

José Alfredo Herrera Altuve  
Luis Felipe Ramírez Santoyo  
Rafael Guzmán Mendoza  
Héctor Gordon Palenius

# Evaluación de la fertilidad del suelo y la nutrición de los cultivos



EDITORIAL  
CIENTÍFICO-TÉCNICA

## Índice de contenido

[Prólogo](#)

[Introducción general](#)

[Capítulo 1](#)

[De la fertilidad del suelo y la nutrición de los cultivos](#)

[Introducción](#)

[Breve reseña histórica](#)

[Conceptos básicos relacionados con la nutrición de las plantas](#)

[Nutrientes esenciales para las plantas](#)

[Absorción de los nutrientes por las plantas](#)

[Fertilidad del suelo y sus componentes](#)

[Respuesta de los cultivos al suministro de nutrientes](#)

[Ley del anticipo](#)

[Ley de la restitución](#)

[Ley del mínimo](#)

[Ley de los incrementos de rendimiento decrecientes](#)

[Ley del máximo](#)

[Ley del equilibrio de los elementos nutrientes en el suelo](#)

[Ley de la prioridad de la calidad biológica](#)

[Suministradores externos de nutrientes para los cultivos](#)

[Fertilizantes minerales](#)

[Fertilizantes orgánicos](#)

[Fertilizantes microbianos](#)

[Enmiendas](#)

[Conservación o mejora de la fertilidad del suelo](#)

[Métodos de evaluación de la fertilidad del suelo para definir sistemas de nutrición de los cultivos](#)

[Bibliografía](#)

[Capítulo 2](#)

Estudios en el campo de la nutrición de los cultivos

Introducción

Clasificaciones de los experimentos en el campo con fertilizantes

De acuerdo con el lugar en donde se realicen

En estaciones experimentales

En áreas de producción

Por la duración de los experimentos

De acuerdo con el tamaño del experimento

Etapas fundamentales en la ejecución del método

Recolección de antecedentes

Planificación

Localización

Montaje del experimento

Conducción de los experimentos

Observaciones que se debe realizar

Observaciones de crecimiento y desarrollo

Observaciones de rendimiento y sus componentes

Contenido químico de los tejidos vegetales

Análisis de calidad de las cosechas

Estudios de los suelos

Observaciones relacionadas con el clima

Experimentos en áreas de los productores

Bibliografía

Capítulo 3

Estudios en condiciones controladas de la nutrición de los cultivos

Introducción

Recipientes utilizados en los experimentos

Cultivo en recipientes con suelo

Preparación de las macetas

Preparación del suelo y de los recipientes

Llenado de los recipientes con suelo y adición de nutrientes

Siembra o plantación y atenciones durante el desarrollo

Método de cultivos intensivos

Métodos con el uso de microorganismos

Cultivos en arena

Preparación de las macetas

Aplicación de los nutrientes y riego

Atención al cultivo y cosecha de las plantas

Cultivo en disoluciones nutritivas

Preparación del experimento

Atenciones en el desarrollo

Métodos con disoluciones fluyentes

Control de las condiciones ambientales

Experimentos en lisímetros

Lisímetros de bloque o monolíticos

Lisímetros de embudo o Ebermayer

Lisímetros de tanque o de llenado

Lisímetros de succión

Estudios de movimiento de nutrientes en columnas de suelo

Observaciones que se debe realizar

Observaciones de crecimiento y desarrollo

Observaciones de rendimiento y sus componentes

Bibliografía

Capítulo 4

Análisis químico para evaluar la fertilidad de los suelos

Introducción

Análisis químico de los suelos para diagnosticar la necesidad de nutrientes por los cultivos

Factor de intensidad

Factor de cantidad

Factor de capacidad

Métodos de determinación de nutrientes disponibles para las plantas en el suelo

Nitrógeno

Determinación del N inorgánico

Determinación del N mineralizable

Fósforo

Utilización de agua

Con disoluciones extractivas ácidas

Con disoluciones extractivas ácidas y  $\text{NH}_4\text{F}$

Con disoluciones extractivas alcalinas

Resinas intercambiadoras

Cintas de papel impregnadas en óxido de hierro

Potasio, calcio y magnesio

Disoluciones extractivas de acetato de amonio

Disoluciones extractivas de ácidos diluidos

Disoluciones extractivas ácidas y  $\text{NH}_4\text{F}$

Disoluciones ácidas tamponadas

Disoluciones extractivas alcalinas

Utilización del agua

Uso de membranas o resinas de intercambio iónico

Oligoelementos esenciales y azufre

Estudio de otras formas y transformaciones de nutrientes en el suelo

Nitrógeno

Determinación de N total

Fósforo

Fraccionamiento de fosfatos

Isotermas

Isotermas de solubilidad

[Electroultrafiltración \(EUF\)](#)  
[Fósforo en uniones orgánicas](#)  
[Potasio](#)  
[Determinación de K total](#)  
[Determinación del K difícilmente intercambiable](#)  
[Determinación de potenciales de K](#)  
[Electroultrafiltración](#)  
[Evaluación de condiciones químicas del suelo](#)  
[Acidez del suelo](#)  
[Bases intercambiables](#)  
[Capacidad de intercambio catiónico \(CIC\)](#)  
[Materia orgánica del suelo](#)  
[Salinidad](#)  
[Contenido de carbonatos](#)  
[Selección y calibración de métodos de análisis de la disponibilidad para las plantas de nutrientes en los suelos](#)  
[Selección de métodos de análisis en condiciones controladas](#)  
[Calibración en condiciones de campo](#)  
[Condiciones a cumplir por el método de análisis](#)  
[Diseño de una tabla de interpretación basada en modelos de respuesta](#)  
[Conversión de valores entre métodos de análisis de suelo](#)  
[Análisis rápido](#)  
[Bibliografía](#)  
[Capítulo 5](#)  
[Diagnóstico vegetal de la nutrición de los cultivos](#)  
[Introducción](#)  
[Diagnóstico visual](#)

Particularidades de la ocurrencia de síntomas visuales en las plantas

Técnicas para la realización del diagnóstico visual

Historial del campo

Cultivo

Condiciones del suelo

Coloración de las hojas o de la planta

Posición de las hojas con síntomas de deficiencia

Cambios morfológicos de las plantas

Momento de la observación

Plantas indicadoras

Nitrógeno

Fósforo

Potasio

Calcio

Magnesio

Azufre

Boro

Cobre

Hierro

Manganeso

Molibdeno

Cinc

Níquel (Ortega y Malavolta, 2012).

Cobalto (Ortega y Malavolta, 2012).

Nitrógeno

Fósforo

Potasio

Calcio y magnesio

Azufre

Boro

Manganeso

Cobre

Cloro

Hierro

Cinc

Aluminio

Diagnóstico por aspersión e inyección

Diagnóstico por aspersión

Diagnóstico por inyección

Análisis químico de tejidos vegetales

Análisis foliar

Orígenes y principios técnicos

Factores que influyen en los índices foliares

Especie y variedad

Órgano a muestrear y posición en la planta

Edades de la planta y el órgano que se han de muestrear

Interacciones entre nutrientes

Tipo de suelo y sus características

Diseño de un sistema de análisis foliar

Determinación del órgano que se ha de muestrear

Definición del momento en que debe tomarse la muestra

Establecimiento de los indicadores para la evaluación

Determinación de la absorción y la extracción de nutrientes por los cultivos

Determinación de los elementos de calidad

Análisis bioquímico

Actividad enzimática específica

Reactivación o inducción enzimática

Pigmentos foliares

Bibliografía

Capítulo 6

Muestreo de suelo y tejidos vegetales

Introducción

Muestreo y análisis de suelos para estudiar su fertilidad

Organización de la base plano-cartográfica

Recolección de las muestras

Frecuencia de los muestreos

Momento del muestreo

Sistema de recolección de submuestras

Forma de recolección de cada submuestra

Número de submuestras para cada muestra compuesta

Profundidad del muestreo

Método y herramientas para extraer la muestra

Traslado de las muestras al laboratorio

Análisis de las muestras recolectadas

Recepción de las muestras en los laboratorios

Preparación de las muestras para el análisis

Análisis a realizar

Elaboración de los cartogramas de fertilidad

Muestreo y análisis de tejidos vegetales

Recolección de muestras para el análisis químico de tejidos

Área que se va a representar por cada muestra y momento de muestreo

Tecnología del muestreo

Recolección de muestras en algunos cultivos

Recolección de muestras para determinar el contenido de nutrientes en los tejidos vegetales

Manipulación de la muestra después de recolectada

Análisis a realizar

Comprobación de calidad de los análisis

Bibliografía

Capítulo 7

Diseño de experimentos para estudiar la nutrición de los cultivos

Introducción

Clasificación de los experimentos

De acuerdo a la organización

De acuerdo con el alcance de los objetivos

Experimentos preliminares o exploratorios

Experimentos fundamentales

Diseño de los experimentos y programas

Diagnóstico previo y definición del problema

Estudio previo del sistema y la región, definición del problema que se ha de resolver y el diagnóstico del estado actual de la temática

Establecimiento de hipótesis y objetivos

Identificar las variables y selección del diseño estadístico

Definición de metodologías e instrumentos a utilizar

Estructura de tratamientos

Testigos de referencia

Tratamientos para determinar dosis de nutrientes y seleccionar métodos de análisis de suelo y planta

Esquemas para modelos continuos de respuesta

Esquemas para modelos discontinuos de respuesta

Esquemas para estudiar suministradores de nutrientes, métodos y épocas de aplicación

Esquemas para estudiar el efecto de las enmiendas

Determinación de las dosis que se han de utilizar en los experimentos

Observaciones que se han de realizar

Diseño de experimentos en áreas de productores

Diseño estadístico de los experimentos  
[Principios básicos del diseño experimental]  
Réplicas  
Aleatorización  
Control local  
Principales diseños estadísticos utilizados en la  
nutrición de los cultivos  
Diseño completamente aleatorio  
Diseño de bloques al azar  
Diseño cuadrado latino  
Diseños o arreglos factoriales  
Diseño en parcelas divididas  
Diseño en bloques divididos  
Ejecución de los experimentos  
Bibliografía  
Capítulo 8  
Evaluación de experimentos para estudiar la  
nutrición de los cultivos  
Introducción  
Evaluación de la ejecución del experimento  
Análisis bioestadístico  
Obtención de correlaciones y modelos de respuesta  
Obtención de modelos continuos de respuesta  
Obtención de modelos lineales discontinuos de  
respuesta  
Evaluación agronómica de los resultados  
Balance y presupuestos de nutrientes  
Cálculos de eficiencia de la fertilización  
Determinar la dosis de nutrientes a aplicar  
Establecimiento de la dosis media general de  
nutrientes sobre la base de modelos lineales  
continuos de respuesta

[Cálculos de dosis para un solo nutriente](#)

[Cálculo de dosis para dos nutrientes](#)

[Establecimiento de la dosis media general sobre la base de modelos lineales discontinuos de respuesta](#)

[Establecimiento de dosis de acuerdo con el balance de nutrientes](#)

[Determinación de dosis mediante análisis de nutrientes disponibles en el suelo](#)

[Evaluación de la fertilidad del suelo y la necesidad de fertilización de los cultivos mediante el análisis foliar](#)

[Sistema Integrado de Diagnóstico y Evaluación](#)

[Método de Homes](#)

[Crop logging](#)

[Fertigrama](#)

[Valoración de los cambios en la fertilidad del suelo](#)

[Evaluación de dosis de enmiendas químicas y orgánicas](#)

[Cálculo de dosis de abonos orgánicos](#)

[Cálculo de dosis de encalado](#)

[Evaluación de la economía en el suministro de nutrientes](#)

[Evaluación de experimentos en áreas de producción](#)

[Bibliografía](#)

[Capítulo 9](#)

[Isótopos en el estudios de la fertilidad del suelo y nutrición de los cultivos](#)

[Introducción](#)

[Generalidades sobre isótopos radioactivos y estables](#)

[Isótopos radioactivos](#)

[Detección y medición de los radioisótopos](#)

[Detectores por ionización](#)

[Autorradiografías](#)

Medidas de precaución

Isótopos estables

Métodos generales de investigaciones con isótopos en la fertilidad del suelo

Dilución isotópica

Empleo como trazadores

Análisis por activación

Marcado de los portadores de nutrientes, los suelos y plantas

Utilización de isótopos radioactivos en los estudios de fertilidad del suelo y la nutrición de los cultivos

Evaluación de la fertilidad del suelo

Intercambio isotópico en el laboratorio (valor E).

Intercambio isotópico con suelo y planta y un compuesto químico como portador (valor L).

Intercambio isotópico con suelo y planta y un fertilizante estándar como portador (valor A).

Modelo de compartimientos

Selección de portadores de nutrientes

Evaluación de métodos de aplicación

Estudios sobre la dinámica de los nutrientes en suelos y plantas

Utilización de isótopos estables en los estudios de fertilidad del suelo y la nutrición de los cultivos

Estudios del aprovechamiento del nitrógeno por las plantas

Investigaciones sobre las transformaciones de N suministrado como fertilizante marcado con  $^{15}\text{N}$

Estudio de portadores y su forma de aplicación

Estudio sobre la fijación biológica simbiótica del nitrógeno atmosférico

Bibliografía

## Datos de autores

Edición: Sergio Bello Canto y Miriam Raya Hernández  
Diseño de cubierta: Seidel González Vázquez (*6del*)  
Diseño interior: Carlos Javier Solis Méndez  
Realización: Elvira M. Corzo Alonso  
Corrección: Miriam Raya Hernández  
Emplante digital: Madeline Martí del Sol

© José Alfredo Herrera Altuve,  
Luis Felipe Ramírez Santoyo,  
Rafael Guzmán Mendoza,  
Héctor Gordon Núñez Palenius, 2019  
© Sobre la presente edición:  
Editorial Científico-Técnica, 2021

ISBN 9789590512469

Quedan rigurosamente prohibidas, sin la autorización escrita de los titulares del Copyright, bajo la sanción establecida en las leyes, la reproducción parcial o total de esta obra por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático, y la distribución de ejemplares de ella mediante alquiler o préstamo público. Si precisa obtener licencia de reproducción para algún fragmento en formato digital diríjase a CEDRO (Centro Español de Derechos Reprográficos, [www.cedro.org](http://www.cedro.org)) o entre la web [www.conlicencia.com](http://www.conlicencia.com) EDHASA C/ Diputació, 262, 2º 1ª, 08007 Barcelona. Tel. 93 494 97 20 España.

INSTITUTO CUBANO DEL LIBRO

Editorial Científico-Técnica Calle 14 no. 4104, entre 41 y 43, Playa, La Habana, Cuba  
[editorialmil@cubarte.cult.cu](mailto:editorialmil@cubarte.cult.cu)  
[www.nuevomilenio.cult.cu](http://www.nuevomilenio.cult.cu)

*No tenemos la tierra como un  
legado de nuestros padres sino como  
unos préstamos de nuestros hijos.*

JOSÉ MARTÍ

# Prólogo

Si el prólogo, término que proviene del griego y que se refiere al escrito breve o relativamente breve antepuesto al cuerpo de una obra escrita, tiene como fin fundamental explicar a los lectores las necesidades y motivaciones que llevaron al autor a crearla o bien destacar algunos aspectos que considera determinantes y relevantes a la hora de su lectura, en este caso, el autor me exime de tener que hacerlo y remito al lector a la documentada y completa Introducción que hacen los autores sobre esta obra titulada Evaluación de la fertilidad del suelo y la nutrición de los cultivos, continuación en el tiempo, décadas después, de la que uno de ellos, el doctor José Alfredo Herrera Altuve dio a conocer como Métodos de trabajo agroquímico.

José Alfredo Herrera Altuve, mi profesor en la frontera de las décadas de los sesenta y los setenta del siglo xx, y de siempre, después de 52 años de labor profesional como ingeniero agrónomo, de 46 como doctor en Ciencias Agrícolas y de 45 como profesor titular e investigador titular, ya no a partir del conocimiento universal y una experiencia profesional en la docencia y la investigación universitarias de apenas 19 años, sino de 47 años dedicados a muchas y muy variadas actividades dentro de la docencia universitaria de pregrado y de posgrado. También formó numerosos maestros en Ciencias y doctores en Ciencias en determinada especialidad, a lo que se conoce como Investigación, Desarrollo, Innovación y Extensión, tanto como ejecutante directo como directivo de colectivos de docentes, investigadores, no solo de las instituciones de educación superior y de ciencia, tecnología e innovación del Ministerio de Educación Superior en que

ha trabajado, sino también en función de demandas de los ministerios de Ciencia, Tecnología y Medioambiente y de la Agricultura de Cuba, con la experiencia personal, más la información científico técnica disponible mundialmente en la actualidad sobre el contenido de esta nueva obra, entrega a los lectores vinculados al mundo agrario, dando cumplimiento a uno de los más importantes deberes del hombre, al decir de José Martí Pérez: “El único autógrafo digno de un hombre es el que deja escrito con sus obras”.

Al doctor Herrera Altuve se han unido en este nuevo esfuerzo varios especialistas de la Universidad de Guanajuato, México. Como coautor de la obra el doctor Luis Felipe Ramírez Santoyo, ingeniero agrónomo y especialista en Suelos, doctor ingeniero agrónomo en Tecnología de Invernaderos por la Universidad Politécnica de Valencia, España. Es profesor investigador del Departamento de Agronomía de la Universidad de Guanajuato, donde imparte las asignaturas Uso y manejo del suelo I y II, Prácticas Agrícolas y Tópicos Selectos. Participa como docente en el Diplomado de producción de cultivos en agricultura protegida. Como coautores de capítulos específicos, los doctores Rafael Guzmán Mendoza y Héctor Gordon Núñez Palenius refuerzan los enfoques fisiológicos y bioestadísticos de la obra.

El licenciado Rafael Guzmán Mendoza es doctor en Ciencias Biológicas, actualmente profesor de la Universidad de Guanajuato, es profesor con reconocimiento de “Perfil Deseable PRODEP 2015-2018”, miembro del Sistema Nacional de Investigadores nivel I. Es un especialista experimentado en la ecología de poblaciones y de comunidades y la agroecología, en cuyos temas ha realizado diferentes publicaciones y presentaciones en eventos científicos nacionales e internacionales.

El licenciado Héctor Gordon Núñez Palenius es doctor en Ciencias Hortícolas, actualmente profesor titular A de la Universidad de Guanajuato; y es miembro del Sistema

Nacional de Investigadores nivel I. Es un especialista experimentado en la fisiología vegetal, con variadas publicaciones y presentaciones en eventos nacionales e internacionales. Por su trabajo científico y docente, ha recibido numerosos premios y reconocimientos.

Este documento no es el clásico libro de texto o de consulta para los estudiantes universitarios y de posgrado, sino un libro de consulta para esos estudiantes y para los graduados universitarios que tengan que relacionarse con la producción agraria, en una realidad objetiva diferente a la de la década de los ochenta del siglo xx, donde regían la producción vegetal de cualquier tipo, los conceptos de la revolución verde; concebido y escrito vinculado estrechamente con el análisis, a la historia, a las realizaciones y a la práctica concreta del hombre en su afán de perfeccionar permanentemente, entre otros, los “Métodos de evaluación de la fertilidad del suelo y la necesidad de nutrientes por los cultivos”.

En la actualidad, convencidos de que es posible la seguridad alimentaria y la soberanía alimentaria con una agricultura moderna, eficiente y económica, y socialmente justa y sostenible, basada en los principios de la joven ciencia de la agroecología, los autores ofrecen una obra imprescindible para todas las ciencias agrarias, no solamente para la producción vegetal, sino también animal, haciendo con ello un modesto homenaje a las enseñanzas que legara André Marcel Voisin a los cubanos y a todos los científicos del mundo.

Pero, la joven ciencia definida como agroecología, guía imprescindible para la conducción del quehacer agrario actual y del futuro previsible, continúa siendo contaminada por creencias, tradiciones ancestrales que siempre han de considerarse, pero algunas superadas por el conocimiento científico actual, mitos y otras no científicas, no probadas en la *praxis* aplicando el método científico, desconociendo hasta la ampliamente demostrada ley de la conservación de

la materia o ley de Lomonósov-Lavoisier y creyendo y hasta escribiendo; por tanto, como algunos autores no verdaderamente agroecólogos lo hacen, que, por ejemplo, no reconocen o no conocen que si un suelo es genética, naturalmente, deficitario en un elemento químico nutriente cualquiera, digamos fósforo, solo con adiciones de abonos orgánicos, restos de cosechas y otros residuos de origen animal o vegetal, producidos en ese sitio, como “sistema cerrado”, serán capaces con sus aportes de elementos nutrientes y enmendantes, además de mejorar las propiedades físicas y biológicas de ese suelo, aumentar a los niveles requeridos las producciones vegetal y animal aceptables. Desconocen que, en términos generales, es cierto que “la materia ni se crea ni se destruye”, salvo que hay que tener en cuenta, en el concepto teórico más amplio de esa ley, la existencia de las reacciones nucleares, pero ese no es el caso en general de cómo se manifiesta en la agricultura.

La agroecología es una ciencia que aun está constituyéndose, no un conjunto de concepciones, suposiciones e ideas, algunas hasta místicas, alejadas del verdadero quehacer científico del hombre.

Un *sistema cerrado*, como puede ser una finca con suelos por su origen deficitarios en determinado elemento nutriente, en la fase de “conversión” de la agricultura tradicional hacia una agricultura basada en los principios de la agroecología, *sí* tiene que “importar”, repito, en un principio, portadores autorizados por la agroecología, de ese elemento deficitario naturalmente, con miras a llevarlo a niveles adecuados para la producción vegetal con destino a la alimentación (humana y animal) si se quiere obtener, como se debe desear y esperar, una producción económica, de calidad biológica, sostenible en el tiempo.

Es necesario repetir, hasta el cansancio, que la agroecología no está reñida con la aplicación de las más modernas tecnologías de producción agraria, siempre y

cuando no agredan al ambiente y al hombre en el tiempo; por ello, el conocimiento de los actuales métodos de evaluación de la productividad y la fertilidad del suelo, las plantas y las necesidades lo más precisas posibles de nutrientes por las plantas, por los cultivos económicos o de conservación ambiental, son herramientas que utilizadas, por los agroecólogos, les permiten y permitirán obtener, como se ha escrito, la seguridad alimentaria y la soberanía alimentaria, con una agricultura moderna, eficiente y económica, y socialmente justa y sostenible, basada en los principios de la joven ciencia de la agroecología, como todas, en constante enriquecimiento por el quehacer científico del hombre.

Resumiendo, la presente obra se propone acercar al lector a esas partes de las ciencias agrarias, como la agroquímica, la agronomía, la producción animal (aunque parezca indirectamente), la ciencia forestal, la horticultura, la utilización de abonos, los productos agrícolas no alimenticios, la producción de cultivos, la explotación de cultivos, las técnicas de cultivos, los cultivos de campo, los cultivos forrajeros, la gestión de la producción vegetal, los pastos, las semillas, el comportamiento del suelo en cultivos rotatorios, la fertilidad del suelo, el (manejo) combinado del agua y fertilizantes, y otras reconocidas por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO).

Ahora, podrán utilizar esta importante obra no solo los lectores cubanos, sino todos los de habla hispana, aunque por la cantidad y calidad de su actual contenido pudiera pensarse en un futuro mediato, a partir de las críticas y sugerencias de sus lectores, en una segunda edición en español y en otra traducida al inglés; repito, la cantidad, actualidad y calidad de la información que contiene este libro, lo merecen.

Ing. Agr., Dr. C. (PhD) José Roberto Martín Triana  
Investigador titular, Cuba

Profesor investigador de la Universidad Técnica de  
Babahoyo, Ecuador  
Exacadémico titular de la Academia de Ciencias de Cuba

# Introducción general

Una agricultura sostenible, un mundo mejor hoy y para siempre, son conceptos que marchan juntos en el esfuerzo de la humanidad para sobrevivir a sus éxitos y errores. Conceptos que solamente coincidirán si también marchan juntos la ciencia, la economía y la política, en la decisión y participación de todos para vivir en armonía con la naturaleza.

Para lograr una agricultura que responda a las necesidades de la humanidad, desde los puntos de vista social, económico, político y ecológico, es imprescindible conocer y comprender el desarrollo y la práctica de la ciencia agrícola desde sus inicios y realizar un ejercicio de rediseño de las tecnologías y sistemas de acuerdo con los nuevos conocimientos y experiencias. El uso de la modelación del desarrollo de las plantas y los cambios en el suelo, unido a la utilización de las técnicas geoespaciales (propios de la agricultura de precisión) son elementos que se integran a estos propósitos.

Desde el momento en que los suelos con mejores condiciones para la agricultura escasearon, los objetivos de la agricultura fueron incrementar el potencial de rendimiento de los cultivos y maximizar la productividad y la recuperación económica. Hoy se mantienen esos objetivos, pero se necesita lograrlos de forma sostenible.

El objetivo de este libro es participar en este esfuerzo necesario, hacia una seguridad alimentaria y ecológica, enfrentando los retos de asegurar la nutrición integral de los cultivos, aprovechando todas las fuentes de nutrientes, protegiendo los suelos, obteniendo productos y materias

primas de origen vegetal de calidad y disminuyendo las afectaciones al medioambiente propias de la agricultura.

Esta obra surge de la ventaja de tener en un solo libro los diferentes métodos y herramientas que pueden disponer investigadores, especialistas, técnicos, decisores y estudiantes para el estudio de la fertilidad del suelo y la necesidad de nutrientes por los cultivos; se hace referencia a libros y artículos donde se puede profundizar en cada tema.

En su contenido no se trata de resultados de experimentos, sino de cómo obtenerlos de forma eficiente: se intenta ayudar a estudiantes y especialistas que se inician en el arduo camino de la experimentación agrícola en este tema, para que conozcan cuáles métodos y herramientas pueden utilizar para el estudio de la fertilidad del suelo y cómo esta se relaciona con la nutrición de los cultivos, y les sirva de base para profundizar en textos especializados en aquellos tópicos que necesiten para lograr sus objetivos.

Como bibliografía de respaldo se han seleccionado citas de todas las épocas, tratando de obtener información lo más cercana posible a las originales, lógicamente actualizando lo relativo a los métodos de experimentación.

Se espera brindar posibilidades a los estudiantes y especialistas para:

1

. Poder reconocer las limitantes para la obtención de la sostenibilidad no solo ecológica, sino también económica y social en la nutrición de los cultivos.

2

. Brindar elementos para diseñar programas de investigación o experimentos que coadyuven a sobrepasar esas limitaciones.

3

- . Identificar áreas en las cuales se debe profundizar el estudio para perfeccionar los sistemas de cultivo desde el punto de vista de la fertilidad del suelo y la nutrición de los cultivos.

4

- . Promover la acción conjunta de agricultores, especialistas y decisores para lograr sistemas integrales de nutrición de los cultivos.

5

- . Identificar documentos con miras a ampliar sus conocimientos sobre cada tema.

El texto brinda propuestas para enfrentar problemas generalizados en el estudio de la fertilidad del suelo y la necesidad de fertilización de los cultivos, aunque no pretende realizar una valoración exhaustiva de cada método ni resolver problemas particulares; el tema es tan amplio y complejo que, en última instancia, son los especialistas quienes, con su experiencia y conocimiento, lograrán diseñar correctamente el programa o estudio conveniente.

Como su título indica, se trata de la fertilidad del suelo y la nutrición de los cultivos, pero no debe olvidarse que estos son aspectos que se integran directamente a otros, como son las propiedades físicas y biológicas del suelo, la disponibilidad de agua, las particularidades genéticas de las especies que se cultivan, la incidencia de patógenos, el clima e incluso el manejo del área agrícola.

El objetivo principal es informar cuáles herramientas y modelos permiten ahorrar tiempo, recursos y alcanzar con más eficiencia y eficacia los objetivos de nutrir correctamente los cultivos, proteger o mejorar la fertilidad del suelo y despertar el interés de seguir profundizando en los temas.

Contiene parte del fundamento teórico de cada método y elementos prácticos para su utilización, tratando de disminuir algunas dificultades para el diseño, montaje y manejo de experimentos, así como para orientar el cálculo, el análisis y la interpretación de los datos.

En relación con las técnicas y sistemas modernos de agriculturas de países desarrollados, como la de precisión, solo se realizan referencias, ya que el libro está dirigido a regiones donde aún existen limitaciones para el uso de las mismas a plenitud.

No se trata de repetir conceptos y herramientas de la bioestadística ni profundizar en temas de la química, la bioquímica y la microbiología, sino de vincular la agronomía con esas ciencias que las acompañan.

Se incluye un primer capítulo que revisa de forma general los conceptos sobre fertilidad del suelo y su relación con la nutrición de los cultivos, para facilitar la revisión de los capítulos básicos.

Es un libro que espera críticas y sugerencias, pero que tiene la esperanza de ser útil.

# Capítulo 1

## De la fertilidad del suelo y la nutrición de los cultivos

### Introducción

El incremento en la demanda de alimentos y materias primas de origen agrícola, unido al crecimiento de los núcleos poblacionales, las áreas industriales y las vías de comunicación, han conllevado la disminución de las tierras cultivables en relación con la población (tabla 1.1); esta situación se complica por las migraciones del campo a las ciudades, lo que reduce la fuerza de trabajo para esas actividades.

Al unísono, se incrementan las áreas de suelo afectadas por factores limitantes graves como la erosión, salinización, compactación y el empobrecimiento de la fertilidad del suelo. Esto significa que en muchas regiones del mundo no es posible incrementar las áreas de calidad dedicadas a la agricultura. Por ello, según Fixen y García (2006), quizá el desafío actual más grande es proveer ciencia y tecnologías disponibles a los productores, en un paquete integrado que apoye efectivamente las decisiones críticas en el manejo de nutrientes.

TABLA 1.1

Tierra cultivable disponible para la agricultura y la población mundial (Roberts, 2002)

Años	Tierra cultivable (ha persona <sup>-1</sup> )	Población (10 <sup>9</sup> )
1965	0,46	3,3
1980	0,34	4,4
1990	0,30	5,3

2000	0,25	6,1
2025	0,20	7,8

El planeta pierde 33 000 ha de tierra fértil por día (Kamal, 2016). Esta situación se complica, según la FAO (2015), ya que se prevé que en los próximos 35 años se producirá un aumento de 30 % de la población mundial, llegando a 9 300 millones de habitantes, a lo que se sumará una creciente competencia por recursos de tierra, agua y energía, cada vez más escasos, así como la amenaza existencial del cambio climático. La producción anual de alimentos deberá aumentar en al menos 60 % desde los 8 400 millones de toneladas actuales (FAO, 2016).

El incremento de la población mundial trae consigo una mayor necesidad de alimentos, materias primas e incluso energía de origen agrícola, lo cual es la base de la seguridad alimentaria de un país o región (Hasler *et al.*, 2015). Sattari *et al.* (2014) plantean que la producción global de comida depende de la disponibilidad de nutrientes (para los cultivos) y pronostican que la demanda global de alimentos se incrementará en 70 %.

Una definición de seguridad alimentaria es: “cuando toda la población, en todo momento, tiene acceso físico, económico y social a suficientes alimentos, sanos y nutritivos para alcanzar sus necesidades de dieta y preferencias alimenticias para una vida activa y saludable (FAO, WFP e IFAD, 2012); pero alcanzar la seguridad y soberanía agroalimentaria, involucra desafíos sociopolíticos, técnico-científicos, culturales y económicos, que se magnifican al asumir procedimientos y métodos con mínimo impacto ambiental, que apunten a mejorar la calidad de vida de la población rural y urbana, incluyendo productores y consumidores (López *et al.*, 2010).

La necesidad de incrementar la disponibilidad de alimentos y materias primas de origen vegetal no significa solamente un aumento en unidades físicas, sino también ocurre un cambio en la diversidad y calidad de la demanda en proteína animal, frutas y vegetales, y hay más

preocupación por la calidad de los alimentos (Krauss y Jiyun, 2000), surgiendo un importante mercado que requiere alimentos clasificados como orgánicos o al menos que no contengan compuestos que afecten la salud humana.

Ingram y Porter (2015) resumen el problema al plantear que la demanda incrementada de comida, dada por el crecimiento poblacional y los cambios en la dieta, junto con la degradación de los recursos naturales y el cambio climático, convierten en esencial el desafío de alcanzar una seguridad alimentaria para todos.

Indisolublemente unida a la seguridad alimentaria, en la agricultura también debe asegurarse la seguridad ambiental, un medioambiente que no cambie para mal; ambas están estrechamente relacionadas entre sí y con la agricultura.

La agricultura debe alimentar, vestir y proveer energía a esta población que crece rápidamente, minimizando impactos ambientales y otros no deseados. Hasta 80 % de estos productos deben ser producidos en tierras cultivadas, a partir del incremento de rendimientos y eficiencia de las áreas actualmente en producción, ya que gran parte de la tierra adicional disponible no está apta para la agricultura, y el costo ecológico, social y económico de ponerla en producción sería muy elevado (FAO, 2015). A menos que la agricultura aumente su sostenibilidad, productividad y resiliencia, se compromete la seguridad alimentaria (FAO, 2016).

La intensificación de la agricultura es una de las estrategias básicas para incrementar la producción de alimentos, lo que depende, entre otros factores, del incremento del flujo de nutrientes vegetales a los cultivos para asegurar altos rendimientos (Roy *et al.*, 2006). Esta estrategia debe integrar rendimientos altos y de calidad, protección de los recursos naturales y economía del agricultor y de la sociedad. Para definir e implementar esta

estrategia es necesario tomar en cuenta las condiciones climáticas, los sistemas de producción y de cultivo, las condiciones edáficas, el manejo de las áreas dedicadas a la agricultura, y las características culturales y económicas de la región.

Lambrecht, Vanlauwe y Maertens (2016) precisan que se han propuesto muchos paradigmas de agricultura sostenible para combinar diferentes tecnologías, pero que su supervivencia depende de cómo los agricultores combinan esas tecnologías en la práctica. Incluso, estos autores encontraron que en el Congo occidental existía una desconexión entre los argumentos teóricos de la literatura referente a un sistema integrado de manejo del suelo y la realidad de la aplicación de los mismos en los campos de agricultores. No hay dudas, los resultados de la agricultura dependen, en última instancia, de los agricultores.

La agricultura es la fuente primaria de alimentos y materias primas, por lo cual si como parte del medioambiente se deterioran los recursos naturales en la que se desarrolla, se afecta la seguridad alimentaria en las regiones o países. La sostenibilidad de la agricultura y con ello la del ambiente pueden, a mediano y largo plazos ser afectadas por la aplicación en defecto o exceso de fertilizantes (tanto químicos, como orgánicos) y un mal manejo de la nutrición, ocurriendo contaminaciones del suelo y el agua (Ghrun *et al.*, 2000).

Johnston y Bruulsema (2014) plantean que la sostenibilidad relacionada con los fertilizantes toma en cuenta: seguridad alimenticia y nutricional, empleo, fertilidad del suelo, cadmio en el suelo, eutrofización, recursos no renovables, emisión de gases de efecto invernadero, depleción de la capa de ozono, calidad del aire e incluso percepción pública. Esto significa que es imprescindible lograr las mejores prácticas de manejo del suministro de nutrientes de los cultivos, como componente del mejor manejo integral del sistema de la agricultura.