mezclado, y que se presenta en forma de cristales muy duros, como la mayoría de las apatitas, prácticamente inutilizables como fertilizantes de uso directo, se utiliza como materia prima para fabricar fertilizantes fosforados solubles al agua.

- **Superfosfato simple:**

Es un fertilizante granulado que contiene 20% de P₂-O₅ y un 12% de azufre. Se elabora tratando la roca fosfatada con ácido sulfúrico.

- **Superfosfato triple:**

También es granulado con un 46% de P₂-O₅ totalmente soluble. Proviene de la reacción de ácido fosfórico con fosfato mineral.

- **Fosfato de amonio:**

Se produce por amonificación del ácido fosfórico. Según la cantidad de amonio agregado se obtiene:

- * Fosfato diamónico (DAP) 18% de nitrógeno y 46% de P₂-O₅ totalmente soluble.

- * Fosfato monoamónico (MAP) que tiene 11% de nitrógeno y 52% de P₂-O₅, es menos higroscópico que el DAP y se adapta mejor a las mezclas.

3. Mezclas

- **Hipertriple:**

Es una combinación en seco, con un 60% de Superfosfato y un 40% de Hiperfosfato, o sea que cuenta con un porcentaje de fósforo rápidamente soluble y otro de solubilidad progresiva, obteniéndose un nivel de fósforo adecuado por un período más prolongado de tiempo.

Se presenta en forma granulada y su contenido de P₂-O₅ es del 40%.

Es ideal para praderas y fertilización de base. Para cultivos se puede mezclar con DAP o MAP.

Fertilizantes Potásicos

Se presentan como sales inorgánicas, siendo los más utilizados el Nitrato de Potasio, Cloruro de Potasio y Sulfato de Potasio.

Cuando se va a aplicar un fertilizante potásico debe tenerse en cuenta la relación del mencionado nutriente con otros elementos del suelo como calcio y magnesio y viceversa.

Fertilizantes con Oligoelementos

En el mercado existen gran cantidad de productos que aportan micronutrientes. Se presentan en forma líquida o sólida, pudiéndose aplicar al suelo con el agua de riego o por vía foliar. Se formulan como óxidos, sulfatos o quelatos. Su elección dependerá del tipo de suelo (principalmente su pH), cultivo a fertilizar y forma de aplicación.

Los micronutrientes presentan en su mayoría escasa movilidad en los suelos, razón por la cual se aconseja la incorporación del fertilizante al suelo. La aplicación foliar es una alternativa más

eficiente (evita los problemas de fijación), pero puede provocar efectos tóxicos en las hojas si la dosis es excesiva.

La aplicación de los micronutrientes en la fertilización foliar, se hace a través del uso de quelatos, ya que los elementos menores en su mayoría son cationes y como la cutícula de las hojas está cargada negativamente aplicarlos en forma libre resultaría en una muy baja eficiencia.

La quelatización permite recubrir los iones metálicos con coloides orgánicos (de carga negativa), lo que facilita el ingreso directo al interior de las hojas.

Ejemplos de quelantes son:

- EDTA: ácido etilén diamino tetraacético
- DTPA: ácido dietilén triamino pentaacético
- HEDTA: ácido hidroxietilén diamino triacético

Los cationes como el hierro, cinc, cobre y manganeso no se encuentran disponibles en la solución del suelo cuando son proporcionados a través de sales inorgánicas. Esta insolubilidad es más pronunciada cuando el pH del suelo es mayor de 5, debido a que los cationes reaccionan con los OH- del suelo y precipitan. Por ello es que los metales quelados se convierten en un importante medio de abastecimiento para las plantas.

Todos los cationes polivalentes pueden formar quelatos, pero algunos tienen mayor estabilidad que otros. La estabilidad de los quelatos disminuye en el siguiente orden: Fe^{3+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} . El quelato férrico es mucho más estable que cualquier otro quelato metálico.

Los quelatos utilizados como fertilizantes deben tener una estabilidad que impida la formación de sales insolubles del ión metal, pero que permita liberar lentamente los metales para que las plantas puedan asimilarlos. Sólo unos pocos agentes quelantes tienen suficiente afinidad con los iones metálicos para formar complejos solubles estables en las condiciones que se dan en los suelos agrícolas.

Fertilizantes orgánicos

Los más importantes son estiércol, paja, compost y abono verde.

Este tipo de fertilizantes en general es utilizado en producciones intensivas, debido a su disponibilidad y volumen. La excepción la constituye el abono verde, en el cual se utilizan plantas enteras, o sólo residuos (raíces).

El efecto del abono verde consiste principalmente en la mejora de la estructura del suelo, aunque no es despreciable el aporte de materia orgánica y nitrógeno, así como de otros nutrientes rápidamente asimilables. Se utilizan fundamentalmente leguminosas, dada su propiedad fijadora de nitrógeno, y cereales, con sistemas radiculares potentes. Sin embargo, hay un factor que debe tenerse siempre presente al evaluar esta práctica, que es el balance de agua

Mezclas

Para optimizar el rendimiento se recurre a la aplicación de los distintos nutrientes necesarios para los cultivos a través de fertilizantes compuestos. Actualmente las empresas fabricantes además de preparar mezclas standard para los distintos cultivos, también realizan mezclas de acuerdo a la

solicitud del productor (en función de las características del suelo y los resultados del análisis del mismo). Las mezclas pueden ser sólidas o líquidas.

En la formulación de las mezclas sólidas debe tenerse en cuenta que el tamaño de los fertilizantes a mezclar sea similar y uniforme, para evitar la sedimentación (segregación). Se considera que una variación del 10% en tamaño entre materiales es aceptable.

Los fertilizantes granulados presentan la ventaja de no segregarse durante el transporte, almacenaje o aplicación, absorber los herbicidas uniformemente y poder combinarse con pesticidas granulados, además de permitir la formulación de mezclas.

Las mezclas sólidas constituyen un método económico y simple para preparar fertilizantes compuestos.

Las mezclas líquidas permiten la aplicación de altas concentraciones de nutrientes en momentos del ciclo de cultivo en que otro tipo de fertilizante no puede aplicarse. Otra ventaja es la posibilidad de aplicación conjunta con pesticidas, y en algunos casos el permitir evitar el contacto del fertilizante con el suelo, mejorando su eficiencia de uso.

Hay dos tipos de mezclas líquidas: soluciones y suspensiones. Las soluciones son líquidos claros, libres de sólidos. Las suspensiones, en cambio, son de mayor concentración y presentan pequeños cristales suspendidos por arcillas gelificantes (atapulgita o bentonato de sodio) en soluciones de fertilizantes saturadas. Los cristales formados deben ser pequeños y livianos para evitar la sedimentación y el tapado de los aspersores.

Compatibilidad química de las mezclas de fertilizantes

Fertilizante	FO	NS	NP	NC	NA	SA	U	HH	RF	SFS	SFT	MAP	DAP	KCl	SP	SPM	C
Fertilizante Orgánico (FO)																	
Nitrato de sodio (NS)	C																
Nitrato de Potasio (NP)	C	C															
Nitrato de Calcio (NC)	C	C	C														
Nitrato de Amonio (NA)	C	C	C	C													
Sulfato de Amonio (SA)	C	C	C	C	C												
Urea (U)	C	C	C	I	I	C											
Harina de Huesos (HH)	CL	C	C	C	C	C	C										
Roca Fosfórica (RF)	C	C	C	C	C	C	I	C									
Superfosfato Simple (SFS)	C	C	C	C	C	C	CL	C	C								
Superfosfato Triple (SFT)	C	C	C	C	C	C	CL	C	C	C							
Fosfat monoamónico (MAP)	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C						
Fosfato diamónico (DAP)	C	C	C	C	C	C	C	C	C	CL	CL	C					
Cloruro de Potasio (KCl)	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C				
Sulfato de Potasio (SP)	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C			
Sulfato de Potasio y Magnesio (SPM)	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C		
Calcáreos (C)	I	C	CL	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	CL	CL	C	

Fertilizantes más comunes

Fertilizante	Concentración	Características
Fertilizantes Nitrogenados	N-P-K-S	
Urea	46-0-0-0	Gránulos blancos, muy soluble. IA:75-84 IS:75
Nitrato de Amonio	34-0-0-0	Granulado, muy soluble IA:58 IS:104
CAN	27-0-0-0	Granulado
Amoniaco anhidro	82-0-0-0	Gas.
Sulfato de Amonio	21-0-0-24	Granulado o en escamas, muy soluble IA:110 IS:69
Nitrato de Potasio	13-0-46-0	Granulado blanco, muy soluble IS:74
Nitrato de Calcio	15-0-0-0/ 27 Ca	Granulado blanco
UAN(Urea+Nitrato deAmonio)	30-0-0-0	Líquido
Fertilizantes Fosfatados		
Superfosfato simple de Calcio	0-21-0-12/ 20 Ca	Granulado
Superfosfato triple de Calcio	0-46-0-0/ 12 Ca	Granulado, soluble
Fosfato monoamónico	11-52-0-0	Gránulos blanquecinos a negro IA: 55 IS:34
Fosfato diamónico	18-46-0-0	Granulado o cristalino, muy soluble IA: 77 IS:34
Fertilizantes Potásicos		
Cloruro de Potasio	0-0-62-0	Granulado blanco IS: 116
Sulfato de potasio	0-0-50-18	Granulado blanco IS: 46
Fertilizantes Azufrados		
Azufre elemental	0- 0-0-80/98	S no disponible inmediatamente. Alta residualidad y concentración
Tiosulfato de amonio	12 0-0-26	Aporta N, líquido, apto para uso directo en mezclas con UAN-
Sulfonitrato de amonio	26-0-0-12	Alta solubilidad. Aporta N. Granular
Sulfato de potasio y magnesio	0-0-22-22/ 11Mg	S, alta disponibilidad. Aporta Mg
Sulfato de calcio (Yeso)	0-0-0-13/ 22Ca	Baja solubilidad y concentración. Granular apto para mezclas físicas
Sulfato de magnesio (Kieserita)	0-0-0-13/ 16Mg	S de alta disponibilidad
Sulfato de amonio	21-0-0-24	Alta solubilidad. Aporta N. Granular apto para mezclas físicas
Sulfato de potasio	0-0-50-18	Aporta Potasio sin Cl. S de alta disponibilidad
Superfosfato simple	0-20-0-12	Aporta fósforo y S de alta disponibilidad
Urea-Azufre	40-0-0-5	Alta concentración de N. S no disponible inmediatamente.

Fertilización en sistemas agrícolas

Como ya se expresó, los suelos dedicados a la agricultura en nuestro país son, en su mayoría, de buena fertilidad, pero actualmente la obtención de rendimientos adecuados a los materiales genéticos utilizados, requiere, entre otras medidas, de la reposición de nutrientes en función de la extracción que realizará el cultivo.

Pese a que todos los elementos requeridos por los vegetales son esenciales, al pensar en aplicaciones de fertilizantes en general se concentra la atención en los llamados macronutrientes (N, P, K), los que son los exportados en mayor proporción con la cosecha de granos y los que frecuentemente se tornan deficientes, limitando los rendimientos. Pero a la hora de reponer nutrientes al suelo deben evaluarse las necesidades de otros elementos, que pudieran surgir en función de la producción exportada, teniendo en cuenta que al aportar determinados nutrientes al cultivo, otros se pueden tornar limitantes.

En general puede decirse que el manejo de la fertilización debe apuntar a incorporar los nutrientes que necesitan los cultivos, reduciendo al máximo las pérdidas y por lo tanto maximizando la eficiencia del fertilizante incorporado al sistema. Para lograr esto es necesario plantearse en primer término el **objetivo** de la fertilización (fertilización del cultivo, fertilización de la rotación, conservación del suelo y recursos naturales en general, etc.), las necesidades del cultivo para un determinado rendimiento y la disponibilidad de nutrientes en el suelo (definirá con cuánto voy a fertilizar). Debe conocerse, además, cómo se encuentran los nutrientes en el suelo, cómo es la fisiología del cultivo y cómo los absorbe, cuáles son las transformaciones que los nutrientes sufren en el medio y qué factores de éste los afectan, teniendo presente, por supuesto, el sistema de labranza utilizado. Con esta información se podría definir cuándo y cómo fertilizar (con la siembra o luego de la emergencia, al voleo o en bandas, incorporado o en superficie, en una dosis o particionado, etc.).

Finalmente se definirá la fertilización teniendo en cuenta, además de los puntos considerados, los fertilizantes disponibles, los costos de los mismos y de su aplicación y la relación de precios fertilizante/grano.

Fertilización balanceada – Ley del mínimo de Liebig

El rendimiento de un cultivo está limitado por el elemento nutritivo que se encuentra en menor proporción con respecto a sus necesidades. Al aumentar las cantidades de un nutriente el rendimiento aumenta proporcionalmente hasta que otro elemento nutritivo se transforma en limitante. Esta ley muestra la importancia de una fertilización equilibrada y completa.

Es importante tener en cuenta que, la fertilización es una herramienta clave para los sistemas de producción, ya que permite incrementos productivos y económicos y devuelve al suelo parte de los nutrientes que se lleva la cosecha. Sin embargo debe recordarse que su objetivo es satisfacer los requerimientos de nutrientes del cultivo en las situaciones en las cuales el suelo no puede proveerlos en su totalidad, pero siempre debe tenerse presente el no deteriorar el ambiente.

Para que el efecto de la fertilización se vea reflejado en el rendimiento de los cultivos, deben conocerse:

- Condiciones agro climáticas del lugar
- Capacidad de uso de los suelos y sus limitantes (químicas, físicas y biológicas)

En función de estos parámetros se establecerá:

* El objetivo de producción (a corto, mediano o largo plazo).

* Una rotación adecuada a las características anteriores, incluyendo, si fuera posible, mejoradores de la fertilidad (pasturas, gramíneas, etc.)

* El material genético a utilizar, sus requerimientos nutricionales y el rendimiento esperado

* Recomendaciones de manejo (prácticas culturales, control de plagas, malezas y enfermedades)

Los beneficios de la fertilización deben ser evaluados con un enfoque amplio, conociendo el destino y el reciclaje de los nutrientes que se incorporan al suelo y sus efectos sobre la producción de todos los cultivos dentro de la rotación (efectos residuales y colaterales de los nutrientes, transformaciones en el suelo, efectos sobre la MO y las propiedades físicas del suelo, modificación de la actividad biótica).

Si bien el consumo de fertilizantes viene aumentando desde los años '90, esto no siempre va acompañado de métodos de diagnóstico. La fertilización debe ser el resultado de la utilización de herramientas tecnológicas, conociendo qué dotación de nutrientes tenemos en nuestro suelo y cuáles son las necesidades del cultivo que vamos a implantar. De esta forma se evitará fertilizar con dosis mayores a las requeridas por un determinado cultivo, en una zona y suelo definido, en determinada época y para el rendimiento esperado, y por lo tanto también se evitará el perjuicio económico y ambiental de una fertilización excesiva o deficiente, con la que no llegan a cubrirse los requerimientos del cultivo.

Un manejo racional de los nutrientes agregados permitiría lograr óptimos niveles de productividad y al mismo tiempo minimizar el impacto ambiental.

Por lo tanto, un programa racional de fertilización debe encararse conociendo el nivel de nutrientes presentes en el suelo (fertilidad química) y, por otro lado se deben conocer los requerimientos del cultivo a implantar.

La siguiente tabla consigna en promedio la cantidad de nutrientes que un determinado cultivo requiere para producir una tonelada de grano.

**Requerimientos nutricionales de diferentes cultivos
(Kg que deben ser absorbidos para producir una tonelada de grano o MS)**

Nutriente	Maíz	Soja	Trigo	Girasol	Alfalfa
Nitrógeno	22	80	30	40	27
Fósforo	4	8	5	5	2,7
Potasio	19	33	19	28	21
Calcio	3	16	3	18	12
Magnesio	3	9	3	11	3
Azufre	4	7	4,5	5	3,5

Fuente: García. INPOFOS.

Conservación de los recursos naturales

Remoción de nutrientes

La evolución de los sistemas productivos en la Argentina registra un cambio hacia una agricultura continua y el desplazamiento de la frontera agrícola hacia zonas tradicionalmente ganaderas. En los últimos 50 años, mientras la superficie cultivada se incrementó un 30 %, la producción, en el mismo período, se ha triplicado, triplicándose también la extracción de nutrientes (Berardo, 2005).

Actualmente las tasas de extracción superan a las de reposición, y a ello se suma una inadecuada rotación de cultivos, lo que provoca un creciente deterioro de los suelos, evidenciado entre otros aspectos, por una disminución en el contenido de nutrientes y una depresión en sus reservas.

Según Fontanetto (2004), si se tienen en cuenta los seis nutrientes principales (N, P, S, K, Ca y Mg), la exportación anual de los mismos del suelo equivale a 8 a 10 millones de ton/año de fertilizante, mientras que durante el año 2004 se incorporaron al sistema sólo 2,5 millones de toneladas de fertilizante, de los cuales el 48% corresponde a fertilizantes nitrogenados, el 40% a compuestos fosforados y el 11% restante a mezclas especiales y otros.

Este nivel de consumo, indica una reposición de un 33% del N (25-30%), 50 % del P (45-50%), 10% del S (7-10%) y 0.8% de P (1%) extraído anualmente por los cultivos (Gráfico N° 2). La tasa de reposición de nutrientes extraídos del suelo no llega al 25%, en promedio, lo cual, en el mediano y largo plazo, puede resultar en la caída de la producción de granos y forrajes.

Fuente: INPOFOS Cono Sur (2004)

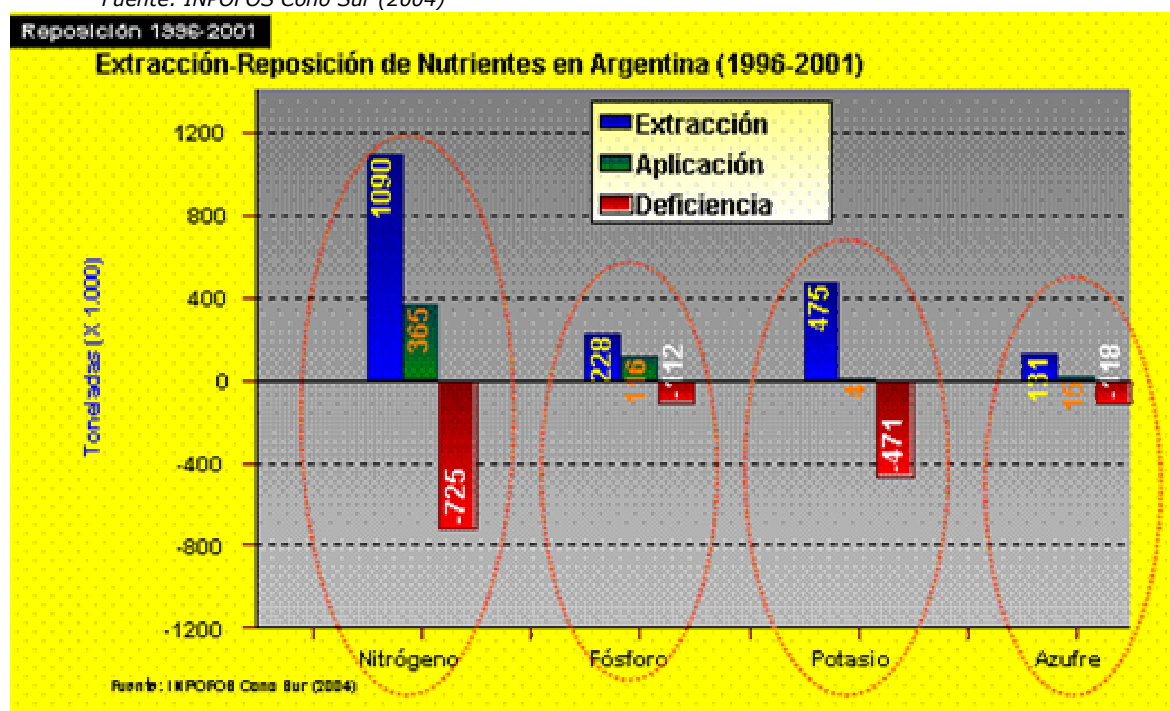


Gráfico N° 2: Extracción-Reposición de Nutrientes en Argentina (1996-2001)

Los nutrientes que entran al sistema están constituidos por los aportes de los fertilizantes, abonos orgánicos y residuos de cultivos anteriores. Los egresos se estiman a partir de las concentraciones promedio en granos y forrajes cosechados, las cuales varían en función de las condiciones ambientales y de manejo.

El balance negativo de nutrientes implica la pérdida de fertilidad de los suelos y el consumo de las reservas de éste. Para lograr una producción sustentable, deberán implementarse sistemas de producción que sean acompañados por un *uso racional de fertilizantes*. El manejo racional de los nutrientes agregados permitirá lograr óptimos niveles de productividad y al mismo tiempo minimizar el impacto ambiental.

Contaminación

Impacto ambiental es cualquier cambio neto, positivo o negativo, que se provoca sobre el ambiente como consecuencia, directa o indirecta, de acciones antrópicas susceptibles de producir alteraciones que afecten la salud, la capacidad productiva de los recursos naturales y los procesos ecológicos esenciales.

Los altos niveles de productividad que exige el mercado global, y la carencia natural de nutrientes hace indispensable el uso de fertilizantes, pero debe asegurarse un uso sustentable de los mismos de modo de minimizar los impactos negativos que puedan producirse. Si bien en nuestro país el nivel de uso de fertilizantes aún es bajo, debe tenerse en cuenta que, si se quiere desarrollar una agricultura sustentable, es necesario prevenir los problemas de contaminación futuros. Para ello se debe planificar la fertilización (fuente de fertilizante, dosis, oportunidad de fertilización, tecnología de aplicación, etc.) de modo tal de maximizar el aprovechamiento de los nutrientes y reducir al mínimo las pérdidas de los mismos fuera del sistema suelo-planta.

Como ya se dijo el incremento en el uso de fertilizantes puede dar origen a procesos de transformación en el ambiente que produzcan alteraciones físico-químicas y biológicas, tales como la eutrofización de los cuerpos superficiales de agua, degradación de suelos y contaminación de acuíferos.

Posibles impactos ambientales de la fertilización

La fertilización imprime cambios en el balance de los nutrientes del sistema y su dinámica, ya que también afecta las condiciones físico-químicas y la biota del suelo

Fertilización nitrogenada

- Aporte de nutrientes, además del nitrógeno, como S, Mg, Ca, Na y B, con su efecto sobre el balance de nutrientes del sistema.
- Variación de la reacción del suelo (acidificación o alcalinización).
- Incremento de la actividad biológica del suelo con importantes efectos indirectos sobre la dinámica global de los nutrientes.
- Daños por salinidad y contaminación de acuíferos, causados por altas dosis.
- Eliminación a la atmósfera de gases con efecto invernadero (por desnitrificación)
- Daños causados por impurezas y productos de descomposición.

Fertilización fosforada

- Aporte de nutrientes, además del fósforo, como S, Ca, Mg, Mn y otros.
- Aporte de sustancias que mejoran la estructura: cal y yeso.
- Variación del pH del suelo.
- Inmovilización de metales pesados.
- Eutrofización de las aguas.

Fertilización potásica

- Salinización de suelos producido por el aporte de impurezas en forma de cationes y aniones, principalmente los cloruros.

Fertilización con azufre

- Efecto tóxico del SO₂ sobre las plantas.
- Efecto acidificante del SO₂ en la lluvia ácida. Con lo que se acidifica el suelo, debido fundamentalmente a la liberación de Al⁺⁺⁺ (soluble hasta pH < 4,5, elemento altamente tóxico para las plantas).
- Efectos sobre la dinámica de la MO por incorporación de S al sistema.

Interrogantes a resolver

¿En qué situaciones, con qué nutrientes y con cuánto fertilizar?

Disponibilidad de nutrientes para el cultivo.

Análisis de suelo y material vegetal

El **análisis de suelo**, es un conjunto de medidas químicas y físicas realizadas sobre una muestra de suelo. Esta es la única manera de conocer la dotación de nutrientes que tiene nuestro suelo. Realizado antes de la siembra, nos permite conocer con qué nivel de nutrientes contará el cultivo una vez sembrado, nos habla de la reserva de nutrientes que posee ese suelo.

El análisis de suelo resulta una herramienta fundamental para:

- Optimizar las prácticas de manejo conducentes a la obtención de rendimientos elevados dentro de un esquema de agricultura sustentable.
- Conocer la aptitud del suelo determinando limitantes y potencialidades.
- Determinar en forma exacta y precisa el nivel del / de los nutrientes estudiados, y efectuar en base al dato obtenido un diagnóstico de fertilidad y una recomendación de manejo o fertilización, que contemple tanto el plano económico como el ecológico.
- Monitorear el estado de fertilidad del suelo a través de los años, para evaluar su evolución con el uso y de ser necesario poder tomar las medidas correctivas apropiadas.

Los análisis de suelo, comparados con otras técnicas de evaluación de la fertilidad, resultan sencillos, objetivos, baratos y rápidos. Por ello y por su utilidad deben ser el primer paso para una fertilización equilibrada, pensando en la sustentabilidad de los sistemas productivos en el tiempo.

Todo Programa racional de fertilización debería contar con las siguientes etapas previas:

1. **Toma de la muestra de suelo**
2. **Análisis de suelo**
3. **Interpretación y diagnóstico de la fertilidad**
4. **Recomendación**

El **muestreo del suelo**, es un aspecto de suma importancia, ya que de él depende que los resultados del análisis posterior sean confiables. En la medida que la muestra sea más representativa, más exactos serán los resultados. Para entender la importancia de la representatividad de la muestra de suelo debemos sacar algunas cuentas.

Considerando que:

1 ha tiene 10000m²

La profundidad promedio del horizonte superficial es de 0.20 m, o sea que el horizonte superficial de 1ha de suelo ocupa un volumen de 2000 m³

Considerando un valor de densidad aparente de 1.3 g/cm³ o Tn/m³

La masa del suelo de 1 ha será de 2600 Tn

Suponiendo un potrero de 40 ha.

Entonces...

... estaremos representando a más de 100.000 Mg de suelo de un potrero con una muestra de 1-2 kg como máximo.

Si además consideramos que de ese suelo sólo utilizamos unos gramos en el análisis, podemos ver que cualquier diferencia en el resultado de un análisis de suelo se multiplicará de manera extraordinaria cuando se consideran esos valores a nivel potrero.

Algunas **recomendaciones** para la toma de muestras son:

- Dividir el lote en áreas homogéneas en cuanto a posición en el relieve, color, uso anterior, textura, tipo de suelo, vegetación existente, etc..

- Evitar muestrear cerca de alambrados o caminos, aguadas u otros lugares donde se agrupe la hacienda, galpones, montes, zonas donde se fertilizó recientemente, en las cabeceras, áreas con mal drenaje, áreas con cambios bruscos de suelo y todas aquellas donde la concentración de nutrientes pueda ser anormal.

- Recordar que cuanto más chicas sean las superficies muestreadas (25-50 ha), mayor será la representatividad de la muestra tomada.

- Utilizar siempre muestras compuestas, obtenidas por la extracción de varias sub-muestras (10 a 15), las cuales deben juntarse en un recipiente de plástico, mezclarse y de ellas se debe extraer de 500 g a 1000 g de suelo destinado al análisis. Recordar que cuanto mayor sea el número de submuestras por cada muestra compuesta, más representativa será ésta.

Analizando la variabilidad espacial de distintos parámetros del suelo se encontrará que algunos de ellos, como el pH, carbono total o N total, son bastante estables, pero otros, como el P, presentan mayor variabilidad horizontal, por lo que si nos interesa evaluar este nutriente será necesario incrementar el número de submuestras que compondrán la muestra compuesta, principalmente si tenemos idea de que el valor promedio es cercano al valor crítico que nos lleva a decidir si se fertilizará o no con dicho nutriente. La fertilización al voleo con un nutriente poco móvil como el P, por ejemplo, provoca un enriquecimiento de este elemento en superficie, mientras que la fertilización en bandas genera alta variabilidad horizontal. Si lo que nos interesa es evaluar nutrientes móviles, por ejemplo NO₃⁻, será necesario tener en cuenta la elevada variabilidad espacial vertical y temporal que estos presentan, por su gran solubilidad y factibilidad de lixiviado, o su variación por mineralización. Por ello cuando el muestreo tiene como objetivo un análisis para diagnóstico de fertilización con N, éste debe hacerse lo más cercano posible a la siembra.

- Para sacar las sub-muestras recorrer los lotes en zig-zag, muestreando al azar, o sistemáticamente según diseño especial

- Utilizar para la extracción pala o barreno

- La profundidad de muestreo dependerá de la movilidad de los nutrientes: se usa 0-20 cm. para determinaciones de P, MO o pH y en el caso de nutrientes móviles (sulfatos, nitratos) se extiende a los 40 – 60 cm.

- La frecuencia de muestreo es anual para el seguimiento de los nutrientes móviles y cada 2 ó 3 años en el caso de los no móviles. En general se recomienda tomar las muestras lo más cerca posible de la siembra.

- Si se van a analizar nutrientes que sufren variaciones importantes en un corto lapso de tiempo, como los nitratos, deberían evitarse para el muestreo las horas del día de mayores temperaturas y la muestra deberá remitirse lo antes posible al laboratorio, cuidando de no cortar la cadena de frío, ya que esto estimularía la actividad microbiana, con la consiguiente alteración del resultado

- Idéntica atención debe prestarse al acondicionamiento de la muestra, teniendo el cuidado de utilizar bolsas limpias (sin uso previo), rotulando debidamente (con datos del lote o parcela, cultivo antecesor, profundidad de extracción, ubicación geográfica, topografía, labores, cultivo a sembrar, rinde objetivo, nombre, fecha, establecimiento o todo aquel dato necesario para su identificación posterior).

- En general la mayoría de los laboratorios son confiables en cuanto al trabajo analítico, pero debe tenerse presente al interpretar el resultado del análisis con qué metodología se ha obtenido, por ello se recomienda, en lo posible, trabajar siempre con el mismo laboratorio, para poder comparar los resultados a lo largo del tiempo.

En conclusión no debe olvidarse que la toma de muestra de suelo es el primer paso de una recomendación y tiene tanta importancia como la interpretación del resultado del análisis.

La **interpretación** de los resultados es por ahora la etapa más difícil y conflictiva. Para una correcta interpretación del dato obtenido y su uso en la elaboración de una recomendación de fertilización deberá tenerse en cuenta:

- El cultivo a sembrar, su período de crecimiento, su potencial de rendimiento, así como la respuesta de ese cultivo a un determinado nutriente en esas condiciones ambientales.

- Rendimiento objetivo y evolución del precio del grano (para estimar ingreso bruto)

- Historia del potrero, tipo y dosis de fertilización en años anteriores, forma de aplicación y fertilizante utilizado

- El cultivo antecesor, rendimiento y volumen de rastrojo dejado en el lote, ya que esto afecta por ejemplo el balance de N para el cultivo siguiente, debido a la cantidad y calidad de rastrojos que haya dejado.

- Duración y tipo de barbecho y condiciones ambientales durante el mismo

- El potencial de liberación de un nutriente por mineralización de la materia orgánica, o la inmovilización o pérdidas según las condiciones del medio. Este aspecto debe tenerse presente sobre todo para el N, P y S, ya que estos nutrientes se encuentran ligados a la MO, y varían con la época en que se desarrolla el cultivo. En este aspecto es de particular importancia el sistema de labranza empleado.

El conocimiento del nivel de respuesta del cultivo al nutriente estudiado en esa área es actualmente uno de los puntos más débiles, ya que este ajuste se hace para los principales cultivos y zonas, pero requiere actualizaciones constantes. Además algunos cultivos son bastante rígidos en su respuesta al agregado de un nutriente deficiente (por ejemplo trigo con N), mientras que otros son más plásticos (soja con P).

El éxito o el fracaso del análisis de suelo como herramienta para el diagnóstico de la fertilización depende, entonces, de la calidad y cantidad de información disponible para la calibración e interpretación del resultado, ya que la calibración de los análisis de suelos se realiza en experimentos de campo con considerables variaciones experimentales de sitio a sitio, y esos

resultados son extrapolados a un área mucho mayor. A esto se suma la variación en los requerimientos nutricionales y eficiencia de utilización de los diferentes híbridos o variedades. Por ello es necesario hacer ensayos de campo durante varias campañas y medir las variables de sitio capaces de influir en el rendimiento para poder modelizar respuestas de los cultivos a la aplicación de fertilizantes.

Debe recalcar que la interpretación de los resultados obtenidos será mejor, cuanto mayor conocimiento se tenga del sistema productivo en cuestión y en consecuencia más ajustadas podrán ser las recomendaciones a realizar.

La **recomendación** surge básicamente de un adecuado balance de nutrientes cuantificando las entradas y salidas de los mismos del sistema suelo, teniendo en cuenta para ello la dinámica del nutriente en cuestión (móvil o no móvil).

También debe tenerse claro que los cultivos tienen requerimientos de nutrientes que deben satisfacerse para poder expresar su potencial, ya sea por lo que les puede ofrecer el suelo o por lo que les llega vía aplicación de fertilizantes. La fertilización es una práctica más dentro de un sistema de manejo, que abarca la correcta elección del híbrido o variedad, la época y densidad de siembra adecuadas, un ajustado control de enfermedades, plagas y malezas; etc.

Obviamente y como una variable de gran peso debe considerarse la relación de precios grano/fertilizante para estimar el ingreso bruto

La fertilización del cultivo ha demostrado ser una herramienta eficaz para alcanzar altos niveles de producción. La aplicación foliar es una estrategia interesante a considerar dentro del manejo nutricional del cultivo.

Variabilidad del suelo. Fertilización sitio-específica

La variabilidad natural del suelo determina la diferencia de disponibilidad de nutrientes en áreas aparentemente uniformes. Técnicas de muestreo intensivas demuestran que los campos son más variables que lo pensado. Esto genera variación en el rendimiento de los cultivos dentro de los lotes de producción. Es evidente que difícilmente se pueda hacer una buena recomendación de fertilización si la variabilidad de los nutrientes es elevada, ya que sólo unas pocas muestras con nivel alto pueden elevar el promedio del nutriente detectado como disponible en el análisis de suelo, lo que resultará en una recomendación de fertilización por debajo de la requerida para rendimientos óptimos. O sea que la variabilidad del suelo puede afectar drásticamente los rendimientos y la rentabilidad del cultivo.

Desde comienzos de la década del 90, comenzaron a desarrollarse tecnologías que permiten para manejar la variabilidad espacial y temporal asociada con los aspectos de la producción agrícola, con el objetivo de mejorar los rendimientos y preservar la calidad ambiental. Cumplir con tales objetivos es el desafío que enfrenta la agricultura de precisión.

En la actualidad, el desarrollo de tecnologías tales como el Sistema de Posicionamiento Global (GPS), los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la disponibilidad de cosechadoras equipadas con monitores de rendimiento permiten documentar la variabilidad de rendimiento de los cultivos dentro de los lotes. Esta variabilidad ha generado interés en el manejo sitio-específico de los cultivos y en la aplicación variable de insumos, siendo los fertilizantes los que generan mayor interés, siendo el N el que presenta mayores desafíos en el manejo, ya que es quien más limita la producción y a su vez el nutriente de mayor incidencia en el costo de producción de los cultivos no leguminosos).

El manejo de cultivos por sitio específico asume que la variabilidad existente en propiedades del suelo influye en el rendimiento de los cultivos.

La aplicación de los nutrientes de acuerdo a las necesidades del cultivo y a las condiciones del suelo sin duda mejorará el uso eficiente de los mismos y la protección ambiental, maximizando la producción del cultivo.

Las variaciones espaciales pueden estudiarse a través de técnicas geoestadísticas que permiten elaborar mapas y delimitar áreas de manejo diferencial. Sin embargo, la variabilidad debe ser de magnitud suficiente para que un manejo diferenciado por sitios resulte en un beneficio neto frente al manejo uniforme.

En nuestro sistema productivo la fertilización se realiza habitualmente con aplicaciones uniformes dentro de los lotes y la variabilidad natural o adquirida de la fertilidad del suelo y/o de la productividad del sitio causa que las dosis aplicadas resulten excesivas o insuficientes. El manejo del N por sitios específicos permite adecuar las dosis de fertilizante a la necesidad de los cultivos en forma variable a través de un lote. La disponibilidad del nutriente puede determinarse y mapearse, y en función de ésta realizar ajustes de las dosis a aplicar para cada sitio. El ajuste de las dosis aplicadas por sitios específicos incrementaría la eficiencia de uso del N y reduciría su impacto ambiental.

Fertilización Foliar

Dentro de los modernos esquemas de manejo de fertilización, la fertilización foliar es considerada una estrategia complementaria de agregado de nutrientes esenciales.

La fertilización foliar puede ser de gran utilidad en diferentes situaciones:

- Aplicación de nutrientes en estadios fenológicos tardíos aprovechando la aplicación de algún fitoterápico para control de plagas y/o enfermedades
- Aplicación de nutrientes en estadios fenológicos tardíos para suplementar deficiencias en la nutrición, sobre todo en leguminosas mal noduladas.
- Aplicación de elementos requeridos en pequeñas cantidades por los cultivos, como micronutrientes.
- Condiciones edáficas adversas para la aplicación de nutrientes en suelo, por ejemplo stress hídrico temporario.
- Aplicación de nutrientes para retrasar la senescencia y aumentar la duración del área foliar por mas tiempo prolongando el período de crecimiento del cultivo.
- Mejoramiento de la calidad del grano en aplicaciones durante llenado de grano.
- Estimulación de la fijación biológica de nitrógeno en leguminosas, por aplicación temprana de azufre, fósforo o mezclas multinutrientes (que aporte Co o Mo, por ejemplo).

Momentos de aplicación y respuesta a la fertilización

Fertilización con macronutrientes en estadios vegetativos

Se han realizado ensayos de fertilización foliar en soja, los cuales se han focalizado en evaluar el efecto del agregado de nutrientes esenciales (primarios, secundarios y micronutrientes) en estadios vegetativos tempranos y/o en reproductivas (generalmente en R3-R4) sobre diferentes parámetros: rendimiento, nodulación (peso y número de nódulos), concentración foliar de nutrientes, calidad de grano, etc. En términos generales, el agregado temprano de nutrientes sería una estrategia interesante para mejorar la nodulación y posterior fijación biológica de nitrógeno (FBN). En este sentido,

nutrientes como el azufre, calcio, potasio, cobalto, molibdeno, etc. podrían ser utilizados para mejorar la actividad de FBN, sin embargo son poco frecuentes las respuestas significativas a esta práctica.

Dado que los factores ambientales y de manejo afectan considerablemente la respuesta a la fertilización foliar, para poder detectar las probabilidades reales de aumentos significativos de rendimiento en condiciones de producción, es necesario efectuar ensayos en una amplia gama de condiciones ambientales.

En general las máximas respuestas al agregado foliar de nutrientes primarios (N, P, K) se presentaron en aquellas situaciones en donde el ambiente edáfico y/o el clima restringieron el crecimiento del cultivo y la disponibilidad de nutrientes en estadios iniciales que la fertilización foliar permitiría compensar deficiencias tempranas en el cultivo.

Forma de aplicación de fertilizantes

Es posible clasificar los diferentes sistemas de fertilización de la siguiente manera:

a) Al voleo o en cobertura total

Este método aplica el fertilizante en la totalidad del terreno antes o después de la siembra.

Antes de la siembra:

Conviene incorporarlo con las labores previas a la implantación.

- **Incorporación Profunda:** Es muy adecuada cuando se implantan cultivos con importantes sistemas radiculares (girasol), o en praderas (en la siembra de alfalfa y lotus) y en aquellos programas de fertilización de base (suelos pobres o empobrecidos) en los cuales se hacen correcciones de pH y de nutrientes con fertilizantes fosfatados y/o potásicos o en aplicaciones de amoníaco anhidro.

- **Incorporación superficial:** Se utiliza en la implantación de pasturas nuevas y en cualquier cultivo, incorporando con rastra de disco o de vibrocultivador. Es muy importante en siembra directa, para aumentar el nivel de nitrógeno del suelo en presiembra.

- **Sin incorporación:** Se emplea en las mismas situaciones que la incorporación superficial. Lo ideal es aplicar el fertilizante antes de que nazcan las plantas para que éstas dispongan de nutrientes desde el inicio. Si el fertilizante aplicado es urea se corre el riesgo de una volatilización muy alta. Si el fertilizante es fosforado debe tenerse presente su escasa movilidad, por lo que la fertilización sólo será efectiva si el sistema radicular de la especie implantada es superficial

Después de la siembra:

- **Con incorporación:** Se realiza cuando falta nitrógeno en los cultivos de escarda – girasol, maíz, sorgo, algodón- y se incorpora con el escardillo. Esta fertilización es complementaria de la realizada antes de la siembra.

- **Sin incorporación:** Se aplica en pasturas viejas, en las recién sembradas y en trigo al macollaje.

b) En bandas laterales

Este método consiste en aplicar el fertilizante al costado (5-10 cm.) y por debajo (7-15 cm.) de la semilla **en el momento de la siembra**. La aplicación profunda puede hacerse con cuchillas abridoras, o inyectado en la zona radicular.

Este es el sistema más aconsejable para la implantación de los cultivos en suelos muy arcillosos. Permite incorporar dosis de fertilizantes más elevadas que en la aplicación en el surco y hace más eficiente el aprovechamiento de los nutrientes, sobre todo cuando se aplican fertilizantes nitrogenados (Urea, Nitrato y Sulfato de Amonio), fosfato-nitrogenados (DAP y MAP) o nitrogenados-potásicos (Nitrato de Potasio), ya que disminuye el contacto del fertilizante con el suelo y las reacciones entre ambos, evitándose las pérdidas por volatilización del NH₃ o la fijación del P en el suelo

c) En el surco

Junto con la semilla

- Cuando se aplican fertilizantes nitrogenados, fosfatados-nitrogenados y nitrogenados-potásicos en altas dosis es posible que se presenten plantas "quemadas". Ante posibles movimientos de agua en el suelo, las sales pueden afectar las semillas en germinación o por contacto. En otras situaciones retrasan el nacimiento o reducen la producción por toxicidad del amonio.

- Se recomienda cuando se aplican dosis bajas (menos de 60 Kg/ha) de Fosfato de amonio o de fertilizantes nitrogenados como "arrancadores" en la siembra.

Debajo de la semilla (15 cm.)

- Se utiliza cuando se aplican fosfatos o fertilizantes fosfatados-nitrogenados o nitrogenados-potásicos en dosis bajas, según cultivo.

La formas de aplicación en el surco *deben complementarse con aplicaciones al voleo*, dependiendo de los requerimientos, pues en general se aplican dosis que no satisfacen al cultivo.

d) Entre líneas.

Es la aplicación de fertilizantes sobre cultivos establecidos, entre los surcos de siembra.

En agricultura convencional y siembra directa, con este sistema es posible incorporar los abonos nitrogenados en forma gaseosa (Amoníaco anhidro) –empleando equipos especiales- o como granulados, incorporándolo, cuando la distancia entre líneas lo permite, con equipos adaptados al efecto.

Este es un sistema complementario de la fertilización en el surco, en bandas laterales y al voleo, porque permite complementar las dosis de nitrogenados necesarios al cultivo y superar imprevistos: por ejemplo las deficiencias de nitrógeno causadas por abundantes lluvias.

La correcta ubicación del fertilizante debe permitir a las plantas captar más efectivamente los nutrientes.

La elección del método deberá contemplar la cantidad de fertilizante a aplicar, el momento de aplicación, el hábito de crecimiento de la raíz, condiciones de temperatura y humedad del suelo y su efecto sobre las transformaciones del nutriente en el suelo y su movilidad (adsorción de P,

lixiviación, volatilización y desnitrificación del N), características físico-químicas del suelo (pH, textura), interacción con otros nutrientes (N-P), el sistema de labranza, costo y disponibilidad de maquinaria.

El fertilizante utilizado como arrancador, aplicado en banda por debajo o al costado de la semilla, a la siembra mejora el desarrollo inicial de la raíz, sobre todo con labranzas conservacionistas, con suelos frescos y húmedos, con siembras tempranas o tardías, o con variedades de alta relación tallo/raíz. La respuesta al arrancador generalmente decrece al aumentar el nivel de nutrientes en el suelo, pero si se aplica con suelos frescos y húmedos hay respuesta a pesar de contar con un buen nivel de nutrientes en el suelo.

Los sistemas de cultivo que dejan alto nivel de cobertura de residuos (como la siembra directa) usualmente responden bien al fertilizante como arrancador. Debe recordarse que el aumento de residuos en superficie mejora la infiltración de agua y origina temperaturas del suelo más bajas, aumento de materia orgánica en superficie y por ello cambios en la compactación y pH del suelo. Todo esto influye en la actividad microbiana y por lo tanto en la mineralización e inmovilización de nutrientes.

¿Cuándo fertilizar?

Desde la aplicación de un fertilizante al suelo hasta que los nutrientes son absorbidos por el cultivo pueden ocurrir varios procesos de naturaleza biológica y fisicoquímica que afectarán su eficiencia. Los nutrientes aplicados están expuestos a interacciones químicas complejas y a una competencia entre la flora de microorganismos del suelo y las raíces de la planta. Los procesos que reducen la disponibilidad de los nutrientes para el cultivo son más importantes cuanto mayor sea el lapso de tiempo transcurrido entre la aplicación del fertilizante y la absorción del nutriente por el cultivo. Aumentar la eficiencia agronómica del fertilizante aplicado es uno de los principales objetivos del manejo de la fertilización.

Actualmente los esfuerzos se centran principalmente en el nitrógeno (N), ya que es el factor de manejo más importante en los rendimientos a escala global, es el de menor eficiencia relativa, (entre el 30 y el 50 %) y además por que es necesario sostener el rendimiento sin poner en riesgo la calidad del ambiente. Los procesos biológicos como la desnitrificación y la inmovilización reducirán la disponibilidad del N para el cultivo. El mismo efecto provocan procesos químicos y físicos como la fijación, la lixiviación o la volatilización.

Una situación ideal implicaría que el nutriente estuviese disponible cuando se produjeran los requerimientos del cultivo. Lograr la gradualidad en la liberación del nutriente ha sido el principal objetivo del desarrollo de los fertilizantes de liberación lenta, de los inhibidores de la nitrificación e inhibidores de la ureasa. La siguiente figura ilustra esta situación “ideal”

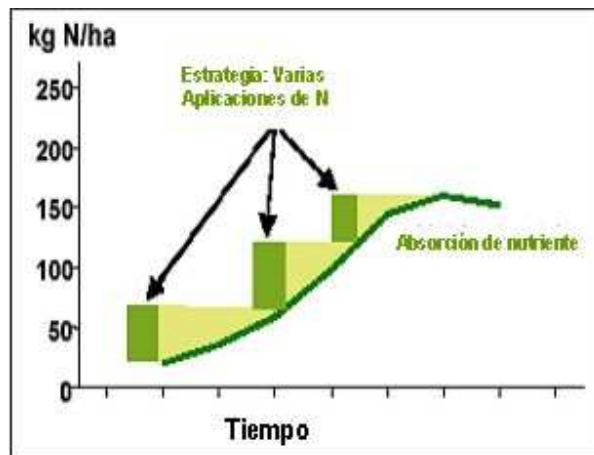


Sin embargo, como ya se explicara, estos productos tienen el inconveniente de su alto costo (entre 4 y 12 veces más caros que los productos solubles comunes). Por esta razón, solo los cultivos de alto valor admiten su uso sin un impacto importante en el costo de producción.

Para realizar la aplicación del fertilizante, el productor necesita decidir la dosis correcta a la siembra. Esto es un desafío importante ya que la demanda de nutrientes cambia de año en año, y más aún de lote en lote. En principio la demanda del nutriente aportado por el fertilizante depende de la demanda del cultivo y de la disponibilidad del nutriente en el suelo. Ambos dependen de las condiciones climáticas durante la estación de crecimiento. La demanda del cultivo puede estimarse en función de la expectativa de rinde, pero variaciones en las condiciones climáticas pueden causar desvíos significativos del crecimiento del cultivo respecto del esperado. De igual manera, esas variaciones afectan la disponibilidad del nutriente.

Cualquier estrategia de fertilización que pretenda basarse en una única aplicación tiene que asumir y manejar ese riesgo. Una dosis excesiva debida a una sobrestimación del rinde reducirá la eficiencia de uso del fertilizante, además de incrementar el costo de producción, mientras que una dosis deficiente no permitirá expresar el potencial de rendimiento del cultivo.

Una alternativa posible es la aplicación dividida de la dosis de fertilizante prevista. Esta práctica permite reducir el tiempo que transcurre entre la aplicación y la absorción del nutriente por el cultivo, además de retrasar la decisión sobre la dosis total de fertilizante a etapas posteriores del crecimiento, cuando se tiene mayor seguridad de los rindes que pueden lograrse y una visión más clara sobre el precio que se obtendrá por la producción. Dividir las aplicaciones del fertilizante permite reaccionar ante condiciones climáticas específicas durante el periodo vegetativo y ajustar de esa manera la dosis a aplicar. El uso de aplicaciones divididas proporciona, entonces, la posibilidad de ajustar la oferta de nutrientes durante el ciclo de crecimiento y disminuir en definitiva el riesgo de la inversión.



Aplicación particionada del fertilizante

De esto se deduce que el objetivo de aplicar una dosis más ajustada de nutrientes es mucho más fácil de lograr con aplicaciones divididas que con una única fertilización, aunque también deberá tenerse en cuenta el costo adicional de particionar la fertilización.

El manejo de la fertilización fosforada, depende aún en mayor medida de la relación de precios insumo/producto (fertilizante/grano), ya que este nutriente sufre procesos de adsorción en el suelo y si bien no se encuentra totalmente disponible para el cultivo, no se pierde fácilmente de la profundidad explorada por las raíces, sino que permanece fijado allí y gradualmente libera P disponible a la solución del suelo. Por ello cuando la relación de precios es favorable, es el momento indicado para incorporar al sistema el P que se va a consumir no sólo en esa cosecha, sino que también puede reponerse parte de lo ya consumido y no repuesto o parte de lo que se va a consumir a futuro.

Conclusiones

Debemos tender a una gestión sustentable de la fertilización, que permita obtener la productividad adecuada, con la mayor eficiencia posible en el uso de recursos.

Estimaciones recientes indican niveles de reposición en los cuatro cultivos principales de grano de la región pampeana (trigo, maíz, soja y girasol) del orden del 25-30% para nitrógeno (N) y 50-55% para fósforo (P), siendo prácticamente nulos para potasio y otros nutrientes esenciales. La baja reposición de nutrientes ha llevado a una disminución considerable de la fertilidad nativa de los suelos y, por lo tanto, de la sustentabilidad física, económica y ambiental de las explotaciones agrícolas. En este marco, la fertilización se convierte en una práctica indispensable para mantener y/o mejorar la sustentabilidad de los suelos y alcanzar rendimientos rentables y sostenidos en el tiempo. Pero debemos ser conscientes de que el mal manejo de ésta, además de resultar económicamente negativa, puede provocar impactos ambientales significativos.

Con el propósito de realizar una gestión sustentable de la fertilización debemos:

- Tener en cuenta la reposición de los nutrientes exportado con la cosecha, especialmente los macronutrientes.
- Prevenir de la lixiviación de nutrientes después del período vegetativo aumentando la superficie protegida con cubierta vegetal en otoño/invierno, y mediante la siembra de cultivos con una capacidad elevada de consumo de nitrógeno. Para esto pueden utilizarse abonos verdes, pero debe tenerse presente el consumo de agua que éstos realizan
- Fertilizar con dosis acordes a rendimientos esperados realistas.
- Realizar un manejo de la fertilización nitrogenada de forma tal de evitar su salida del ambiente explorado por las raíces de los vegetales (evitar su lixiviación, volatilización, desnitrificación, etc.)
- Considerar el efecto del pH sobre los fertilizantes y la disponibilidad de los nutrientes en el suelo.
- Aplicar micronutrientes (fertilizaciones foliares)

No existe la “mejor manera de fertilizar”. La elección del método de aplicación, oportunidad, cantidad y tipo de fertilizante a utilizar varía con las condiciones específicas del lugar, del cultivo y del tipo de producción, por lo que debería basarse en las necesidades y condiciones locales.

En esta clase lo que se brindan son conocimientos y opciones para que Uds. los utilicen con criterio al tomar decisiones en el manejo de la fertilización.

Ing. Agr. Miriam Ostinelli



TRABAJO PRÁCTICO N° 3

Capacidad de uso de las tierras (USDA).

Es el sistema de clasificación más usado del mundo y diversos usuarios de información edafológica se encontrarán con él muy frecuentemente.

Este sistema es una interpretación cualitativa de las unidades cartográficas de las tierras de la región, siguiendo una metodología promovida y creada por el Departamento de Conservación de Suelos de los EEUU (Klingebiel, A.A and Montgomery, P. H. 1961. Land capability classification. USDA. Agricultural Handbook 210, Washington, DC).

Objetivo

Clasificar las unidades cartográficas de suelos de acuerdo a su capacidad para sostener tipos generales de uso, sin degradación o efectos externos significativos, para el planeamiento de empresas agropecuarias.

Los usuarios originales del sistema fueron los Distritos Conservacionistas del Servicio de Conservación de Suelos (SCS), quienes asesoraban a los productores sobre el modo más apropiado de usar sus campos. No se intentó crear planes detallados de manejo, sólo la parte de conservación de esos planes.

Estructura de la clasificación

La clasificación contempla: Clases, Subclases y Unidades de acuerdo a la Capacidad de Uso del suelo.

Clase: es una medida general de bondad de los suelos. I= mejor, VIII = peor.

Subclase: indica las limitantes principales mediante una o más letras.

'e'= erosión,

'w'= exceso de agua,

's'= limitaciones en la zona de enraizamiento (incluye rocosidad, profundidad, salinidad, baja fertilidad natural difícil de corregir, salinidad),

'c'= limitaciones climáticas (temperatura o lluvia).

La clase I no tiene subclases, dado que se considera que un suelo de Clase I no posee limitantes.

Unidad: es una división de la subclase en función de requerimientos de manejo muy similares.

El tipo y grado de limitación son los mismos en una subclase, pero puede haber importantes diferencias de manejo. Por ésta razón podría requerirse separarlas en el mapa de capacidad y en las tablas de recomendaciones.

Desde el punto de vista de los cultivos se han tomado en consideración especialmente aquellos agrícolas, como maíz, Trigo. Soja, girasol, etc., y otros cultivos agrícolas de requerimientos menos exigentes.

Presuposiciones del Sistema de Capacidad de Uso de los Suelos.

Existe una serie de presuposiciones (14) dentro de las cuales se maneja el sistema. Las principales son:

- ❖ Sólo se consideran las características relativamente permanentes, y por lo tanto ciertas características físicas, como rocosidad, tienen más peso que las químicas, como el pH.

- ❖ Dentro de una clase pueden haber suelos muy diferentes pero con el mismo grado de limitaciones.

- ❖ No es una valoración productiva, o sea que la clase IV podría ser más productiva que las superiores, pero también más frágil.

- ❖ No es un intento para determinar beneficios.

- ❖ Se asume un nivel de manejo moderadamente alto.

- ❖ Si se introducen grandes mejoras la tierra deberá ser reclasificada. El costo de las mejoras no está considerado.

- ❖ Los factores geográficos, como distancia al mercado, tipo de rutas, tamaño y formas de las unidades, ubicación dentro del campo, etc., no están incluidos.

Conclusión

El sistema es útil para planeamiento de la conservación y para el agrupamiento de las unidades de los mapas de suelos en grupos generales de manejo.

Los principales problemas que plantea esta metodología son:

- 1) No considera factores económicos, sólo en términos generales.
- 2) La tierra no es evaluada para usos específicos.

RESUMEN DE LAS DEFINICIONES DE LAS CLASES DEL MANUAL 210 (SCS)

a) Tierras aptas para la labranza y otros usos

Clase I

Los suelos de esta clase tienen pocas limitaciones para su uso. Son aptos para producir una amplia variedad de plantas, pudiendo usarse para cultivos labrados y pasturas, como campos naturales de pastoreo y para forestación y recreo.

Ocupan generalmente relieve llano (algunos de los suelos con permeabilidad rápida pueden ser incluidos en la clase I, aunque tengan pendientes suaves), por lo tanto el peligro de erosión es reducido.

Son suelos profundos, bien drenados, con buena capacidad de retención de agua, bien provistos de elementos nutritivos y no se hallan expuestos a inundaciones. En general son productivos y se adaptan al cultivo intensivo.

Los suelos de Clase I sólo requieren prácticas comunes de manejo para mantener su productividad, tanto en lo referente a su fertilidad como su estructura.

Para incorporar los suelos a la clase I en áreas de regadío, la limitación por clima árido debe ser superada por un riego más o menos permanente, y los suelos deben reunir las siguientes condiciones:

- ocupar un terreno casi llano.
- permitir una profunda penetración radicular.
- ofrecer buena permeabilidad y capacidad de retención de humedad.
- soportar elevada capacidad de laboreo para resistir una explotación continuada.

Clase II

Estos suelos tienen algunas limitaciones en lo que se refiere a la elección de plantas, o requieren moderadas prácticas de conservación, generalmente para mejorar la relación aire-agua.

Son suelos utilizables bajo cultivos labrados, pasturas, como campos naturales de pastoreo, para forestación y para conservación de la fauna silvestre.

Las limitaciones que presentan estos suelos se deben a:

- pendientes suaves.
- susceptibilidad moderada a la erosión eólica o hídrica y efectos adversos debido a una erosión anterior.
- profundidad del suelo menor que la ideal.
- condiciones desfavorables de estructura y laboreo.
- salinidad y/o alcalinidad ligera o moderada, pero corregible.
- perjuicios ocasionados por inundaciones.
- limitaciones climáticas leves para el uso y manejo del suelo.

Clase III

Los suelos de esta clase presentan severas limitaciones que restringen la elección de las plantas, o requieren la aplicación de prácticas especiales de conservación o ambas cosas a la vez.

Estos suelos se pueden usar para cultivos labrados, pasturas y como campos naturales de pastoreo, forestación y para conservación de la fauna.

Las limitaciones de estos suelos restringen:

- la cantidad y proporción de cultivos de escarda.

- la duración del tiempo apropiado para la plantación o la siembra.
- el laboreo del suelo y la cosecha.
- la elección de cultivos.

Las limitaciones pueden tener las siguientes causales:

- pendientes moderadamente pronunciadas.
 - alta susceptibilidad a la erosión hídrica o eólica o graves efectos adversos de una erosión anterior.
 - inundaciones frecuentes que dañan los cultivos.
 - permeabilidad lenta del subsuelo.
 - exceso de humedad o cierto estancamiento de agua después de instaladas obras de avenamiento.
 - escasa profundidad del suelo (por duripan, fragipan o claypan) que limita el desarrollo radical y el almacenamiento de agua.
 - baja capacidad de retención de agua.
 - baja fertilidad (difícil de corregir).
 - condiciones climáticas ligeramente adversas.
- Son suelos excesivamente húmedos, poco permeables y de relieve llano, que necesitan un sistema de drenaje y de cosecha que mejore la estructura y las condiciones de laboreo del suelo.
- En áreas irrigadas, estos suelos tienen un uso limitado por:
- existencia de una capa de agua a poca profundidad.
 - permeabilidad lenta.
 - peligro de acumulación de sales o sodio intercambiable.

Clase IV

Los suelos de esta clase presentan limitaciones muy severas que restringen la elección de cultivos y/o requieren un manejo muy cuidadoso.

Se pueden utilizar para cultivos labrados, para pasturas, como campos naturales de pastoreo, para forestación y conservación de la fauna. En estos suelos pueden prosperar sólo los cultivos comunes y es probable que los rendimientos medios de cosecha sean escasos con relación a los costos de producción.

Las limitaciones pueden ser por:

- pendientes pronunciadas.
- gran susceptibilidad a la erosión hídrica o eólica.
- graves consecuencias de la erosión anterior.
- escasa profundidad del suelo.
- baja capacidad de retención de agua.
- inundaciones frecuentes que dañan los cultivos.
- humedad excesiva con peligro de estancamiento de agua después de la instalación de obras de avenamiento.
 - fuerte salinidad o alcalinidad sódica.
 - factores climáticos moderadamente adversos.

En regiones húmedas y áreas de relieve casi plano y drenaje deficiente los suelos de esta clase no están expuestos a erosión, pero se adaptan poco a cultivos intercalados, por el tiempo que demora el suelo en secarse en primavera y por su baja capacidad de producción para cultivos labrados.

Algunos suelos se adaptan bien a uno o varios cultivos especiales tales como frutales y árboles y arbustos ornamentales.

En regiones sub-húmedas y semi-áridas los suelos de la clase IV pueden producir buenos rendimientos de cultivos adaptados en años de precipitaciones superiores a la normal, pero los resultados son bajos en años de precipitación media y nula cuando la precipitación es inferior a la normal.

En años de sequía los suelos necesitan protección aunque haya poca o ninguna posibilidad de obtener beneficios de cosecha.

b) Tierras de uso limitado, generalmente ineptos para la labranza

Clase V

Los suelos de esta clase presentan poco o ningún peligro de erosión, pero encierran otras limitaciones no corregibles que restringen su uso a la producción de pasturas y árboles frutales. Son aptos como campos naturales de pastoreo o para la conservación de la fauna.

Estos suelos ocupan terrenos casi llanos, sufren frecuentes inundaciones por cursos de agua, son pedregosos, tienen excesiva humedad y limitaciones climáticas.

Suelos de esta clase son:

- suelos de riberas de cursos de agua sujetos a frecuentes inundaciones, que imposibilitan la producción normal de cultivos labrados.
- suelos de relieve llano y casi llano con piedras o rocas.
- áreas encharcadas donde la falta de drenaje impide la producción de plantas cultivadas, pero es posible producir vegetación herbácea o arbórea.

Clase VI

Los suelos de esta clase tienen graves limitaciones que los hacen ineptos para el cultivo por lo que su uso queda restringido en gran parte a pasturas, campo natural de pastoreo, forestación o conservación de la fauna.

Las limitaciones que presentan estos suelos son:

- pendientes pronunciadas.
- grave peligro de erosión.
- efectos de erosión anterior.
- pedregosidad.
- somera zona de enraizamiento.
- humedad excesiva o frecuentes inundaciones.
- baja capacidad de retención de humedad.
- salinidad o alcalinidad sódica.
- severas condiciones climáticas.

Clase VII

Los suelos de esta clase tienen limitaciones muy graves que los hacen inadecuados para el cultivo y su uso queda restringido casi exclusivamente al pastoreo, forestación o conservación de la fauna.

Las condiciones físicas de los suelos no justifican la aplicación de mejoras a las pasturas o campos naturales de pastoreo.

Las limitaciones permanentes no corregibles son:

- pendientes muy pronunciadas.
- erosión.
- suelos someros.

- piedras.
- exceso de humedad.
- sales o alcalinidad sódica.
- clima desfavorable.

Clase VIII

Estos suelos presentan limitaciones que hacen imposible su uso para la producción comercial de plantas y solamente son aprovechables para la recreación, conservación de la fauna y protección de las cuencas.

Las limitaciones no corregibles tienen como causales:

- erosión actual o peligro de erosión.
- clima riguroso.
- exceso de humedad.
- piedras.
- escasa capacidad de retención de humedad.
- salinidad o alcalinidad sódica.

Las tierras que se incluyen en esta clase corresponden a tierras yermas, terrenos rocosos, playas arenosas, embanques de ríos, residuos de la minería u otras tierras estériles.

Puede ocurrir que estas tierras necesiten protección, por lo que se implanta vegetación a fin de proteger otros suelos vecinos de más valor, controlar el agua o promover la vida silvestre.

Ing. Agr. Vicente Nakama