

DETECCIÓN DE DEFICIENCIAS DE HIERRO EN *Pinus leiophylla* A PARTIR DE LOS EFECTOS DE DILUCIÓN Y CONCENTRACIÓN NUTRIMENTAL

Detection of Iron Deficiencies in *Pinus leiophylla* from Nutrient Dilution-and-Concentration Effects

Miguel Ángel López-López^{1‡} y Elizabeth Estañol-Botello¹

RESUMEN

En un huerto semillero de *Pinus leiophylla* localizado en Montecillo, Texcoco, edo. de México, se presentó un deterioro de la condición sanitaria en 1998. Éste se manifestó principalmente en clorosis, seguida por defoliación y presencia de plagas, en especial *Dendroctonus* sp. Para abordar el problema de la clorosis, se llevó a cabo un análisis foliar; sin embargo, dado que no existen antecedentes sobre los requerimientos nutrimentales de la especie, hubo dificultad para interpretar los análisis foliares, por lo que se ideó un procedimiento que permitiría identificar el factor limitativo en esa población. El procedimiento se basó en los procesos de dilución y concentración nutrimentales que normalmente se presentan en los tejidos vegetales como consecuencia del crecimiento vegetal. Después del diagnóstico, se procedió a corregir la deficiencia detectada, mediante fertilización foliar (sagaquel-Fe, 8% quelato de hierro, 400 mL de producto/100 L de agua, 300 L de solución ha⁻¹, aplicación bimestral). Los resultados obtenidos mediante el procedimiento de diagnóstico diseñado indican que el nutrimento limitativo del crecimiento fue el Fe. La aplicación de fertilizante a base de Fe corrigió adecuadamente la clorosis de los árboles. Se concluye que este procedimiento de diagnóstico es adecuado para detectar la clorosis férrica en *P. leiophylla* y se recomienda probarlo para deficiencias de otros nutrimentos en la misma y otras especies vegetales.

Palabras clave: procedimiento de diagnóstico, diagnóstico nutrimental, interpretación de análisis foliar, corrección de desórdenes nutrimentales.

¹ Colegio de Postgraduados, campus Montecillo, 56230 Montecillo, estado de México.

[‡] Autor responsable (lopezma@colpos.mx).

SUMMARY

A health deterioration of a *Pinus leiophylla* seed orchard located in Montecillo, Texcoco, State of Mexico appeared in 1998. Deterioration consisted of needle yellowing followed by needle loss and insect attacks, especially *Dendroctonus* sp. Foliar analyses were carried out to determine the cause of the yellowing symptom. However, since no background on the nutrient requirements for this species was found, interpretation of foliar analyses became difficult and a new procedure for this purpose had to be developed. The procedure was based on the dilution and concentration processes that take place within plant tissues as a consequence of growth. After the diagnosis procedure, a foliar fertilizer (sagaquel-Fe, 400 mL product /100 L water, 300 L solution ha⁻¹, applications every other month) was applied to correct the deficiency detected. The results obtained by using the designed diagnosis procedure indicate that Fe was the limiting nutrient. The application of iron-based fertilizer appropriately corrected tree yellowing. We conclude that the diagnosis procedure proposed is suitable for detecting iron chlorosis in *P. leiophylla*. We recommend testing the procedure for other nutrients and plant species.

Index words: diagnosis procedure, nutrient diagnosis, foliar analysis interpretation, correction of nutritional disorders.

INTRODUCCIÓN

A la fecha, existen varios procedimientos diseñados para la interpretación de resultados de análisis de tejido vegetal. La mayoría de ellos, sin embargo, se basan en normas o antecedentes nutrimentales sobre la especie vegetal en estudio (Etchevers, 1999), normas cuya elaboración, en ocasiones, resulta ser extremadamente costosa, como en el caso del DRIS [Diagnosis and Recommendation Integrated System (Beaufils, 1973)]. Por otro lado, en México, se carece de antecedentes

sobre requerimientos nutrimentales de la mayoría de especies forestales, en especial de aquéllas que son endémicas. Esta falta de información dificulta el diagnóstico nutrimental y, en consecuencia, la puesta en marcha de programas de fertilización química efectivos y de estudios científicos relacionados con su nutrición.

De lo anterior, resalta la necesidad de generar información sobre requerimientos nutrimentales para las principales especies forestales mexicanas o buscar procedimientos alternos que permitan determinar los factores nutrimentales que limitan el crecimiento de los árboles en un momento dado. Atendiendo la segunda propuesta, en este trabajo se ha intentado desarrollar un procedimiento que, con base en información espacial de tipo nutrimental sobre una población vegetal problema, permita identificar el nutriente limitativo del crecimiento de la especie problema. Los fundamentos fisiológicos del método propuesto se detallan a continuación.

Como consecuencia de la ocurrencia de tasas diferenciales de crecimiento, aun en árboles de igual edad creciendo sobre un mismo tipo de suelo por efectos del microsítio (Garten *et al.*, 1994; Li y Yang, 2004), se generan procesos de dilución y concentración nutrimental dentro de los tejidos del árbol (Mengel y Kirkby, 1982). Esto indica que el crecimiento de los árboles no sólo depende de la concentración nutrimental en sus tejidos, como de manera lógica se espera. La concentración nutrimental es, a su vez, un resultado del proceso de crecimiento del árbol.

El tipo de proceso (dilución o concentración) y el grado en que ocurre dentro de un árbol depende, además de las tasas de crecimiento, del nivel o fase en que se encuentre cada nutriente dentro de la curva de Macy (1936), en la cual se identifican los intervalos de deficiencia, hambre oculta, consumo de lujo y toxicidad. En efecto, si un nutriente se encuentra dentro de la planta en la fase de consumo de lujo, esto significa que su disponibilidad en el suelo es suficiente para el árbol, de forma tal que aun incrementando la tasa de crecimiento del vegetal, la probabilidad de que se produzca dilución de ese nutriente es baja y, en todo caso, poco significativa. Por el contrario, si el nutriente se ubica en la fase de franca deficiencia o en hambre oculta y se logra estimular el crecimiento del árbol, el nutriente necesariamente sufrirá un proceso de dilución.

Estas afirmaciones se apoyan en las aseveraciones de Pritchett (1986) y Larcher (1995), quienes mencionaron que, cuando un nutriente es deficiente

en la planta, un ligero aumento en su disponibilidad induce un incremento en la tasa de crecimiento, mientras que su concentración en el vegetal tiende a ser constante, debido a la ocurrencia del fenómeno de dilución. Lo contrario ocurre con un tratamiento similar cuando el nutriente se encuentra en el árbol en la fase de consumo de lujo.

El hecho de que los efectos de dilución aparezcan en situaciones de fertilidad del suelo diferentes a aquéllas en que sucede el efecto de concentración, ofrece una posibilidad que puede ser aprovechada para detectar deficiencias nutrimentales al identificar las tendencias que sigue la concentración de un nutriente en los tejidos de plantas de la misma especie, con tasas diferenciadas de crecimiento.

El presente trabajo tiene por objeto estudiar la viabilidad de usar los principios expuestos anteriormente para detectar el nutriente causante del deterioro de un huerto semillero de *Pinus leiophylla*.

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se llevó a cabo en un huerto semillero de *Pinus leiophylla* de 180 árboles (2500 m²), ubicado en Montecillo, Texcoco, estado de México. Este sitio se encuentra a orillas de lo que fue el vaso del lago de Texcoco. Los suelos del área tienen fuertes problemas de salinidad y su pH se ubica alrededor de 7.6 (Salazar y Baca, 1998). Como consecuencia del elevado pH del suelo, se tienen graves problemas de precipitación y baja disponibilidad de hierro para los vegetales.

El huerto se estableció en 1991 y, aparentemente, presentó un desarrollo normal hasta el año de 1998. En este año, los árboles empezaron a mostrar clorosis progresiva en el follaje joven. En las etapas posteriores, la clorosis estuvo acompañada por altos índices de defoliación, mortalidad de ramas, ataques de plagas, en especial *Dendroctonus* sp., y mortalidad de 78 árboles (Figura 1).

En septiembre del año 2000 se hizo un diagnóstico nutrimental para asegurar que el problema provenía de una deficiencia de hierro. Para ello, se seleccionaron aleatoriamente 10 árboles, a los cuales se les tomó una muestra de follaje maduro del tercio superior de la copa. En adición, a cada árbol seleccionado se le midió el diámetro normal.

Las muestras se lavaron con agua corriente y se enjuagaron con agua destilada. Posteriormente, se secaron en una estufa de circulación forzada a 70 °C



Figura 1. Estado del arbolado en el año 2000, antes del tratamiento de fertilización. A) Copas con alta mortalidad de follaje y ramas. B) Ataques de *Dendroctonus* sp.

por 48 h y se llevaron al laboratorio. En cada muestra se determinó N, P, K, Ca, Mg, Fe, Zn, Mn, B y Cu.

El N se determinó por el procedimiento microkjeldahl. Para la determinación de los demás nutrientes, el material vegetal se sometió a una digestión húmeda y el extracto se procesó mediante un ICP-AES (Alcántar-González y Sandoval-Villa, 1999) para la cuantificación de los nutrientes.

En agosto de 2005, se obtuvieron virutas de ocho árboles seleccionados aleatoriamente para determinar el tiempo de paso durante tres períodos del desarrollo de los árboles: antes, durante y después del período de estrés sufrido por la plantación. Para la estimación del tiempo de paso correspondiente a cada uno de los períodos mencionados, se seleccionó la amplitud de los anillos de crecimiento correspondientes a los pares de años 1996-1997, 1998-1999 y 2003-2004.

De acuerdo con el principio del procedimiento de interpretación de análisis de tejidos planteado, la tendencia de la concentración de cada uno de los nutrientes debiera guardar relación con las dimensiones del árbol, debido a la ocurrencia de los efectos de dilución y concentración de nutrientes dentro del árbol. Es de esperar que el efecto de dilución ocurra al menos en los casos de nutrientes cuya disponibilidad en el suelo sea insuficiente para mantener un abastecimiento acorde con las tasas de crecimiento de los árboles. La idea central del procedimiento planteado consiste en definir la tendencia que sigue cada uno de los nutrientes con el cambio en alguna dimensión de los árboles. En este caso, la dimensión seleccionada fue el diámetro normal del fuste, el cual se relaciona estrechamente con

la biomasa aérea de los mismos (Waring y Schlesinger, 1985).

Para detectar la tendencia de la concentración de cada nutriente, el procedimiento plantea graficar cada uno de ellos en función del diámetro de los árboles y estimar la pendiente de la curva que resulta en cada caso. La siguiente etapa del procedimiento consiste en comparar las pendientes correspondientes a los diferentes nutrientes para seleccionar aquella que indique mayor dilución (la de menor valor). Esta comparación, sin embargo, plantea el problema de que la pendiente de una curva depende de las escalas de las variables y las escalas de cada nutriente difieren entre sí. Por esta razón, es necesario estandarizar las variables, antes de construir las gráficas, para llevarlas a una media común. Existen varios procedimientos de estandarización de variables, pero uno de los más frecuentemente usados es la estandarización a media cero y varianza uno.

La ecuación para estandarización de la variable Y_o (la variable original) es:

$$Y_i = (Y_i - \bar{Y}_o) / s$$

donde: Y_i es la i -ésima observación de la variable Y_o , la variable estandarizada; Y_i es la i -ésima observación de la variable Y_o , la variable original; \bar{Y}_o es la media de la variable original Y_o ; y s es la desviación estándar de la variable Y_o .

Mediante este proceso de estandarización se logra que todas las variables tengan una media común, lo que significa que las escalas de todas las variables o nutrientes son comparables entre sí, al tiempo que se mantiene la proporción entre las observaciones de una variable. Por otro lado, la estandarización elimina el efecto de la escala sobre la pendiente de la curva.

Después de la estandarización, es posible proceder a graficar las variables, ahora adimensionales, en función del diámetro normal de los árboles, para definir la tendencia de las concentraciones de cada nutriente. A este respecto, pudiera ensayarse el ajuste de las variables a diversos modelos; sin embargo, para el efecto de este método, sólo importa definir la tendencia de las concentraciones para determinar si el nutriente está sufriendo un proceso de dilución o de concentración, de tal manera que es suficiente el ajuste de los datos a un modelo de la forma:

$$Y_s = aX + b$$

donde: Y_s = concentración estandarizada de un nutrimento; X = diámetro normal del árbol (cm); a y b = parámetros estimados (pendiente de la recta y ordenada al origen, respectivamente).

De acuerdo con los principios del método de diagnóstico planteado, la pendiente de la recta corresponde al índice del estado de un nutrimento dado. Las pendientes negativas indican dilución del nutrimento al incrementar el crecimiento. El nutrimento cuya tendencia de su concentración en el tejido presente el menor valor negativo para su pendiente será el nutrimento que más limite el crecimiento. Una pendiente de cero puede indicar suficiencia o, bien, deficiencia secundaria. Las pendientes positivas, necesariamente indican suficiencia del nutrimento, toda vez que su concentración se incrementa al aumentar la biomasa del tejido analizado.

En relación con el tratamiento estadístico de los datos de tiempo de paso, éstos se procesaron mediante análisis de varianza y pruebas de Tukey ($\alpha = 0.05$), habiéndose comparado los tres períodos de desarrollo de la plantación mencionados anteriormente. Esto se hizo utilizando un modelo completamente al azar en el que se incluyeron ocho repeticiones o árboles.

Realizado el diagnóstico nutrimental por el método ideado, y sabiendo de acuerdo con los antecedentes del sitio que el nutrimento definido como limitativo (Fe) es el más frecuentemente deficiente en el área, se procedió a la aplicación foliar de fertilizante a base de hierro. Se usó un producto comercial a base de Fe quelatado denominado SAGAQUEL- Fe. La composición garantizada de este producto indica 8% de quelato de hierro y el restante 92% de solventes y acondicionantes. La dosis seleccionada fue de 400 mL de producto por cada 100 L de agua, aplicándose 300 L de solución ha^{-1} . Las aplicaciones se hicieron cada dos meses durante el primer año y, en forma irregular, cada dos a tres meses, durante el segundo año.

El producto se aplicó usando una bomba aspersora con motor de combustión interna con capacidad para elevar el agua a una altura entre 15 y 18 m, lo que garantizó una adecuada distribución de la solución en las copas de los árboles. Toda vez que el trabajo no se visualizó originalmente como un trabajo experimental, la solución fertilizante se aplicó a la totalidad de árboles, sin dejar algún individuo como testigo, debido a que el problema era tan grave que se supuso que cualquier individuo no tratado moriría en el corto plazo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo con los modelos de regresión insertos en las gráficas de las Figuras 2 y 3, las rectas que muestran las pendientes negativas más pronunciadas (valores menores) son las correspondientes al hierro (-0.0521), cobre (-0.0329), calcio (-0.0291) y zinc (-0.0165). Con excepción del Ca, la lista de nutrimentos que más se diluyeron en árboles de mayores dimensiones incluye micronutrientes, cuya disponibilidad en el suelo es sensible al pH. Las pendientes de las rectas correspondientes a macronutrientes, por otro lado, con excepción de Ca (mencionada anteriormente) y N (pendiente positiva), son cercanas a cero.

Estos resultados son lógicos si se relacionan con las características del suelo del área de estudio, en lo relativo al pH. Ya se ha mencionado que el pH del suelo en el sitio es de alrededor de 7.6. Este valor, de acuerdo con los conocidos efectos del pH del suelo sobre la disponibilidad de nutrimentos, es el factor que probablemente está reduciendo la disponibilidad de estos micronutrientes, mismos que la literatura describe como los mayormente afectados por valores elevados de pH (Mengel y Kirkby, 1982; Pritchett 1986; Larcher, 1995).

La congruencia entre los resultados obtenidos y los esperados, de acuerdo con los valores de pH prevalecientes en el área y con las comunes deficiencias de Fe en gran proporción de las especies arbóreas que habitan el área, representa una prueba de la bondad del procedimiento utilizado para la interpretación de los análisis de tejidos. Una prueba más contundente la representa el hecho de que la fertilización química, atendiendo el diagnóstico obtenido mediante el procedimiento propuesto, permitió eliminar, casi en su totalidad, la mayoría de problemas de salud presentes en el rodal (Figura 4), lo que indica que el diagnóstico fue acertado.

Después de realizado el diagnóstico en el año 2000 y de iniciado el programa de aplicaciones foliares de Fe, la respuesta positiva de los árboles fue conspicua, aproximadamente un mes después de la primera aplicación, y su estado sanitario continuó mejorando gradualmente. A la fecha, los árboles tienen una apariencia cercana a la normal, excepto por la presencia de un número de ramas muertas (Figura 4), resultado del pobre estado nutrimental previo al tratamiento de fertilización.

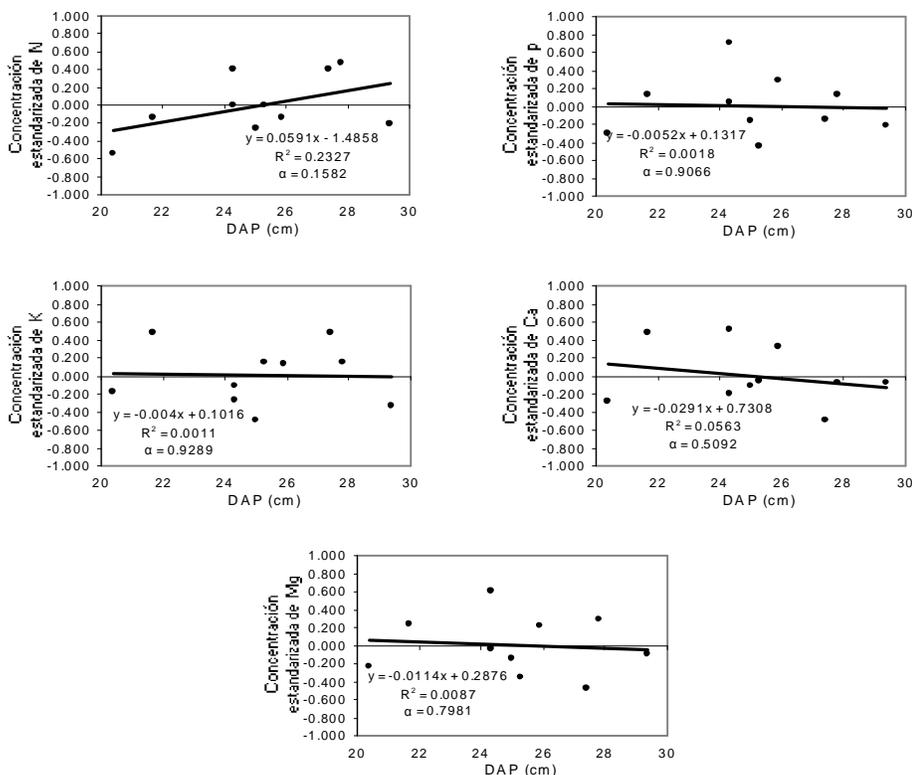


Figura 2. Tendencia de las concentraciones de macronutrientes en *Pinus leiophylla* en función del diámetro normal de los árboles (DAP).

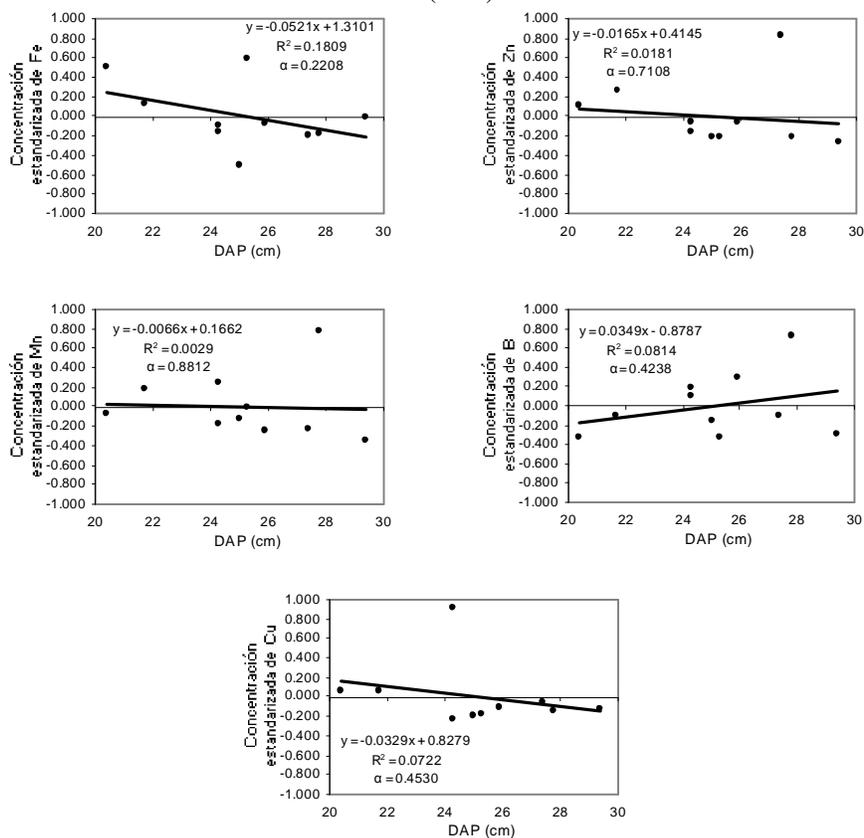


Figura 3. Tendencias de las concentraciones de micronutrientes en *Pinus leiophylla* en función del diámetro normal de los árboles (DAP).



Figura 4. Estado sanitario al mes de noviembre del 2004 de (A) los mismos árboles mostrados en la Figura 1 y (B) apariencia actual de un fuste promedio en el huerto (obsérvese la ausencia de descortezadores).

La prueba de Tukey para el tiempo de paso (Cuadro 1) muestra que el paso de una categoría diamétrica de 5 cm a la inmediata superior fue estadísticamente similar antes y después del período de estrés de la plantación, pero fue significativamente ($\alpha = 0.05$) superior durante el período de depresión del crecimiento. Esto constituye una prueba adicional de la recuperación de la tasa de crecimiento de los árboles, después de iniciados los tratamientos de fertilización a finales del año 2000.

Estas pruebas significan que el procedimiento de interpretación de análisis de tejidos propuesto presenta buena viabilidad, al menos en cuanto a su capacidad para detectar deficiencias de hierro, cuando este nutriente es el que limita el desarrollo de los árboles. No obstante lo anterior, es necesario realizar una serie de pruebas para conocer la bondad del procedimiento en otras especies vegetales, para la detección de deficiencias de otros nutrientes y, en especial, en condiciones ambientales variadas. La experiencia de los autores indica que las deficiencias de hierro en especies forestales son difíciles de detectar a través de análisis de tejidos, por ser este un nutriente extremadamente inmóvil dentro de la planta, por lo que su deficiencia se manifiesta primeramente en las hojas jóvenes (Finck, 1988; Larcher, 1995; Fisher y Binkley, 2000), mismas que, de acuerdo con los procedimientos de muestreo diseñados para el conjunto de nutrientes, se recomienda excluir por ser hojas inmaduras (Wells y Allen, 1985). De acuerdo con esto, es posible especular que el procedimiento propuesto permite identificar

Cuadro 1. Comparación de medias para el tiempo de paso de árboles de *Pinus leiophylla* en Montecillo, estado de México.

Período	Tiempo de paso (años)
Antes del período de estrés	2.023 b [†]
Durante el período de estrés	4.323 a
Después del período de estrés	2.627 b

[†] Valores asociados a la misma letra no son estadísticamente diferentes (Tukey, $\alpha = 0.05$).

deficiencias de nutrimentos más fácilmente detectables que la de hierro.

CONCLUSIONES

- El procedimiento de interpretación de análisis de tejidos planteado permite detectar las deficiencias de hierro en *Pinus leiophylla* y tiene la ventaja, sobre otros métodos, de no requerir de antecedentes nutricionales de la especie. Esta ventaja es muy importante para el caso de las coníferas mexicanas que son endémicas, pues para la mayoría de ellas no existe información alguna sobre los requerimientos nutrimentales, lo que dificulta la puesta en marcha de programas eficientes de fertilización o trabajos de investigación relacionados con aspectos nutrimentales mediante el uso de los procedimientos de diagnóstico hasta ahora disponibles.
- El procedimiento planteado es sencillo, se puede correr un diagnóstico en minutos y no requiere de programas de cómputo especializados.
- Se recomienda probar la capacidad predictiva del procedimiento para los casos de otros nutrientes, otras especies vegetales, incluyendo cultivos agrícolas, y otras condiciones ambientales.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen las valiosas aportaciones de dos árbitros anónimos y de un editor de la Revista Terra Latinoamericana.

LITERATURA CITADA

- Alcántar-González, G. y M. Sandoval-Villa. 1999. Manual de análisis químico de tejido vegetal. Guía de muestreo, preparación, análisis e interpretación. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Chapingo, estado de México.
- Beaufils, E. R. 1973. Diagnosis and Recommendation Integrated System (DRIS). Soil Science Bulletin 1. University of Natal. S. Africa.

- Etchevers-Barra, J. D. 1999. Técnicas de diagnóstico útiles en la medición de la fertilidad del suelo y el estado nutrimental de los cultivos. *Terra* 17: 209-219.
- Finck, A. 1988. Fertilizantes y fertilización. Reverte. Barcelona, España.
- Fisher, R. F. y D. Binkley. 2000. Ecology and management of forest soils. Tercera edición. John Wiley. New York, NY, USA.
- Garten, C. T., M. A. Huston y C. A. Thomas. 1994. Topographic variation of soil nitrogen dynamics at Walker Branch Watershed, Tennessee. *For. Sci.* 40: 497-512.
- Larcher, W. 1995. Physiological plant ecology. 3rd ed. Springer Verlag. Berlin, Alemania.
- Li, M. y J. Yang. 2004. Effects of microsite on growth of *Pinus cembra* in the subalpine zone of the Austrian Alps. *Ann. For. Sci.* 61: 319-325.
- Macy, P. 1936. The quantitative numerical nutrient requirements of plants. *Plant Physiol.* II: 749-764.
- Mengel, K. y A. E. Kirkby. 1982. Principles of plant nutrition. International Potash Institute. Berna, Suiza.
- Pritchett, W. L. 1986. Suelos forestales: propiedades, conservación y mejoramiento. Trad. al español por José Hurtado-Vega. Limusa. México, D. F.
- Salazar-Salazar, O. y G. A. Baca-Castillo. 1998. Comportamiento nutrimental de frambuesa roja cultivada en un suelo alcalino y con aspersiones foliares de urea, Mn y Zn. *Terra* 16: 211-218.
- Waring, R. H. y W. H. Schlesinger. 1985. Forest ecosystems. Concepts and management. Academic Press. New York, NY, USA.
- Wells, C. y L. Allen. 1985. When and where apply fertilizers. A loblolly pine management guide. Gen. Tech. Rep. SE-36. USDA Forest Service. Ashville, NC, USA.