

## ASPECTOS FISIOLÓGICOS DE LA PRODUCTIVIDAD VEGETAL<sup>1</sup>

Antonio Roberto Pereira<sup>2</sup>

La fotosíntesis es el proceso fisiológico responsable de la captación de energía solar y su subsecuente transformación bioquímica en compuestos orgánicos que a la vez son transformados en alimentos, fibras, celulosa y energía. El proceso de oxidación de compuestos orgánicos para liberar la energía necesaria para el mantenimiento y crecimiento de las plantas se denomina respiración.

Conceptualmente fotosíntesis y respiración son procesos antagónicos, donde el primero representa ganancia y el segundo pérdida de energía. Esta visión fisiológica distorsionada es el resultado de la filosofía reduccionista que dominó la ciencia desde el siglo XVII. El reduccionismo indujo al estudio detallado de estos dos procesos diferentes, permitiendo grandes avances hasta un nivel molecular; sin embargo, todo proceso fisiológico solo se justifica dentro de un contexto mayor, como parte de un sistema. Para tener una visión amplia y panorámica del sistema, es necesario el desarrollo de modelos integrados de los dos procesos y sus interacciones. Desde este punto de vista, fotosíntesis y respiración pueden ser analizadas como componentes de un sistema autotrófico productivo.

Partiendo del supuesto que el producto de la fotosíntesis puede ser utilizado en el mismo día, McCree (1970), experimentalmente, y Thornley (1970) teóricamente, desarrollaron un modelo que permite cuantificar su utilización y distribución. La Cantidad total de sustrato (s)

producido por la fotosíntesis bruta (Fb), en un intervalo de tiempo (t), está dada por,

$$s = Fb \cdot t \quad (1)$$

Teóricamente, s puede ser utilizado en dos procesos, crecimiento (Sc) y mantenimiento (Sm), esto es,

$$s = sc + sm \quad (2)$$

Crecimiento significa la incorporación de nueva fitomasa; mantenimiento es un proceso de reposición de compuestos degradados, de conservación de los gradientes electroquímicos de las membranas, en fin un proceso de recomposición de las células que no resulta en un incremento de fitomasa (Penning de Vries, 1975 a,b). Sm es totalmente respirado, respiración de mantenimiento, siendo proporcional a la fitomasa existente (W), o sea,

$$Sm = M \cdot W \cdot t \quad (3)$$

Donde M es el coeficiente de respiración de mantenimiento. La ecuación (3) demuestra que cuando mayor es la planta, mayor es su respiración de mantenimiento. Sin embargo, esta no es la única forma de respiración, pues parte de Sc también es respirada (Sr), denominándose ésta respiración de síntesis, liberando energía para convertir lo restante en nueva fitomasa (W). Por lo tanto,

1 Extraído de la Revista Brasileña de Fisiología Vegetal, 1(2): 139-42, 1989.

2 Ing. Agr., Ph D., Investigador Científico VI, Sección de Climatología Agrícola y Centro de Computación, Instituto Agronómico, Campiñas.

$$S = W + Sr + Sm \quad (4)$$

La eficiencia (Y) del proceso de conversión fotosintética está dada por la relación entre el incremento de la fitomasa (W) y la cantidad de sustrato disponible para el crecimiento (Sc), esto es,

$$Y = W/Sc = W/(W + Sr) \quad (5)$$

Substituyendo las ecuaciones (1) y (5) en la ecuación (4), y simplificando la misma tenemos,

$$W/t = Y (Fb - M \cdot W) \quad (6)$$

Donde W/t representa la tasa de crecimiento en la planta. Por lo tanto, la tasa de crecimiento resulta del balance entre la tasa de fotosíntesis y la tasa de respiración de mantenimiento. La ecuación (6) permite cuantificar las interacciones entre crecimiento, fotosíntesis y respiración.

La tasa de fotosíntesis varía mucho entre plantas con metabolismo tipo C4, C3 y CAM de fijación de CO<sub>2</sub> atmosférico. Las plantas tipo C4 son las más eficientes fotosintéticamente y dentro de éstas se destacan maíz, caña de azúcar y sorgo. Las plantas tipo C3 son menos eficientes e incluyen arroz, fréjol, trigo, soya, algodón, maní, patata y mandioca. Entre las de tipo CAM está el aguacate.

Dentro de plantas de una misma especie la tasa de fotosíntesis varía con el cultivo. Sin embargo no hay evidencia experimental de la existencia de una relación positiva entre productividad y tasa de fotosíntesis, ni que seleccionando plantas de mayor tasa de fotosíntesis se tenga mayor productividad (Evans, 1975; Elmore, 1980).

El hecho paradójico de que no exista una correlación entre productividad y tasa de fotosíntesis puede ser aclarado a través de un análisis cuantitativo de crecimiento (índice de rendimiento) y de eficiencia de conversión (Y). En cereales el aumento de productividad resultó de la selección de plantas menos competitivas (Jennings y Aquino, 1968; Donald, 1968), pero con mayor capacidad de localización de productos fotosintéticos en los granos (Donald, 1962; Donald Hamblin, 1976; Duncan et al., 1978; Borlaug, 1983; Snyder y Carlson, 1984; Neyra, 1985). En arroz, Jennings y Jesús (1968) encontraron una relación negativa entre productividad y competitividad, lo cual implica que plantas más competitivas presentaron mayor producción de tallos y hojas y menor de granos; por lo tanto, presentan menor índice de rendimiento. El control de malas hierbas elimina la necesidad de seleccionar plantas altas, con hojas largas y competitivas, permitiendo la selección de plantas que localicen mayor proporción de sus reservas en órganos de importancia económica (Evans, 1975).

Por lo tanto esta tasa de fotosíntesis acarrea una tasa de crecimiento inversamente proporcional al tamaño de la planta, en función de la respiración de mantenimiento. Esto explica en parte la mayor productividad de variedades de tamaño reducido, principalmente en cereales. El valor de M varía principalmente con la temperatura (McCrece, 1970) y con la edad de la planta (Hunt y Loomis, 1970). Cuando mayor es la temperatura, mayor es la actividad metabólica de los tejidos y consecuentemente, mayor la degradación de células; por lo tanto, M aumenta con el aumento de temperatura. La actividad metabólica disminuye con la edad de los tejidos, provocando decrecimiento en el valor de M. Plantas más viejas necesitan, proporcionalmente, menor cantidad de carbohidratos para su mantenimiento.

La eficiencia de conversión (Y) tiene como fuente principal de variación la composición de la fitomasa formada (Penning de Vries, 1975; Penning de Vries et al., 1983). La composición de la fitomasa varía con la especie y también con el cultivar. Basicamente, cinco grupos de sustancias se encuentran en las plantas: carbohidratos, proteínas, lípidos, lignina y ácidos orgánicos. Sin embargo el producto primario de la fotosíntesis son los carbohidratos y su conversión a otros compuestos orgánicos representa un costo energético equivalente a la respiración de síntesis (Sr). De modo general, de un gramo de carbohidrato fotosintetizado resultan (1) 0,404 g de proteínas; (2) 0,33 g de lípidos (3) 0,472 g de lignina; (4) 0,826 g de carbohidratos estructurales; (5) 1,104 g de ácidos orgánicos (Penning de Vries et al., 1983).

Así resulta más claro entender porqué cuando se selecciona plantas para tener un aumento en el valor del contenido de proteína o grasa el proceso esta siempre acompañado de reducción en la productividad, debido a que estos compuestos (proteína) son altamente energéticos, con un alto costo de respiración de síntesis y un bajo coeficiente de conversión. La tabla 1 presenta la composición media y la eficiencia de conversión de algunos cultivos. La composición de algunos cultivos puede diferir sustancialmente de los valores medios presentados. Sin embargo estos datos permiten comparaciones entre las especies citadas. Cabe resaltar que Y decrece con el decrecimiento en el contenido de carbohidratos. En forma relativa 1 tonelada de caña de azúcar o de mandioca equivale a 0.86 toneladas de fréjol.

La tabla 2 muestra que los rendimientos obtenidos en condiciones naturales clasifican a los diversos cultivos de acuerdo con su producción potencial. Solamente para el cultivo de fréjol, debido a algunos problemas económicos de manejo y de sensibilidad a estrés, la productividad obtenida no corresponde a la esperada. Teóricamente, la productividad de fréjol debería ser mayor que a aquellas de soya y

de maní.

Otro aspecto que se destaca es que tanto la media mayor como la media mundial son bastante menores a la máxima productividad registrada. Considerando a la media mayor como la más cercana a la realidad, se observa que la media

mundial varía en un 25%, en el caso del fréjol y 44% en el caso de la soya; de modo general, la media mundial se sitúa alrededor del 30% con respecto a la media mayor observada. Nótese también que las mayores productividades medias no siempre fueron obtenidas en países tecnológicamente más desarrollados.

Tabla 1. Composición media y eficiencia de conversión (Y) de algunos cultivos<sup>1</sup>.

Cultivo	Organo	Composición(% Materia Seca)					Y
		Carb.	Prot.	Lip.	Lig.	Ac. Org.	
Caña de azúcar <sup>2</sup>	Tallo	88	2	1	7	1	0,78
Mandioca	Tubérculo	87	3	1	3	3	0,78
Camote	Tubérculo	84	5	2	3	3	0,76
Papa	Tubérculo	78	9	0	3	5	0,75
Maíz	Espiga (sem-70%)	75	8	4	11	1	0,73
Arroz	Panícula (graos-60%)	76	8	2	12	1	0,73
Trigo	Panícula (graos-85%)	76	12	2	6	2	0,73
Fréjol	Vaina (sem-85%)	60	23	2	7	4	0,67
Girasol	Inflorescencia (sem-44%)	45	14	22	13	3	0,60
Algodón	Capullo (sem-65%;lint-35%)	40	21	23	8	4	0,57
Soya	Vaina (sem-80%)	29	37	18	6	5	0,53
Maní	Vaina (sem-75%)	14	27	39	14	3	0,45

Fuente: 1 Penning de Vries et al. (1983)

2 Valsechi y Oliviera (1964)

Tabla 2. Productividad de algunos cultivos<sup>1</sup>

Cultivo	PRODUCTIVIDAD (t/ha)					
	Máx. Reg.(1)	Mayor Media(2)	Media Mundial(3)	(2)/(1)	(3)/(1)	(3)/(2)
Maíz	23.2	7.5 N.Zelandia	3.0	0.32	0.12	0.40
Arroz	17.8	7.0 Gabón	2.5	0.39	0.14	0.36
Trigo	12.0	5.7 Holanda	1.8	0.48	0.15	0.32
Soya	7.4	3.4 Italia	1.5	0.46	0.20	0.44
Maní	5.0	3.8 Malasia	1.0	0.76	0.20	0.26
Fréjol	5.0	2.4 Egipto	0.6	0.48	0.12	0.25

Fuente: 1 Tanaka (1983)

# EL FOSFORO

## (Primera Parte)

### UN NUTRIENTE ESENCIAL PARA LAS PLANTAS

El fósforo (P) es esencial para el crecimiento de las plantas. No existe ningún otro nutriente que pueda sustituirlo. Las plantas deben tener P para completar su ciclo normal de producción. Es uno de los tres nutrientes principales. Los otros dos son el Nitrógeno (N) y el Potasio (K). La tabla siguiente muestra algunos cultivos y las cantidades de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> que absorben del suelo.

Cultivo	Rendimiento/ha	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> absorbido por todo el cultivo (kg/ha)
Alfalfa	18 t	135
Pasto bermuda	18 t	108
Maíz	10035 kg	102
Algodón	1100 kg	45
Sorgo granífero	8960 kg	94
Naranjas	50 t	62
Maní	4480 kg	44
Arroz	7840 kg	67
Soya	4030 kg	65
Tomates	89.6 t	95
Trigo	4030 kg	46

Nota: El contenido de fósforo de los fertilizantes se expresa como equivalente de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, aun cuando no se presenta P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> como tal en los fertilizantes. El P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> es la designación corriente del contenido relativo de P. En este texto, algunos de los resultados están reportados en términos de P y otros en términos de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Para convertir el P en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, simplemente se multiplica por el factor 2,29. Para convertir de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> a P, se multiplica por el factor 0,43

### EL FOSFORO DESEMPEÑA VARIOS PAPELES EN LA PLANTA

Las plantas absorben la mayor parte del fósforo que necesitan como ion ortofosfato primario (H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup>). También absorben cantidades menores del ion ortofosfato secundario (HPO<sub>4</sub><sup>=</sup>). El pH del suelo influye enormemente en la proporción con que estos iones son absorbidos

por la planta. Otras formas de P también pueden ser utilizadas, pero en cantidades mucho menores que los ortofosfatos.

El P actúa en la fotosíntesis, respiración, almacenamiento y transferencia de energía, división celular y muchos otros procesos de la planta viviente.

Promueve la formación temprana y el crecimiento de las raíces. El P mejora la calidad de numerosas frutas, verduras y cereales. El P es vital para la formación de semillas.

La concentración de P es más alta en la semilla que en ninguna otra parte de la planta madura, como lo indica la siguiente tabla:

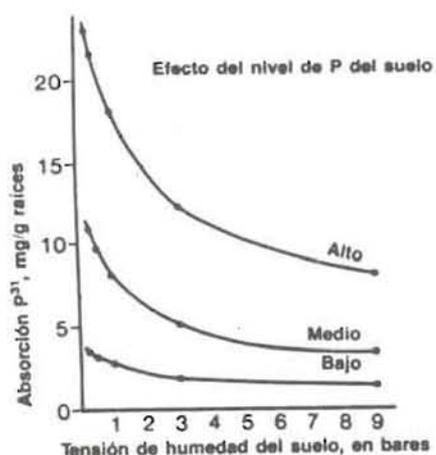
Cultivo	Parte	Rendimiento kg/ha	%P
Maíz	Grano	9400	0.22
	Forraje	8400	0.17
Algodón	Semilla	2240	0.66
	Tallos	2800	0.24
Maní	Nueces	4480	0.20
	Ramas	7170	0.26
Arroz	Grano	6720	0.28
	Paja	7840	0.09
Soya	Grano	3360	0.42
	Paja	7840	0.18
Trigo	Grano	4030	0.24
	Paja	6050	0.12

El P ayuda a que las plántulas y las raíces se desarrollen más rápidamente. El P permite a las plantas soportar inviernos rigurosos. El P aumenta la eficiencia de uso de agua. El P acelera la madurez, lo cual es importante para la cosecha y para la calidad del cultivo (ver tabla siguiente). El P contribuye a aumentar la resistencia a las enfermedades en algunas plantas.

La fertilización con P aumentó los rendimientos de maíz y redujo la humedad de los granos al momento de la cosecha en un suelo con bajo contenido de P, en Illinois.

P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> kg/ha	Rendimiento kg/ha	Porcentaje de humedad del grano %
0	6210	31.8
45	8216	27.8
90	8844	27.0
135	8467	26.9
180	8718	26.5

La absorción de P por las plántulas de maíz disminuye a medida que la tensión de agua del suelo aumenta. Pero niveles altos de P en el suelo ayudan a mantener la absorción del mismo por las plántulas de maíz aún con altas tensiones de humedad (ver gráfica).



## SINTOMAS DE DEFICIENCIA EN LA PLANTAS

El primer síntoma de falta de P es una planta atrofiada. Las hojas pueden deformarse. Con deficiencia severa se pueden producir áreas necróticas en las hojas, frutos y tallos. Las hojas más viejas quedan afectadas antes que las jóvenes. A menudo se observa un color rojizo en las plantas de maíz deficientes en P. Esto también ocurre en otros cultivos, especialmente cuando las temperaturas del medio ambiente son bajas.

Los síntomas visibles, aparte de la atrófia en crecimiento y bajos rendimientos, son en general menos claros que los síntomas de deficiencia producidos por el N y K.

La deficiencia de P es difícil de detectar en los cereales. En ciertas etapas del desarrollo la deficiencia de P puede

dar al cultivo un colorido verde oscuro. Uno debe siempre estar alerta para observar las características típicas de atrofiamiento, y cuando sea posible, confirmar lo que se ve a simple vista mediante análisis de suelo y tejidos.

## FUENTES Y CANTIDAD DE FOSFORO EN LOS SUELOS

El fósforo elemental es químicamente muy activo. Debido a ello no se le encuentra en estado puro en la naturaleza. Se le encuentra solo en combinación con otros elementos.

El P del suelo proviene en su mayor parte de la interperización de la apatita, un mineral que contiene P y Ca, junto con otros elementos como flúor y cloro. A medida que la apatita se descompone y desprende P en el suelo, se forman numerosos compuestos de P incluyendo los dos ortofosfatos que las raíces de las plantas absorben. Estos son generalmente solubles y se les puede encontrar disueltos en pequeñas cantidades en la solución del suelo.

Una parte de P formará compuestos con el Ca, Fe y Al, ya sea su origen la apatita, fertilizante, estiércol, o materia orgánica. La mayoría de estos compuestos no serán utilizados por las plantas debido a que son insolubles. Se dice que se encuentran en forma "invertida" o "fija". Sin embargo, los fosfatos dicálcicos u octocálcicos son relativamente utilizables.

Otras fuentes de P incluyen la materia orgánica, el humus, microorganismos y los cuerpos de insectos y otras formas de vida en descomposición.

La capa arable de la mayoría de los suelos contiene entre 800 y 1600 kg de P por hectárea, combinado con otros elementos, la mayoría en forma no disponible para las plantas. Sólo una cantidad muy pequeña del P total del suelo se encuentra en solución en un momento dado, por lo general menos de 4 kg por ha.

Por lo tanto, a medida que las raíces penetran el perfil del suelo para usar el P disponible, éste debe ser reemplazado en forma continua. El P en la solución del suelo es reemplazado unas 2 veces al día o alrededor de 250 veces durante la estación de crecimiento de cultivos tales como el maíz y la soya. Para que el suelo produzca altos rendimientos debe reabastecer o mantener un nivel de P adecuado en solución.

El diagrama siguiente muestra: (1) cómo la solución del suelo es reabastecida con P, (2) cómo éste se torna no disponible, (3) cómo es removido (o perdido) del suelo.

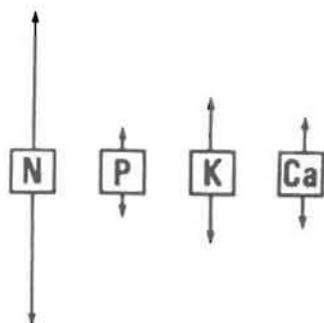


Note la doble flecha entre "P en la solución suelo" y "Minerales". RECUERDE: El P se torna disponible a través de la intemperización de los minerales. Pero también se torna no disponible o "fijo" de tal forma que las plantas no pueden usarlo.

### MOVIMIENTO DEL FOSFORO EN EL SUELO

El P se mueve muy poco en la mayoría de los suelos. Por lo general se queda en el lugar en que es puesto ya sea por la intemperización de los minerales o por la fertilización. De modo que el P que se pierde por lixiviación es muy poco, si bien es cierto que éste se mueve con mayor facilidad en los suelos arenosos que en los arcillosos. La erosión superficial (escurrimiento) puede remover las partículas de suelo que contienen P. Las pérdidas importantes de P ocurren únicamente por escurrimiento o por la remoción efectuada por las plantas.

Prácticamente todo el P del suelo se mueve por difusión, un proceso lento y de corto alcance, que depende de la humedad del suelo. La difusión en los suelos secos es extremadamente baja. El K también se mueve por difusión, pero éste es más soluble que el P, de modo que tiende a moverse a distancias mayores. Si comparamos las distancias a que se mueven el N, P, K y Ca desde su punto de ubicación, vemos cuán libremente se mueve el N (como  $\text{NO}_3^-$ ) en el suelo. Recuerde que esta comparación es sólo relativa, no absoluta.



¿CUANTO se mueve realmente el P en el suelo?. Si el P en un suelo franco (migajón) se encuentra a más de 0,6 cm de una raíz, nunca se acercará lo suficiente para ser absorbido por la raíz. Las raíces de un cultivo en crecimiento, de acuerdo con estimaciones, sólo entran en contacto con el 1% al 3% del suelo de la capa arable.

En términos prácticos, esto significa que el suelo debe tener un suministro adecuado de P para mantener un crecimiento óptimo del cultivo. El nivel de P del suelo en toda la zona donde crecen las raíces debería ser lo suficientemente alto para asegurar P DISPONIBLE durante cada etapa del crecimiento.

Como lo muestra la tabla siguiente, la disponibilidad de P en toda la temporada de crecimiento no puede dejarse de subrayar. La soya absorbe prácticamente la mitad de sus necesidades durante los últimos 40 días de su crecimiento. Si falta P para la mitad de las necesidades aún por satisfacer, más vale olvidarse de los objetivos de cosecha de esa temporada

Porcentaje de P total absorbido por la soya después de siembra				
40 días	80 días	100 días	120 días	140 días
2%	44%	51%	76%	100%

### FACTORES QUE AFECTAN LA DISPONIBILIDAD DE FOSFATO

La mayoría de los cultivos recuperan sólo una pequeña parte del P de los fertilizantes durante el primer año de aplicado. El porcentaje de recuperación es muy variable. Depende de la fuente de P, tipo de suelo, cultivo, método de aplicación y clima. Por lo general es menor del 30%. Pero una buena parte de P residual estará disponible para los cultivos siguientes. La disponibilidad de P depende de numerosas condiciones del suelo:

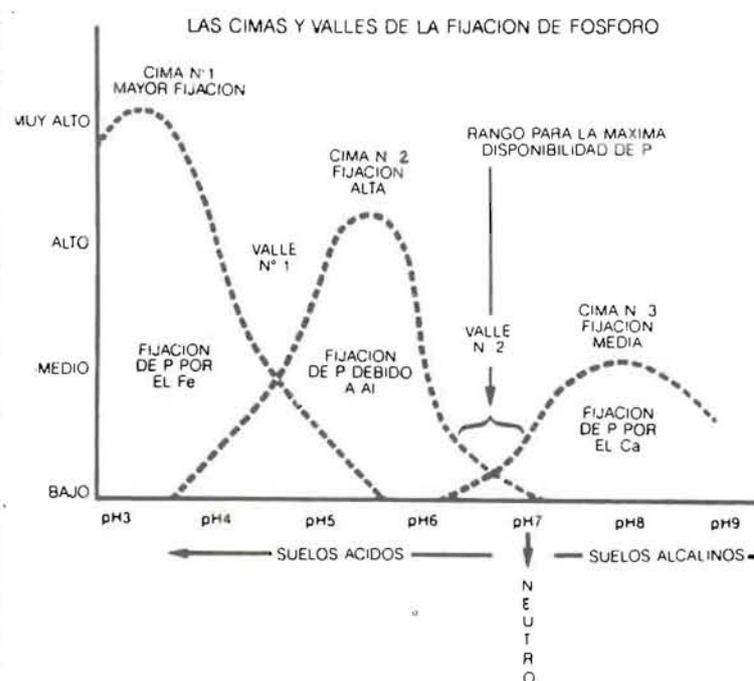
1. TIPO DE ARCILLA -Los suelos ricos en arcillas caoliníticas (en zonas de alta pluviosidad y temperatura) retienen o "fijan" más P agregado que otros suelos. (El término, "fijación", describe la retención de P en los suelos). Independientemente del tipo de arcilla, el P de los fertilizantes es convertido rápidamente a formas menos disponibles.
2. CANTIDAD DE ARCILLA -Los suelos con alto contenido de arcilla fijarán más P que aquellos que

contienen cantidades menores.

3. **EPOCA DE APLICACION** -Mientras mayor sea el tiempo de contacto entre el P añadido y el suelo, mayores serán las oportunidades de fijación. En suelos con alta capacidad de fijación, el cultivo debe usar el P del fertilizante antes de que éste sea fijado. En otros suelos, la utilización de P puede durar muchos años. Este período crítico (cuánto tiempo después de la aplicación puede la planta utilizar el P en forma efectiva) determina el calendario de fertilización. ¿Debemos aplicar el fósforo ocasionalmente en grandes cantidades, como en una rotación, o debemos aplicarlo con mayor frecuencia y en cantidades más pequeñas?
4. **AIRACION** -El oxígeno es necesario para el crecimiento de las plantas y la absorción de nutrientes. También es esencial para la descomposición microbiológica de la materia orgánica del suelo, una de las fuentes de P.
5. **COMPACTACION** -La compactación reduce la aireación y el espacio poroso de la zona radicular. Esto reduce la absorción de P y el crecimiento de las plantas. La compactación también reduce el volumen del suelo que las raíces pueden penetrar, limitando en esta forma su acceso al P del suelo.
6. **HUMEDAD** -Al aumentar la humedad del suelo a niveles óptimos, se aumenta la disponibilidad de P para las plantas. Pero el exceso de humedad excluye el oxígeno, limitando el desarrollo radicular y reduciendo la absorción de P.
7. **CONDICION DEL FOSFATO EN EL SUELO** - Aquellos suelos que han recibido fosfato en cantidad mayor de la que los cultivos han removido por varios años pueden presentar un aumento en el nivel de P - suficiente como para reducir los niveles de fertilización, si el P en el suelo es lo suficientemente alto. No deje que el suelo llegue a niveles bajos en P.
8. **TEMPERATURA** -Cuando las temperaturas son adecuadas para permitir un buen crecimiento de las plantas, la disponibilidad de P no se ve afectada. Las temperaturas altas favorecen la descomposición de la materia orgánica. Pero si las temperaturas son o muy altas o muy bajas, pueden limitar la absorción de P por parte de la planta.

9. **pH DEL SUELO** -La solubilidad de numerosos compuestos del P en el suelo está determinada principalmente por el pH. Los fosfatos de hierro, manganeso y aluminio son poco solubles en el agua. Ellos predominan en suelos ácidos. Existen compuestos insolubles de Ca, Mg y Na a un nivel de pH superior a 7,0. Las formas más solubles y disponibles de P se presentan en la gama de pH entre 5,5 y 7,0. Esto hace que las prácticas de encalado en suelos muy ácidos sean esenciales. (Veáse el Concepto Visual 8).
10. **OTROS NUTRIENTES** -La aplicación de otros nutrientes puede estimular la absorción de P. El Ca en suelos ácidos y el azufre en suelos básicos parecen aumentar la disponibilidad de P, como también lo hace el N amoniacal. Pero la fertilización con zinc tiende a limitar la disponibilidad de P. Las aplicaciones de K tienen poco o ningún efecto.

### La disponibilidad del fósforo varía con la reacción del suelo (pH)



---

# PRODUCCION SOSTENIDA DE ALIMENTOS EN LATINO AMERICA

(Segunda Parte)

## LIMITACIONES PARA OBTENER RENDIMIENTOS ALTOS SOSTENIBLES EN LATINO AMERICA.

En muchos casos, la búsqueda de altos rendimientos en las zonas tropicales y subtropicales de Latino América se ha circunscrito a investigación a corto plazo con dosis altas de fertilizantes. Aun cuando se han obtenido excelentes respuestas y se ha demostrado la utilidad del uso de altas dosis de fertilizantes para obtener rendimientos altos, la producción comercial en campos de agricultores decrece con el tiempo, en algunos casos substancialmente. Esto indica que no existe productividad sostenida y que en ese momento son otros los factores limitantes de la producción, más allá del uso adecuado de fertilizantes, que deben ser identificados y entendidos.

Se ha determinado que el principal factor limitante de la sostenibilidad de la producción de altos rendimientos de los suelos tropicales y subtropicales es la degradación del suelo. Se ha declarado a la degradación del suelo como "La Crisis Silenciosa" y este fenómeno representa actualmente la más seria limitación para la producción de alimentos. La degradación del suelo no es otra cosa que la reducción de la calidad del suelo para mantener una productividad sostenida. Este es un fenómeno complejo en el cuál factores naturales y humanos contribuyen a la pérdida de la capacidad de producción de suelos [9, 10].

Las proyecciones del potencial de producción en los trópicos no se han cumplido en muchos casos porque se han ignorado los efectos de la degradación del suelo en la producción sostenida de cultivos [9]. Los rendimientos altos obtenidos inicialmente declinan rápidamente y la aplicación de dosis altas de fertilizantes no producen el efecto esperado llevando a la errónea conclusión de que no es necesaria la utilización fertilizantes en dosis adecuadas, aun cuando es evidente que los rendimientos son bajos.

Los procesos de degradación del suelo se manifiestan en la mayoría de los casos a través de problemas de compactación, encostramiento y sellado superficial, salinización, sodificación y erosión hídrica y eólica [9, 11].

Existen una diversidad de ambientes en América Latina y las condiciones limitantes varían dentro de una amplia zona de condiciones climáticas, fisiográficas y de suelo. Estas condiciones hacen que los procesos de degradación del suelo sean diferentes en mecanismo y magnitud y en consecuencia los esfuerzos y metodologías encaminadas a conocer, entender y solucionar estos problemas son también diferentes.

El proyecto de Zonas Agro-Ecológicas de la FAO ha identificado en Latino América los siguientes ambientes agroclimáticos [9]: árido, semiárido, subhúmedo, húmedo, áreas de altas pendientes y zonas frías. En este artículo se usa esta clasificación, que es bastante amplia, para discutir ligeramente los procesos que limitan la producción de rendimientos altos sostenidos en Latino América.

## ZONAS ARIDAS

El alto costo de los sistemas de agricultura bajo riego en zonas áridas y semiáridas obliga a un manejo intensivo de los insumos, principalmente fertilizantes y variedades de alto potencial y a la ocupación continua del suelo, para lograr un eficiente uso del agua. La producción sostenida de altos rendimientos en ciertas áreas áridas y semiáridas de Latino América no ha sido posible por problemas graves de salinización y sodificación. Los suelos afectados con problemas de exceso de sales y sodio son muy difíciles de manejar, el costo asociado con enmiendas es alto y los rendimientos decrecen rápidamente. La recuperación de estos suelos es difícil y costosa. Este factor limitante de rendimientos altos es cada día más agudo y se están perdiendo rápidamente las altas inversiones hechas en la construcción y desarrollo de amplios sistemas de riego. Es crítica la relación agua-clima-suelo para prevenir los problemas de salinización y sodificación y poder mantener agricultura sostenida de altos rendimientos [9].

## ZONAS SEMIARIDAS Y SUBHUMEDAS

Las áreas semiáridas y subhúmedas de Latino América son las que presentan mayor potencial para incorporación de nuevas tierras a la producción [9]. Se pueden citar como ejemplos, los llanos Centrales y Orientales de Venezuela y las sabanas Orientales de Colombia. En el caso de los llanos Centrales de Venezuela los suelos de texturas arenosas o francas presentan severas limitaciones de fertilidad donde prevalecen condiciones ácidas, bajo contenido de materia orgánica, fósforo, calcio y magnesio. Investigación realizada en estos suelos ha demostrado la posibilidad de obtener, con adecuada tecnología que elimina estos factores limitantes primarios, altos rendimientos de cultivos rentables como sorgo y soya [12]. Algunos de estos resultados se presentan en las tablas 3 y 4.

Tabla 3. Rendimientos altos de sorgo obtenidos con adecuado uso de fertilizantes en el estado de Guárico, Venezuela.

Manejo de fertilizantes	Rendimiento kg/ha
150 kg Urea presiembra	3684
300 kg/ha 12-24-12 + 100 kg/ha Urea presiembra al voleo e incorporado	5919
300 kg/ha 12-24-12 presiembra al voleo e incorporado + 100 kg/ha Urea 25 días después de emergencia	6990

Adaptado de Casanova [12]

Se estima que la superficie a sembrarse con sorgo en el estado de Guárico, en Venezuela, en 1990, será de 450.000 ha para cubrir solamente un porcentaje de las necesidades nacionales. La producción de soya se limita a aproximadamente 10.000 ha mientras que casi la totalidad de la soya consumida en Venezuela se importa [12]. Se estima que la superficie a sembrarse con soya será de alrededor de 50.000 ha en 1995 y de 140.000 ha en 1999 [14]. Es evidente entonces el alto potencial de producir altos rendimientos en extensas áreas pero el manejo adecuado de estos suelos, para el mantenimiento sostenido de estos altos rendimientos, no es tan claro todavía.

La labranza convencional de estos suelos ubicados en un paisaje dominado por relieve colinado incentiva la pérdida

de altas cantidades de suelo por erosión [12]. En estas condiciones el horizonte A con mejor contenido de materia orgánica y nutrientes se pierde aceleradamente, exponiendo a la superficie el horizonte B menos fértil y más duro [12], esto indudablemente reduce los rendimientos.

Tabla 4. Rendimiento de Soya a aplicaciones de cal en la Mesa de Guanipa, Venezuela.

P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> kg/ha	Cal	Rendimiento kg/ha
0	No	88
0	Si *	119
230	No	2891
230	Si *	2720

\* Medias calculadas de los tratamientos con 300 y 600 kg/ha de cal.

Adaptado de Solórzano [13].

Se han demostrado las ventajas de la labranza mínima o cero labranza en este tipo de suelos. Esta práctica de manejo reduce la erosión, enriquece el suelo con materia orgánica y permite el uso más eficiente de los fertilizantes y el agua permitiendo de esta forma rendimientos sostenidos. El efecto de varios tipos de labranza en el control de erosión y pérdida de nutrientes, en suelos de Chaguaramas, Venezuela, se ilustra en la tabla 5.

Aun cuando las ventajas de la labranza mínima son obvias existen muchos obstáculos para su uso extensivo a nivel comercial siendo el más importante la falta de equipo apropiado. Una alternativa sería la adaptación de equipo existente que se ajuste a las condiciones de suelo y cultivo a sembrarse [12]. En estas áreas se deben introducir, tan pronto como sea posible, prácticas de manejo del suelo que disminuyan o detengan los procesos de degradación. En áreas nuevas lo ideal sería el iniciar los cultivos comerciales con estas prácticas antes que la degradación del suelo sea de tal magnitud que haga difícil y costosa la obtención de rendimientos sostenidos [9].

Tabla 5. Pérdida de suelos y nutrimentos en relación al manejo del suelo en el cultivo del sorgo. Chaguaramas, Venezuela.

TRATAMIENTO	PERDIDAS			
	SUELO t/ha	MAT. ORG. kg/ha	N	P
Suelos Desnudos	73.8	1313	141.4	2.39
Lab. Convencional	17.3	392	36.0	1.39
Lab. Mínima	2.1	52	4.7	0.19

Adaptado de Casanova [12].

### ZONAS HUMEDAS

Las zonas húmedas de América Latina comprenden extensas áreas de compleja diversidad que en general están cubiertas de bosques naturales con ecosistemas frágiles. La deforestación acelerada de estas áreas tiene efecto en el clima local y un no bien definido efecto en el clima mundial [9]. En general la deforestación se inicia con un proceso de tala y quema del bosque efectuado por agricultores sin tierra que utilizan las áreas deforestadas para producir cultivos itinerantes. Los factores socio-económicos que acentúan estos procesos son variados y complejos pero el resultado final es que este tipo de agricultura no es sostenible y más bien incentiva la deforestación y la degradación del suelo [9, 15, 16].

Investigación ha demostrado que se puede reducir la tasa de deforestación al desarrollar y adaptar técnicas sostenibles de manejo que permitan utilizar las áreas ya desmontadas con cultivos continuos por tiempo indefinido. Se ha acumulado suficiente evidencia que permite asegurar que es posible la producción de cultivos en las zonas tropicales húmedas con el adecuado uso de cal, fertilizantes, rotaciones y prácticas de conservación de suelos. Se ha sugerido que la mayor productividad del suelo bajo estas condiciones de manejo reduciría la deforestación y por cada hectárea manejada con esta tecnología de 5 a 10 hectáreas serían salvadas de ser deforestadas [17].

Por otro lado es poco probable que los agricultores migratorios estén en condiciones de cambiar rápidamente a sistemas de producción continua debido, entre otros factores, a la falta de crédito y a la limitada infraestructura que no permite ni obtener insumos ni vender los productos. En estos casos son más útiles sistemas intermedios de bajos in-

sumos, como transición a sistemas más intensos como agroforestería, pasturas con leguminosas y rotaciones continuas de cultivos [15, 16]. La tecnología de bajos insumos utilizada en estos sistemas de transición hace uso de cultivos de especies adaptadas a las limitaciones de suelos, principalmente acidez, para minimizar pero no eliminar insumos como fertilizantes y cal y maximizar el reciclaje de nutrientes [15].

En suelos planos bien drenados de los trópicos húmedos se puede desarrollar agricultura mecanizada continua y sostenida usando cal y fertilizantes. Esto permite producir alimentos en forma estable en menos cantidad de tierra y se reduce la necesidad de deforestar extensas zonas de bosques naturales para producir alimentos [17]. La posibilidad de obtener rendimientos sostenibles en estas condiciones ha sido documentada en oxisoles de Manaus, Brasil [18] y en vertisoles de Yurimaguas, Perú [17]. En el último caso un sistema continuo que produce dos cultivos al año ha permanecido estable por 17 años con un mejoramiento de las propiedades químicas y sin deterioro de las propiedades físicas del suelo [17].

Es importante aclarar que todos estos sistemas de producción buscan utilizar eficientemente, con agricultura sostenible, los suelos ya deforestados en búsqueda de disminuir y eventualmente eliminar la deforestación.

### ZONAS CON PENDIENTES ALTAS

Estas zonas se encuentran localizadas en los Andes y Centro América. En el pasado se establecieron en estas áreas poblaciones relativamente densas pero estables que aprovecharon de las condiciones de clima moderado, disponibilidad de agua y suelos de buena fertilidad para asentarse [9]. La presión sobre la tierra, producto del rápido crecimiento poblacional, ha desencadenado problemas sociales y ambientales que han promovido un acelerado proceso de erosión que ha degradado el suelo a niveles extremos.

En estas condiciones la producción de rendimientos sostenibles es muy difícil. Es alarmante la consistente tendencia a obtener menor cantidad de alimentos frente a una población creciente. Es claro además que en estas áreas ya no existe frontera agrícola y que para satisfacer la demanda es necesario incrementar los rendimientos de parcelas pequeñas que han producido tradicionalmente una variedad de alimentos.

El problema es en extremo complejo y muchas de estas áreas han sido abandonadas porque nada crece en estos suelos intensamente erosionados. Este es el caso de extensas zonas de los Andes de Colombia, Ecuador, Perú y

Bolivia. Solamente un programa agresivo de conservación y manejo de suelos permitirá el mantener agricultura sostenida en estas áreas. En muchos casos y en futuro no muy lejano serán necesarios programas de rehabilitación de suelos para poder cubrir la necesidad de producción de alimentos.

#### TIERRAS SIN LIMITACIONES APARENTES

Extensas zonas planas en áreas con clima templado y subtropical, con suelos de buena calidad, son apropiadas para agricultura intensiva y de alta mecanización. Estas zonas tienen el más alto potencial de producción de Latinoamérica pero el uso intenso de la tierra provoca problemas cada vez más graves de degradación del suelo provocados por el uso inadecuado de maquinaria agrícola. Rendimientos muy altos no son sostenibles y la productividad está por debajo del potencial de los suelos y los cultivos [9].

Se ha identificado a la compactación como la principal causa de la degradación física de estos suelos. Este fenómeno afecta directamente el crecimiento y el rendimiento de los cultivos al afectar la tasa de difusión de oxígeno e infiltración del agua y el normal desarrollo de las raíces. Esto finalmente produce la formación de un volumen escaso de raíces que no tienen capacidad de absorber nutrientes y agua eficientemente. Se observan entonces, en suelos profundos sin aparentes limitaciones, síntomas como lento desarrollo de plantas, deformación de raíces, poco enraizamiento, frecuentes volcamientos del cultivo, marchitamiento de las plantas pocos días después de la lluvia y baja respuesta a la aplicación de fertilizantes. Efectos indirectos de la compactación son el incremento del peligro de erosión, encharcamiento, escorrentía, encostramiento y sellado superficial [10, 18, 19].

En general, se deben insentivar prácticas de uso del suelo que eviten la formación de capas endurecidas o que rompan las que ya se han formado para proporcionar un medio adecuado para el desarrollo de las raíces que permita el óptimo aprovechamiento de agua y nutrientes. En la tabla 6 se ilustra un ejemplo del efecto del subsolado en el desarrollo de raíces.

La excesiva compactación del suelo es hoy en día más extensiva que nunca y ejemplos de áreas afectadas son los llanos Occidentales de Venezuela, los valles del Magdalena Medio y Alto y el valle del Cauca en Colombia y la cuenca del Río Guayas en Ecuador.

Estas zonas tienen un alto potencial para producir rendimientos muy altos pero los rendimientos han decrecido en los últimos años.

Tabla 6. Influencia del pie de arado y del subsolado en el desarrollo de las raíces de soja

Fecha	Profundidad de Enraizamiento en cm	
	L. Convencional*	Subsolado +
Julio 1	0	0
" 6	13.2	21.9
" 8	16.0	35.6
" 11	20.6	45.5
" 13	20.6	56.1
" 15	21.3	50.8

\* Pie de arado a 25 cm.

+ Subsulado a 50 cm de profundidad y siembra sobre la línea de subsolado.

Adaptado de Amézquita [20].

#### INVESTIGACION EN MANEJO DE SUELOS A LARGO PLAZO

En la discusión anterior se ha demostrado la posibilidad de obtener altos rendimientos en todos los ambientes de América Latina con el uso adecuado de fertilizantes y otros insumos. Por otro lado es aparente que estos rendimientos altos no se mantienen debido a factores limitantes que no permiten que el potencial de las variedades y el efecto de los fertilizantes se expresen completamente. Dentro de este contexto se hace necesario evaluar métodos de manejo de suelo y cultivos que permitan sostener la producción indefinidamente. Esto será posible con el diseño, conducción y evaluación de experimentos de fertilizantes y manejo de suelos y cultivos a largo plazo.

Los experimentos a largo plazo tienen como objetivo el determinar el potencial de producción y el evaluar la capacidad del suelo para soportar manejos intensivos y mantener los rendimientos. Es sorprendente lo poco que se conoce acerca de la dinámica de macro y micro nutrientes a largo plazo y el efecto de la producción continua en el contenido de materia orgánica y en las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos tropicales y subtropicales. Mas aún la evaluación cuidadosa de los cambios en rendimientos y de la evolución de la fertilidad del suelo, en experimentos a largo plazo, permitirá un mejor conocimiento de los limitantes nutricionales y los problemas de manejo que se encuentran cuando el suelo es sujeto de manejo intensivo [20, 21].

## BIBLIOGRAFIA

8. Tamaka, A. (1990): "Maximum yield research - welcoming address". Proceedings of the 14th International Congress of Soil Science. Maximum Yield Research Symposium, Kyoto, Japan, 1.
9. Benites, J. R., Pla Sentis, I., y Couto, W. (1990): "Manejo de Tierras en Latino América y el Caribe. Problemas Técnicos y Prioridades". Memorias del XI Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, Habana, Cuba, (En Prensa).
10. Brady, M.C. (1986): "Soil and world food supplies". Proceedings of the 13th International Soil Science Congress, Hamburg, Germany, I: 61-79.
11. Pla Sentis, I. (1990): "Methodological problems to evaluate soil physical degradation". Proceedings of the 14th International Soil Science Congress, Kyoto, Japan, I: 96-100.
12. Casanova, E. (1990): "Manejo de suelos en cultivos de importancia agrícola en los llanos centrales de Venezuela". Memorias del Taller de Investigación en Suelos Tropicales, RISTROP, San José, Costa Rica, (En Prensa).
13. Solorzano, P. R. (1990): "Influence of fertilizer and lime on grain sorghum and soybean yields in Mesa de Guanipa área". Better Crops International, 6 (1), 4-5.
14. Gilabert de Brito, J. Pérez, R., y Cid, B. (1989). Estimación de las necesidades actuales y potenciales de fertilizantes y enmiendas en función de los análisis de suelos. MAC, FONAIAP, CENAIAP. Caracas, Venezuela.
15. Sánchez, P. A. y Benites, J. R. (1990): "Cultivos de bajos insumos para suelos ácidos de los trópicos húmedos". Memorias del Taller de Investigación en Suelos Tropicales, RISTROP, San José, Costa Rica, (En Prensa).
16. Sánchez, P. A. (1990): "Iniciativa para la reducción de la deforestación. Un imperativo para la sostenibilidad del mundo en el siglo veintiuno". Memorias del Taller de Investigación en Suelos Tropicales, RISTROP, San José, Costa Rica, (En Prensa).
17. Alegre, J. C. y Sánchez, P. A. (1990): "Manejo de suelos con cultivos continuos en los trópicos húmedos". Memorias del Taller de Investigación en Suelos Tropicales RISTROP, San José, Costa Rica, (En Prensa).
18. Smyth, J. T., Cravo, M. and Bastos J. (1985): "Soil nutrient dynamics and fertility management for sustained crop production on oxisols of the Brazilian Amazon". TROPISOILS technical report, 1985; 88-94.
19. Amézquita, C. (1990): "Algunas consideraciones agroclimáticas y edáficas para uso y manejo integral de suelos". Memorias del Taller de Investigación en Suelos Tropicales RISTROP, San José, Costa Rica. (En Prensa).
20. Amézquita, C. (1990): "Respuesta de los cultivos a la fertilización en áreas de agricultura intensiva". Memorias del Taller de Investigación en Suelos Tropicales, RISTROP, Universidad de Costa Rica, San José, (En Prensa).
21. Agboola, A. (1990): "Long Term Fertilizer experiments experiments". Proceedings of the 14th International Soil Science Congress, Kyoto, Japan, IV:3-4.
22. Juo, A. S. R. (1990): "Long term soil fertility experiments - An overview". Proceedings of the 14th International Soil Science Congress, Kyoto, Japan, IV: 4-8.
23. Wall, P. C. (1989): "Yield limitations in two contrasting cropping systems of Latin America". In "Fertilizer Latin America". Proceedings of the International Conference, Caracas, Venezuela, 9-23.

---

## ANUNCIO DE CURSOS Y SIMPOSIOS

### 1. Seminario Internacional Sobre el Cultivo de Sorgo.

Organizadores: INTSORMIL, ICA, FENALCE

Lugar: CIAT, Cali, Colombia

Fecha: Enero 16-18, 1991

Información y Memorias: Ing. Fernando Gaitán Gaitán

Cra. 97-62

Bogotá D.E.

Colombia

Telf.: 2181755

Fax.: 2189463

---

## **2. Training Workshop**

Developing the Fertilizer Dealer. Emphasizing the Small Farm Sector.

Organizadores: IFDC, Jamaica Ministry of Agriculture, Canadian International Development Agency.

Lugar: Kingston, Jamaica

Fecha: Enero 21-25, 1991

Información y Memorias: Dr. Loren Ahlrichs  
IFDC  
P.O. Box 2040  
Muscle Shoals  
Alabama 35662  
USA  
Telf.: 205 3816600  
Fax.: 205 3817408

## **3. Simposio sobre "Uso Racional de los Fertilizantes en América Latina".**

Organizadores: FETIMEX, Sociedad Mexicana de la Ciencia de Suelo, ADIFAL.

Lugar: Querétaro, México

Fecha: Febrero 6-9, 1991

Información y Memorias: Ing. Fausto Montoya  
ADIFAL  
A.C. Mexicali 52  
Colonia Hipódromo Condesa  
México D.F. 06170  
Tef.: 2864843  
Fax.: 2115715

## **4. II Reunión de la Red Latino Americana de Roca Fosfórica.**

Organizadores: FOSFASUROESTE, Universidad Central de Venezuela,  
Sociedad Venezolana de la Ciencia de Suelo.

Lugar: San Cristobal, Venezuela

Fecha: Marzo 13-16, 1991

Información y Memorias: Dr. Eduardo Casanova  
U.C.V. FAGRO  
Apto. Postal 4579  
Maracay, Aragua  
Venezuela  
Tef.: 584 3419454  
Fax.: 584 3453242

---

---

## PUBLICACIONES DE INPOFOS

Las siguientes publicaciones de INPOFOS se encuentran disponibles sin costo alguno o en ciertos casos con costo nominal.

- **Manual de Fertilidad de Suelos.** Publicación didáctica sobre uso y manejo de suelos y fertilizantes.
- **POTASA: Su Necesidad y Uso en Agricultura Moderna.** Esta publicación cubre aspectos como funciones de potasio en las plantas, necesidades y síntomas de deficiencia y el eficiente uso de fertilizantes potásicos.
- **Fertilización del Banano para Rendimientos Altos.** Aspectos como requerimientos nutricionales, ciclaje de nutrientes, análisis foliar y fertilización se discuten en amplitud en esta publicación.



INPOFOS - INSTITUTO DE POTASA Y EL FOSFORO  
Av. de los Shyris 2260 y El Telégrafo  
QUITO - ECUADOR