

Diagnóstico de los requerimientos de fertilización de cultivos extensivos ¹

Malcolm E. Sumner
Profesor Emérito
Department of Crop and Soil Sciences
University of Georgia
Athens, GA 30622, EE.UU.

INTRODUCCION

Existen más de cincuenta factores que gobiernan el crecimiento y el comportamiento de los cultivos. Estos factores se pueden dividir en tres categorías principales: controlables, parcialmente controlables e incontrolables (Figura 1). Ejemplos de los factores incontrolables podrían ser la luz, la temperatura, el viento, la duración del día y la concentración de CO₂ de la atmósfera. En la mayoría de los casos, el productor está obligado a aceptar las condiciones del medio que se le presentan. Como ejemplo de los factores parcialmente controlables, las precipitaciones pueden ser suplementadas por el riego, los cultivos pueden ser mejorados contra enfermedades y plagas, y algunas propiedades físicas pueden mejorarse, aunque no cambiarse totalmente, con obras de drenaje o enmiendas. Entre los factores controlables, se pueden mencionar dosis y localización de nutrientes, prácticas culturales tales como el espaciamiento entre surcos, densidad de plantas y época de siembra, tipo de cultivo y rotación. Para que un cultivo exprese su máximo rendimiento, es necesario que todos estos factores estén en un nivel óptimo. Si uno o más factores se presenta en niveles sub-óptimos, resultará en una disminución del rendimiento. Por lo tanto, no debemos olvidar que aún estando todos los factores nutricionales en niveles óptimos, una sequía, plagas o cualquier factor no controlable puede resultar en un cultivo improductivo. Esto significa que por más que el suelo sea deficiente en algún nutriente en particular, la aplicación de ese nutriente al suelo no garantizará un incremento en los rendimientos, ya que puede haber otros factores no nutricionales que pueden ser más limitantes.

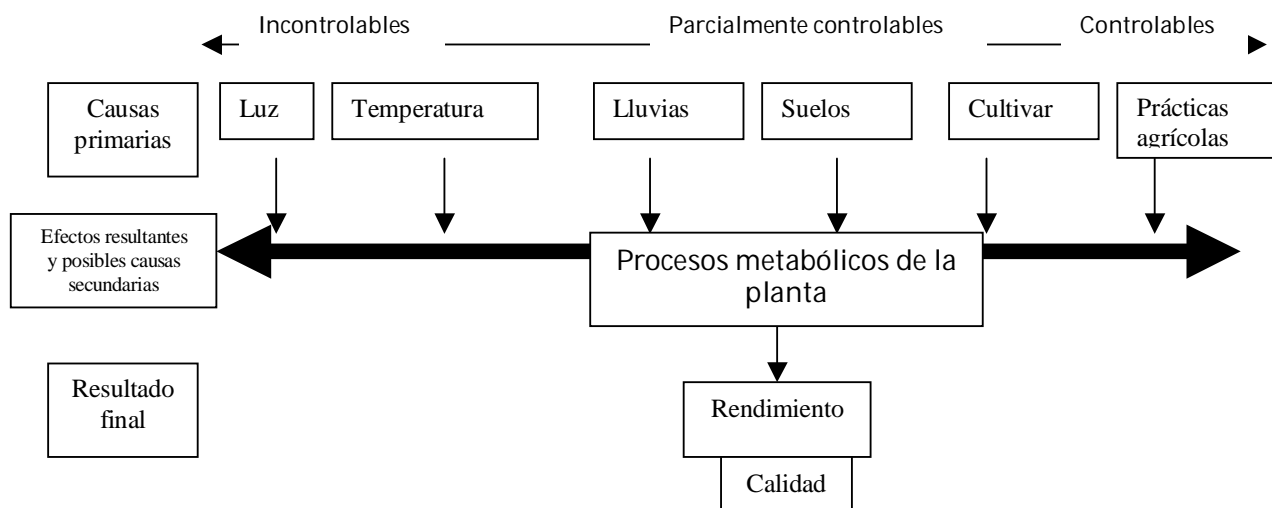


Figura 1. Esquema de las interrelaciones entre el rendimiento del cultivo y su calidad, los procesos metabólicos y los factores externos y genéticos (Beaufils, 1973).

¹ Presentado en el VIII Congreso Argentino de Siembra Directa, AAPRESID. Mar del Plata, 16-18 Agosto 2000.

En cierto modo, predecir los requerimientos de fertilización de un cultivo se parece al juego del "blackjack", donde es bien sabido que los jugadores que piden cartas pueden incrementar las chances de ganarle a la banca, pero a la vez todos saben que no siempre se gana en todas las manos. Lo mismo sucede cuando se fertiliza un cultivo. En una determinada estación del año, todo lo que uno espera es incrementar las chances de obtener una respuesta al agregado de un fertilizante, la cual solo será posible si todo el resto de los factores están en un nivel óptimo o cercano a el, y si el nutriente en el suelo es limitante. Así, si por ejemplo un análisis de suelo diagnostica correctamente una deficiencia de fósforo, la aplicación de un fertilizante fosfatado puede no tener respuesta en rendimiento si la humedad es limitante en ese año; sin embargo, se espera tener respuesta en ese suelo en un período de años cuando el resto de los factores sean menos limitantes. En este contexto deben evaluarse las opciones disponibles para evaluar el estado nutricional de un suelo y un cultivo. Básicamente, existen dos aproximaciones al problema: el análisis de suelo y de planta.

¿QUE PODEMOS APRENDER DEL ANALISIS DE SUELO Y DE PLANTA?

Los nutrientes en el suelo se hallan en distintas formas que varían en nivel de disponibilidad. Por ejemplo, muchos nutrientes se encuentran en la solución del suelo (inmediatamente disponibles pero en pequeñas cantidades), en forma intercambiable (rápidamente disponible en grandes cantidades), o dentro de la estructura cristalina de las arcillas (lenta a muy lentamente disponible en grandes cantidades). Para que un análisis de suelo provea información significativa para predecir requerimientos de fertilización de un cultivo, debe ser capaz de evaluar las cantidades del nutriente en aquellas categorías que estarán disponibles para el cultivo a diferentes tasas a lo largo de la estación de crecimiento. Es mucho más fácil decir esto que hacerlo. La mayoría de los análisis de suelo son llevados a cabo con extractantes de soluciones salinas o ácidas que remueven una fracción no conocida del nutriente en las categorías anteriormente mencionadas. Al ser esta una aproximación empírica, la extracción debe reproducirse en forma exacta en cada análisis para que tengan validez los resultados. En esta aproximación, se asume que un simple extractante con una solución particular y en poco tiempo (5-30 minutos) puede remover una cierta cantidad de nutriente equivalente a la cantidad que absorbería un cultivo durante toda la estación de crecimiento. Desde ya que esta aproximación puede presentar potenciales problemas. Recientemente, el uso de resinas aniónicas y catiónicas que simulan más exactamente la absorción de nutrientes por las raíces ha ganado popularidad. De todas maneras, los resultados de los análisis de suelos deben dividirse en categorías que predigan la probabilidad de obtener respuesta a un nutriente en particular. Para lograr esto se usan ensayos a campo en los cuales las respuestas a un nutriente en particular se calibran con los valores de determinaciones de muestras obtenidas inmediatamente antes de fertilizar.

Por otro lado, el análisis de planta que es semejante al análisis de sangre, indica lo que absorbió la planta de toda la oferta. El análisis de tejido está calibrado de manera similar al análisis de suelos dividido en categorías de deficiente, suficiente, y excesiva. Si el nivel de nutrientes de una hoja esta en el rango de deficiencia, no necesariamente se observa respuesta a la aplicación de ese nutriente, si los niveles de otros nutrientes (factores) y su balance no son óptimos. Además, es imposible determinar la cantidad de un nutriente que debe aplicarse al suelo para cubrir una deficiencia a partir del análisis foliar. Los mismos argumentos desarrollados anteriormente para análisis de suelos se pueden aplicar para el análisis foliar. Lo mejor que uno puede hacer es tratar de optimizar el nivel de todos los nutrientes en el suelo y la planta, con la esperanza de encontrar altos rendimientos, siempre que no se encuentre algún otro factor limitante.

Los análisis de suelos y plantas son herramientas complementarias y se usan como guías para determinar cual o cuales son el o los factores más limitantes para el crecimiento del cultivo. Si las muestras de suelo o de tejido son tomadas, analizadas, o interpretadas incorrectamente; es imposible hacer un correcto diagnóstico. Esto resalta la importancia de contar con un consejero experimentado en esta cadena de eventos. La mejor recomendación de fertilización no puede ser realizada por una computadora, ya que no es imposible programar toda la experiencia de un agrónomo experimentado. Las respuestas en rendimiento solamente pueden esperarse donde los nutrientes son los factores más limitantes porque el análisis de suelos y plantas cubre solamente 15-20 de todos los factores que gobiernan el crecimiento de los cultivos.

A pesar de todo lo discutido en cuanto a las probabilidades de alcanzar una correcta recomendación de fertilización a través del análisis de suelo y de planta, se han obtenido numerosos éxitos a lo largo de los años. La razón de estos éxitos se debe a que los nutrientes son muchas veces limitantes y a que, como veremos, tanto el análisis de suelo como de planta evalúan adecuadamente las necesidades de fertilización. La siguiente discusión plantea las preguntas más frecuentes con respuestas que abarcan los distintos problemas involucrados y sus soluciones.

ANÁLISIS DE SUELO

¿Que es el análisis de suelos?

En un contexto general, el análisis de suelo se define como cualquier medición química o física hecha en el suelo, mientras que en forma particular, se refiere a cualquier análisis químico rápido para evaluar el nivel de nutrientes disponibles para la planta, la salinidad, y los elementos tóxicos del suelo. Bajo análisis de suelo, también se han incluido las interpretaciones, evaluaciones y recomendaciones de fertilizantes y enmiendas basadas en los resultados de análisis químicos y en otras diversas consideraciones (Peck y Soltanpour, 1990).

¿Cuándo debo muestrear el suelo?

En el caso de cultivos anuales, tales como maíz, soja, trigo o girasol, las muestras deben ser tomadas al menos algunos meses antes de la siembra del cultivo para dejar suficiente tiempo para hacer las determinaciones, interpretar los resultados, formular las recomendaciones de fertilización, comprar los fertilizantes y/o enmiendas y finalmente aplicarlos en el lote. En rotaciones con labranzas conservacionistas, el cultivo de mayor beneficio económico debe ser tenido en cuenta. En sistemas intensivos, las muestras deben ser tomadas preferentemente una vez al año o al menos una vez cada dos años.

¿Cómo debo tomar la muestra del suelo?

En cultivos bajo labranza convencional, se debería muestrear la capa arable (10-15 cm) mientras que bajo labranzas conservacionistas es preferible muestrear la capa superficial (2-5 cm) ya que todas las aplicaciones son superficiales sin incorporación. Para representar adecuadamente un área de producción, lote o sector del lote, se deberían tomar al menos 15-20 piques (submuestras) que forman una muestra única compuesta. Los piques o submuestras pueden tomarse al azar por todo el lote o en un zig-zag definido a través del lote (Figura 2). Los muestreadores comerciales disponibles son preferibles, pero el corte vertical con una pala también puede ser utilizado. Las submuestras que corresponden a una muestra son mezcladas cuidadosamente sobre una superficie plana cubierta con un plástico para asegurarse de obtener una buena mezcla. Luego se esparce el suelo, se lo subdivide en 4 cuartos y se descartan dos para disminuir el volumen a analizar. Preferiblemente la muestra debería ser secada al aire, particularmente si es probable que pase un extenso período hasta enviarla al

laboratorio. Debe tenerse mucho cuidado de no contaminar la muestra. Nunca deben usarse bolsas viejas o previamente usadas (Sims, 1999).

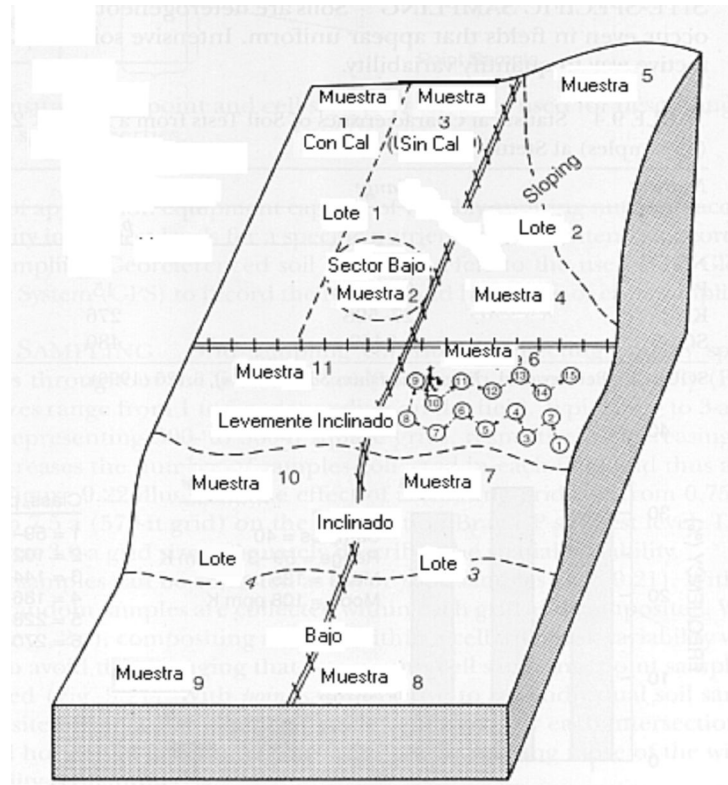


Figura 2. Ilustración de prácticas de muestreo de suelos para ambientes uniformes (Adaptado de *Nebraska Agricultural Extension Service*).

¿Cuáles son los métodos que deberían usarse para extraer los nutrientes del suelo?

Existe una amplia gama de extractantes disponibles para este propósito. Lo importante es que se seleccione el extractante apropiado para cada tipo de suelo. Los suelos Molisoles son los más comunes en la producción de cultivos en Argentina. Si bien el método de resinas (Nuerenberg *et al.*, 1998) es usado para todo tipo de suelos; los extractantes más comúnmente utilizados para Molisoles son acetato de amonio 1M (pH 7) (Haby *et al.*, 1982) o cloruro de amonio para cationes intercambiables (Ca, Mg, K, Na), y el Bray 1 (0.025 M HCl + 0.03 M NH₄F) (Bray y Kurtz, 1945) o el de Olsen (NaHCO₃) para P (Olsen *et al.*, 1954).

En general, ya que las formas disponibles de N (NH₄⁺ y NO₃⁻) y, en cierto modo, S (SO₄²⁻) cambian rápidamente en cortos períodos de tiempo, no es frecuente realizar análisis de suelo solo para N o S. Las recomendaciones de fertilización para N se basan usualmente en el rendimiento esperado y la mineralización potencial del suelo, mientras que las aplicaciones de S se hacen cuando se observan síntomas de deficiencia en el cultivo en años previos. Sin embargo, el análisis de nitratos residuales se ha difundido en áreas de clima seco, en donde las lluvias son insuficientes para lixiviar los NO₃⁻ por debajo de la zona de las raíces (Sims, 1999). Estos análisis pre-siembra (PPNT, preplant N test) requieren que las muestras sean tomadas de 0-60 cm o incluso de 0-100 cm para evaluar la totalidad de los NO₃⁻ en el perfil,

consecuentemente, el muestreo es muy laborioso y demandante de tiempo. En regiones más húmedas, se ha desarrollado el análisis de NO_3^- previo a la aplicación complementaria de N (PSNT, pre-sidedress soil nitrate test), normalmente al estado de 5-6 hojas desarrolladas de maíz, para prevenir los problemas de exceso de fertilización. Este análisis requiere muestrear el suelo a 0-30 cm cuando el cultivo tiene aproximadamente 30 cm de altura, la muestra debe ser rápidamente analizada e interpretada para permitir una aplicación de N. Estos análisis, PPNT y PSNT, podrían ser obligatorios para prevenir la contaminación de napas freáticas con nitratos lo cual ocurre cuando las cantidades de nitratos en el perfil exceden los requerimientos de los cultivos (Figura 3). En ambos casos, PPNT y PSNT, el extractante utilizado es usualmente KCL 2M.

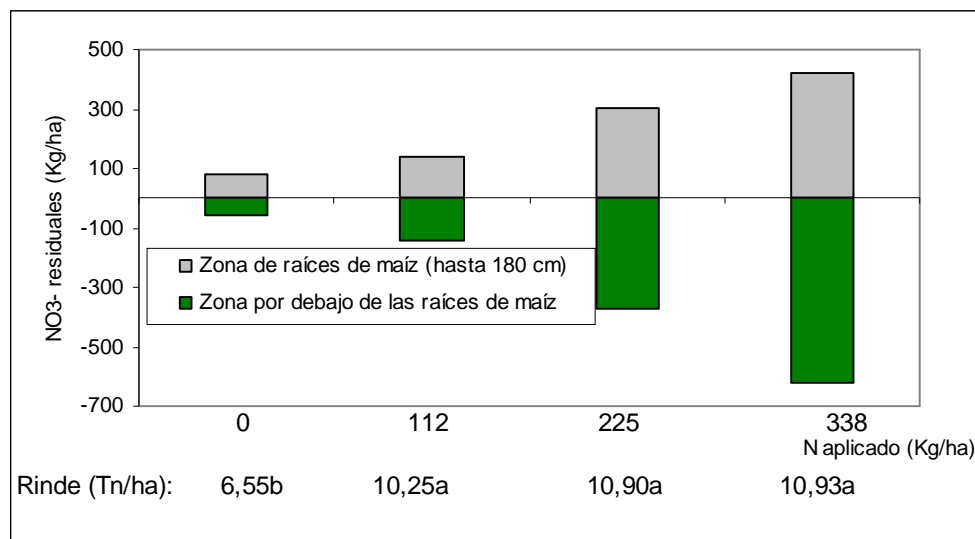


Figura 3. Acumulación de NO_3^- residuales dentro y fuera de la zona radical de maíz irrigado sobre suelos franco limosos (serie Cozad) en función de la dosis de N aplicado y el rendimiento obtenido. Letras distintas indican diferencias significativas en rendimientos ($p > 0,05$) (Olson *et al.*, 1987).

El grado de acidez del suelo debe medirse primeramente con el pH (preferentemente en solución 0.01 M CaCl_2) y cuando los valores de pH en agua son < 5.4 (o $\text{pH}_{\text{CaCl}_2} < 5.0$), se debe el aluminio extractable con una solución KCl 1M (Farina *et al.*, 1980; van Lierop, 1990). La necesidad de encalado se calcula de acuerdo a la cantidad de aluminio intercambiable. Con el mismo fin, se pueden usar los métodos buffer, como el de Shoemaker, McLean y Pratt (Shoemaker *et al.*, 1961). Los micronutrientes (Zn, Cu, Mn y Fe) son generalmente extraídos con agentes complejantes como el DTPA (ácido dietilentriaminopentacético) (Lindsay y Norvell, 1978) y el boro (B) es extraído con agua caliente (Berger y Truog, 1940), aunque en general el análisis de micronutrientes es poco frecuente porque en muchos casos no se dispone de calibraciones adecuadas.

¿Cómo se calibran los análisis de suelo?

El mayor problema de los análisis de suelo es la calibración de los valores del análisis con los rendimientos de los cultivos. Las mejores y más apropiadas calibraciones se obtienen a partir de ensayos a campo en los cuales importantes respuestas en rendimiento han sido observadas en condiciones por lo menos normales o buenas para el crecimiento de los cultivos. Datos de cultivos de bajos rendimientos no deberían ser tenerse en cuenta. Para calibrar un

análisis de suelo para un nutriente determinado, se deben graficar los valores de análisis en función del rendimiento expresado como porcentaje del máximo obtenido en los ensayos a campo para diferentes años como se ilustra en la Figura 4.

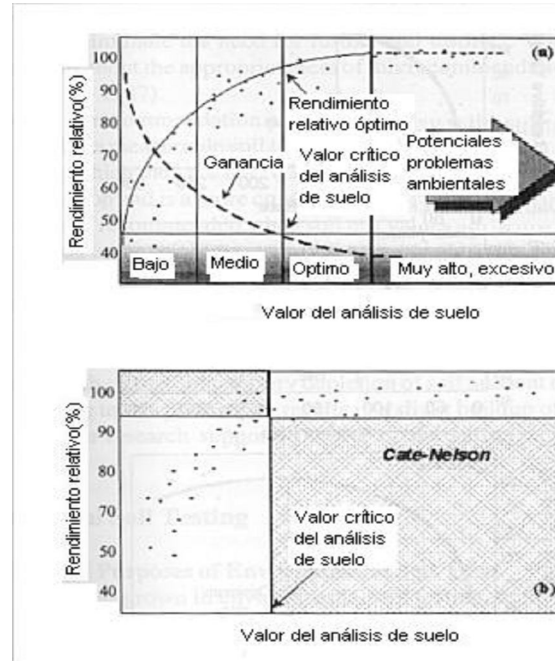


Figura 4. Esquema general de los principios de calibración del análisis de suelo usando (a) modelos curvilíneos y (b) aproximación por Cate-Nelson (Sims, 1999).

Para determinar el punto en el cual el desarrollo de la planta es óptimo y el valor crítico del análisis de suelo asociado a un rendimiento óptimo (93-95% del máximo rendimiento) se utilizan modelos matemáticos (Figura 4a). De igual manera, se puede usar el procedimiento de Cate-Nelson con el cual se generan cuadrantes, en donde la línea horizontal se encuentra en el óptimo rendimiento relativo y la línea vertical minimiza los puntos del cuadrante superior izquierdo e inferior derecho (Figura 4b). El valor del análisis de suelo correspondiente con la intersección de las dos líneas corresponde al nivel o valor crítico. La parte de la curva con respuesta (por debajo del rendimiento óptimo) se subdivide en diferentes categorías que indican la probabilidad de obtener una respuesta a la aplicación de un nutriente en particular (Tabla 1).

Asimismo, los datos de rendimiento y el análisis de suelo de lotes de productores se pueden usar para generar diagramas de dispersión como se ilustra en la Figura 5. Se puede trazar un límite que encierra los datos con las categorías de respuestas señaladas anteriormente. Se puede observar en la Figura 5 que los rendimientos se incrementan con los valores de análisis de suelo para luego llegar hasta un pico y decrecer debido a algún otro factor limitante (nutriente). El P gobierna el rendimiento únicamente en aquellos casos cercanos a la línea límite, lejos de ella, cualquier otro factor menos el P es responsable de los rendimientos decrecientes.

Tabla 1. Categorías de análisis de suelo y recomendaciones generales basadas en las respuestas de los cultivos y el impacto ambiental (Sims, 1999).

Categoría	Definición de la categoría	Recomendaciones
Respuesta del cultivo		
Por debajo del óptimo (muy por debajo, debajo, medio)	El nutriente es considerado deficiente y probablemente limite el rendimiento del cultivo. Existe una alta a moderada probabilidad de una respuesta económica a la aplicación del nutriente.	La recomendación de los nutrientes se basa en la respuesta de los cultivos y a través del tiempo se alcanzarán los rangos de óptima fertilidad. Se recomiendan fertilizantes arrancadores o "starter" en algunos cultivos.
Óptimo (suficiente, adecuado)	El nutriente se considera adecuado y probablemente no limitará el crecimiento del cultivo. Hay una baja probabilidad de respuesta económica al aplicar el nutriente.	Si se realizan anualmente los análisis de suelo, no es necesario agregar ningún nutriente para el cultivo actual. Si no se muestrea anualmente, se recomienda fertilizar para mantener la fertilidad del suelo en el rango óptimo. Se recomiendan fertilizantes arrancadores o "starter" en algunos cultivos.
Por arriba del óptimo (alto, muy alto, excesivo)	El nutriente es considerado más que adecuado y no limitará el rendimiento. Existe una probabilidad muy baja de encontrar respuesta económica al agregar un nutriente. En muy altos niveles existe la posibilidad de producir efectos negativos en el cultivo al aplicar el nutriente.	No se recomienda agregar ningún nutriente. En niveles muy altos a excesivos, una acción curativa será necesaria para prevenir problemas de fitotoxicidad o de medio ambiente.
Impacto ambiental		
Impacto Ambiental Potencialmente Negativo	Con estos niveles de nutrientes, existe un alto potencial de causar degradación ambiental y el monitoreo debe ser permanente. La probabilidad de un problema ambiental depende del sitio en cuestión (e.g., pendiente, hidrología, precipitaciones). El nivel del análisis de suelo es independiente de las categorías por respuesta del cultivo, mencionadas arriba, y pueden estar por debajo o por arriba del óptimo de rendimiento del cultivo	Si existe algún otro factor del lugar que minimice el impacto ambiental, se recomendaría agregar algún nutriente de acuerdo al criterio de respuesta del cultivo. En caso de que otro factor de sitio indique un potencial impacto ambiental, no se recomendarían aplicaciones de nutrientes. Una acción curativa podrá ser necesaria para proteger al medio ambiente.

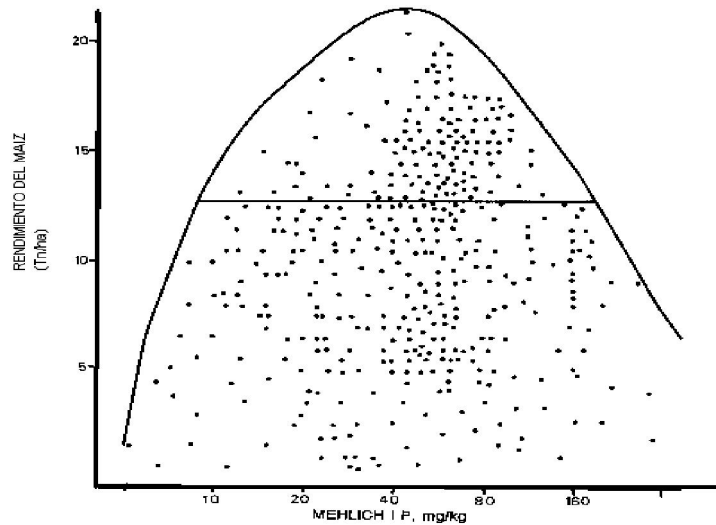


Figura 5. Diagrama de dispersión junto con el límite horizontal de confinamiento para la relación entre el análisis de P y el rendimiento de maíz en suelos de la planicie del sudeste costero del sudeste de Estados Unidos (Sumner, 1987).

La línea horizontal de la Figura 5 indica que un rendimiento de maíz de 12 ton/ha es posible con cualquier valor de análisis de suelo comprendido entre 10 y 180 ppm de P. La cantidad de nutriente a aplicar para cada categoría de análisis de suelo se obtiene de calibraciones previas de la cantidad de nutriente necesaria para elevar el valor de análisis de suelo en un incremento dado (Figura 6).

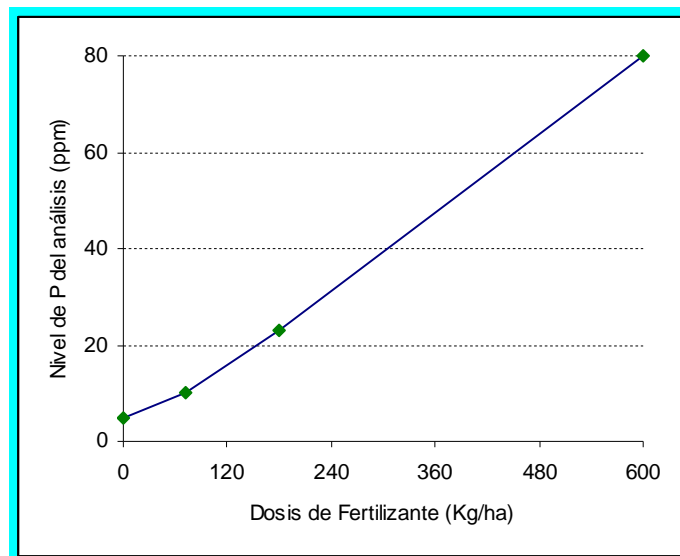


Figura 6. Efecto de la fertilización con P en el contenido de P (Olsen) en un suelo franco limoso calcáreo de Idaho (Westrman, 1977).

¿Cómo se hacen las recomendaciones de fertilización?

Una vez que los análisis de suelo son calibrados en función de los niveles de nutriente necesario para alcanzar un rendimiento relativo dado, y en función de la cantidad de nutriente requerido para elevar el valor del análisis de suelo en una unidad, se hace relativamente

sencillo realizar la recomendación de fertilización. La dosis de fertilizante requerida puede ser obtenida de tablas que relacionan valores de análisis de suelo con el nivel recomendado de nutriente requerido (Tabla 2).

Tabla 2. Recomendaciones de P y K según análisis de suelo para maíz bajo riego en suelos arenosos de la Planicie Costera de Georgia (EEUU) usando Melich I como extractante.

Categorías de análisis de suelo para fósforo	Categorías de análisis de suelo para K			
	Bajo	Medio	Alto	Muy Alto
	0-30 mgK/kg	31-75 mgK/kg	76-125 mgK/kg	> 126 mgK/kg
Recomendación - N-P2O5-K2O (kg/ha)				
Bajo 0 -15 mg P/kg	220 [#] -125-150	220-125-100	220-125-80	220-125-0
Medio 16 -30 mg P/kg	220-100-150	220-100-100	220-100-80	220-100-0
Alto 31 -50 mg P/kg	220-80-150	220-80-100	220-80-80	220-80-0
Muy Alto >51 mg P/kg	220-0-150	220-0-100	220-0-80	220-0-0

[#] Basado en una expectativa de rendimiento de 12,5 tons/ha

¿Qué tan bien funcionan los análisis de suelo?

Existen muchos ejemplos que se pueden citar que muestran que los análisis de suelo funcionan en la práctica, pero aquí solo presentaremos algunos casos. En la Tabla 3 se ve que la respuesta a la fertilización con K sigue un patrón de acuerdo a las categorías de análisis de suelo.

Tabla 3. Respuesta del cultivo de cebada al agregado de fertilizante potásico para diferentes categorías de análisis de suelos en Alberta, Canadá (Walker, 1978).

Categorías de análisis de suelo para potasio	K intercambiable	Proporción del campo mostrando respuesta	Incremento en rinde debido a fertilización con K [#]
	0-15 cm de suelo		
	mg/kg	%	
Extremadamente bajo	< 25	100	> 1000
Muy Bajo	25-50	75	242
Bajo	50-75	66	47
Medio	75-100	24	30
Alto	100-125	18	34
Muy Alto	>125	3	11

[#] Basado en una expectativa de rendimiento de 12,5 tons/ha

En un estudio de la Universidad de Nebraska, se compararon las recomendaciones de fertilización de varios laboratorios con el nivel de nutriente residual. Las recomendaciones de P del laboratorio E (Universidad de Nebraska) mantuvieron el nivel de P dentro de los niveles de suficiencia, mientras que para los laboratorios comerciales, los niveles de P fueron mucho mayores que los de suficiencia (Figura 7). En el caso de potasio, el cual estaba bien provisto el suelo original, los laboratorios recomendaron la aplicación de K. A pesar de las altas recomendaciones de P y K de los laboratorios comerciales, los rendimientos no fueron mayores que los de la Universidad de Nebraska. Además, los laboratorios comerciales recomendaron S y micronutrientes, no observándose respuesta a su aplicación. Se debe ser cuidadoso al seleccionar el laboratorio apropiado y/o a quien interprete los resultados.

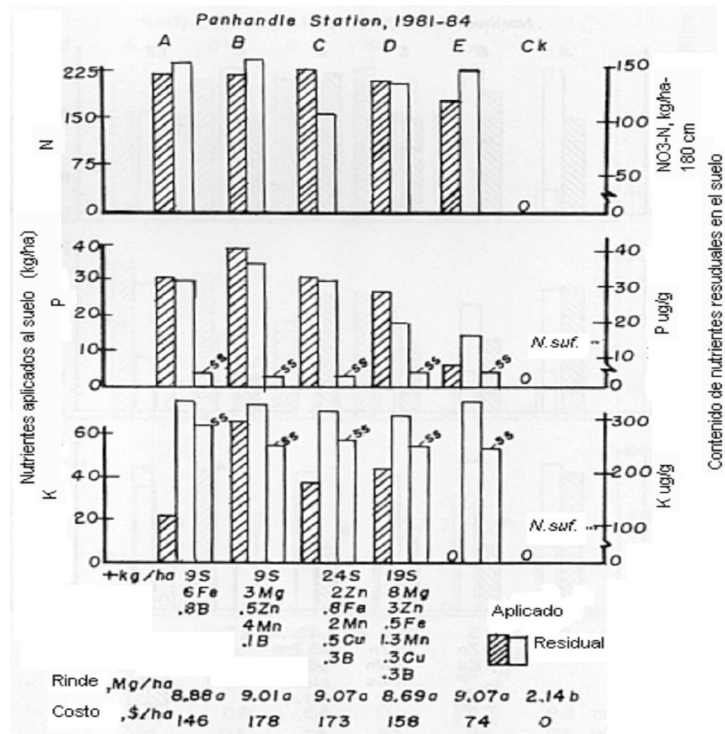


Figura 7. Comparación de recomendaciones de fertilización de laboratorios comerciales (A,B,,C,D) y de la Universidad de Nebraska (E) en relación al rendimiento obtenido, costo del fertilizante y nutrientes residuales luego de la campaña 1984 en un suelo franco arenoso muy fino (Haplustol aridico)(*N.suf*= nivel de suficiencia; *ss*= subsuelo de 15-180 cm). Rendimientos seguidos por letras iguales no difieren significativamente al nivel del 5% (Olson *et al.*, 1987).

ANÁLISIS DE PLANTA

¿Que es el análisis de planta?

El análisis de planta incluye a todo análisis químico que se realiza tanto a campo (análisis rápido de tejido) como en laboratorio (análisis de planta) para evaluar, en función de un contenido óptimo de nutrientes esenciales, si un cultivo es deficiente o no en algún/os elemento/s en particular. A pesar que el análisis rápido de tejido, que usa savia extraída de las hojas para el análisis, es muy útil a campo y provee un diagnóstico instantáneo, no es demasiado preciso y los colores desarrollados en el test son difíciles de cuantificar. En la mayoría de los casos, una muestra de hoja o algún otro tejido se toma en el campo y es llevada al laboratorio para analizar el contenido total de elementos. El resultado obtenido de este análisis de planta debería de ser el mismo independientemente del método o el laboratorio proveedor del servicio, siempre y cuando los análisis se realicen de acuerdo a procedimientos reconocidos. El análisis de planta se define como la determinación de la composición elemental de las plantas, o una porción de ella, generalmente para determinar elementos esenciales para el crecimiento pero también para verificar la presencia de elementos tóxicos para el crecimiento de las plantas, animales o humanos en la cadena alimenticia. En la mayoría de los casos, la parte analizada es la hoja o alguna parte de ella.

¿Cómo debería tomar una muestra de hoja?

Para cada cultivo, se debe muestrear la hoja que por posición y estado de crecimiento ha sido usada para desarrollar las normas de comparación. Por ejemplo, para maíz se muestrea la hoja de la espiga a floración. En la Tabla 4 se muestran algunas sugerencias de procedimientos de muestreo de hoja en algunos cultivos.

Tabla 4. Procedimientos de muestreo en hoja sugeridos para algunos cultivos.

Cultivo	Estadio de crecimiento	Parte de la planta a muestrear	Número de hojas
Maíz	Antes de panojamiento	Hoja entera completamente desarrollada por debajo de la espiga	15-25
	Panojamiento a aparición de estigmas	Hoja entera en el nudo de la espiga	15-25
Soja	Antes o durante floración	Dos o tres hojas completamente desarrolladas de la parte superior de la planta.	20-30
Granos finos	Antes de espigazón	Cuarta hoja superior	50-100
Pasturas	Anterior a la emergencia de la inflorescencia o en el estado óptimo de calidad de forraje	Cuarta hoja superior	50-100
Alfalfa	Anterior o en el 10% de floración	Hojas maduras tomadas cerca del tercio superior de la planta	50-100

¿Cómo se calibran los análisis de planta?

Por razones de simplicidad se discutirán como ejemplos casos de N, P y K, pudiéndose extender la metodología para otros nutrientes.

Aproximación por Valor Crítico y Rango de Suficiencia

En la aproximación por el valor crítico (VC), la calibración se realiza graficando la concentración del nutriente en hoja en un estadio de crecimiento específico en función del rendimiento relativo obtenido de datos provenientes de ensayos a campo con diferentes dosis de fertilizante para un nutriente en particular (Figura 8). El valor óptimo o crítico es aquel al cual se obtiene el 90% del rendimiento relativo máximo. Este valor crítico se determina para cada nutriente en particular y se compara como un standard con el valor determinado en la muestra a diagnosticar. Debido a que en esta aproximación se considera cada nutriente por separado, se ignoran los efectos de interacción entre nutrientes, los que pueden causar grandes variaciones en el valor crítico. Para

cuantificar dichas variaciones, más que un simple valor crítico se usa el rango de suficiencia, aunque esto contribuye a una pérdida en la exactitud del diagnóstico. El mayor problema de este tipo de aproximaciones proviene de la dificultad de asegurar que el tejido para el diagnóstico es tomado en el mismo estadio de desarrollo al usado para establecer el valor crítico.

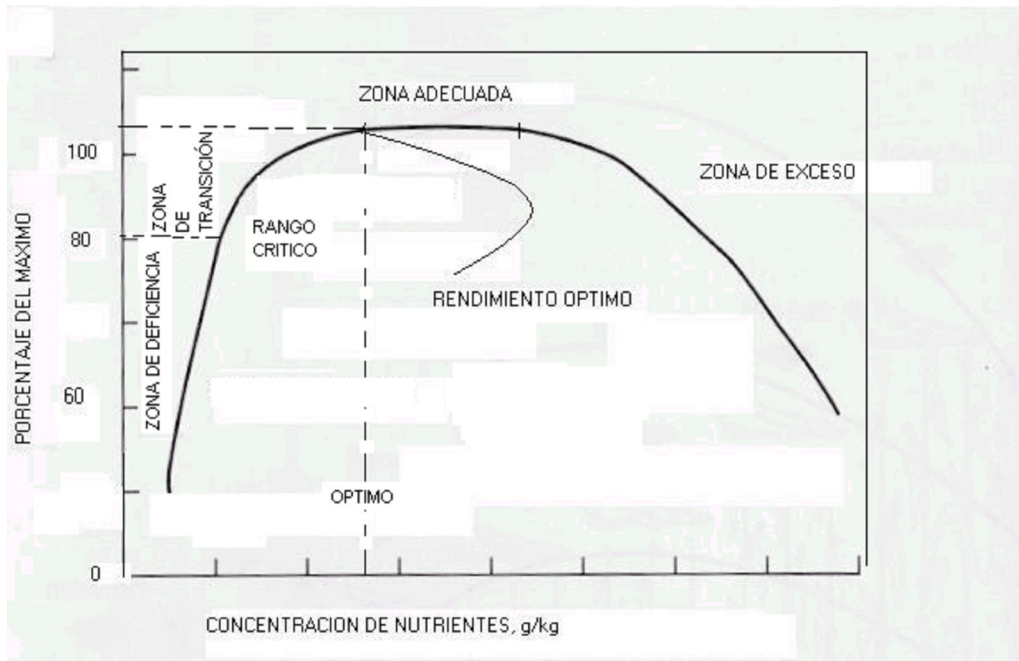


Figura 8. Representación esquemática de las relaciones entre el rendimiento relativo y la concentración de nutrientes de una parte específica de la planta muestreada en un estadio de desarrollo dado (Munson y Nelson, 1990).

Sistema Integrado de Diagnóstico y Recomendación (DRIS)

El problema de la edad del tejido ha sido solucionado por el DRIS (Walworth y Sumner, 1987). Este sistema utiliza relaciones entre nutrientes en lugar de valores críticos para hacer el diagnóstico. En la medida que la planta madura, los tejidos contienen mayor proporción de materia seca que de humedad y nutrientes y, por consiguiente, al expresar la concentración de nutrientes en función del contenido de materia seca (MS), el valor decrece en el tiempo, por ejemplo, $N(\%) = 100N/MS$. Sin embargo, al usar las relaciones entre nutrientes, como ejemplo, $N/P = (100N/MS)/(100P/MS)$, se cancela la MS y la relación N/P se vuelve menos dependiente de los cambios relativos en MS con la edad. Esto se puede observar en la Tabla 5, donde el porcentaje de cambio en las relaciones es menor que para N(%), P(%) y K(%). Esto permite una mayor flexibilidad en el momento de muestreo y un período mayor de tiempo para realizar el diagnóstico.

Tabla 5. Efecto del momento del muestreo en el diagnóstico por DRIS y la aproximación por valor crítico en maíz.

Momento de muestreo (días)	Composición de la hoja (%)			Relación de nutrientes			Índice DRIS				VC ¹	RS ²
	N	P	K	N/P	N/K	K/P	N	P	K	Orden		
30	4,6	0,30	3,4	15,3	1,4	11,3	16	-32	16	P>K=N		
60	3,9	0,26	2,4	15,0	1,6	9,2	19	-25	6	P>K>N		
80	3,4	0,24	1,9	14,2	1,8	7,9	19	-18	-1	P>K>N	P	P
110	3,0	0,20	1,8	15,0	1,7	9,0	20	-24	4	P>K>N	P,K	P
cambio %	35	33	47	7	22	30						

¹ VC= Valores críticos para maíz: N= 3,0%; P= 0,25%; K= 1,9% (Melsted *et al.*, 1969).

² RS= Rango de suficiencia para maíz: N= 2,8-3,5%; P= 0,25-0,40%; K= 1,7-2,5% (Jones, 1967).

Las normas para el DRIS son obtenidas a partir del muestreo de un gran número de lotes de productores (>500) donde se sacan muestras de hojas, se registran datos de los cultivos (año, variedad, fecha de siembra, análisis de suelo); y se evalúa el rendimiento a cosecha. Las normas se calculan como el promedio de todas las observaciones ubicadas en el 10-20% superior (Walworth y Sumner, 1987) o tomando relaciones de valores críticos bien conocidos (Grove y Sumner, 1982). La aproximación por DRIS usa índices calculados como el desvío del valor normal para cada nutriente. Así, un valor negativo indica deficiencia relativa, uno positivo indica exceso y un valor cero indica balance. Al medir balances relativos, la suma de los índices debe ser cero. Los índices para N, P y K se calculan de la siguiente manera:

$$\text{Índice N} = [f(N/P) + f(N/K)]/2$$

$$\text{Índice P} = [-f(N/P) - f(K/P)]/2$$

$$\text{Índice K} = [-f(N/K) - f(K/P)]/2$$

en donde, por ejemplo,

$$f(N/P) = (1000/CV)\{(N/P/n/p) - 1\} \text{ donde } N/P > n/p$$

$$f(N/P) = (1000/CV)\{1 - (n/p/N/P)\} \text{ donde } N/P < n/p$$

y N/P y n/p son los valores para el tejido a diagnosticar y la norma, respectivamente, y CV es el coeficiente de variación para la norma en particular. f(N/K) y f(K/P) son calculados en forma similar.

En la Tabla 6, se compara el método DRIS con el rango de suficiencia. Existe una concordancia razonable entre las relaciones estimadas por normas DRIS y las relaciones calculadas con el valor crítico y el rango de suficiencia para niveles bajos, medios y altos. A pesar de ello, cuando se usan combinaciones de valores altos y bajos del rango de suficiencia para calcular las relaciones, aumenta el desvío y consecuentemente la precisión, como se menciono anteriormente.

Tabla 6. Comparación de normas para DRIS, valor crítico y rango de suficiencia.

Diagnóstico	Relación calculada	N(%)	P(%)	K(%)	N/P	N/K	K/P
DRIS	única	3,26	0,33	2,42	10,1	1,4	6,8
Valor crítico	única	3	0,25	1,9	12	1,57	7,6
Rangos de Suficiencias (Jones, 1967)	Bajo/Bajo	2,8-3,5	0,25-0,40	1,7-2,5	11,2	1,64	6,3
	Medio/Medio				9,8	1,49	6,6
	Alto/Alto				8,8	1,4	6,3
	Bajo/Alto				7	1,1	4,3
	Alto/Bajo				14	2,1	10

¿Cómo se realiza el diagnóstico?

Para el caso de la aproximación por valor crítico, el contenido de nutrientes en hoja simplemente se compara con el del valor crítico. Si son más bajos indican deficiencia y si son más altos se consideran adecuados los niveles. Esto se puede observar en la Tabla 5, donde a los 80 y 110 días, P y PK resultaron deficientes, respectivamente. Este tipo de diagnóstico no es posible realizarlo durante los estadios de crecimiento temprano, y solamente fue aplicable cuando el muestreo se realizó a los 80 días.

Con respecto al rango de suficiencia, se considera una adecuada nutrición cuando el diagnóstico del tejido cae dentro de dicho rango. Como se observa en la Tabla 5, solo fue posible identificar niveles de deficiencia en P a los 80 y 110 días. Nuevamente, el rango de suficiencia es solamente aplicable a los 80 días de edad.

Para el caso del DRIS, el diagnóstico que se realiza mediante los índices indica que si estos nutrientes están realmente influyendo en el rendimiento del cultivo, entonces el P es más limitante que el K, seguido del N que se encuentra relativamente en exceso. Debido a que la aproximación por DRIS minimiza el efecto de la variación en edad del tejido, es posible hacer el mismo diagnóstico en los estadios tempranos del cultivo y a la madurez. Esta es una clara ventaja sobre los otros métodos.

¿Cómo funciona el análisis de planta?

En la Tabla 7, se presenta una comparación de la precisión de los tres métodos de aproximación con datos experimentales en donde el rendimiento responde a N, P y K. Partiendo con el control (000), el diagnóstico por DRIS mostró que el P era el más limitante, tal como lo hizo el valor crítico y el rango de suficiencia. Al seleccionar el tratamiento con adición de P (010), se obtuvo respuesta al rendimiento, indicando que el diagnóstico fue correcto. Sin embargo, el DRIS reveló que ahora era el K el más limitante, y esto se corroboró con los otros dos métodos. Al adicionar K al tratamiento (011), se corroboró nuevamente que el diagnóstico era correcto ya que hay respuesta al rendimiento. En este caso, el DRIS mostró que nuevamente el P era el nutriente limitante, lo que no fue revelado por ninguno de los otros dos métodos que señalaban al N como limitante. Seguidamente, las adiciones de P al tratamiento (021), resultó en un incremento en el rendimiento, confirmando el correcto diagnóstico del DRIS. Recién ahora el DRIS diagnostica como el nutriente más limitante al N, mientras que los otros métodos mostraron fallas en el diagnóstico. Al adicionar N al tratamiento (121) hubo respuesta, confirmando el preciso diagnóstico obtenido con el DRIS; a diferencia de los restantes que no lo registraron.

Tabla 7. Comparación de la precisión alcanzada por el DRIS, valor crítico (VC) y rango de suficiencia (RS).

Tratamiento	Composición de la hoja (%)			Índice DRIS			VC	RS	Rinde (%)
	N	P	K	N	P	K			
000	2,8	0,21	2,2	7	-22	15	N,P	P	28
010	3,2	0,28	1,0	31	13	-44	K	K	49
011	2,9	0,28	2,6	-6	-9	15	N		55
021	2,6	0,26	2,4	-9	-8	17	N	N	60
121	3,16	0,33	2,45	-5	-1	6			75
221	3,4	0,34	2,4	-1	-1	2			100

¿Qué normas están disponibles para su uso inmediato en la Argentina?

Ciertamente, las normas ya publicadas para maíz, soja, trigo, alfalfa y, posiblemente, girasol pueden ser usadas como una primera aproximación. Las normas para maíz han sido ampliamente evaluadas y no deberían requerir más ajustes. A pesar de ser tentativas, las normas presentadas para los otros cultivos no dejan de ser un buen punto de partida (Tabla 8).

Tabla 8. Normas DRIS apropiadas para su uso en Argentina.

Parámetro	Maíz ¹	Soja ²	Trigo ³	Alfalfa ⁴	Girasol ⁵
N(%)	3,26			3,29	
N/P	10,13	14,9	12,74	10,3	12,8
N/K	1,4	2,69	1,45	1,26	1,71
N/S	12,17		14,7		
P(%)	0,33			0,32	
K/P	6,84	5,68	8,8	8,06	7,86
P/S	1,33		1,15		
K(%)	2,42			2,67	
K/S	8,74		10,1		
S(%)	0,27				

¹Walworth y Sumner (1987), ²Beverly et al. (1985), ³Sumner (1981), ⁴Erickson et al. (1982), ⁵Grove y Sumner (1982).

Referencias

- Beaufils, E.R. 1973. The Diagnosis and Recommendation Integrated System. Univ. of Natal Soil Sci. Bul. 1.
- Berger, K.C., and E. Truog. 1940. Boron deficiency as revealed by plant and soil tests. J. Am. Soc. Agron. 32:297-301.
- Beverly, R.B., M.E. Sumner, W.S. Letsch, and C.O. Plank. 1985. Foliar diagnosis of soybeans by DRIS. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 17:3-18.
- Bray, R.H., and L.T. Kurtz. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. Soil Sci. 59:39-45.
- Erickson, T., K.A. Kelling, and E.E. Schulte. 1982. Predicting alfalfa nutrient needs through DRIS. Proc. Wisc. Fert. Agrilime & Pest Manag. Conf. 21:233-246.
- Farina, M.P.W., M.E. Sumner, C.O. Plank, and W.S. Letsch. 1980. Exchangeable aluminum and pH as indicators of lime requirement for corn. Soil Sci. Soc. Am. J. 44:1036-1040.

- Grove, J.H., and M.E. Sumner. 1982. Yield and leaf composition of sunflower in relation to N, P, K, and lime treatments. *Fert. Res.* 3:367-378.
- Haby, V.A., M.P. Russelle, and E.O. Skogley. 1990. Testing for potassium, calcium, and magnesium. pp. 181-227. *In* R.L. Westerman (Ed.) *Soil Testing and Plant Analysis*. Soil Science Society of America, Madison, WI.
- Jones, J.B., Jr. 1967. Interpretation of plant analysis for several agronomic crops. pp. 15-22. *In* G.W. Hardy (Ed.) *Soil testing and plant analysis*. Soil Science Society of America, Madison, WI.
- Lindsay, W.L., and W.A. Norvell. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42:421-428.
- Melsted, S.W., H.L. Motto, and T.R. Peck. 1969. Critical plant nutrient composition values useful in interpreting plant analysis data. *Agron. J.* 61:17-20.
- Munson, R.D., and W.L. Nelson. 1990. Principles and practices in plant analysis. pp. 359-387. *In* R.L. Westerman (Ed.) *Soil Testing and Plant Analysis*. Soil Science Society of America, Madison, WI.
- Nuereberg, N.J., J.E. Leal, and M.E. Sumner. 1998. Evaluation of an anion-exchange membrane for extracting plant available phosphorus in soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 29:467-479.
- Olsen, S.R., C.V. Cole, F.S. Watanabe, and L.A. Dean. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. USDA Circ. 939. US Government Printing Office, Washington, DC.
- Olson, R.A., F.N. Anderson, K.D. Frank, P.H. Grabouski, G.W. Rehm, and C.A. Shapiro. 1987. Soil testing interpretations: Sufficiency vs. build-up and maintenance. pp. 41-52. *In* J.R. Brown (Ed.) *Soil Testing: Sampling, Correlation, Calibration, and Interpretation*. Soil Science Society of America, Madison, WI.
- Peck, T.R., and P.N. Soltanpour. 1990. The principles of soil testing. pp. 1-9. *In* R.L. Westerman (Ed.) *Soil Testing and Plant Analysis*. Soil Science Society of America, Madison, WI.
- Shoemaker, H.E., E.O. McLean, and P.F. Pratt. 1961. Buffer methods of determining lime requirement of soils with appreciable amounts of extractable aluminum. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 25:274-277.
- Sims, J.T. 1999. Soil fertility evaluation. pp. D113-D153. *In* M.E. Sumner (Ed.) *Handbook of Soil Science*. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Sumner, M.E. 1981. Diagnosing the sulfur requirements of corn and wheat using foliar analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45:87-90.
- Sumner, M.E. 1987. Field experimentation: Changing to meet current and future needs. pp. 119-131. *In* J.R. Brown (Ed.) *Soil Testing: Sampling, Correlation, Calibration, and Interpretation*. Soil Science Society of America, Madison, WI.
- van Lierop, W. 1990. Soil pH and lime requirement determination. pp. 73-126. *In* R.L. Westerman (Ed.) *Soil Testing and Plant Analysis*. Soil Science Society of America, Madison, WI.
- Walker, D.W. 1978. Potassium fertilization in central Alberta. *Better Crops Plant Food* 62:13.
- Walworth, J.L., and M.E. Sumner. 1987. The Diagnosis and Recommendation Integrated System (DRIS). *Adv. Soil Sci.* 6:149-188.
- Westermann, R.L. 1977. Proc. 28th Ann. Northwest Fert. Conf. pp. 141-146.

