

Química Agrícola

2^a
EDICIÓN

JOSÉ NAVARRO

MP

La Química Agrícola, a nivel mundial, ha experimentado, en las últimas décadas, una enorme y rápida expansión. En España, y sobre todo desde su inclusión a partir de 1967 en las actividades científico-docentes de la Universidad de Murcia, y posteriormente de muchas otras universidades, el interés de los estudiantes por esta disciplina se ha incrementado de forma extraordinaria. Ello está creando, como consecuencia, la necesidad de poner a su disposición obras en castellano en las que, mediante una cuidadosa selección de materias, puedan serles útiles en los estudios que deban realizar.

Con esta obra los autores, con un amplio historial docente e investigador en Química Agrícola en la Universidad de Murcia, hemos intentado cubrir una parcela importante de esta disciplina: los aspectos fundamentales de la química del suelo y de los elementos químicos esenciales para la planta. En ella se ha procurado reunir todas aquellas materias que razonablemente deben abordarse, debidamente acopladas, y pensando en aquellos a quienes van dirigidas. Todos los temas se tratan a un nivel universitario, con un contenido y una solidez, pensamos, más que suficiente para que sean soporte adecuado para una correcta formación. Y lo que es también muy importante, dejan abiertas al mañana posibilidades de incorporar fácilmente a estos esquemas las nuevas conquistas que la ciencia logra diariamente.

El texto consta de 26 temas, distribuidos en tres partes. La primera parte está dedicada a contemplar cuestiones fundamentales relativas a la composición, propiedades y funciones de los suelos en orden a la nutrición de las plantas. Son temas generales, con marcada orientación química, imprescindibles para llegar a adquirir un concepto claro del suelo en su conjunto. El tema primero, como excepción, es una introducción a la Química Agrícola, en la que destaca su conexión con otras ciencias y, sobre todo, su situación actual en cuanto a sus límites, desarrollo y posibilidades.

Las dos partes restantes están centradas en el estudio de los distintos elementos químicos que en el momento actual se consideran esenciales para la vida vegetal. Todos ellos se tratan con una sistemática muy semejante, abordando primero su estado en la planta, las principales funciones que conllevan a su esencialidad y las alteraciones que en ella pueden producirse por deficiencia o exceso. De esta forma se le expone al alumno su importancia, y justifica plenamente el estudio que a continuación se realiza del mismo en el suelo para conocer su dinámica en función de los distintos factores influyentes, y su disponibilidad en último término para la planta.

Queremos indicar, finalmente, que al final de la obra se aporta una amplia bibliografía, citada o relacionada con los temas tratados. Con ella abrimos la posibilidad a un mayor conocimiento en un determinado aspecto.

Mantenemos la esperanza de que esta obra pueda contribuir modestamente a la formación de los actualmente ya numerosos estudiantes de Química Agrícola de las facultades universitarias y escuelas técnicas, tanto nacionales como latinoamericanas.



ISBN: 84-8476-155-X

www.mundiprensa.com

AGR
434.727-7

QUIMICA AGRICOLA

EL SUELO Y LOS ELEMENTOS QUIMICOS
ESENCIALES PARA LA VIDA VEGETAL

AGR



SIMON NAVARRO BLAYA (†)
CATEDRATICO DE QUIMICA AGRICOLA
UNIVERSIDAD DE MURCIA

GINES NAVARRO GARCIA
PROFESOR TITULAR DE QUIMICA AGRICOLA
UNIVERSIDAD DE MURCIA

QUIMICA AGRICOLA

EL SUELO Y LOS ELEMENTOS QUIMICOS
ESENCIALES PARA LA VIDA VEGETAL

Segunda edición



Ediciones Mundi-Prensa
Madrid • Barcelona • México

2003

Grupo Mundi-Prensa

- **Mundi-Prensa Libros, s. a.**

Castelló, 37 - 28001 Madrid
Tel. 914 36 37 00 - Fax 915 75 39 98
E-mail: libreria@mundiprensa.es

- **Internet: www.mundiprensa.com**

- **Mundi-Prensa Barcelona**

- **Editorial Aedos, s. a.**

Consell de Cent, 391 - 08009 Barcelona
Tel. 934 88 34 92 - Fax 934 87 76 59
E-mail: barcelona@mundiprensa.es

- **Mundi-Prensa México, s. a. de C. V.**

Río Pánuco, 141 - Col. Cuauhtémoc
06500 México, D. F.
Tel. 00 525 55 533 56 58 - Fax 00 525 55 514 67 99
E-mail: mundiprensa@mundiprensa.com.mx

© 2003, Simón Navarro Blaya y Ginés Navarro García.

© 2003, Ediciones Mundi-Prensa, Madrid

Depósito Legal: M. 37.112-2003

ISBN: 84-8476-155-X

No se permite la reproducción total o parcial de este libro ni el almacenamiento en un sistema informático, ni la transmisión de cualquier forma o cualquier medio, electrónico, mecánico, fotocopia, registro u otros medios sin el permiso previo y por escrito de los titulares del Copyright.

IMPRESO EN ESPAÑA - PRINTED IN SPAIN

Imprime: Artes Gráficas Cuesta, S. A. - Seseña, 13 - 28024 Madrid

Una Agricultura perfecta es la verdadera base del comercio y de la industria. Es la base de la riqueza de los estados, pero el sistema racional de la Agricultura no puede formarse sin la aplicación de principios científicos, ya que dicho sistema debe basarse en un exacto conocimiento de las necesidades nutritivas de los vegetales y de la influencia del suelo y acción que éste ejerce sobre el estiércol. Estos conocimientos deben basarse en la Química, que enseña la manera de investigar la composición y el carácter de las distintas sustancias que sirven de alimento a las plantas.

Justus von Liebig (1840)

PROLOGO A LA PRIMERA EDICION

La Química Agrícola, a nivel mundial, ha experimentado, en las últimas décadas, una enorme y rápida expansión. En España, y sobre todo desde su inclusión a partir de 1967 en las actividades científico-docentes de muchas de sus universidades, el interés de los estudiantes por esta disciplina se ha incrementado de forma extraordinaria. Ello está creando, como consecuencia, la necesidad de poner a su disposición obras en castellano en las que, mediante una cuidadosa selección de materias, puedan serles útiles en los estudios que deban realizar.

En este sentido, es indudable que el texto ideal de Química Agrícola, o de cualquier otra disciplina, sería aquel que llegara a sus últimos avances, en el que todo fenómeno fuera no solamente expuesto, sino claramente explicado, y que no dejara ningún hecho o concepto fundamental de la materia sin incluir.

Ese ideal, creo, no es asequible todavía en Química Agrícola. Por una parte hay que tener en cuenta que esta disciplina no puede encerrarse dentro de unos límites concretos. Sus posibilidades, ya de por sí extensas, se hallan grandemente ampliadas por las íntimas conexiones que tiene con otras ciencias agrícolas: Bioquímica, Fisiología Vegetal, Edafología, Microbiología, etc., lo cual hace ya muy difícil establecer sus verdaderos límites. Por otra, su continua evolución en el sentido de crecimiento es tal que todos los días nos informa la bibliografía de nuevos hechos que permiten un mejor conocimiento de los ya conocidos, de posibles nuevas teorías que agrupen los aspectos estudiados en forma más lógica, o que faciliten una explicación más razonable.

Es obvio, por tanto que en un campo tan enormemente amplio, una exposición de los múltiples aspectos de la materia requeriría muchos volúmenes, y ello sería verdaderamente difícil, si se considera que el mayor problema que normalmente presentan los libros de texto es el relativo poco tiempo de vida útil, debido al incesante avance de la ciencia en general.

Con esta obra se intenta cubrir una parcela importante de la Química Agrícola: los aspectos fundamentales de la química del suelo y de los elementos químicos esenciales para la planta. En ella se ha procurado reunir todas aquellas materias que razonablemente deben abordarse, debidamente acopladas, y pensando en aquellos a quienes van dirigidas. Todos los temas se tratan a un nivel universitario, con un contenido y una solidez, pensamos, más que suficiente para que sean soporte adecuado para una correcta formación. Y lo que es también muy importante, dejan abiertas al mañana

posibilidades de incorporar fácilmente a estos esquemas las nuevas conquistas que la ciencia logra diariamente.

El texto consta de 26 temas, distribuidos en tres partes:

- I. Química del suelo. Aspectos fundamentales (Temas 1-9).
- II. Elementos esenciales macronutrientes (Temas 9-18).
- III. Elementos esenciales micronutrientes (Temas 19-26).

La primera parte está dedicada a contemplar cuestiones fundamentales relativas a la composición, propiedades y funciones de los suelos en orden a la nutrición de las plantas. Son temas generales, con marcada orientación química, imprescindibles para llegar a adquirir un concepto claro del suelo en su conjunto. El tema primero, como excepción, es una introducción a la Química Agrícola, en la que destaca su conexión con otras ciencias y, sobre todo, su situación actual en cuanto a sus límites, desarrollo y posibilidades.

Las dos partes restantes están centradas en el estudio de los distintos elementos químicos que en el momento actual se consideran esenciales para la vida vegetal. Todos ellos se tratan con una sistemática muy semejante, abordando primero su estado en la planta, las principales funciones que conllevan a su esencialidad y las alteraciones que en ella pueden producirse por deficiencia o exceso. De esta forma se le expone al alumno su importancia, y justifica plenamente el estudio que a continuación se realiza del mismo en el suelo para conocer su dinámica en función de los distintos factores influyentes, y su disponibilidad en último término para la planta.

Quiero indicar, finalmente, que al final de la obra se aporta una amplia bibliografía, citada o relacionada, con los temas tratados. Con ella se abre la posibilidad a un mayor conocimiento en un determinado aspecto.

Mantengo la esperanza de que esta obra pueda contribuir modestamente a la formación de los actualmente ya numerosos estudiantes de Química Agrícola en las facultades universitarias y escuelas técnicas, tanto nacionales como de Hispanoamérica.

Murcia, marzo, 2000.

G. Navarro García.

NOTAS A LA SEGUNDA EDICION

Hace tres años que se publicó la primera edición de esta obra y el éxito alcanzado ha sido, creemos, importante, pues aunque se trata de una obra específica, dirigida a estudiantes e investigadores en un área muy determinada, ha alcanzado un nivel de difusión realmente notable.

A nivel docente esperamos cambios importantes para los próximos años en la Unión Europea en materia de docencia universitaria. El Espacio Europeo de Enseñanza Superior establece que los estudiantes de todas las universidades europeas deben unificar su formación y conocimientos, de forma que la movilidad en todo el ámbito de competencias sea un hecho. Y para ello será necesario disponer de las bases docentes suficientes para poder equiparar nuestros estudios, en este caso agrícolas, a los de los otros países de la Unión Europea.

En nuestro caso, donde la Agricultura es uno de los pilares económicos de la Unión Europea, y siendo España uno de los países agrícolas más importantes, la formación universitaria en esta materia es fundamental. Nuestras universidades deberán preparar unas titulaciones homologables entre sí y con el resto de las universidades europeas. Y para ello, poder disponer de textos, cursos, etc. diversos nos permitirá proponer una formación de calidad para nuestros universitarios.

En ese espacio pretendemos ubicar esta obra. Intentamos que, aunque modestamente, pueda ser una aportación de la universidad española a la formación de los químicos agrícolas de nuestro entorno. Sólo con que se considere algún aspecto de este libro nos habremos dado por satisfechos, por haber contribuido a la formación de nuestros investigadores y al desarrollo de nuestra investigación agraria.

Murcia, septiembre, 2003.

G. Navarro García

INDICE

- 1. QUIMICA AGRÍCOLA. EVOLUCION Y CONCEPTO, 1.**
 - 1.1. Antecedentes e iniciación de la Química Agrícola, 1.
 - 1.2. Avances en el siglo XVIII, 3
 - 1.3. Evolución y progresos en el siglo XIX, 5.
 - 1.4. Líneas de trabajo y concepto de la Química Agrícola, 10.
 - 1.5. Posibilidades futuras, 13.

- 2. FORMACION Y CONSTITUYENTES DEL SUELO. ASPECTOS GENERALES, 15.**
 - 2.1. El suelo bajo el punto de vista agrícola, 15.
 - 2.2. Origen y formación del suelo. Procesos y factores influyentes, 16.
 - 2.2.1. El perfil del suelo, 20.
 - 2.3. El suelo como sistema disperso. Componentes, 22.
 - 2.4. Los organismos del suelo, 27.

- 3. COMPONENTES INORGANICOS DEL SUELO, 33.**
 - 3.1. Fracciones no coloidales. Características generales, 33.
 - 3.2. Fracciones coloidales. Arcillas, 34.
 - 3.2.1. Arcilla del suelo. Composición y carácter coloidal, 34.
 - 3.2.2. Principios estructurales y origen de la carga negativa, 35.
 - 3.2.3. Tipos principales de arcillas. Estructura, composición química y propiedades, 39.
 - 3.2.4. Arcillas con óxidos hidratados de hierro, aluminio y manganeso, 47.
 - 3.2.5. Métodos de estudio de las arcillas. Fundamento, 48.

- 4. MATERIA ORGANICA DEL SUELO, 53.**
 - 4.1. Material originario. Fuentes y composición química, 53.
 - 4.1.1. El proceso degradatorio. Dinámica y factores influyentes, 54.
 - 4.2. Humus. Naturaleza y constitución, 58.
 - 4.2.1. Origen y formación. Teorías, 59.
 - 4.2.2. Componentes húmicos. Aislamiento y características, 66.
 - 4.2.3. Hipótesis acerca de la estructura de las sustancias húmicas, 72.
 - 4.3. Propiedades generales del humus, 76.
 - 4.4. Funciones del humus en el suelo y acción sobre la nutrición de la planta, 77.

5. EL AGUA Y LA ATMOSFERA DEL SUELO, 81.

- 5.1. Estados del agua en el suelo, 81.
- 5.2. Fuerzas de retención del agua en suelos no saturados, 82.
- 5.3. Clasificaciones del agua del suelo, 86.
 - 5.3.1. En relación con las fuerzas de retención, 86.
 - 5.3.2. En función de su utilización por la planta, 87.
- 5.4. Movimiento del agua en el suelo, 88.
- 5.5. Utilización del agua del suelo por las plantas. Factores influyentes, 90.
 - 5.5.1. Transferencia del agua del suelo a la planta. Generalizaciones, 91.
- 5.6. Balance hídrico del suelo, 93.
- 5.7. Atmósfera del suelo. Composición, 94.
- 5.8. Mecanismos de renovación de la atmósfera del suelo, 96.

6. ADSORCION E INTERCAMBIO IONICO EN SUELOS, 99.

- 6.1. Las fracciones coloidales del suelo y tipos de cargas que condicionan el intercambio de iones, 100.
- 6.2. Mecanismo general del intercambio iónico. Importancia, 102.
- 6.3. Intercambio catiónico: Factores influyentes, 104.
- 6.4. Constantes características del complejo adsorbente, 110.
- 6.5. Determinación de la capacidad de cambio de cationes y de los cationes de cambio, 112.
- 6.6. Intercambio aniónico: Aspectos generales, 114.
- 6.7. Isotermas de adsorción. Formulaciones empíricas, 115.

7. LA REACCION DEL SUELO, 119.

- 7.1. Origen y causas de la reacción del suelo, 119.
- 7.2. Variaciones del pH del suelo, 122.
- 7.3. Influencia del estado y naturaleza del complejo coloidal en la reacción del suelo, 123.
- 7.4. Relación entre V, T y pH del suelo, 125.
- 7.5. Modalidades de la acidez del suelo, 126.
- 7.6. Poder amortiguador del suelo. Importancia, 128.
- 7.7. Modificación de la reacción del suelo, 131.
 - 7.7.1. Acidificación, 131.
 - 7.7.2. Alcalinización, 132.
- 7.8. Significación agrícola del pH del suelo, 132.

8. LOS ELEMENTOS QUIMICOS Y LA VIDA VEGETAL, 135.

- 8.1. La búsqueda de los elementos esenciales, 135.
- 8.2. Criterios de esencialidad, 140.
- 8.3. Macro y micronutrientes esenciales y elementos beneficiosos, 140.
- 8.4. Elementos no esenciales contenidos en las plantas, 142.
- 8.5. Origen y formas de los elementos esenciales utilizados por las plantas, 143.

- 8.6. Alteraciones en la planta por deficiencias de los elementos esenciales. Consideraciones, 144.
 - 8.7. Efectos tóxicos de los elementos minerales, 148.
- 9. ABSORCIÓN DE LOS ELEMENTOS NUTRITIVOS POR LAS PLANTAS, 151.**
- 9.1. Mecanismo de absorción. Teorías, 151.
 - 9.2. Factores influyentes en la absorción mineral, 155.
 - 9.2.1. Relacionados con el suelo, 155.
 - 9.2.2. Relacionados con la planta, 159.
 - 9.2.3. Relacionados con las condiciones climáticas, 161.
- 10. EL NITROGENO EN LA PLANTA, 165.**
- 10.1. Origen, contenido y formas, 165.
 - 10.2. Integración en la planta, 167.
 - 10.2.1. Absorción, 167.
 - 10.2.2. Reducción del nitrato, 167.
 - 10.2.3. Biosíntesis de los aminoácidos, 170.
 - 10.2.4. Biosíntesis de los aminoácidos amidados, 174.
 - 10.2.5. Biosíntesis protéica. Aspectos básicos, 176.
 - 10.3. Funciones, 180.
 - 10.4. Alteraciones por deficiencia y exceso, 180.
- 11. EL NITROGENO EN EL SUELO, 183.**
- 11.1. Origen, contenido y formas, 183.
 - 11.2. Dinámica del nitrógeno en el suelo. Procesos generales, 186.
 - 11.3. Ganancias, 188.
 - 11.3.1. Fijación biológica. Tipos, 188.
 - 11.3.2. Otras aportaciones, 199.
 - 11.4. Transformaciones, 200.
 - 11.4.1. Aminificación y amonificación. Mecanismos y factores influyentes, 200.
 - 11.4.2. Nitrificación. Mecanismos y factores influyentes, 204.
 - 11.5. Pérdidas, 209.
 - 11.5.1. Desnitrificación. Mecanismo y factores influyentes, 209.
 - 11.5.2. Descomposición de nitritos, 212.
 - 11.5.3. Volatilización del amoníaco, 213.
 - 11.5.4. Lixiviación de nitratos, 213.
 - 11.5.5. Extracción por cultivos, 214.
 - 11.5.6. Fijación del amonio por arcillas y materia orgánica, 215.
 - 11.6. Ciclo del nitrógeno en la Naturaleza. Balance, 215.
- 12. EL FOSFORO EN LA PLANTA, 219.**
- 12.1. Contenido, formas y compuestos importantes, 219.

- 12.2. Funciones, 223.
 - 12.2.1. Biogénesis de los glúcidos, 223.
 - 12.2.2. Biosíntesis de los lípidos, 226.
 - 12.2.3. Síntesis de clorofilas y compuestos carotenoides, 228.
 - 12.2.4. Glucolisis y metabolismo de los ácidos orgánicos, 229.
- 12.3. Alteraciones por deficiencia y exceso, 231.
- 13. EL FOSFORO EN EL SUELO, 233.**
 - 13.1. Origen, contenido y formas, 233.
 - 13.2. Dinámica del fósforo en el suelo. Factores influyentes, 236.
 - 13.2.1. Fósforo inorgánico, 237.
 - 13.2.2. Fósforo orgánico, 244.
 - 13.3. Pérdidas de fósforo en los suelos, 245.
 - 13.3.1. Extracción por cultivos, 246.
 - 13.3.2. Pérdidas por lixiviación, 246.
 - 13.3.3. Pérdidas por erosión, 247.
 - 13.3.4. Pérdidas por volatilización, 247.
 - 13.4. Ciclo del fósforo en la Naturaleza y su problemática bajo el punto de vista agrícola, 247.
- 14. EL POTASIO EN LA PLANTA, 251.**
 - 14.1. Contenido y formas, 251.
 - 14.2. Funciones, 252.
 - 14.2.1. Fotosíntesis, 253.
 - 14.2.2. Economía hídrica, 253.
 - 14.2.3. Activación enzimática, 253.
 - 14.3. Alteraciones por deficiencia y exceso, 255.
- 15. EL POTASIO EN EL SUELO, 259.**
 - 15.1. Origen, contenido y formas, 259.
 - 15.2. Dinámica, 260.
 - 15.2.1. Potasio no asimilable, 260.
 - 15.2.2. Potasio rápidamente asimilable, 260.
 - 15.2.3. Potasio lentamente asimilable, 261.
 - 15.2.4. Equilibrio del potasio en el suelo. Factores influyentes, 263.
 - 15.3. Pérdidas, 267.
 - 15.3.1. Lixiviación, 267.
 - 15.3.2. Extracción por cultivo, 268.
 - 15.3.3. Erosión, 269.
 - 15.4. Ciclo del potasio en la Naturaleza. Problemática bajo el punto de vista agrícola, 269.
- 16. EL AZUFRE EN LA PLANTA Y EN EL SUELO, 273.**
 - 16.1. Contenido, formas y compuestos importantes de azufre en la planta, 273.

- 16.2. Funciones en la planta, 275.
 - 16.2.1. Integración del azufre en los compuestos orgánicos y biosíntesis de los aminoácidos azufrados, 276.
 - 16.2.2. Formación del acetilcoenzima A, 279.
 - 16.3. Alteraciones en la planta por deficiencia y exceso, 282.
 - 16.4. El azufre en el suelo. Origen, contenido y formas, 283.
 - 16.5. Dinámica del azufre en el suelo, 284.
 - 16.5.1. Mineralización del azufre orgánico, 285.
 - 16.5.2. Oxidación del azufre mineral, 288.
 - 16.5.3. Reducción del azufre mineral, 290.
 - 16.6. Pérdidas de azufre en el suelo, 291.
 - 16.7. Ciclo del azufre en la Naturaleza, 291.
- 17. EL CALCIO EN LA PLANTA Y EN EL SUELO, 295.**
- 17.1. El calcio en la planta. Contenido y formas, 295.
 - 17.2. Funciones del calcio en la planta, 296.
 - 17.3. Alteraciones en la planta por deficiencia y exceso, 298.
 - 17.4. Origen, contenido, formas y dinámica del calcio en el suelo, 299.
 - 17.5. Pérdidas de calcio en el suelo, 302.
 - 17.6. La adición de cal a los suelos ácidos. Reacciones y repercusiones en la planta, 302.
 - 17.7. Ciclo del calcio en la Naturaleza, 306
- 18. EL MAGNESIO EN LA PLANTA Y EN EL SUELO, 309.**
- 18.1. Contenido y formas en la planta, 309.
 - 18.2. Funciones del magnesio en la planta, 310.
 - 18.2.1. Transformaciones de las hexosas fosforiladas, 311.
 - 18.2.2. Transformaciones en la glucólisis, 311.
 - 18.2.3. Ciclo de los ácidos tricarbóxicos, 311.
 - 18.2.4. Síntesis de los ácidos nucleicos, 313.
 - 18.3. Alteraciones en la planta por deficiencia y exceso, 314.
 - 18.4. Origen, contenido, formas y dinámica del magnesio en el suelo, 316.
 - 18.5. Pérdidas de magnesio en los suelos, 318.
 - 18.6. Ciclo del magnesio en la Naturaleza, 318.
- 19. EL HIERRO EN LA PLANTA Y EN EL SUELO, 321.**
- 19.1. Contenido y formas en la planta, 321.
 - 19.2. Funciones del hierro en la planta, 323.
 - 19.2.1. Los enzimas con estructura hierro-porfirina y la respiración vegetal, 323.
 - 19.2.2. Enzimas sin estructura hierro-porfirina. Procesos importantes en los que participan, 327.
 - 19.2.3. El hierro en la síntesis clorofílica, 329.
 - 19.3. Alteraciones en la planta por deficiencia y exceso, 330.

- 19.4. Origen, contenido y formas del hierro en el suelo, 335.
- 19.5. Dinámica del hierro en el suelo. Factores influyentes en su disponibilidad para la planta, 336.
 - 19.5.1. Influencia del pH, 336.
 - 19.5.2. Influencia de la composición del suelo, 338.

20. EL MANGANESO EN LA PLANTA Y EN EL SUELO, 341.

- 20.1. Contenido y formas en la planta, 341.
- 20.2. Funciones del manganeso en la planta, 342.
 - 20.2.1. Fotosíntesis, 342.
 - 20.2.2. Transformaciones de las hexosas fosforiladas. glucolisis y metabolismo de los ácidos orgánicos, 348.
 - 20.2.3. Metabolismo auxínico, 348.
 - 20.2.4. Metabolismo del nitrógeno, 349.
 - 20.2.5. Otros procesos significativos en los que el manganeso participa, 350.
- 20.3. Alteraciones en la planta por deficiencia y exceso, 352.
- 20.4. Origen, contenido y formas del manganeso en el suelo, 353.
- 20.5. Dinámica del manganeso en el suelo. Factores influyentes, 354.
 - 20.5.1. pH del suelo, 355
 - 20.5.2. Materia orgánica y actividad microbiana, 356.

21. EL BORO EN LA PLANTA Y EN EL SUELO, 359.

- 21.1. Contenido y formas en la planta, 359.
- 21.2. Funciones del boro en la planta, 360.
 - 21.2.1. Metabolismo y transporte de carbohidratos, 361.
 - 21.2.2. Formación de las paredes celulares. Lignificación, 362.
 - 21.2.3. Influencia en el metabolismo de ácidos nucleicos y en la síntesis protéica, 362.
 - 21.2.4. Efectos en la síntesis de sustancias importantes en la planta, 364.
- 21.3. Alteraciones en la planta por deficiencia y exceso, 365.
- 21.4. Origen, contenido y formas del boro en el suelo, 368.
- 21.5. Dinámica del boro en el suelo. Factores influyentes, 369.
 - 21.5.1. Textura del suelo, 369.
 - 21.5.2. pH y componentes del suelo, 369.
 - 21.5.3. Factores climáticos, 373.

22. EL CINCO EN LA PLANTA Y EN EL SUELO, 375.

- 22.1. Absorción y contenido en la planta, 375.
- 22.2. Funciones del cinc en la planta, 376.
 - 22.2.1. Biosíntesis auxínica, 376.
 - 22.2.2. Metabolismo nitrogenado, 376.

- 22.2.3. Glucolisis y transformación de las hexosas fosforiladas, 378.
 - 22.2.4. Otros enzimas activados por cinc, 379.
 - 22.3. Alteraciones en la planta por deficiencia y exceso, 380.
 - 22.4. Origen, contenido y formas del cinc en el suelo, 381.
 - 22.5. Dinámica del cinc en el suelo. Factores influyentes, 382.
 - 22.5.1. pH del suelo, 383.
 - 22.5.2. Textura y composición del suelo, 383.
- 23. EL COBRE EN LA PLANTA Y EN EL SUELO, 387.**
- 23.1. Contenido y formas en la planta, 387.
 - 23.2. Funciones del cobre en la planta, 388.
 - 23.2.1. Enzimas con cobre y procesos en los que intervienen, 388.
 - 23.2.2. Otros procesos en los que el cobre participa, 392.
 - 23.3. Alteraciones en la planta por deficiencia y exceso, 394.
 - 23.4. Origen, contenido y formas del cobre en el suelo, 395.
 - 23.5. Dinámica del cobre en el suelo. Factores influyentes, 396.
 - 23.5.1. Materia orgánica, 396.
 - 23.5.2. pH del suelo, 397.
 - 23.5.3. Interacciones con otros elementos, 398.
- 24. EL MOLIBDENO EN LA PLANTA Y EN EL SUELO, 403.**
- 24.1. Absorción, necesidades y contenidos en la planta, 403.
 - 24.2. Funciones. Enzimas importantes conteniendo molibdeno, 404.
 - 24.3. Alteraciones en la planta por deficiencia y exceso, 406.
 - 24.4. Origen, contenido y formas del molibdeno en el suelo, 407.
 - 24.5. Dinámica del molibdeno en el suelo. Factores influyentes, 408.
 - 24.5.1. pH del suelo, 408.
 - 24.5.2. Contenido en el suelo de óxidos de hierro y aluminio, 409.
 - 24.5.3. Materia orgánica, 410.
 - 24.5.4. Efecto del contenido en el suelo de fósforo y azufre, 411.
- 25. EL CLORO EN LA PLANTA Y EN EL SUELO, 413.**
- 25.1. Contenido, formas y función del cloro en la planta, 413.
 - 25.2. Alteraciones en la planta por deficiencia y exceso, 414.
 - 25.3. Origen, contenido y dinámica del cloro en el suelo, 415.
- 26. ELEMENTOS QUIMICOS ESENCIALES PARA ALGUNAS PLANTAS, 419.**
- 26.1. Sodio, 419.
 - 26.1.1. Contenido, función y efectos beneficiosos en la planta, 419.
 - 26.1.2. Contenido y dinámica en el suelo, 422.
 - 26.2. Silicio, 425.
 - 26.2.1. Contenido, función y efectos beneficiosos en la planta, 425.
 - 26.2.2. Contenido y dinámica en el suelo, 426.

26.3. Cobalto, 427.

26.3.1. Contenido y función en la planta, 428.

26.3.2. Contenido y dinámica en el suelo, 429.

26.4. Vanadio, 430.

26.4.1. Contenido, funciones y efectos beneficiosos en la planta, 430.

26.4.2. Contenido y situación en el suelo, 432.

BIBLIOGRAFIA, 433

INDICE ALFABETICO DE MATERIAS, 479.

1

QUIMICA AGRICOLA. EVOLUCION Y CONCEPTO.

Al estudiar los diversos factores que han desempeñado papeles importantes en el desarrollo de la Agricultura, se saca como conclusión que la Química ha ocupado, y sigue ocupando en la actualidad, un lugar preeminente. Particularmente en los últimos 150 años, su participación en este desarrollo ha sido tan grande que de ella ha surgido una rama de especial importancia, la llamada Química Agrícola.

Hay que reconocer, sin embargo, que la entidad propia de esta ciencia, admitida plenamente en el momento actual, se ha forjado a través del tiempo y con las continuas aportaciones de muchos pensadores y científicos que, a lo largo de muchos siglos, se interesaron por los problemas agrícolas. Por ello, consideramos que para llegar a establecer un concepto suficientemente claro de lo que es la Química Agrícola es necesario previamente conocer algo de su evolución histórica. De esta forma se comprenderá mejor cómo ha nacido y la orientación que debe tener para aportar una ayuda eficaz a la Agricultura.

1.1. ANTECEDENTES E INICIACION DE LA QUIMICA AGRICOLA.

Basada fundamentalmente en la aportación de algunos clásicos griegos, es en tiempo de los romanos cuando empieza ya a disponerse de una extensa literatura sobre Agricultura, casi toda ella recopilada y resumida, alrededor del año 1240, por **P. Crescentius** en un libro titulado *Opus ruralium comodorum*. El texto, muy popular en su tiempo, puede decirse que constituyó el punto de partida para la publicación de la gran serie de libros aparecidos en Europa durante los siglos XVI y XVII.

Hasta esta época, y durante muchos años después del trabajo de **Crescentius**, poco nuevo se aportó realmente al conocimiento de los problemas agrícolas, aunque se publicaron algunos libros sobre temas agrícolas en el siglo XV y principios del XVI en Italia y Francia. En algunos de ellos se exponen ideas y teorías que posteriormente tuvieron una cierta

confirmación. Así, por ejemplo, **B. Palissy** (1563) manifestaba que en las cenizas de las plantas se encontraban los materiales que éstas extraían del suelo. Durante estos años hay que reconocer que hubo un gran interés por los aspectos prácticos de la agricultura, pero se careció del espíritu científico necesario para buscar las causas de los fenómenos que describían.

Ya en el siglo XVII, la preocupación científica por los fenómenos de la fertilidad del suelo y del desarrollo de las plantas es notoria. **F. Bacon** (1561-1624) considera que el principal alimento de las plantas era el agua, y que la principal función del suelo era la de mantener las plantas erguidas y protegerlas del frío y del calor. También sostenía que el continuo cultivo de una determinada planta sobre un mismo suelo lo empobrecía para esta especie en particular, ya que cada planta extraía del suelo una sustancia concreta para su alimentación y correcto desarrollo.

Otro científico de la época, **J.B. Van Helmont** (1577-1644), físico y químico flamenco, de acuerdo con las ideas de **Bacon** realiza una experiencia que, según él, demostraba que el agua tenía que ser el *principio de la vegetación*. Puso 90'60 Kg de suelo, desecado al horno, en un recipiente de arcilla, lo humedeció con agua de lluvia y plantó un vástago de sauce que pesaba 2'26 Kg. Cubrió la tierra con una hoja de hierro estañada provista de agujeros para protegerla del polvo, y sólo añadió agua de lluvia. Exactamente al cabo de cinco años acabó su experimento. El árbol en el que se había transformado la rama de sauce pesaba 76'64 Kg. En el suelo de nuevo secado encontró como única pérdida de peso la de 56 g sobre los 90'60 Kg originales. Debido a que solo había añadido agua, sacó como conclusión que ésta era el único alimento de las plantas. La pérdida de los 56 g de peso de suelo la atribuyó a un error experimental.

En esta experiencia, muy típica de casi toda la primitiva labor de investigación en Química Agrícola, no se tuvo en cuenta dos factores básicos, deduciéndose de un experimento bien planteado para las circunstancias de entonces una conclusión totalmente falsa. **Van Helmont** no tomó en consideración el papel desempeñado por los componentes de la atmósfera, ni tampoco los 56 g de suelo que habían desaparecido. Hay que recordar, sin embargo, que este trabajo se realizó en un tiempo en el que todavía no se sabía nada de la nutrición mineral, ni de la fotosíntesis.

El trabajo de **Van Helmont** fue repetido posteriormente por un prestigioso científico, el inglés **R. Boyle** (1627-1691), y como resultado de los análisis químicos efectuados llegó a la conclusión de que las plantas contenían sales, energía, tierra y aceite, y que todos estos productos podían proceder del agua.

Durante este mismo periodo, **J.R. Glauber** (1604-1668), un químico alemán, sostiene la hipótesis de que el nitrato potásico, y no el agua es el *principio de la vegetación*. Después de obtener la sal a partir de la tierra recogida de establos de ganado bovino, dedujo que debía proceder de la orina o de las deyecciones sólidas de los animales; y dado que los animales se alimentaban de las plantas, el nitrato potásico debía proceder originariamente de éstas. Comprobó también que las aplicaciones al suelo producían grandes incrementos de la cosecha. Al relacionar ambos hechos se convenció de que la fertilidad del suelo y el valor del estiércol dependían totalmente del nitrato potásico. Otro químico inglés de la época, **J. Mayow** (1643-1679), realizó también en este sentido numerosos experimentos. Los resultados obtenidos ratificaron las ideas de **Glauber**.

En 1699, **J. Woodward** publica un trabajo que supuso ya un gran avance en la experimentación agrícola. Basándose en lo anteriormente realizado por **Van Helmont** y **Boyle**, cultivó menta en agua de distintas procedencias: agua de lluvia, de río, residual y residual añadiéndole un mantillo de jardín. Comprobó que el crecimiento de las plantas aumentaba al incrementarse las cantidades de impurezas contenidas en el agua, y de ello dedujo que los vegetales no se forman a partir del agua, sino que lo hacen a partir de los materiales sólidos presentes en el suelo. Aunque su conclusión no fue totalmente correcta, hay que reconocer que representó un gran avance en el esclarecimiento de la nutrición vegetal.

Merece citarse también por esta época al inglés **J. Tull** (1674-1741). Creía que el verdadero alimento de las plantas lo constituían las partículas más finas del suelo, las cuales eran absorbidas directamente por las raíces y después pasaban al sistema circulatorio. Sus ideas, un tanto pintorescas consideradas en el momento actual, fueron, sin embargo, y durante bastantes años, altamente apreciadas en los círculos agrícolas ingleses.

1.2. AVANCES EN EL SIGLO XVIII.

Durante la segunda mitad del siglo XVIII se manifestó ya un interés considerable por todos los aspectos de la Agricultura. Se escribieron libros de texto, se incrementaron los trabajos experimentales y se fundaron sociedades para impulsar el desarrollo de la Agricultura.

En 1775, la Edimburg Society de Inglaterra encargó a **F. Home**, químico, determinar hasta qué punto podría la Química llegar a establecer los fundamentos de la Agricultura. **Home** orientó sus investigaciones hacia la nutrición de las plantas, llegando finalmente a la conclusión de que existían por

lo menos seis materias nutritivas para ellas: aire, agua, tierra, sales, aceite y fuego, en un estado fijo. Su libro *Los principios de la agricultura y la vegetación* constituyó un gran avance sobre las anteriores publicaciones de esta época, no solamente porque reconoce que la nutrición vegetal depende de varios factores, sino también porque indica muy claramente los dos métodos a seguir para estudiar el problema: cultivos en tiestos y análisis de la planta.

En 1761. **J.G. Wallerius**, profesor de Química en la Universidad de Upsala, presentó su libro *De Humo*, primera orientación científica de la Química Agrícola. En él se encuentran indicaciones de la formación del humus durante la descomposición del material vegetal y algunas de sus propiedades, como la naturaleza hidrofílica y la capacidad de adsorber nutrientes.

A. Young (1741-1820) fue uno de los investigadores de este tiempo digno de ser citado. **Young** hizo gran número de pruebas con tiestos para encontrar cuáles eran las sustancias que incrementaban el rendimiento de las cosechas. Cultivó cebada en arena, a la cual añadía materiales diversos: carbón de leña, aceite, estiércol de ave, residuos vínicos, nitratos, pólvora negra, brea, conchas de ostras y otros materiales muy diversos. Algunos favorecieron el crecimiento de las plantas, otros no. **Young** fue también un magnífico escritor, y publicó un tratado titulado *Anales de Agricultura*, en cuarenta y seis volúmenes, que fue muy estimado en los medios agrícolas ingleses.

El descubrimiento del oxígeno por **Priestly** puede considerarse como el punto de partida de otros numerosos descubrimientos. Entre estos destacan los realizados por **J. Ingen-Housz** (1730-1799), que en su libro *Experimentos sobre vegetales*, publicado en 1779, demostraba que la luz solar era necesaria para la producción de oxígeno; que solamente las hojas y peciolo podían sintetizar; y, finalmente, que los frutos y las plantas en la oscuridad respiraban como los animales. Estas conclusiones fueron también las obtenidas por **J. Senebier** en Ginebra. Sus estudios simultáneos del problema opuesto, efecto del aire sobre la planta, le permitieron sugerir en sus *Memorias físico-químicas*, de 1782, que el aumento de peso del tallo de sauce en el experimento de **Van Helmont** se debía al aire fijado.

Aunque la mayoría de los avances hechos en la Química Agrícola durante el siglo XVIII tuvieron lugar en Europa, alguna contribución americana de los primeros tiempos fue suficientemente significativa para ser mencionada.

Posiblemente, la primera publicación americana relacionando la Química con la Agricultura fue la de **J. Winthrop**, primer gobernador de Connecticut, en 1678, con el título *Descripción, cultivo y utilización del maíz*.

En 1688, **J. Clayton** ponía en evidencia ciertas propiedades químicas del tabaco. Y también merece citarse uno de los primeros químicos que ejerció una verdadera influencia en la agricultura americana, **S.L. Mitchell**, profesor de Química y Agricultura en el Columbia College desde 1792 a 1801, y uno de los fundadores en New York de la Sociedad para el Progreso de la Agricultura, Manufacturas y Artes Prácticas.

1.3. EVOLUCION Y PROGRESOS EN EL SIGLO XIX.

Para apreciar la naturaleza radical de la evolución de la Química que tuvo lugar en el siglo XIX, basta comparar los trabajos de **Ingen-Housz** con los de **T. de Saussure**, publicados en 1804 en su libro *Investigaciones químicas sobre la vegetación*, tan solo 25 años después. En su obra, **De Saussure** afronta dos problemas sobre los cuales había trabajado **Senebier**: el efecto del aire sobre las plantas y el origen de las sales en las plantas. Como resultado de una amplia experimentación, fue capaz de demostrar que las plantas podían absorber dióxido de carbono y desprender oxígeno en presencia de la luz. Y que, si las plantas se guardaban en un lugar sin dióxido de carbono, morían.

Pero la extraordinaria labor de **De Saussure** no se concretó solo a lo anteriormente expuesto. También dedujo que el suelo suministraba sólo una pequeña cantidad de los alimentos que necesitaban las plantas, y aportó para demostrarlo los resultados obtenidos con el análisis de sus cenizas. Hizo desaparecer la idea de que las plantas generaban espontáneamente potasa, y concretó aspectos importantes de la asimilación del nitrógeno y de las funciones de la raíz. También demostró que la diferencia en la absorción de sales por las plantas dependía de su edad y de la composición del suelo, y fue el primer investigador que puso de manifiesto que el humus contiene más carbono y menos hidrógeno que los residuos vegetales ordinarios, hecho que sirvió, en cierto modo, para evidenciar la complejidad del proceso de formación del humus.

Aunque la interpretación dada por **De Saussure** a sus resultados no fue completamente correcta, su trabajo, después comprobado repetidamente por otros investigadores, puede considerarse fundamental para el esclarecimiento del proceso general de la nutrición vegetal. Pero además, el mérito fundamental de este investigador fue el de haber iniciado y desarrollado el método experimental cuantitativo que sirvió de base a los posteriores trabajos de **Boussingault**, **Liebig**, **Lawes** y **Gilbert**, y que ha hecho posible, más que cualquier otra cosa, el desarrollo de la Química Agrícola moderna.

Los trascendentales resultados de **De Saussure** no fueron aceptados durante muchos años, ni tampoco sus métodos. Los libros más difundidos entonces, de **A. von Thaer** y **H. Davy**, no acusaron los cambios fundamentales introducidos por aquel. **Thaer**, por ejemplo, publicó *La base de la agricultura racional*, en 1810, y en él se mantenía aún la idea entonces predominante de que las plantas extraían su carbono y otros nutrientes del humus del suelo. *Elementos de Química Agrícola*, publicado en 1813 por **Davy**, constituye el último texto del viejo periodo, y surgió de las lecciones que daba anualmente en The Royal Institution sobre Química Agrícola. Más que aportaciones originales, su mérito estriba en haber sabido sistematizar los hechos conocidos hasta entonces y dar, con gran responsabilidad, una importancia a la Química Agrícola que de otro modo no hubiese tenido.

A partir de 1834 se despertó un nuevo interés por la investigación agrícola. Hasta ese momento, las investigaciones se habían realizado sólo en los laboratorios o en macetas. Fue entonces cuando el francés **J.B. Boussingault** comenzó sus célebres experimentos de campo en su granja de Alsacia, históricamente las primeras en este sentido. **Boussingault** actualizó los métodos cuantitativos de **De Saussure**; pesó y analizó los fertilizantes utilizados y las cosechas obtenidas, y demostró concluyentemente cómo el aire y el agua eran fuentes nutritivas de carbono, hidrógeno y oxígeno. Realizó también trabajos importantes acerca de la asimilación por las plantas del nitrógeno del aire, y abordó problemas relacionados con la nutrición de los animales.

En el periodo comprendido entre 1830 y 1840 no se registran descubrimientos de importancia. Pero en 1840, la comunicación del químico alemán **Justus von Liebig**, *La Química y sus aplicaciones a la Agricultura y Fisiología*, presentada a la British Association, conmovió tan fuertemente a los científicos conservadores de aquel tiempo que a partir de entonces fueron muy pocos los que siguieron afirmando que el carbono contenido en las plantas provenía de alguna otra fuente que no fuera el dióxido de carbono. Sus principales afirmaciones en dicha comunicación fueron:

1.- La mayor parte del carbono de las plantas procede del dióxido de carbono de la atmósfera. Pero también, la aportación de humus al suelo debido a la continua producción de dióxido de carbono, puede ser una fuente para la incorporación de este compuesto a la planta a través de las raíces.

2.- El hidrógeno y el oxígeno provienen del agua.

3.- Los metales alcalinos son necesarios para la neutralización de los ácidos formados en las plantas como resultado de sus actividades metabólicas.

4.- Los fosfatos son necesarios para la formación de las semillas.

5.- Las plantas absorben sin discriminación los materiales del suelo, pero eliminan por sus raíces aquellos que no les son necesarios.

Indudablemente, no todas las ideas de **Liebig** eran correctas. Creía que el ácido acético era eliminado por las raíces, y que el hecho de que una determinada sustancia estuviera presente en las cenizas de la planta era prueba suficiente de su esencialidad. También sostenía que la única forma de nitrógeno que podían absorber las plantas era la amónica, a partir del suelo, del estiércol o del aire.

Liebig creía firmemente que analizando las plantas y conociendo los elementos que contenían, se podían dar las necesarias recomendaciones para una fertilización adecuada. Dedujo la necesidad del fósforo para las plantas y sugirió que este elemento, bajo la forma de fosfato insoluble de los huesos, podía transformarse más o menos en soluble por tratamiento con un ácido mineral. También opinaba que el crecimiento de las plantas era proporcional a la cantidad de sustancias minerales asimilables contenidas en el fertilizante. Casualmente desarrolló la “ley del mínimo”, al indicar que el crecimiento de las plantas está limitado por el elemento nutritivo presente en más pequeña cantidad, si todos los otros estaban presentes en cantidades adecuadas. Estos conceptos dominaron los pensamientos de los investigadores agrícolas por un largo tiempo.

La contribución de **Liebig** al avance de la Agricultura fue enorme, no solo por sus aciertos, sino también por sus errores, ya que estimularon posteriores investigaciones para comprobar o rebatir sus ideas. Por ello, es quizá muy justamente reconocido como el padre de la Química Agrícola. La gran importancia que **Liebig** concedía a la investigación agrícola y el relevante papel que en ella debe desempeñar la Química puede deducirse del siguiente párrafo:

“Una Agricultura perfecta es la verdadera base del comercio y de la industria. Es la base de la riqueza de los estados, pero el sistema racional de la agricultura no puede formarse sin la aplicación de principios científicos, ya que dicho sistema debe basarse en un exacto conocimiento de las necesidades nutritivas de los vegetales y de la influencia del suelo y acción que éste ejerce sobre el estiércol. Estos conocimientos deben basarse en la Química, que enseña la manera de investigar la composición y el carácter de las distintas sustancias que sirven de alimento a las plantas”.

En 1843 se crea en Rothamsted, Inglaterra, una Estación Experimental de Agricultura. Los fundadores de esta institución fueron **J.B. Lawes** y **J.H.**

Gilbert, los cuales iniciaron una amplia investigación para comprobar algunas de las afirmaciones de **Liebig** que no consideraban correctas. Doce años después de la fundación de la estación establecieron los siguientes principios:

1.- Los cultivos requieren fósforo y potasio, pero la composición de los residuos de las plantas no es una medida de las cantidades requeridas de dichos elementos.

2.- Las plantas no leguminosas precisan de un suplemento de nitrógeno, siendo igualmente beneficiosos los nitratos y las sales amónicas. Sin este elemento no se puede conseguir ningún aumento del crecimiento, aún cuando se añadan los constituyentes de las cenizas. La cantidad de nitrógeno amoniacal suministrado por la atmósfera es insuficiente para las necesidades de los cultivos.

3.- La fertilidad del suelo puede ser mantenida durante algunos años con el empleo de fertilizantes químicos.

4.- El efecto beneficioso de los barbechos se debe al aumento de la cantidad de compuestos de nitrógeno utilizables en el suelo.

La colaboración entre **Lawes** y **Gilbert** fue una de las más completas entre hombres de ciencia. Trabajaron juntos por espacio de 57 años, hasta la muerte del primero en 1900. **Gilbert** murió un año más tarde. La investigación realizada por ellos y sus discípulos no se ha interrumpido desde entonces, permitiendo con ello no solo cimentar la parte positiva de teorías científicas anteriores, sino poner jalones fundamentales en el desarrollo de numerosos aspectos de la moderna Química Agrícola.

En 1856, **Salm-Horstmar** cultivó plantas en frascos de estaño revestidos de cera conteniendo arena, cuarzo pulverizado y carbón de azúcar. Estos materiales habían sido previamente hervidos con ácidos para separar las pequeñas cantidades de materia mineral. Omitiendo la adición de uno o más elementos en la disolución nutritiva sacó como consecuencia que el fósforo, azufre, potasio, calcio, magnesio y silicio eran elementos que debían considerarse esenciales para el crecimiento de las plantas.

También por esta época se establece la esencialidad del hierro por **J. Sachs** (1860), aunque ya **E. Gris** (1843) había descrito los fenómenos que acontecen en los vegetales privados de un suministro adecuado de este nutriente. En este tiempo se generalizó la opinión de que el hierro formaba parte de la clorofila, al estimar que en el caso de las plantas existía, como en los animales, una relación hierro-pigmento.

En 1879, el francés **G. Ville**, en su libro *Fertilizantes artificiales. su química, selección y aplicación científica a la Agricultura*, llega incluso más lejos que **Lawes** y **Gilbert**, sosteniendo que los abonos artificiales eran más remuneradores que el estiércol, e incluso constituían el único medio para mantener o incrementar la fertilidad. Y llegó a establecer el carácter selectivo que para algunos nutrientes presentan las especies vegetales, concepto que hoy se ha generalizado con numerosas afirmaciones experimentales.

Otra cuestión, objeto en este tiempo de numerosas discusiones, fue la fuente de nitrógeno para las plantas. Diversos investigadores habían observado la extraña conducta de las leguminosas. Algunas veces crecían bien en los suelos en los que no se había añadido nitrógeno, mientras que en otros no se obtenía ningún rendimiento. Por otro lado, las plantas no leguminosas nunca se desarrollaban bien con insuficientes cantidades de nitrógeno en el suelo.

Esta problemática fue, ya avanzada la segunda mitad del siglo XIX, el inicio del desarrollo de la Microbiología del suelo, que había de conducir a resultados de gran importancia en la estructuración definitiva de la Química Agrícola. Con su desarrollo se reconocen los mecanismos químicos de la nitrificación y desnitrificación en el suelo, y aparecen nuevas ideas sobre la naturaleza y origen de las sustancias húmicas y su papel en el suelo. **C. Sprengel** (1837), **K. Tarkhof** (1881), **P.E. Müller** (1887), **J.van Bemmelen** (1888) y otros, establecen hechos importantes en este sentido.

En cuanto al aparente misterio de la absorción de nitrógeno atmosférico por las leguminosas, la brillante experimentación realizada por **H. Hellriegel** y **H. Wilfarth**, en 1886, demostró con absoluta claridad que aquella estaba condicionada por un factor independiente del suelo y de la planta; y supusieron, acertadamente, que las bacterias contenidas en los nódulos de las raíces asimilaban el nitrógeno, que era posteriormente aportado a la planta. Se debe a **M.W. Beijerinck** el aislamiento del microorganismo, denominado entonces *Bacillus radicicola*, y que en la actualidad se conoce como *Rhizobium*.

También en este siglo merecen citarse notables aportaciones a la Química Agrícola por parte de los científicos americanos. Ya en 1806, **T. Ewell**, de Virginia, publicó un importante tratado en el que se expone la íntima relación existente entre la Agricultura y la Química. En 1810, **G. Troost** realiza los primeros estudios sobre la composición de los suelos de Pennsylvania; y **E. Ruffin**, en 1821, publicó *Ensayo sobre los abonos calcáreos*, que considerablemente ampliado apareció en forma de libro en 1852.

Entre 1840 y 1850 se observa un considerable aumento en las actividades científicas relacionadas con problemas agrícolas. Se realizan estudios químicos de los suelos, de las cosechas, de los alimentos y de los fertilizantes; y surge gran número de publicaciones. En este periodo, **S.L. Dana** publica *Manual de estiércol*; **W. Jhonson**, profesor de Química Agrícola en Yale, destaca por su libro titulado *Cómo se nutren las plantas y cómo crecen las cosechas*; **E. Pugh**, colaborador de **Lawes** y **Gilbert** durante dos años en Rothamsted, publica la obra *El origen del nitrógeno en la vegetación*; y **J.W. Draper**, que fue el primer presidente de la American Chemical Society, en 1884, presenta su *Tratado de las fuerzas que originan la organización de las plantas*.

La importante contribución de la química al desarrollo de la agricultura en América fue puesta claramente de manifiesto por **H.W. Wiley**, en 1901, en un discurso a la American Chemical Society:

“De cuarenta y nueve directores actuales de granjas experimentales, veinte eran químicos profesionales cuando recibieron el nombramiento. La selección de tantos químicos profesionales no fue una pura casualidad, sino que tuvo evidentemente alguna relación con el papel preponderante que la Ciencia Química en el progreso de la investigación agrícola. La lista de directores de las granjas agrícolas experimentales de Alemania indica el mismo estado de cosas”.

Toda esta considerable investigación relacionada con la Agricultura, y en la que la Química ha tomado parte directa, ha experimentado un impulso grandísimo en el siglo XX. La enumeración, aunque tan sólo sea en parte, de lo realizado en el siglo actual y de los hombres que han contribuido a este desarrollo sería realmente fabulosa, y caen fuera de los límites impuestos a este breve resumen histórico. Hay que resaltar, sin embargo, que estos progresos no han sido debidos al trabajo de científicos de algún país determinado, sino de muchos y muy distintos países. Sus frutos son evidentes, porque la producción agrícola y la calidad de las cosechas son más altas y mejores que en cualquier otro tiempo pasado.

1.4. LINEAS DE TRABAJO Y CONCEPTO DE LA QUIMICA AGRICOLA.

Expuesto así el aspecto histórico, veamos a continuación, y antes de establecer un concepto claro de la Química Agrícola, cuáles son las líneas de investigación que en el momento actual se desarrollan dentro de su campo.

La “Química del Suelo”, con su amplia temática, constituye una de las ramas fundamentales, particularmente en aquellas condiciones químicas o bioquímicas que más directamente están relacionadas con el crecimiento de las plantas. El estudio de las fracciones coloidales, inorgánica, orgánica o mixta, asiento de cambios muy variados y responsables del funcionamiento normal del suelo, es objeto de atención de gran número de investigadores; Y así, los procesos de adsorción, intercambio iónico y quelación, constituyen temas de gran importancia investigados ampliamente en los últimos años. Así mismo, el esclarecimiento de la estructura, composición y funciones del humus. Los procesos químicos dirigidos a modificar las condiciones naturales de los suelos para lograr una mejor y mayor producción vegetal, y en los que están involucrados aspectos interesantísimos de pH y enmiendas. El conocimiento de la dinámica química de los elementos esenciales para las plantas y sus interrelaciones. Los procesos químicos y biológicos que se desarrollan en el suelo, etc., son aspectos en cuyo conjunto pueden incluirse gran cantidad de derivaciones, siempre interesantes de estudio y con notables repercusiones de tipo económico en la Agricultura.

La “Química de la Planta” constituye otra gran base de la Química Agrícola, y en ella, la investigación de sustancias vegetales tan importantes como son aminoácidos, proteínas, hidratos de carbono, pigmentos, etc., no tiene sólo un carácter meramente analítico, sino que se extiende hasta el conocimiento completo de su constitución, funciones e incluso de su metabolismo y degradación. En este sentido, el estudio de aspectos bioquímicos fundamentales de las plantas de interés agrícola recibe cada día mayor atención por parte del investigador. Por ello, no es extraño que, en los últimos años, la Química de la Planta haya tomado algunas posiciones que la acercan, en determinados aspectos, cada vez más a la Bioquímica y a la Fisiología Vegetal. El esclarecimiento del proceso de la fotosíntesis y de la proteosíntesis, fenómenos fundamentales de la vida, serían ejemplos más que suficientes para demostrar su importancia. Pero junto a ellos, podemos citar los referentes a la bioquímica de los elementos esenciales, los aspectos químicos de la conservación de productos agrícolas, el aprovechamiento de subproductos, la obtención de sustancias químicas naturales producidas en la planta y de interés en la industria y medicina, etc.

El suelo y la planta determinan, así mismo, un sistema más complejo aún, en su conjunto, que cada uno de ellos considerados por separado: el “Sistema Suelo-Planta”.

Este sistema, en sus aspectos físico-químicos y bioquímicos constituye tradicionalmente, como la Química del Suelo y la Química de la Planta, campo del mayor interés de la Química Agrícola, y mediante el cual

esta ciencia se relaciona estrechamente con la Fisiología Vegetal, Bioquímica, Botánica, Edafología, etc. Por otra parte, la Química del Sistema Suelo-Planta es, posiblemente, una de las líneas más específicas de la Química Agrícola, sobre todo por la posibilidad de estudiar y modificar, con criterios fundamentalmente químicos, sus condiciones, de manera que se obtengan resultados útiles para la Agricultura.

En este capítulo destaca la nutrición mineral de la planta y los posibles mecanismos de absorción. Así, las condiciones de integración de los iones minerales en los compuestos orgánicos. La dinámica del agua en el suelo y su absorción y emisión por la planta, factor limitante de la producción vegetal. Y misión especial de la Química Agrícola en esta línea es llevar a las experiencias de campo nuevos conocimientos y métodos, estudiar el comportamiento del Sistema Suelo-Planta, y señalar el modo de actuar sobre él, modificándolo en cada caso, a fin de obtener los mejores rendimientos cualitativos y cuantitativos.

Pero no finaliza aquí el campo de la Química Agrícola. Y así, con independencia de lo ya apuntado, podríamos señalar muchos aspectos externos al Sistema Suelo-Planta: los estudios relacionados con la fijación de fertilizantes en el medio nutritivo, su absorción por las plantas y la aplicación de nuevos productos, de los que son ejemplos representativos los quelatos y abonos micronutrientes; la síntesis de productos de acción hormonal y otras sustancias de acción fisioterapéutica; la producción, formulación y aplicación de fertilizantes, insecticidas, herbicidas, fungicidas y aditivos diversos; la síntesis y utilización de productos íntimamente relacionados con las prácticas agrícolas, plásticos, tensoactivos, etc.

Finalmente, el Análisis Agrícola, con su concreta entidad, adquirida por las características y naturaleza de las sustancias a estudiar y por las continuas modificaciones que sufre, constituye, si no una rama de la Química Agrícola, sí un auxiliar fundamental. La utilización de la energía nuclear (radiación y radiosótopos), el análisis térmico diferencial, la microscopía electrónica, la cromatografía líquido-líquido y gaseosa, polarografía, espectrofotometría, etc., hacen posible la identificación y cuantificación correcta de muchas sustancias. Puede decirse que con esta orientación analítica se está dando un impulso considerable a la investigación agrícola.

Varios hechos importantes se deducen de lo que hasta ahora hemos expuesto. En primer lugar, la Química Agrícola, por los medios y conocimientos que aporta, es la base inmediata de un buen número de otras ciencias agrícolas que en la actualidad tienden a tener, o tienen ya, una entidad propia, y que sin su concurso sería muy difícil su desarrollo.

Un segundo hecho a resaltar es que la Química Agrícola no puede considerarse encerrada dentro de unos límites concretos. Sus posibilidades, ya de por sí extensas, se hallan grandemente ampliadas por esas íntimas conexiones, de tal manera que rara es la actividad de la Química que, directa o indirectamente, no tenga o pueda tener relación con algún problema agrícola.

Por último, que los resultados conseguidos por la Química Agrícola, directamente o influidos por las necesidades demandadas por la propia Agricultura, han contribuido poderosamente al aumento y calidad de los productos agrícolas, a su conservación y a su rentabilidad.

La Química Agrícola, por tanto, no puede ceñirse solo al estudio de aspectos concretos, como apuntan algunas revistas especialidades; tampoco debe enfocarse hacia un criterio meramente productivo; ni incluso con el de su utilidad a la Agricultura.

La Química Agrícola debe tener un sentido y unas metas más amplias: Es la Química del suelo, de la planta y de todos los procesos y materiales agrícolas que, directa o indirectamente, puedan estar relacionados con la Agricultura. En definitiva, la Química Agrícola significa la convergencia, la integración de diversos sectores de la Ciencia Química hacia un objetivo común: El desarrollo y mejora de la Agricultura.

1.5. POSIBILIDADES FUTURAS.

Es evidente que los progresos realizados por la Química Agrícola a través del tiempo y que han proporcionado los extraordinarios conocimientos de la época presente, no sólo han sido debidos al esfuerzo de muchos científicos y a la continua mejora de las técnicas utilizadas, sino también a la acción coordinada de diversas ramas de la Ciencia que en otras épocas actuaban separadamente.

En el momento actual, la Agricultura y sus industrias derivadas siguen siendo la fuente máxima de alimentos, y por ello, las causas anteriormente apuntadas se han potenciado considerablemente por la instalación de nuevas y modernas instalaciones que, en un perfecto y programado trabajo de equipo, proporcionan nuevos conocimientos y abren nuevas rutas de investigación. Las posibilidades que se vislumbran para un futuro próximo son realmente enormes, no solo para completar y ampliar estudios ya iniciados, sino también para iniciar otros actualmente inéditos.

Y así, en el campo abarcado por la Química Agrícola, y en una rápida visión de estas posibilidades, podríamos citar, entre otras, las siguientes:

* El conocimiento de muchos aspectos aún oscuros en la química del humus y el estudio concreto de los fenómenos de interacción arcilla-humus en su conjunto.

* El descubrimiento de nuevos elementos esenciales y el esclarecimiento de la función específica que realizan otros, en los cuales ya está establecida su esencialidad, como silicio, cloro, boro, etc.

* Esclarecimiento de muchos procesos químicos que se desarrollan en la planta y de los sistemas enzimáticos que los regulan o catalizan.

* El conocimiento químico de nuevas sustancias, tales como las que controlan la formación de flores y frutos, provocando o inhibiendo el crecimiento o cambios de forma.

* Aprovechamiento de productos o subproductos vegetales, actualmente inútiles o no rentables.

* Síntesis de nuevas sustancias de aplicación agrícola.

* Utilización de nuevos procedimientos químicos para la mejora de la calidad, producción, conservación y transformación de los productos agrícolas.

* Estudio químico de nuevas variedades más productivas y menos sensibles a los factores climáticos, enfermedades y plagas.

Estos y otros aspectos que surgen al analizar detenidamente las posibilidades de la Química Agrícola, constituyen hoy temas de gran interés en la mayor parte de los centros de investigación agrícola de todo el mundo.

2

FORMACION Y CONSTITUYENTES DEL SUELO. ASPECTOS GENERALES.

2.1. EL SUELO BAJO EL PUNTO DE VISTA AGRICOLA.

El término *suelo*, que deriva del latín *solum*, y significa piso, puede definirse como la capa superior de la Tierra que se distingue de la roca sólida y en donde las plantas crecen. Con este enfoque, los suelos deben considerarse como formaciones geológicas naturales desarrolladas bajo condiciones muy diversas de clima y materiales de origen, lo cual justifica su continua evolución y, en consecuencia, su gran variedad.

Pero tal como ocurre con muchas palabras que corrientemente se utilizan, el suelo puede definirse de formas diferentes. Esto depende del criterio que se adopte en lo que respecta a su utilización, formación, origen, constitución o función. Para un ingeniero de caminos, por ejemplo, el suelo puede ser el material donde construir una carretera. Un ingeniero de minas lo puede considerar como el conjunto de restos diversos que cubren las rocas y minerales que él debe estudiar. Y para un agricultor, por no citar más ejemplos, el suelo puede ser exclusivamente el lugar donde crecen sus cultivos.

Bajo el punto de vista menos aplicado y general, y más científico, también se pueden encontrar otras orientaciones. Así, existe una dirección o criterio geológico que define el suelo en función de su formación a partir de las rocas originarias. Y en este sentido, el suelo puede definirse como el producto de erosión de las rocas, evidenciado en las partes superficiales de la corteza terrestre y que contiene en ocasiones restos de materia orgánica descompuesta o en estado de descomposición.

Pero el suelo, independientemente de su origen tiene una función: soportar una vegetación, y en él se deben dar las condiciones necesarias para el desarrollo de las plantas. Con este enfoque, nos encontramos con una concepción fisiológica vegetal que define el suelo como la mezcla de partículas sólidas pulverulentas, de agua y de aire que, provista de los elementos nutritivos necesarios para las plantas, puede servir como sustentadora de una vegetación.

El suelo, sin embargo, como parte de la Biosfera, está poblado de organismos. El suelo respira, nitrifica, origina humus. Nos encontramos también con un criterio biológico, donde se da prioridad para su definición a los organismos que en él habitan y a las transformaciones o procesos que realizan.

Las definiciones expuestas ponen pues claramente en evidencia que el concepto de suelo puede ser diferente. Y ello dependerá de la disciplina que lo estudie.

Bajo el punto de vista químico y agrícola también es aceptable su correspondiente orientación. Y en este sentido, el suelo puede considerarse como un sistema disperso constituido por tres fases: sólida, líquida y gaseosa, que constituye el soporte mecánico y, en parte, el sustento de las plantas.

Según este concepto, el estudio del suelo debe dirigirse hacia dos objetivos fundamentalmente. Por una parte a considerar sus diversas propiedades, con referencia especial a la producción de plantas, es decir, un aspecto práctico o aplicado. Por otra, a su estudio científico, especialmente químico, para determinar la variación de su productividad y hallar los medios para su conservación y mejora.

2.2. ORIGEN Y FORMACION DEL SUELO. PROCESOS Y FACTORES INFLUYENTES.

El punto de partida en la formación del suelo lo constituye las rocas situadas en la superficie terrestre (en su mayoría rocas ígneas y sedimentarias), las cuales con el tiempo, y a través de un conjunto de procesos que se engloban en el término "meteorización", son desintegradas y alteradas por acción de diversos agentes de naturaleza física, química y biológica (Figura 2.1.).

La meteorización física se debe a la aparición de importantes tensiones en el interior de la roca, lo cual provoca roturas en sus líneas débiles sin que se produzcan cambios apreciables en la mineralogía de sus componentes. Estas tensiones pueden ser provocadas por distintos agentes, entre los que hay que destacar los diferentes cambios de temperatura, la alternancia de humedad y sequedad, la congelación por el hielo, la cristalización de sales por hidratación y el efecto mecánico de animales y plantas.

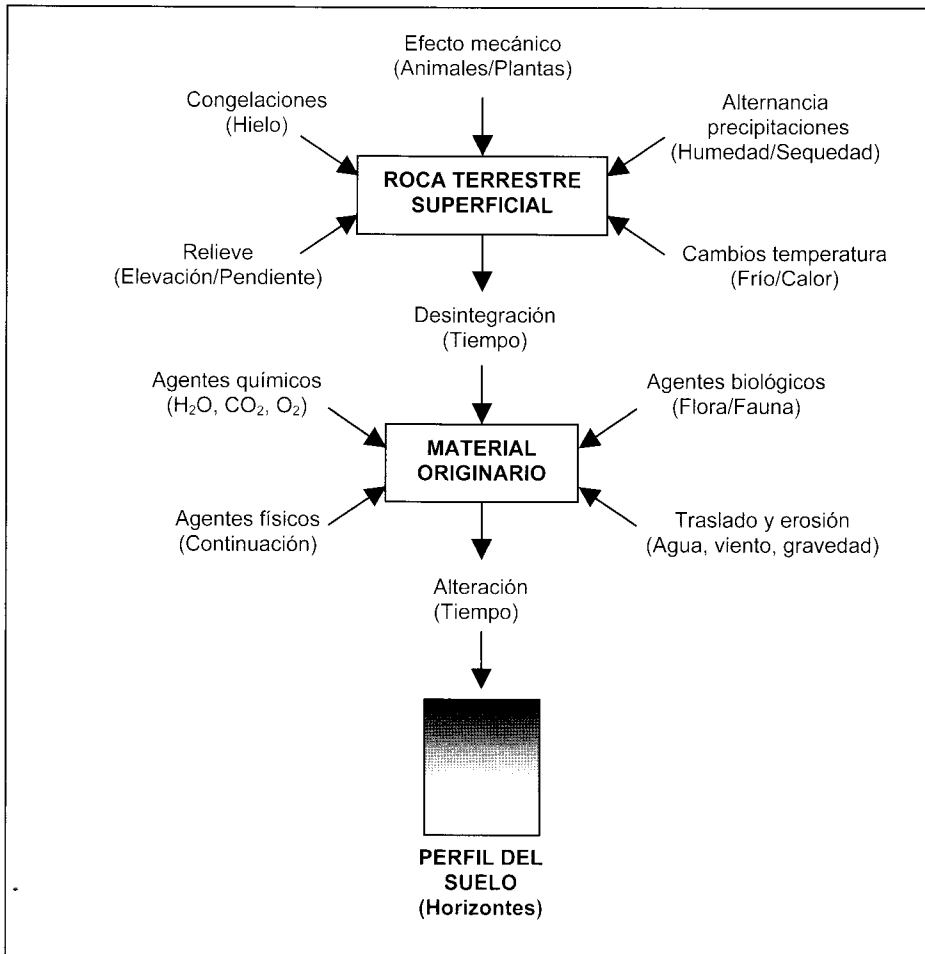


Figura 2.1. Origen y formación del suelo. Factores influyentes.

Los cambios bruscos de temperatura, sobre todo del día a la noche, afectan altamente el estado inicial de las rocas, provocando en éstas de forma continuada sucesivas dilataciones y contracciones, que facilitan su desintegración.

La alternancia de humedad y sequedad origina, así mismo, una expansión o contracción de la roca, propiciando la disminución de su tamaño.

La congelación del agua presente en los intersticios de las rocas, al aumentar su volumen con respecto al estado inicial, es factor importante para su fractura y degradación. Este mismo efecto se produce por cristalización de sales por hidratación.

La acción de estos agentes físicos que son los que inicialmente participan en la formación del material originario del suelo, viene en muchos casos incrementada por su traslado del lugar de origen a otro lugar por corrientes de agua, viento o desplazamiento de zonas montañosas a otras más bajas por gravedad.

El material originario así formado por partículas de rocas que no han sufrido aún modificaciones internas, es posteriormente alterado mediante procesos químicos más lentos. A través de éstos, el suelo se va configurando, adquiriendo su configuración, su verdadera entidad como tal.

La meteorización química se caracteriza por transformaciones que afectan a la composición química y mineralógica de la roca, dando lugar a mezclas de minerales de composición variable y compleja. Estos cambios de composición suelen estar acompañados por una continuada desintegración física y se consideran de fundamental importancia para el desarrollo de la fertilidad química del suelo, al posibilitar la liberación de los elementos inmovilizados en las redes cristalinas del mineral.

Los agentes químicos que intervienen en estos procesos son, principalmente, el agua que provoca reacciones de disolución, hidrólisis e hidratación en los minerales integrantes de las rocas; el dióxido de carbono que participa en las de carbonatación; y el oxígeno en las de oxidación-reducción. A ellos hay que añadir, en menor cuantía, la secreción de sustancias ácidas por parte de algunos organismos vivos (raíces de plantas y microorganismos) que facilitan notoriamente la transformación del material originario, mediante reacciones de intercambio iónico o de complejación.

La disolución tiene importancia cuando se trata de rocas y minerales solubles, y depende del pH del medio, de la temperatura ambiente y de la cantidad de agua que soportan. La movilidad del compuesto solubilizado determina la magnitud del proceso y de los productos finales.

La meteorización por hidrólisis consiste en la reacción entre un determinado mineral y el agua, para dar un ácido y una base. Afecta a un gran número de silicatos aluminicos, dada su abundancia en la corteza terrestre.

Las reacciones de hidratación se caracterizan por la incorporación de moléculas de agua en la estructura cristalina del mineral, originando con ello otro distinto.

La carbonatación se basa en la reacción de iones $\text{CO}_3^{=}$ ó CO_3H^- con el mineral. Estos iones se originan por disolución del dióxido de carbono procedente de la actividad de las raíces y microorganismos. Depende de la temperatura existente, del pH y de la concentración de dióxido de carbono.

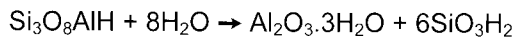
Las reacciones de oxidación-reducción se verifican sobre elementos que pueden actuar con diversos grados de valencia, como por ejemplo el hierro y el manganeso. Estos elementos pueden presentarse en las rocas en forma reducida, y su oxidación puede producirse por contacto con el aire o por la acción de bacterias autótrofas.

Las reacciones de intercambio iónico se verifican entre las superficies de las raíces de la planta y cationes adosados en la superficie del mineral. Su continuo contacto puede provocar en éste una progresiva alteración de su estructura.

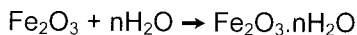
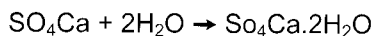
La meteorización por formación de complejos suele originarse entre determinados compuestos orgánicos, que actúan como ligandos, y cationes presentes en disolución o adsorbidos en la superficie del mineral.

Las siguientes reacciones son ejemplos perfectamente conocidos en estos procesos:

Hidrólisis.

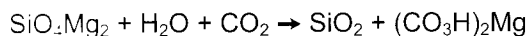


Hidratación.

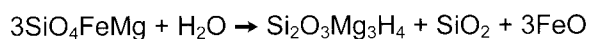
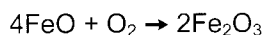


Carbonatación.

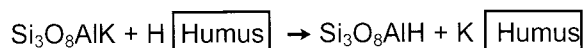




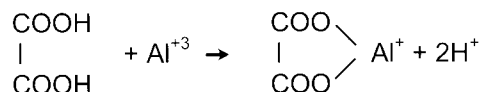
Oxidación-Reducción.



Intercambio iónico.



Complejación.



Los agentes biológicos son, en su conjunto, los organismos vivos que habitan y se desarrollan en el suelo. Sus acciones pueden ser tanto físicas como químicas. Efectos mecánicos de animales y plantas, desprendimiento de dióxido de carbono, secreción de sustancias orgánicas activas, formación de complejos y quelatos, y su participación en la génesis del humus.

Es evidente que junto al tipo de roca sometida a la meteorización, el tiempo de actuación de todos los agentes descritos condiciona el tipo de suelo que puede generarse. En este aspecto, los conceptos de suelo joven, maduro o viejo, vienen determinados por el grado de actuación de este factor.

2.2.1. EL PERFIL DEL SUELO.

El perfil del suelo se considera como la exposición vertical de una porción superficial de la corteza terrestre que incluye todas las capas u horizontes que han sido alteradas durante el periodo de su formación, junto con las más profundas que influyeron en su génesis.

Básicamente, y sin profundizar en el aspecto puramente edafológico (subhorizontes y sistemas de nomenclatura), el perfil de un suelo comprende tres horizontes principales designados por las letras A, B y C (Figura 2.2.).

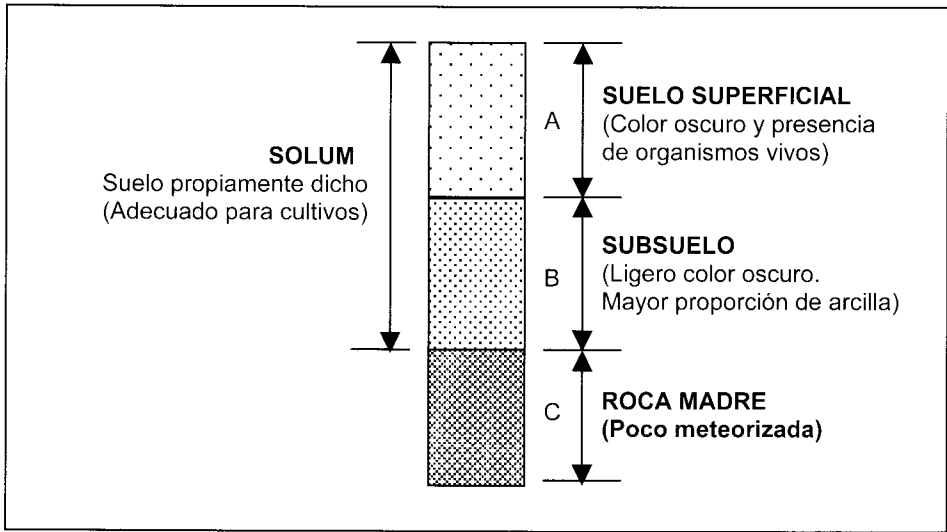


Figura 2.2. Esquema de un perfil típico de suelo

El horizonte A está formado por el suelo superficial, y en él se encuentra la mayor parte de la materia orgánica procedente de las raíces de las plantas y otros restos que son depositados sobre la superficie. Presenta un color oscuro, y es el más expuesto y, consecuentemente, afectado por los agentes climáticos. Desde el punto de vista agrícola, es el más adecuado para el cultivo, ya que contiene muchos de los nutrientes esenciales para la planta.

El horizonte B constituye la capa intermedia, y suele estar también altamente meteorizado. De color más claro, en él se sitúan las raíces de los arbustos y árboles. El contenido en materia orgánica es mucho menor. En suelos muy evolucionados (zonas húmedas) se pueden distinguir en él dos subhorizontes: uno más superficial de transición y otro más inferior de acumulación formado por óxidos de hierro y aluminio, arcillas y carbonato cálcico.

El horizonte C comprende la capa más profunda del perfil. Está formado por partículas de roca poco desmenuzadas y prácticamente sin actividad por parte de organismos vivos.

En muchos casos se pueden concretar los tres horizontes, pero no siempre pueden delimitarse con claridad. Algunas veces pueden carecer de alguno, o no haber una diferencia visible. Esto último es lo que pueden presentar algunos suelos jóvenes que solo muestran un ligero oscurecimiento en la parte superficial, indicador del comienzo de la formación del horizonte A; o de otros, en los que sólo se aprecian el A y el C.

Los suelos maduros presentan siempre muy diferenciados los distintos horizontes.

2.3. EL SUELO COMO SISTEMA DISPERSO. COMPONENTES.

Si se considera el suelo en su conjunto como un sistema disperso, constituido por tres fases (sólida, líquida y gaseosa) se pueden distinguir en él cuatro grandes componentes: materia mineral, materia orgánica, agua y aire, íntimamente ligados, mezclados entre sí y originando un medio ideal para el crecimiento de las plantas (Figura 2.3.).

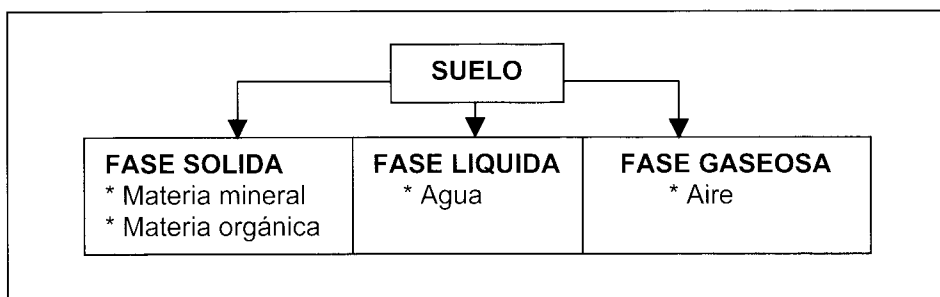


Figura 2.3. Fases y componentes fundamentales del suelo.

La composición de los citados componentes, como es lógico puede variar con el tiempo y de un lugar a otro. Y dentro de ellos, el volumen de agua y el de aire guardan una relación inversamente proporcional entre sí, ya que al eliminarse el agua por drenaje, evaporación o crecimiento de la planta, el espacio poroso que estaba ocupado por ella es llenado de nuevo por aire. Pero de forma aproximada, y considerando un suelo superficial, bien equilibrado, se puede situar dentro de los valores reflejados en la tabla 2.1.

De estas tres fases, la sólida posee una mayor estabilidad, menor capacidad de variación y puede servir, en términos generales, para la

caracterización del suelo. La fase líquida, y aún más la gaseosa, tienen fluctuaciones grandes y bruscas y no sirven para ese objeto, lo que de ningún modo quiere decir que no sean importantes.

Tabla 2.1. Composición centesimal media aproximada en volumen y peso de un suelo superficial franco en buenas condiciones para el desarrollo vegetal.

COMPONENTE DEL SUELO	% VOLUMEN	% PESO
Materia mineral	45	81
Materia orgánica	5	2
Agua	25	17
Aire	25	-

La fase sólida mineral es una mezcla de materiales que se diferencian entre sí en su composición y en sus propiedades. Estas características están íntimamente relacionadas con su tamaño.

Existen partículas más o menos gruesas que tienen una analogía casi total con el material original de donde proceden; se caracterizan por su escasa actividad físico-química y constituyen las llamadas fracciones gruesas: piedras, gravas y arenas. Otras han sufrido una mayor transformación e incluso no se puede reconocer su parentesco con el material originario; son partículas con una mayor actividad, de menor tamaño y constituyen las fracciones finas, limos y arcillas.

Teniendo en cuenta, por tanto, la gran influencia que el tamaño de estas partículas tiene sobre las propiedades más importantes de todo suelo, los científicos las clasifican en grupos convenientes según su tamaño. Estos diferentes grupos se denominan fracciones, separatas o separados, y el procedimiento analítico utilizado análisis mecánico o granulométrico. Sin entrar en este momento en la descripción del método a seguir para esta diferenciación, se han propuesto varias y diferentes clasificaciones. Las más importantes corresponden a las establecidas por el Departamento de Agricultura de los EE.UU., la propuesta por la Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo y la adoptada por la Unión Europea (Tabla 2.2.).

El establecimiento mediante el análisis mecánico de las distintas fracciones que constituyen el suelo permite conocer el nombre de su textura, dato este importante por ser uno de los primeros que debe conocer el agricultor.

Es evidente que un suelo nunca está compuesto sólo de una fracción. Normalmente, pequeñas cantidades de la mayoría de las fracciones están

presentes. El primer paso, por consiguiente, para una clasificación de la textura es agruparlos tomando como base el porcentaje de las distintas fracciones que lo constituyen. Estos grupos se designan como clases de suelos, y se les ha denominado resaltando aquellos que más contribuyen a sus características.

Tabla 2.2. Principales sistemas de clasificación físico-mecánica del suelo.

GRANULOMETRIA Denominación	FRACCIONES	
	Denominación	Diámetros (μm)
Departamento Agricultura EE.UU. (USDA)	Arena muy gruesa.....	2000 > \emptyset > 1000
	Arena gruesa.....	1000 > \emptyset > 500
	Arena media.....	500 > \emptyset > 250
	Arena fina.....	250 > \emptyset > 100
	Arena muy fina.....	100 > \emptyset > 50
	Limo.....	50 > \emptyset > 2
	Arcilla.....	2 > \emptyset
Sistema Internacional	Arena gruesa.....	2000 > \emptyset > 200
	Arena fina.....	200 > \emptyset > 20
	Limo.....	20 > \emptyset > 2
	Arcilla.....	2 > \emptyset
Sistema Europeo	Arena gruesa.....	2000 > \emptyset > 600
	Arena media.....	600 > \emptyset > 200
	Arena fina.....	200 > \emptyset > 60
	Limo grueso.....	60 > \emptyset > 20
	Limo medio.....	20 > \emptyset > 6
	Limo fino.....	6 > \emptyset > 2
	Arcilla gruesa.....	2 > \emptyset > 0'6
	Arcilla media.....	0'6 > \emptyset > 0'2
Arcilla fina.....	0'2 > \emptyset	

Sobre la base, pues, de la textura del suelo (tamaño de las partículas), se consideran cuatro grandes grupos fundamentales y generales: líticos o pedregosos, arenosos, francos y arcillosos.

Los suelos líticos son los que están integrados por las fracciones de mayor tamaño. Se caracterizan porque la suma de las fracciones limo y arcilla no supera el 18% del total de la muestra.

El grupo de los arenosos incluye todos los suelos en los que el porcentaje de arenas alcanza un 70% o más de todo el material en peso.

Los suelos francos contienen numerosas subdivisiones, pero el ideal puede ser definido como una mezcla de arena, limo y arcilla en iguales proporciones. Son los más importantes desde el punto de vista agrícola, ya que se trata de suelos fácilmente laborables. En ellos, la fracción lítica no suele aparecer. Se les conoce también como tierras francas.

Los suelos limosos y arcillosos contienen en líneas generales más del 60% y 45% de limo y arcilla respectivamente, y admiten también diversas subdivisiones.

El Departamento de Agricultura de los EE.UU. (USDA) ha establecido, para lograr una correcta diferenciación, un método de identificación que se muestra en la figura 2.4.

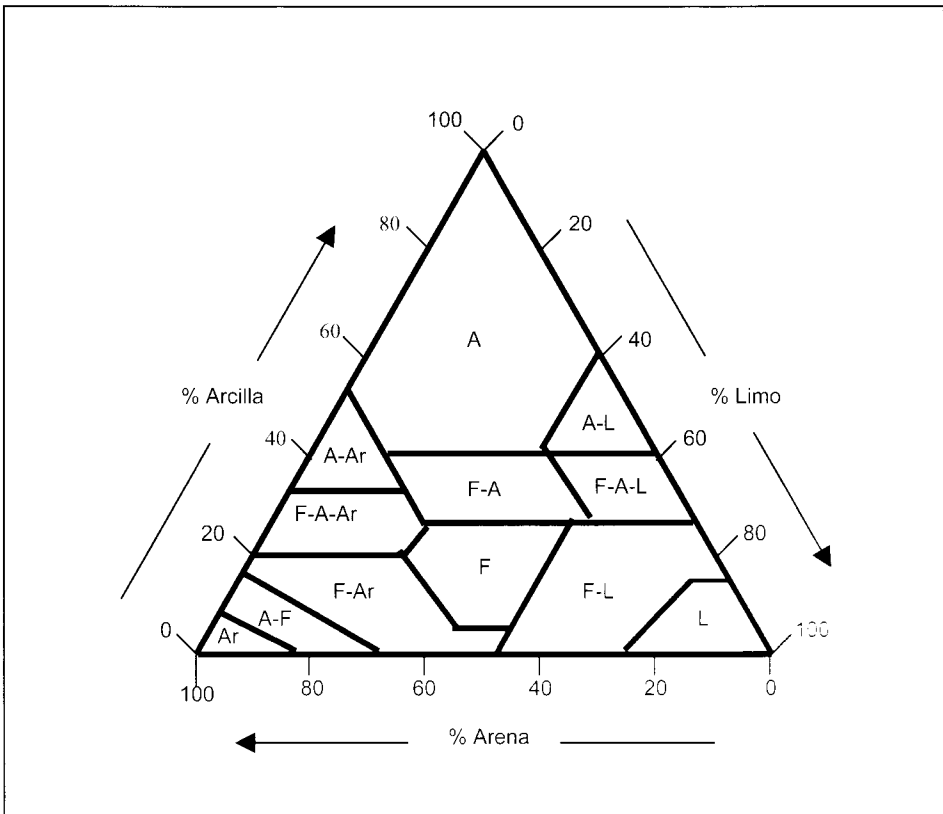


Figura 2.4. Diagrama para la determinación del nombre de la textura de un suelo a partir del análisis mecánico. A: Arcillosa, L: Limosa, F: Franca, A: Arenosa (Soil Survey Manual, 1977).

Para concretar la textura del suelo analizado, se localizan primeramente los porcentajes de limo y arcilla obtenidos en las líneas respectivas. Desde ellos se proyectan hacia el interior líneas paralelas, en el primer caso al lado del triángulo en que está la arcilla, y en el segundo al lado de la arena. La textura del suelo será la correspondiente a la zona donde se cruzan las dos líneas.

El conocimiento de la textura del suelo está íntimamente relacionado con la plasticidad, permeabilidad, facilidad de laboreo, sequedad, fertilidad y productividad del mismo. Sin embargo, debido a la gran variación que pueda existir en la naturaleza mineralógica de las fracciones, no pueden hacerse generalizaciones amplias de los distintos suelos.

La materia orgánica del suelo constituye sólo una pequeña parte de la fase sólida, pero desempeña una gran función, no sólo en la mejora de las propiedades físicas y químicas del suelo, sino también en lo que respecta al desarrollo de los cultivos. Representa todas las sustancias de origen animal y vegetal que se acumulan o aplican a los suelos, independientemente de la fase de descomposición.

Así, el término materia orgánica comprende no solo la fracción del suelo sumamente descompuesta, oscura y de naturaleza coloidal conocida como humus, sino también otros materiales como raíces y parte aérea de las plantas, cuerpos de microorganismos, gusanos, insectos y otros animales, que se depositan normalmente en el suelo y contribuyen a incrementar su fertilidad.

Con este concepto, la materia orgánica del suelo puede dividirse para su estudio más racional en dos grupos generales: 1º) Los tejidos originales y sus equivalentes parcialmente descompuestos; y 2º) El humus.

El tejido original incluye los aportes descompuestos en mayor o menor grado que de forma constante producen las raíces y partes aéreas de las plantas superiores, y en menor proporción los aportes animales. Todos estos materiales están sometidos a un continuo y fuerte ataque por parte de los microorganismos vivos, tanto vegetales como animales, que los utilizan como fuente de energía y material de recuperación frente a su propio desgaste.

Las sustancias coloidales que constituyen los productos más resistentes a esta degradación, tanto los sintetizados por microorganismos como los resultantes de la modificación de los tejidos originarios, se les denomina colectivamente como humus.

El contenido total de materia orgánica que normalmente se encuentra en el suelo es pequeño, sólo alrededor del 3-5% en peso, en el caso de un suelo típico en su capa superficial. Dentro de este porcentaje, el 85-90% está representado por el humus, y sólo una pequeña parte por los restos no humificados. Por esta razón se suele emplear corrientemente el término materia orgánica del suelo en lugar de humus, lo cual puede provocar una cierta confusión si este aspecto no queda aclarado. Hay que indicar, además, que en los análisis de suelos, cuando se trata de conocer su contenido en materia orgánica, las muestras se trituran y se eliminan la mayor parte de los restos orgánicos aún no descompuestos. Por tanto, en la práctica no es necesario diferenciar el humus de la materia orgánica.

La fase líquida del suelo está constituida por el agua que queda retenida dentro de los poros con distinta intensidad, según la cantidad presente y el tamaño de los poros. Desempeña una gran función, no solo en la formación, erosión y estabilidad estructural del suelo, sino también por los efectos directos que ejerce sobre las plantas y organismos que en él habitan. Para la planta concretamente, el agua tiene cuatro funciones básicas: es el mayor constituyente del protoplasma (85-95%), es esencial para la fotosíntesis, es el disolvente en el cual los nutrientes se mueven a través de ella, y es la que proporciona la turgidez necesaria para mantenerla en condiciones apropiadas para la recepción de la luz solar.

La tercera fase del suelo, considerado éste como un sistema disperso, es la fase gaseosa, constituida por lo que se conoce como atmósfera o aire del suelo. En ella, el oxígeno que entra en su composición es indispensable para la respiración de las raíces de las plantas, y por tanto para adquirir un desarrollo correcto. Si el suelo tiene una pobre aireación, la absorción de agua y nutrientes por la planta queda notablemente disminuida, con la consiguiente repercusión en su producción, incluso en suelos bien abastecidos de elementos nutrientes asimilables.

Otro aspecto importante a señalar cuando la aireación queda reducida es el efecto sobre importantes procesos microbiológicos que en el suelo se realizan. La materia orgánica se oxida con lentitud, los microorganismos aerobios paralizan su actividad, y sólo los anaerobios actúan produciendo formas reducidas de determinados elementos, que son casi siempre tóxicos para las plantas. El suelo, pues, no solo tiene una atmósfera, sino que actúa en ella. Por esta razón, su proporción y composición son características básicas que condicionan en alto grado la vida de los organismos en el suelo.

2.4. LOS ORGANISMOS DEL SUELO.

Todo suelo cultivado puede considerarse en su conjunto como un verdadero organismo viviente, ya que en él se desarrollan innumerables formas de vida animal y vegetal de tamaño y actividades muy diversas. Todos estos organismos contribuyen a la formación y a la evolución del suelo. Y la importancia de esta materia viviente es tal que su peso puede parecer irrisorio al lado de la intensa actividad que desarrolla.

Dentro de la materia viviente del suelo predomina cualitativamente, por el papel que desempeñan, y cuantitativamente, por el número, los pertenecientes al Reino Vegetal. Sin embargo, gran número de animales pasan una gran parte de su vida en el suelo y sus efectos sobre éste último son algunas veces beneficiosos en muchos aspectos

Se pueden distinguir, entre las formas vivientes del suelo, dos grupos principales: los macroorganismos y los microorganismos. Tanto unos como otros están constituidos por formas animales y vegetales. Una clasificación de los grupos más importantes se expone en la tabla 2.3.

Tabla 2.3. Grupos más importantes de organismos normalmente presentes en el suelo.

ORGANISMOS DEL SUELO			
ANIMALES	Macro	Pequeños mamíferos Insectos Caracoles y babosas Arácnidos Lombrices de tierra	
	Micro	Nemátodos Protozoos Rotíferos	
VEGETALES	Macro	Raíces de plantas superiores	
	Micro	Algas	Verdes Verde-azuladas Diatomeas
		Hongos	Setas Levaduras Mohos
		Actinomicetos	
	Bacterias	Aerobias Anaerobias Autótrofas Heterótrofas	

Macroorganismos.

La actividad de los pequeños mamíferos se centra fundamentalmente en la pulverización, granulación y transferencia de considerables cantidades de suelo. Estas acciones pueden considerarse en cierto modo beneficiosas, ya que sus madrigueras sirven para airear y drenar el suelo y, por otra parte, durante su ciclo vital y posteriormente a su muerte, incorporar una notable cantidad de materia orgánica al suelo.

Los insectos, caracoles, babosas, arácnidos, etc, constituyen un amplio grupo de macroorganismos que utilizan como alimento los tejidos vegetales más o menos descompuestos. Inician así los procesos de descomposición que luego son proseguidos por bacterias y hongos.

Dentro de los macroanimales del suelo, las lombrices de tierra son importantes en muchos aspectos. Viven en suelos húmedos y densos, más que en los áridos y arenosos. Requieren materia orgánica, por lo que se desarrollan mejor en suelos donde abunda este material. Por esta razón, su número está afectado grandemente por la aplicación de estiércol.

El peso de las lombrices presentes en el suelo en condiciones favorables puede ser impresionante. En determinados casos, su número puede alcanzar hasta tres millones por hectárea, con un peso aproximado de 2.300 Kg.

Grandes cantidades de suelo pasan anualmente a través de sus cuerpos, y no solo la materia orgánica le sirve de alimento, sino también sus minerales constituyentes quedan sometidos a la acción de sus enzimas digestivos, de tal forma que los residuos producidos comparados con el propio suelo son claramente más ricos en materia orgánica, nitratos, calcio y magnesio, porcentaje de saturación de bases y en capacidad de cambio.

Por otra parte, los agujeros que originan en sus desplazamientos sirven para incrementar la aireación y el drenaje del suelo, transportando y mezclando gran cantidad del mismo desde las capas inferiores a las superiores. Al finalizar su ciclo vital, sus cuerpos constituyen una importante fuente de materia orgánica.

Los organismos de naturaleza vegetal son más numerosos y, en muchos aspectos, más importantes que las formas animales. Como fuente de materia orgánica, las raíces de las plantas superiores proporcionan una cantidad de tejido originario mucho mayor que los demás organismos juntos. Una buena cosecha de avena produce 4500 Kg/Ha de materia seca en sus

partes aéreas; y una de trigo 6700 Kg/Ha. Si las raíces dejan en el suelo cantidades de casi la mitad de estos pesos, cuando las cosechas son recogidas, los residuos orgánicos que restan en el suelo no son, de ningún modo, insignificantes.

Las raíces de las plantas superiores no solo actúan como fuente de tejidos muertos. Mientras viven ejercen una gran influencia en el equilibrio de la disolución del suelo. Excretan sustancias ácidas que actúan como eficientes disolventes y aumentan el número de microorganismos a su alrededor, lo cual activa muchos procesos bioquímicos. Al morir, aportan gran cantidad de materia orgánica.

Microorganismos.

Los nemátodos, protozoos y rotíferos constituyen los microanimales del suelo. Se encuentran en casi todos los suelos, y su actividad está centrada en el ataque del tejido de la planta (caso de los nemátodos), o en la participación en la degradación de la materia orgánica (caso de protozoos y rotíferos).

Dentro de los microorganismos vegetales, las algas constituyen un grupo no muy grande. Algunas actúan y viven como las plantas superiores, mientras otras son típicos microorganismos del suelo. Su contribución al contenido orgánico del suelo y la posibilidad de algunas de ellas de poder fijar nitrógeno atmosférico son, quizá, lo que más pueda señalarse bajo el punto de vista agrícola.

Los hongos juegan un papel importante en las transformaciones de los constituyentes del suelo. Tienen notable capacidad para degradar compuestos altamente resistentes (celulosa, lignina, etc), por lo que deben considerarse como muy importantes para la formación del humus. Aunque no pueden oxidar el NH_4^+ a NO_3^- , ni tampoco fijar el nitrógeno atmosférico como lo hacen las bacterias, sí tienen gran capacidad de descomposición.

Los actinomicetos ocupan un lugar intermedio entre hongos y bacterias. Son bastante numerosos en suelos ricos en humus, y son de gran importancia en relación con la degradación de la materia orgánica del suelo y la liberación de nutrientes de ella. Aparentemente reducen a formas sencillas incluso a los compuestos más resistentes, como la lignina.

Las bacterias del suelo constituyen, bajo el punto de vista agrícola, el grupo más importante. Son seres unicelulares y una de las formas más

simples y pequeñas de vida que se conocen. Se multiplican alargándose y dividiéndose en dos partes, en un proceso sorprendentemente rápido bajo condiciones favorables (20-30 minutos). Su casi ilimitada capacidad de aumentar su número es muy importante en los suelos.

Las bacterias son muy pequeñas (4-5 μm de longitud). Muchas poseen flagelos. Su forma es variada (redondas, bacilares o espiriladas). En el suelo, las formas de bastones son las predominantes.

Su número en el suelo es variable y depende de las condiciones. La mayor proporción se encuentra en los horizontes superficiales. Su número puede situarse entre 3 y 4 billones por gramo de suelo, y entre 450 y 560 Kg de peso de tejido bacteriano viven así en el espesor arable de una hectárea.

En el suelo aparecen formando colonias, y su existencia depende de las condiciones del suelo y abundancia de alimentos. Algunas producen esporas, lo que les permite resistir condiciones desfavorables.

Pueden ser autótrofas y heterótrofas. Las primeras obtienen su energía de la oxidación de constituyentes minerales, como NH_4^+ , S y Fe, y la mayor parte de su carbono del CO_2 . Las heterótrofas obtienen su energía y carbono de la materia orgánica del suelo.

Algunas utilizan más el oxígeno gaseoso (aerobias), otras el oxígeno combinado (anaerobias), y otras las dos posibilidades (facultativas). Su temperatura óptima de desarrollo se sitúa entre 21 y 38°C, estando limitado su desarrollo por temperaturas superiores o inferiores a los límites citados. Requieren también una alta concentración de calcio en el suelo (pH=6-8).

Las bacterias, como grupo, participan en todas las transformaciones orgánicas vitales para un suelo que deba soportar con éxito a las plantas superiores. Y en este aspecto son fundamentales para la nitrificación, oxidación del azufre y fijación del nitrógeno atmosférico. Si estos procesos fallan, la vida de las plantas superiores se altera rápidamente.

3

COMPONENTES INORGANICOS DEL SUELO.

Los componentes inorgánicos del suelo se clasifican habitualmente, tal como se ha indicado en el capítulo anterior, con un criterio físico, en función de su tamaño. Sin embargo, desde el punto de vista de su dinámica química se pueden separar en dos grupos perfectamente delimitados: a) Fracciones no coloidales (piedras, gravas, arenas y limo); y b) Fracciones coloidales (arcillas). Cada una, por las particularidades que en este aspecto presentan, requieren ser examinadas por separado.

3.1. FRACCIONES NO COLOIDALES. CARACTERISTICAS GENERALES.

Los constituyentes mayores: piedras y gravas, debido a sus tamaños, actúan como partículas independientes. Las primeras poseen un diámetro comprendido entre 5 y 2 cm, y las segundas entre 2 y 0'2 cm. Ambas pueden ser más o menos redondeadas, angulosas o aplastadas, y presentan solo una reducida influencia sobre las propiedades agrícolas del suelo. Pueden constituir, en algunos casos, una reserva de elementos nutritivos a largo plazo y, si son suficientemente porosas, útiles para conservar cierta cantidad de humedad, que vuelven a ceder parcialmente a las partículas más finas cuando éstas se desecan. En general, cuando su proporción es elevada, se considera su presencia en el suelo más negativa que positiva, puesto que reducen la capacidad nutritiva del mismo al disminuir el volumen de suelo que se pone a disposición de la raíz de la planta. En el examen práctico y valoración de un suelo, no entran en el análisis granulométrico, ya que sus cantidades son valoradas por separado.

Las arenas (gruesas y finas), con un tamaño comprendido entre 2 y 0'05 mm, pueden presentar también diversas formas: redondeadas o angulares, dependiendo de la erosión sufrida. Carecen de plasticidad y tenacidad. Su capacidad de imbibición es casi nula y, debido a los grandes espacios entre sus partículas, el agua pasa rápidamente a su través. Por esta razón, los suelos en los que predomina la arena poseen un buen drenaje y

aireación. Facilitan también los cambios de temperatura, y por ello los suelos muy arenosos se calientan y enfrían muy rápidamente. Cuando están constituidas por minerales fácilmente alterables pueden ser una modesta fuente de elementos nutritivos; pero en la mayoría de los casos, los suelos arenosos son poco fértiles.

Bajo el punto de vista mineralógico se pueden considerar compuestas de fragmentos de rocas o minerales, particularmente de cuarzo, feldespatos y micas, que son residuos menores en la degradación de la roca madre. Residuos de caliza y concreciones ferruginosas se hallan también revistiendo normalmente a estas partículas.

Los limos pueden considerarse como partículas de arenas microscópicas, con un tamaño que oscila entre 0'05 y 0'002 mm. El cuarzo es el mineral dominante, y en menor proporción también se encuentran pequeños fragmentos de feldespatos, micas y óxidos e hidróxidos de hierro. Poseen ya una cierta plasticidad, cohesión y propiedades adsorbentes, debido a las partículas de arcilla que suelen llevar adheridas. Los suelos en los que esta fracción predomina, si bien tienen una fertilidad química aceptable, presentan el inconveniente de su gran impermeabilidad. Por esta última razón, el limo no es un constituyente apropiado para el suelo, a menos que junto a él se encuentren cantidades suficientes de materia orgánica, arenas y arcilla.

Al hacer un examen comparativo de las características expuestas para estos componentes no coloidales del suelo puede afirmarse que el área superficial, poder adsorbente, plasticidad y calor de humedad aumentan al pasar de las gravas a las arcillas, a través de las arenas y los limos.

En cuanto a su composición, el cuarzo y los silicatos primarios (feldespatos y micas) predominan, por este orden, en las arenas, y tienden a disminuir en la fracción del limo. Los óxidos de hierro y aluminio suelen estar presentes en los limos y en las arcillas de mayor tamaño.

3.2. FRACCIONES COLOIDALES. ARCILLAS.

3.2.1. ARCILLA DEL SUELO. COMPOSICION Y CARACTER COLOIDAL.

Las partículas minerales más finas del suelo (con $\varnothing < 0'002$ mm) constituyen la fracción conocida o denominada "arcilla".

Los compuestos que integran esta fracción aparecen en el suelo como resultado final del proceso de edafización de algunas rocas, especialmente constituidas por feldespatos, micas, anfíboles y piroxenos, las cuales, después de haber estado sometidas a diversas acciones físicas (viento, lluvia, cambios bruscos de temperatura, etc), sufren un conjunto de procesos químicos (hidrólisis, hidratación, oxidación, etc) y biológicos (microorganismos animales y vegetales), que reducen su tamaño a menos de 2 micras de diámetro. Aparece así un material muy complejo integrado en su mayor parte por silicatos aluminicos hidratados y, en menor proporción, por óxidos de hierro y aluminio, residuos muy finos de cuarzo y caliza, generalmente precipitada.

Los silicatos aluminicos que constituyen la parte más abundante de la arcilla del suelo presentan una estructura cristalina muy fina, están más o menos hidratados y responden a la fórmula general: $n\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot m\text{H}_2\text{O}$. La relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ varía entre 2 y 5, y suele utilizarse para caracterizar el tipo de arcilla.

A pesar de poseer una estructura cristalina, estos silicatos están dotados de propiedades coloidales, debido al pequeño tamaño de sus partículas y a sus cargas eléctricas. Pero hay que señalar que esta característica coloidal no alcanza a toda la fracción que denominamos "arcilla" del suelo, por cuanto en ella se incluyen otros componentes con un tamaño de partícula superior al límite máximo admitido para ser considerados coloides. Este límite ha de ser menor de 0'001 mm (aproximadamente 1 micra), generalmente entre 0'2 y 0'5 micras. Teniendo en cuenta que en la fracción que se clasifica comunmente como "arcilla" se engloban todas aquellas partículas menores de 0'002 mm, es evidente que no toda la arcilla del suelo es estrictamente coloidal. Muchas partículas de yeso, carbonato o cuarzo, son lo suficientemente pequeñas para ser incluidas en esta fracción, pero no pueden considerarse como coloides.

3.2.2. PRINCIPIOS ESTRUCTURALES Y ORIGEN DE LA CARGA NEGATIVA.

El tamaño y forma de las arcillas dependen de su condición mineralógica y de las condiciones bajo las cuales se han originado. Pueden ser hexagonales, planas, alargadas o en forma de capas. En todos los casos, sin embargo, presentan una estructura laminada, como un paquete de cartas; cada carta representa una capa, cada una de las cuales es una reproducción exacta de las otras, para esa arcilla. Estas unidades están unidas unas a otras en un grado de tenacidad que varía en función del tipo de arcilla de que se trate; en algunos casos esta unión es débil, y al mojarse pueden aparecer entre estas unidades una amplia expansión.

Estas arcillas, gracias a su estado de fina división, presentan una gran superficie externa y, en algunos casos, también una interna, por la citada expansión interlamina. Aproximadamente, la superficie que presenta 1 g de arcilla coloidal es 1000 veces mayor que la de 1 g de arena gruesa.

La estructura atómica de la mayor parte de las arcillas consiste en láminas formadas por dos componentes básicos: tetraedros de sílice y octaedros de alúmina.

Un tetraedro de sílice tiene un átomo de silicio equidistante de cuatro oxígenos o hidroxilos. Estos tetraedros están acoplados en la lámina formando un retículo hexagonal, compartiendo los átomos de oxígeno de los vértices (Figura 3.1.).

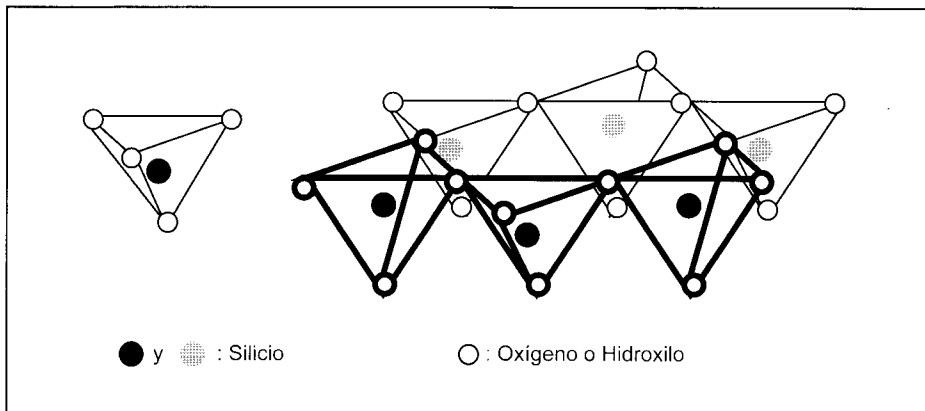


Figura 3.1.- Esquema de la capa tetraédrica silícica.

En las láminas octaédricas, un átomo de aluminio equidista de sus oxígenos o hidroxilos. Estas unidades forman unas capas laminares compartiendo oxígenos entre octaedros adyacentes (Figura 3.2.).

Todas las partículas coloidales de arcillas mantienen en su superficie una amplia carga negativa. esto hace que miles de cationes sean fácilmente atraídos hacia ella, originándose así un complejo coloidal formado por un anión gigante rodeado de cationes sueltos más o menos hidratados (Figura 3.3.).

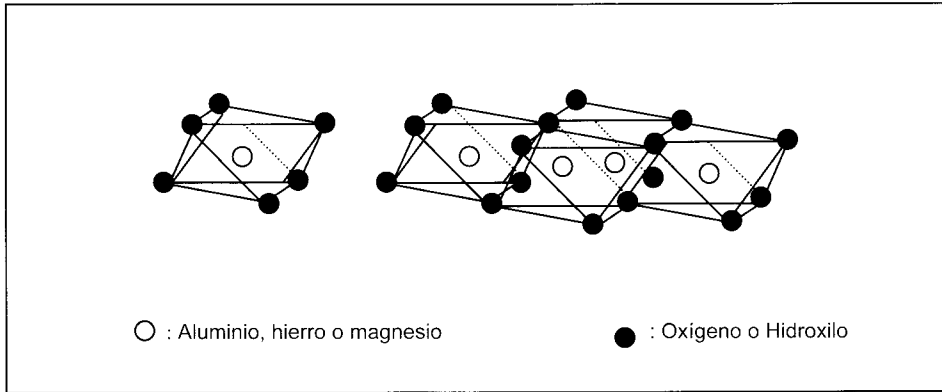


Figura 3.2.- Esquema de la capa octaédrica aluminica.

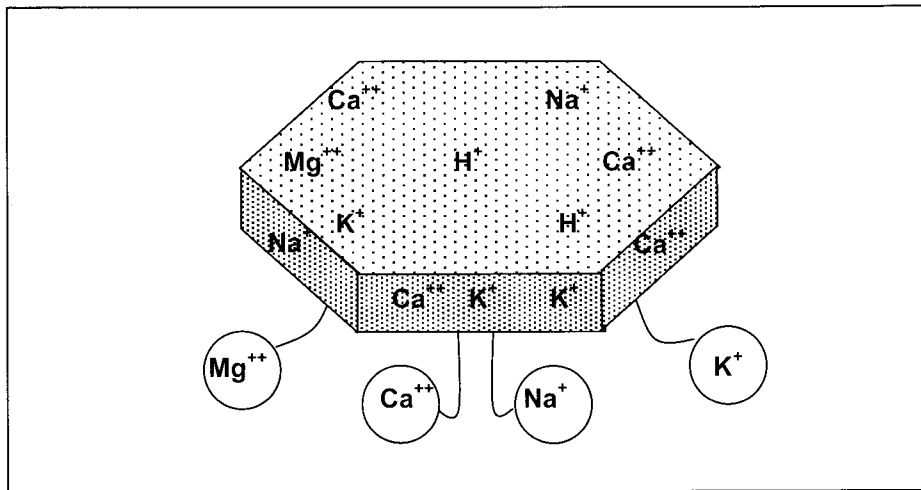
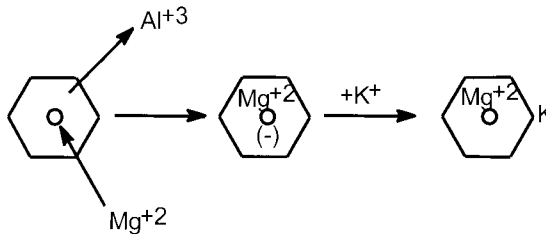


Figura 3.3.- Esquema de un cristal de arcilla coloidal, con su estructura laminar, cargas negativas y cationes adsorbidos.

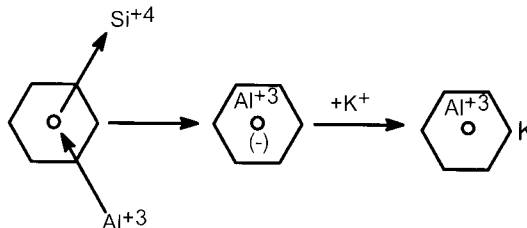
Este enjambre de cationes que acompaña a la partícula coloidal arcillosa en su movimiento está integrado por H⁺ o por cationes metálicos, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ y Na⁺ principalmente, y en menor proporción por NH₄⁺, Mn²⁺, Cu²⁺ y Zn²⁺. Todos ellos son llamados "de cambio", ya que pueden participar en un proceso de cambio reversible con cationes que se encuentran en la disolución del suelo.

En condiciones habituales de todo suelo, esta electronegatividad se debe a dos tipos de cargas: las permanentes y las variables, ambas de origen distinto.

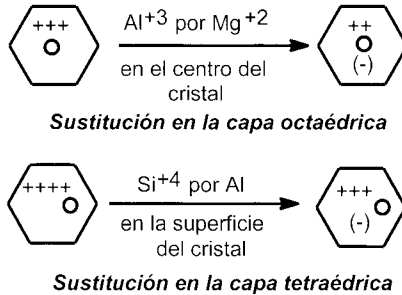
Las cargas permanentes aparecen como consecuencia de sustituciones isomórficas de átomos de la red cristalina por otro de menor valencia. Estas sustituciones se producen durante el proceso de edafización de los minerales primarios que han dado lugar a las arcillas, creando puntos con densidad de carga eléctrica negativa. Sustituciones de: Si^{4+} por Al^{3+} en la capa tetraédrica; Al^{3+} por Mg^{2+} , ó Fe^{2+} en la capa octaédrica; y de Mg^{2+} por Li^+ ó K^+ , situados en el interior de la red cristalina son los más frecuentes. Estos reemplazamientos de cationes tetra, tri o divalentes por cationes tri, di o monovalentes, originan un déficit de cargas positivas que son compensadas en la superficie de la partícula por cationes. Por ejemplo, en algunas arcilla tipo de red 2x1, como la montmorillonita, un átomo de magnesio puede sustituir a otro de aluminio. Esto da como resultado un aumento de una valencia negativa no saturada, ya que un átomo divalente reemplaza a otro trivalente. Si se admite que las tres valencias del aluminio estaban satisfechas por un átomo de oxígeno y un grupo hidroxilo ($\text{O}=\text{Al}-\text{OH}$) todo ello puede representarse de la siguiente forma:



De forma parecida, en arcillas como la illita puede haber una sustitución de un átomo de silicio por uno de aluminio, dejando una valencia negativa sin saturar. Considerando que el átomo de silicio estaba asociado a dos átomos de oxígeno ($\text{O}=\text{Si}=\text{O}$), el proceso podría representarse así:

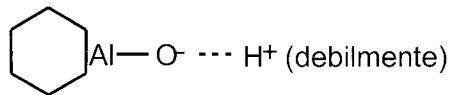


Evidentemente, la carga negativa libre se manifiesta en la superficie del cristal en forma más o menos intensa según la distancia que exista entre el punto cargado y la superficie:



Como las capas octaédricas están más lejos de la superficie de las láminas que las tetraédricas, los cationes retenidos por cargas cuyo origen esté en las primeras, lo estarán más débilmente que las correspondientes a las capas tetraédricas.

Las cargas variables son debidas a la ionización de los grupos -OH de las superficies y aristas de los cristales arcillosos. El número de estos grupos -OH en una superficie arcillosa determinada sería prácticamente previsible en cristales perfectos. Pero en la práctica, la presencia de cristales rotos, incompletos o asociados, hace que las variaciones dentro de una misma especie arcillosa sean grandes. En todos los casos, el hidrógeno de estos radicales -OH se separa ligeramente y la superficie del cristal queda con una carga negativa que soporta el átomo de oxígeno. La situación puede representarse como sigue:



Este proceso justifica la mayor parte de la capacidad adsorbente de las arcillas silíceas tipo de red 1x1, aunque también puede presentarse en las de tipo 2x1, particularmente en cristales rotos.

3.2.3. TIPOS PRINCIPALES DE ARCILLAS. ESTRUCTURA, COMPOSICION QUIMICA Y PROPIEDADES.

La repetición bidimensional de las unidades tetraédricas y octaédricas, el apilamiento de estas láminas según varias combinaciones y, finalmente, las sustituciones isomórficas de unos átomos por otros dentro de la red cristalina, originan los distintos tipos de arcillas. A este respecto, se pueden establecer

seis grandes grupos, en los cuales quedan englobados la mayor parte de los minerales:

- * Grupo de la caolinita.
- * Grupo de la montmorillonita (o esmectita).
- * Grupo de las micas hidratadas (o illita).
- * Grupo de la clorita.
- * Grupo de la vermiculita.
- * Grupo de los minerales intermedios.

Grupo de la caolinita.

En este grupo de alúmino-silicatos se pueden incluir unas diez especies, si bien la caolinita es la más importante y abundante en los suelos. Las restantes, entre las que se pueden destacar haloisita, nacrita, anxita y metaloisita, se encuentran en el suelo en escasa proporción; su composición química y mineralógica es prácticamente igual a la caolinita, siendo diferentes en lo que se refiere a la sustitución parcial del Al^{+3} por Fe^{+2} , Mg^{+2} , Ni^{+2} o Mn^{+2} . La haloisita está algo más hidratada.

La caolinita presenta una estructura hojosa, constituida por unidades cristalinas aplanadas. Cada una de estas unidades está a su vez formada por láminas alternadas de sílice y alúmina, unidas entre sí muy estrechamente. Como puede observarse en la figura 3.4., las dos láminas de cada unidad cristalina están unidas entre sí por átomos de oxígeno que quedan libres en los tetraedros, los cuales resultan compartidos por los átomos de silicio y aluminio en sus planos respectivos. Así se constituye cada unidad cristalina, que se une con otras muy tenazmente por existir enlaces de hidrógeno entre los hidroxilos de una de ellas y los oxígenos de la lámina vecina. Este tipo de estructura se denomina tipo de red 1x1 (una lámina silícea tetraédrica por una lámina alumínica octaédrica).

Se deduce, por tanto, que la red que constituye la partícula arcillosa no permite ninguna dilatación entre las unidades cuando se moja, y ni el agua ni los cationes pueden penetrar en la interfase interna. La única superficie activa es la externa y, por ello, las arcillas de este grupo se caracterizan por su baja capacidad de adsorción y cambio de cationes.

La caolinita no presenta sustituciones isomórficas significativas, por lo que su capacidad de cambio de cationes se debe fundamentalmente a las cargas variables.

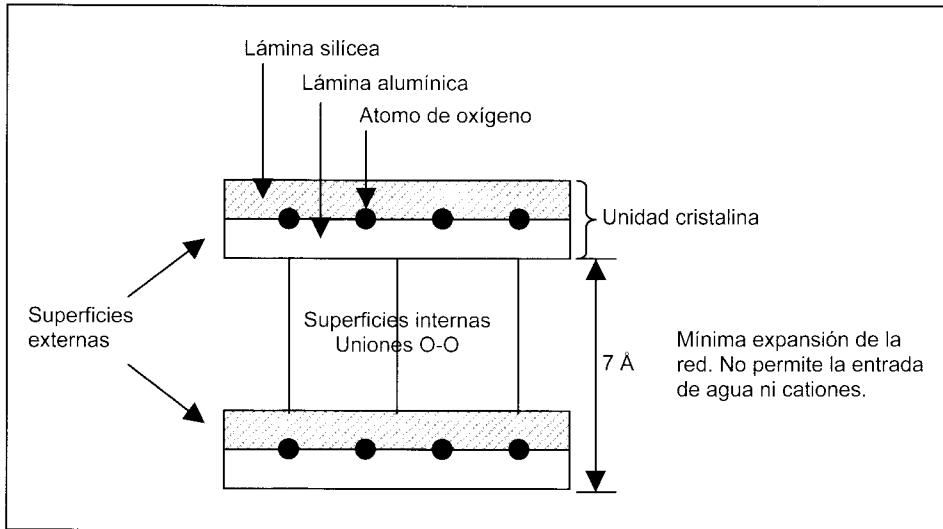


Figura 3.4. Esquema de la estructura en láminas de la caolinita.

El grupo de la caolinita integra la mayor parte de las arcillas cuya génesis tiene lugar en climas húmedos, y procede generalmente de rocas ácidas. Sus cristales son casi siempre hexagonales y con diámetros entre 0'1 y 5 micras. Posee poca plasticidad, propiedades coloidales poco acentuadas y una capacidad de cambio de cationes que puede situarse entre 1 y 15 me/100 g, lo que explica que los suelos con alto contenido de caolinita sean poco fértiles. Son características de suelos muy meteorizados.

Cada una de las unidades cristalinas presenta en estas arcillas una relación molecular $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3=2$, siendo su fórmula química $2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Pero considerando el término "celdilla", usado para describir la unidad tridimensional más pequeña de la cual se considera están constituidos los cristales (2 unidades cristalinas consecutivas), se le asigna normalmente la fórmula: $(\text{Si}_4)(\text{Al}_4)\text{O}_{10}(\text{OH})_8$, con una relación $\text{Si}/\text{Al}=1$.

Grupo de la montmorillonita.

Este grupo de arcillas, en el que la montmorillonita es la principal, lo integran también especies afines, como beidelita (Si parcialmente sustituido por Al), nontronita (Al parcialmente sustituido por Fe), stevensita (Al

parcialmente sustituido por Mg) y saponita, entre otras. Con excepción de la montmorillonita, se encuentran en pequeña proporción y tan solo en algunos suelos. En la montmorillonita, las unidades cristalinicas están formadas por dos láminas de sílice y una de alúmina, ésta última intercalada y tenazmente unida a las dos de sílice por átomos de oxígeno. Por ello, esta estructura se la conoce como tipo de red 2x1 (2 láminas de sílice tetraédrica por 1 lámina aluminica octaédrica) (Figura 3.5.).

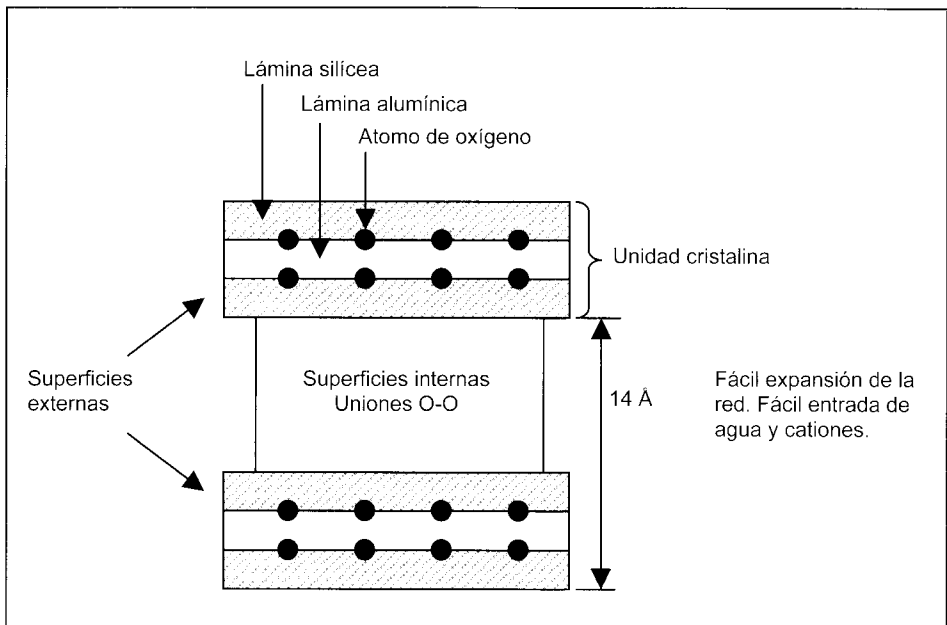


Figura 3.5. Esquema de la estructura en láminas de la montmorillonita.

Estas unidades cristalinicas están ligadas unas a otras mediante puentes oxígeno-oxígeno. Ello permite a estas arcillas, cuando están mojadas, una expansión amplia de la red y, como consecuencia, la fácil entrada y adsorción de agua y cationes en las superficies internas. Esta adsorción interna es siempre mucho mayor que la externa, ya que tratándose de una estructura laminar, la superficie de las bases es muy superior a la de los bordes, pues la de estos es muy pequeña debido al escaso grosor de las láminas. Un esquema del proceso se representa en la figura 3.6.

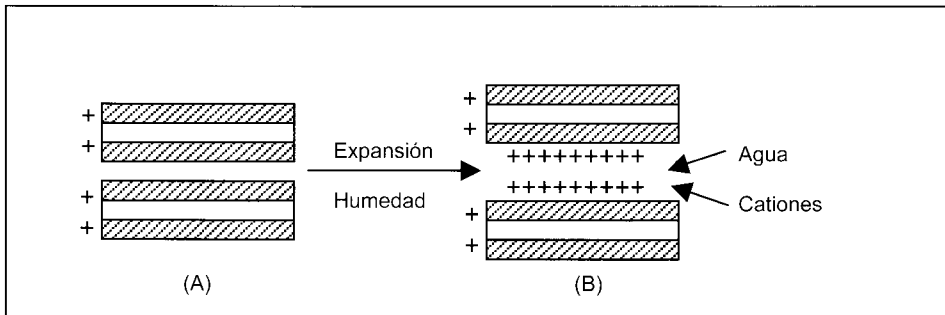


Figura 3.6. Capacidad de adsorción de cationes de la montmorillonita. (A): Adsorción catiónica limitada a las superficies externas. (B): Adsorción catiónica alta por utilización de las superficies internas.

La montmorillonita abunda en suelos de clima seco en fase avanzada de edafización, o en suelos húmedos cuando la roca originaria es más bien básica. Sus cristales son irregulares, extraordinariamente pequeños, con diámetro entre 0'01 y 1 micra. El espesor de los estratos es de 14'2 Å, y su capacidad de cambio de cationes se sitúa entre 80 y 150 me/100 g, con una alta superficie específica (600-800 m²g⁻¹).

Sus unidades cristalinas presentan una relación molecular SiO₂/Al₂O₃=4. Su fórmula química es: 4SiO₂.Al₂O₃.H₂O. A la unidad celdilla le corresponde: (Si₈)(Al₄)O₂₀(OH)₄.

En este tipo de arcillas, como ya se ha indicado, pueden presentarse casos de sustituciones iónicas en la red. La sustitución de Si por Al en la capa tetraédrica y Al por Mg en la capa octaédrica son las más frecuentes. Cuando esto ocurre, las cargas negativas que aparecen en la sustitución son compensadas por cualquier catión intercambiable.

Grupo de las micas hidratadas.

La arcilla más representativa de las micas hidratadas es la illita. Otras, aún no totalmente definidas, como moscovita, glauconita y serospatita, se integran también en este grupo.

La illita presenta una organización estructural semejante a la montmorillonita, es decir, tipo de red 2x1. Pero como puede verse en la figura 3.7., existen diferencias en lo que respecta a la fase interlamina, que repercute notablemente en su capacidad de expansión.

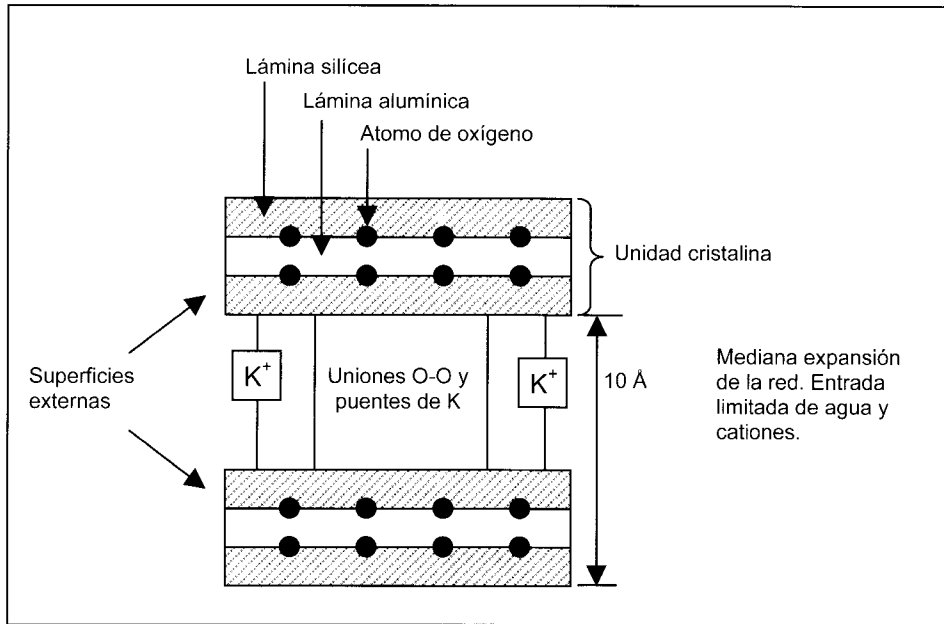


Figura 3.7. Esquema de la estructura laminar de la illita.

En esta estructura, un cierto porcentaje de silicio de las láminas tetraédricas es sustituido por aluminio. Las cargas negativas que aparecen se compensan casi todas por iones potasio, que se acomodan entre las unidades cristalinas, proporcionando uniones adicionales entre ellas. Este mecanismo de enlace, que se conoce como "puente de potasio", ejerce un efecto estabilizador sobre la red cristalina, y evita que se pueda producir una amplia expansión, tal como ocurría en el caso de la montmorillonita. Algunos, sólo de los Al tetraédricos, no están relacionados en la formación de los puentes de potasio, y sirven para adsorber e intercambiar cationes.

Lo expuesto explica el motivo por el cual los cristales de illita, aun teniendo una estructura muy similar a la montmorillonita, presentan frente a ésta una menor capacidad de hidratación, dilatación y adsorción catiónica. La illita, no obstante, supera en estos aspectos a la caolinita.

Las micas hidratadas pueden considerarse como productos primarios de la descomposición de las rocas feldespáticas, y parece ser que en ella tiene lugar gran número de sustituciones isomórficas, las cuales pueden dar lugar al cambio de sodio por potasio e inversamente.

Los cristales de illita se presentan formando escamas irregulares y con diámetros entre 0'1 y 2 micras. Su superficie, plasticidad, cohesión y carácter coloidal pueden considerarse intermedia entre la caolinita y la montmorillonita. La capacidad de cambio de cationes suele oscilar entre 15 y 40 me/100 g. El espesor de estratos es de 10 Å. A la unidad celdilla se le puede asignar la fórmula general: $[(Si_7AlK_{0.8})(Al_4)O_{20}(OH)_4]^{-0.2} \dots (K_{0.2})^{+0.2}$.

Grupo de la clorita.

Este grupo abarca gran variedad de especies, cada una de las cuales se forma a partir de la sustitución de un elemento por otro en la estructura cristalina. La clorita, representante del grupo, presenta también una estructura laminar tipo de red 2x1. Pero en este caso, las unidades cristalinas se mantienen juntas más por los hidróxidos de magnesio y aluminio que por el potasio, como ocurría en la illita (Figura 3.8.).

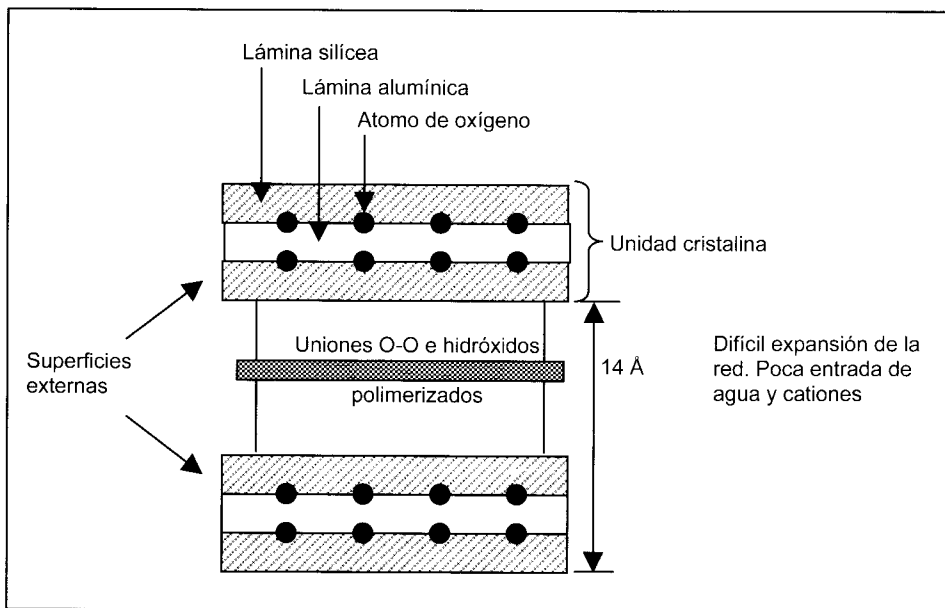


Figura 3.8. Esquema de la estructura laminar de la clorita.

Las láminas de hidróxidos enlazan a las unidades cristalinas, no permitiendo su expansión cuando el mineral se moja con agua. Esta estructura

se denomina a veces tipo de red 2x2 ó 2x1x1, porque contiene dos láminas tetraédricas y una octaédrica como la montmorillonita, más una segunda lámina octaédrica asociada con la capa de hidróxidos.

La clorita tiene poca capacidad de cambio, entre 10 y 40 me/100 g, con una superficie activa intermedia, sobre 70-150 m²g⁻¹.

Admitiendo sustituciones en su red cristalina de Si por Al, y de Al por Mg, se puede admitir como fórmula general para la clorita la siguiente: (Al₆Al₂Mg₄Al₂(OH)₁₂)(Al₂Mg₃)O₂₀(OH)₄.

Grupo de la vermiculita.

La vermiculita, arcilla principal de este grupo, presenta un retículo cristalino similar a la illita, pero en lugar de contener potasio entre las láminas silíceas adyacentes, contiene magnesio. Su espaciamiento basal es de 14 Å, y debido a que puede adsorber además agua, se la conoce como "arcilla hinchable" (Figura 3.9.).

En esta arcilla, los Mg⁺² hidratados son fácilmente reemplazables por otros cationes, pudiendo dar origen a otros minerales arcillosos. Admitiendo sustituciones iónicas, al igual que en la clorita, su fórmula puede aceptarse como: (Si₇AlMg.xH₂O) (Al₂Mg₃)O₂₀(OH)₄.

Presenta una capacidad de cambio elevada (120-150 me/100 g), con una superficie específica de 600-800 m²g⁻¹.

Grupo de los minerales intermedios.

Este grupo está constituido por una considerable variedad de formas intermedias de los cinco grupos anteriormente descritos. Normalmente, los minerales de arcilla hinchable contienen pequeñas cantidades de hidróxido de aluminio que reemplazan los iones adsorbidos (Figura 3.10.).

En estos minerales, las láminas de hidróxidos de magnesio y aluminio no son siempre continuas, como ocurre en el caso de la clorita. Ello influye notablemente en las reacciones del suelo y en el comportamiento químico de la arcilla, puesto que al estar cargados positivamente reducen notablemente el número de cationes necesarios para neutralizar eléctricamente la unidad celdilla.

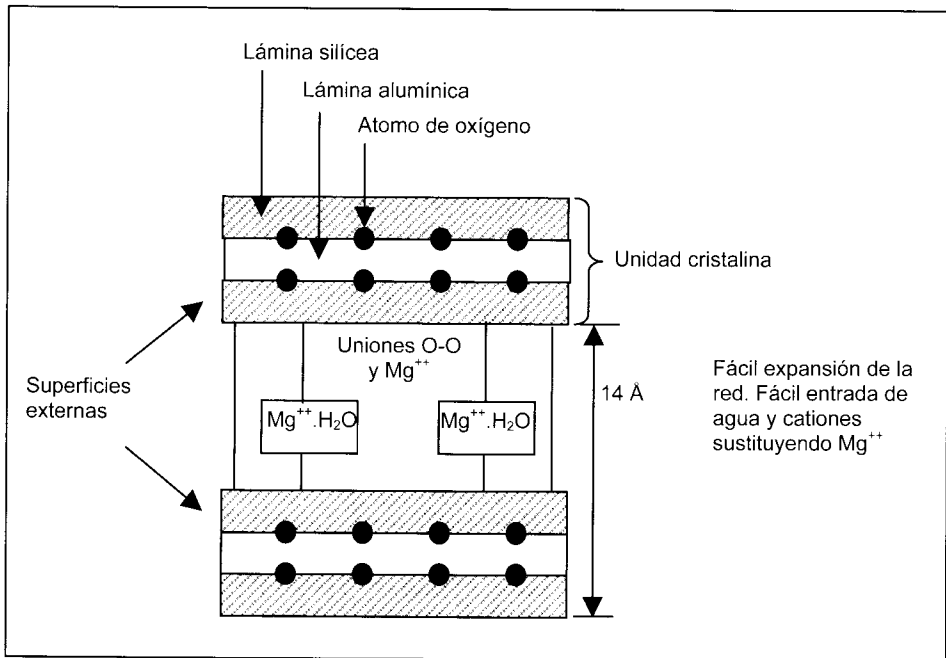


Figura 3.9. Esquema de la estructura laminar de la vermiculita.

Los minerales que forman este grupo contienen cantidades relativamente grandes de magnesio.

3.2.4. ARCILLAS CON OXIDOS HIDRATADOS DE HIERRO, ALUMINIO Y MANGANESO.

Todos, o la mayor parte de los suelos contienen en su fracción arcilla cantidades variables, aunque generalmente pequeñas, de partículas de tamaño coloidal, constituidas por óxidos diversos de hierro, aluminio y manganeso. Estos coloides, conocidos como "arcillas óxidos", incluyen compuestos a los que se les pueden asignar como fórmulas generales las de $Fe_2O_3 \cdot xH_2O$, $Al_2O_3 \cdot xH_2O$ y $MnO_2 \cdot xH_2O$, en donde x indica que la cantidad de agua de hidratación puede ser diferente según el mineral de que se trate. Los dominantes en la mayoría de los suelos corresponden a la gibsita: $Al(OH)_3$, goetita: $Fe(OH)_3$ y limonita $Fe_2O_3 \cdot xH_2O$.

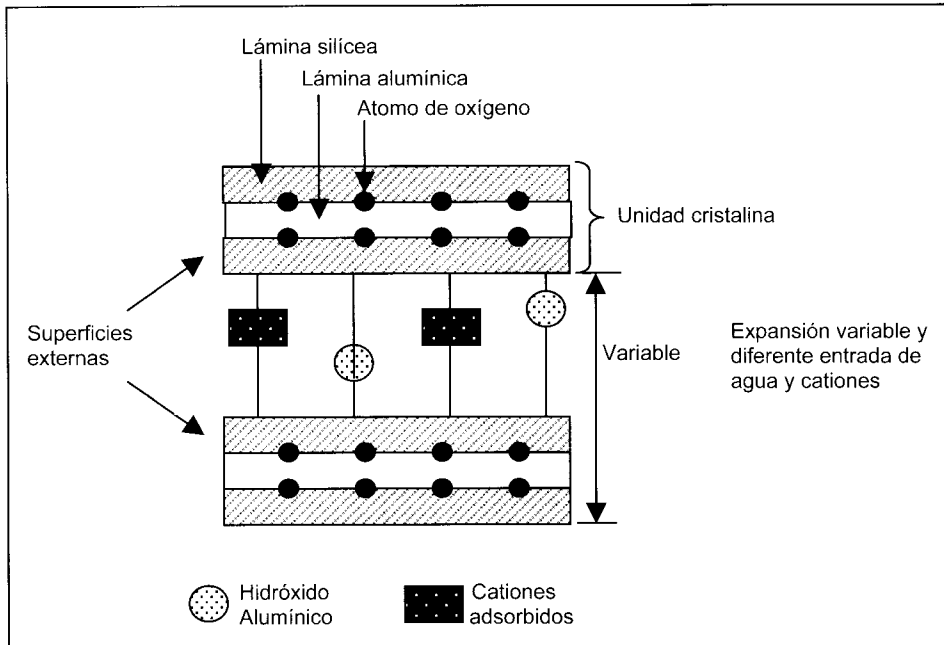


Figura 3.10. Esquema de la estructura laminar de los minerales intermedios.

Estos minerales poseen algunas propiedades que son comunes a las de las arcillas. Se considera que tienen estructura cristalina y que pueden llevar cargas negativas, lo cual hace que queden adsorbidos en su superficie cationes, principalmente calcio e hidrógeno. Consecuentemente, presentan una capacidad de cambio de cationes y retención de agua, si bien en grado muy inferior a cualquiera de las arcillas. Como valor medio se puede admitir una capacidad de cambio de cationes de 5 me/100 g.

Su color pasa por diversos matices, que van del amarillo al rojo. Su plasticidad y cohesión son también menores que los de las arcillas, por cuyo motivo los suelos tropicales, en los que suelen abundar, son en gran parte laborables después de grandes lluvias, y sufren en menor grado la erosión.

3.2.5. METODOS DE ESTUDIO DE LAS ARCILLAS. FUNDAMENTO.

El estudio de las arcillas del suelo requiere siempre la utilización conjunta de métodos físicos o químicos que puedan aportar resultados que se

complementen, ya que la utilización de uno solo no puede nunca proporcionar datos suficientes que puedan abarcar todas las características que son necesarias conocer. Hay que tener en cuenta que no se opera con un cuerpo puro, sino con una mezcla de minerales englobados en un extracto obtenido a partir de un análisis granulométrico previo.

Los fundamentos de los métodos usualmente empleados para tal fin se exponen a continuación.

Microscopía electrónica.

Suele emplearse frecuentemente para establecer la forma y estado de organización de los cristales arcillosos. Con esta técnica se pueden alcanzar aumentos superiores a 50000 diámetros, y ello permite obtener datos importantes relacionados con la dimensión y espesor de las partículas, parámetros y distinciones de la malla cristalina, detalles de su estructura y estudiar sus problemas de adsorción. Estas observaciones son importantes para la interpretación de los registros de difracción de rayos X.

Difracción de rayos X.

Es uno de los métodos más utilizados y de mayor valor caracterizador. Está fundamentado en el hecho de que un rayo luminoso enviado sobre una red cristalina sufre una serie de perturbaciones que se traducen en luz reflejada o bien en luz transmitida por una difracción.

Cuando se someten los cristales de arcilla a una radiación de rayos X de determinada longitud de onda, la equidistancia característica de los planos cristalinos provocan distintas difracciones. Analizando los espectros obtenidos (radiogramas), se puede recibir información sobre la separación de dichos planos y, por tanto, sobre la estructura de la arcilla sometida a tal radiación.

El método presenta ciertas dificultades cuando la cristalización no es buena, o cuando se trata de mezclas de minerales, ya que en estos casos las rayas de difracción se convierten en bandas más o menos difusas, y su medida resulta difícil.

Métodos térmicos: Análisis termogravimétrico y térmico diferencial.

Cuando las arcillas son sometidas a un calentamiento sufren alteraciones que se traducen en pérdidas de peso, reacciones endo y exotérmicas, transformaciones mineralógicas y dilataciones y contracciones. La determinación de las dos primeras, por su rapidez y sencillez, proporciona datos que pueden ayudar a caracterizar el tipo de arcilla.

El fundamento del análisis termogravimétrico (ATG) consiste en que los minerales de la arcilla poseen dos clases de agua; adsorbida y constitucional o reticular, las cuales se pierden a distintas temperaturas en los minerales de los diferentes grupos. El agua adsorbida se pierde por debajo de 300-400°C aproximadamente, y el agua constitucional a partir de esta temperatura hasta unos 800°C. La determinación de esta pérdida de peso se realiza corrientemente mediante un calentamiento intermitente. Consiste en someter a la muestra objeto de estudio a una determinada temperatura hasta peso constante. Alcanzado éste, se somete a otra temperatura más elevada hasta constancia de peso, y así sucesivamente. Al representar en ordenadas los pesos de agua perdidos, y en abscisas las correspondientes temperaturas, se obtienen curvas características para las distintas arcillas analizadas.

El análisis térmico diferencial (ATD) se basa en calentar una muestra de arcilla progresivamente. Al alcanzar ésta una determinada temperatura, puede absorber o emitir calor. Estas temperaturas varían de una especie a otra, y son características para cada una de ellas. Cierta proporción de agua puede ser eliminada al principio, produciéndose entonces generalmente un fenómeno endotérmico. Otra parte está más íntimamente ligada a la molécula cristalina y no puede desprenderse sin provocar una recomposición de su red, y ello se manifiesta en un fenómeno exotérmico.

Muy resumido, el fundamento del método es el siguiente. Si se calienta en un horno eléctrico un determinado peso de arcilla y un peso igual de una sustancia inerte, al producirse un fenómeno endo o exotérmico se produce una diferencia de temperatura entre ambas muestras. Si estas diferencias se miden con un par termoelectrónico y se representan en ordenadas y en abscisas las temperaturas, se obtienen curvas características en las que las reacciones endotérmicas dan lugar a picos orientados hacia abajo y las exotérmicas hacia arriba.

El método es adecuado para la identificación de minerales puros. En caso de mezclas es más difícil la identificación, ya que los fenómenos endo y exotérmicos pueden superponerse.

Métodos químicos.

Cuando se trata de mezclas de minerales, los análisis químicos sólo pueden tener un valor orientativo. Para minerales puros puede servir la fusión alcalina, valorar la relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, o para conocer la capacidad de cambio de cationes (T), que en algunos casos puede ser bastante diferente.

4

MATERIA ORGANICA DEL SUELO.

Con un criterio similar a lo expuesto en el capítulo anterior al tratar la materia mineral del suelo, la materia orgánica requiere ser examinada también atendiendo a dos aspectos claramente diferenciados: 1º) El material originario: su composición y degradación; y 2º) Las fracciones coloidales resultantes integradas dentro del término "humus".

4.1. MATERIAL ORIGINARIO. FUENTES Y COMPOSICION QUIMICA.

Los residuos de las plantas constituyen el material principal originario de la materia orgánica del suelo. Bajo condiciones naturales, todos estos residuos (partes aéreas y raíces de los árboles, arbustos, malas hierbas y otras plantas) aportan anualmente al suelo una gran cantidad de residuos orgánicos. En los suelos cultivados, una gran parte de las plantas son extraídas, pero muchos de sus tallos y raíces son abandonados en el suelo.

Junto a estos restos también hay que incluir los cadáveres de microorganismos vegetales, especialmente bacterias y hongos. Esta participación es más importante de lo que en un principio pueda parecer, pues se estima que las sustancias nitrogenadas del humus pueden proceder, en una proporción bastante elevada, del protoplasma celular de los citados microorganismos.

Los componentes químicos existentes en todo este material originario son muchos y variados. Clasificados en grupos se exponen en la tabla 4.1.

Las materias de origen animal que pueden incorporarse al suelo están formadas por los cadáveres y las deyecciones de los animales. Todos estos restos, sobre todo aquellos que proceden de animales superiores y principalmente sus cadáveres, evolucionan rápidamente y no dejan compuestos duraderos en el suelo. En su conjunto se consideran tan solo fuentes secundarias de materia orgánica.

Tabla 4.1. Grupos de compuestos más importantes del material originario de la materia orgánica del suelo. Los compuestos marcados con asterisco se consideran de más difícil descomposición.

COMPONENTES QUIMICOS DEL MATERIAL ORIGINARIO DE LA MATERIA ORGANICA DEL SUELO	
Hidratos de carbono	Monosacáridos: Pentosas, hexosas
	Oligosacáridos: Sacarosa, maltosa
	Polisacáridos: Arabanas, poliuronidos....
Ligninas (*)	Polímeros derivados del fenilpropano
Taninos (*)	Complejos fenólicos
Glucósidos	Compuestos glucosa+alcohol, fenol o aldehidos
Acidos orgánicos, sales y ésteres	Acidos oxálico, cítrico, málico, etc.
Lípidos y afines	Grasas y aceites: Esteres glicéricos
	Ceras: Esteres no glicéricos
	Aceites esenciales: Derivados del terpeno
Resinas (*)	Acidos resínicos
Compuestos nitrogenados	Proteínas, aminoácidos, aminos y bases orgánicas
	Alcaloides
	Purinas, pirimidinas, ácidos nucleicos
Pigmentos	Clorofilas
	Carotenoides
	Antocianinas
Compuestos minerales	Aniones y cationes

4.1.1. EL PROCESO DEGRADATORIO. DINAMICA Y FACTORES INFLUYENTES.

La degradación del tejido orgánico originario y formación del humus en el suelo es un proceso bioquímico muy complicado; pero en términos generales, sin profundizar en lo más particular, puede describirse con relativa simplicidad.

Si las condiciones son apropiadas, todos los tejidos orgánicos que llegan al suelo en forma de restos de plantas y animales quedan sometidos inmediatamente a una transformación química y bioquímica. En estas transformaciones participan todos los organismos que viven en el suelo: microorganismos vegetales y animales, animales inferiores y superiores. Estos

últimos cooperan activamente en los primeros momentos, mezclando aquellos materiales con las partículas inorgánicas del suelo, favoreciendo de esta forma su desintegración y transformación por los microorganismos que viven en él, especialmente bacterias y hongos.

Estos restos están constituidos, como ya se ha señalado, por una amplia gama de sustancias: glúcidos, taninos, resinas, grasas, aceites, pigmentos, compuestos nitrogenados, etc. Cuando todos ellos llegan al suelo, aún conservan su estructura anatómica original y un contenido bastante elevado de humedad. Esta última circunstancia ejerce una acción estimulante sobre la actividad microbiana del suelo.

La rapidez de descomposición de todo este material originario no es, sin embargo, siempre la misma. Cuando las condiciones del medio son propicias (clima y tipo de suelo), la velocidad de descomposición depende de la naturaleza química de las sustancias que lo integran. Algunos de los grupos citados anteriormente, fácilmente atacables por los microorganismos del suelo, como almidón, celulosa, hemicelulosa y proteínas sencillas, son rápidamente degradados, dando primero compuestos intermedios más o menos complejos, y finalmente los productos simples de la descomposición: CO_2 , H_2O , NH_3 , etc. Otros, por el contrario, ofrecen una notable resistencia a la degradación y permanecen en el suelo inalterados, o ligeramente alterados, durante un determinado periodo de tiempo.

La dinámica química y microbiológica de toda esta degradación puede comprenderse mejor si se parte de la situación en que se halla un suelo cultivado en una buena condición de nitrificación. En ella, los materiales orgánicos difícilmente descomponibles se encuentran presentes en el suelo. En ese momento, los organismos desintegradores presentan muy poca actividad, y la producción de dióxido de carbono está reducida al mínimo. El material orgánico tiene una relación C/N pequeña y los nitratos se encuentran en cantidades relativamente altas, ya que los residuos fácilmente atacables han sido degradados.

Si se incorporan entonces grandes cantidades de tejido orgánico fresco y descomponible se origina un cambio rápido. Los microorganismos desintegradores se multiplican rápidamente al encontrar, de forma fácil, una energía y nutrientes asimilables. La actividad microbiana pronto llega al máximo, lo cual se pone de manifiesto por la rápida liberación de energía y el gran desprendimiento de dióxido de carbono. Bajo estas condiciones, el nitrógeno desaparece rápidamente del suelo debido a la insistente demanda de este elemento por los microorganismos para sintetizar sus tejidos. Y al cabo de un cierto tiempo está en pequeñísimas cantidades, o no queda nada de él.

Por tanto, cuando se produce la degradación, la relación C/N de los residuos decrece, ya que el carbono se pierde y el nitrógeno se conserva.

En esta fase, la materia orgánica del suelo está formada por una gran variedad de compuestos, junto con los cuerpos de los microorganismos muertos o vivos. Los microorganismos muertos quedan también sujetos a su desintegración por los gérmenes vivos.

Finalmente, cuando las reservas alimenticias y energía asimilable disminuyen, la actividad de los microorganismos degradadores va siendo gradualmente menor, debido a una falta de oxidación fácil del carbono. Es entonces cuando empiezan su actuación las bacterias nitrificantes, apareciendo nitratos de nuevo en cantidad. Las condiciones originales se establecen de nuevo, y al poco tiempo el suelo se enriquece en humus y en nitratos. El proceso gráficamente se representa en la figura 4.1.

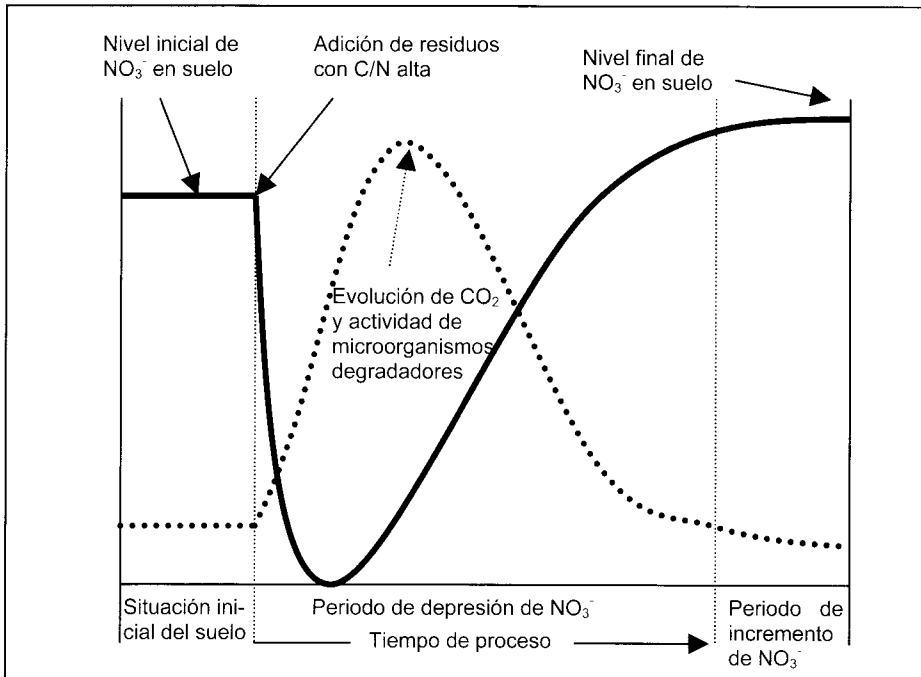


Figura 4.1. Representación gráfica del proceso de degradación del material originario de la materia orgánica del suelo e incidencia en la formación de nitratos (H.O. Buckman y N.C. Brady, 1979)

Evidentemente, el periodo de tiempo durante la descomposición del material originario en el que los nitratos disminuyen en el suelo (periodo de depresión de nitratos) puede ser mayor o menor, y dependerá de la cantidad del material aportado. Será más amplio cuando se añadan cantidades grandes, y más corto cuando sean cantidades pequeñas, ya que la degradación en este último caso es más rápida.

En cuanto a la intensidad de la depresión, dependerá, a igualdad de material aportado, de la relación C/N que posea. Los residuos orgánicos con una relación baja (trébol, por ejemplo, con C/N=17), por lo general tienen bastante nitrógeno para satisfacer las necesidades de los microorganismos degradantes. Por tanto, a medida que los residuos se descomponen habrá nitrógeno en exceso con relación al que necesitan, el cual se liberará como amoníaco. Las plantas superiores podrán utilizar el nitrógeno a medida que transcurre la descomposición. Por el contrario, cuando se incorporan restos con una relación C/N alta (por ejemplo paja, con C/N=90), los nitratos desaparecerán prácticamente del suelo al ser utilizados exclusivamente por los microorganismos; y las plantas, en suelos en estas condiciones, serán deficientes en nitrógeno. Para evitar esta situación, se debe suministrar nitrógeno de alguna otra fuente para satisfacer las necesidades de los microorganismos y acortar el periodo de la depresión. Los hechos expuestos son de gran importancia práctica y deben ser considerados cuando los residuos orgánicos se añaden al suelo.

Entre los distintos factores externos que pueden favorecer o disminuir la rapidez de esta descomposición hay que considerar, en primer lugar, la edad de la planta. Durante las primeras fases del crecimiento, las plantas son relativamente ricas en minerales, proteínas y sustancias solubles en agua. Pero a medida que se van transformando en adultas disminuye el porcentaje de estos compuestos y aumenta, en cambio, la proporción de lignina y celulosa. Esta variación en su composición es importante desde el punto de vista de la velocidad de degradación del material cuando se incorpora al suelo, así como de la cantidad de nutrientes, sobre todo nitratos, que pueden originarse para su consumo por las plantas. Las plantas jóvenes, por tanto, contienen porcentajes relativamente elevados de sustancias que se descomponen rápidamente, y cantidades mucho más pequeñas de otras que resisten a la descomposición y tienden a acumularse en el suelo.

Las condiciones climáticas, temperatura y humedad, también ejercen una influencia dominante en la velocidad de descomposición del tejido orgánico.

Está comprobado que al pasar de un clima cálido a otro más frío, la materia orgánica de suelos comparables tiende a aumentar. Ello se debe a que la descomposición de la materia orgánica se acelera en climas cálidos por encontrar los microorganismos temperaturas más apropiadas para su desarrollo y actuación. En los fríos, en cambio, la pérdida es más lenta. En general, dentro de zonas de condiciones de humedad uniforme y de vegetación semejante, el promedio de materia orgánica total aumenta unas dos a tres veces por cada 10°C de disminución de la temperatura.

La humedad del suelo ejerce, así mismo, un notable control sobre la acumulación de materia orgánica. En condiciones de suelo comparables, la materia orgánica aumenta a medida que la humedad efectiva del suelo se hace mayor. La explicación no sólo está en la rapidez de acción microbiana en áreas de moderada o poca lluvia, sino también en la más pobre vegetación de estas regiones.

La textura del suelo es otro factor influyente. Los suelos arenosos, por ejemplo, contienen normalmente menos materia orgánica que otro de textura fina. Esto es debido, concretamente a la menor humedad contenida y a la más rápida oxidación, ya que son suelos bien aireados. En cambio, los suelos de textura fina, a causa de sus altas cifras de humedad y poca aireación, son casi siempre mucho más ricos.

Finalmente, y dentro de las características y condiciones del suelo, su reserva de calcio, la erosión y el tipo de su vegetación, deben considerarse también factores influyentes.

4.2. HUMUS. NATURALEZA Y CONSTITUCION.

En un sentido muy amplio, se entiende por "humus" de un suelo la totalidad de materias orgánicas que, por ser difícilmente degradables, se han acumulado en el mismo después de un conjunto de descomposiciones y transformaciones químicas y bioquímicas.

El estudio de este material, así inicialmente definido, constituye un tema de gran interés y actualidad. De interés por la gran misión que el humus desempeña en el suelo, su importancia para la nutrición de las plantas y, por consiguiente, de los animales en general. De actualidad, porque a pesar de lo que se ha avanzado a través de dos siglos de investigación y de lo mucho conseguido, el conocimiento de la naturaleza del humus y de los mecanismos de su formación y restauración aún está

incompleto, en plena vía de construcción. Lleno aún, podría decirse, de dudas y contradicciones.

4.2.1. ORIGEN Y FORMACION. TEORIAS.

Actualmente no hay resultados determinantes que aseguren una única procedencia de las fracciones húmicas. La investigación realizada se decanta en su mayoría a contemplar diversas posibilidades.

En este sentido hay evidencia de que sustancias de naturaleza hidrocarbonada, descompuestas principalmente durante los primeros estados de la humificación, pueden servir como fuentes primarias de unidades estructurales en las moléculas de sustancias húmicas, a través de diversas transformaciones durante el metabolismo microbiano.

Y así, se ha demostrado que precursores de compuestos aromáticos, el ácido siquímico por ejemplo, se forman en cultivos de bacterias y hongos, usando azúcar como fuente energética. Y ciertos autores han mostrado la tendencia a la polimerización y a la insolubilización de aminoazúcares, que podrían ser el origen de ciertas fracciones húmicas.

Estos hechos se han tratado de explicar admitiendo que la humificación comienza muy precozmente en los tejidos en descomposición. Antes de que los tejidos lignificados sean descompuestos, los tejidos celulósicos son destruidos, originando compuestos solubles y precipitables por los ácidos, que son en cierto modo comparables a los ácidos húmicos. El proceso que se sugiere se presenta en la figura 4.2.

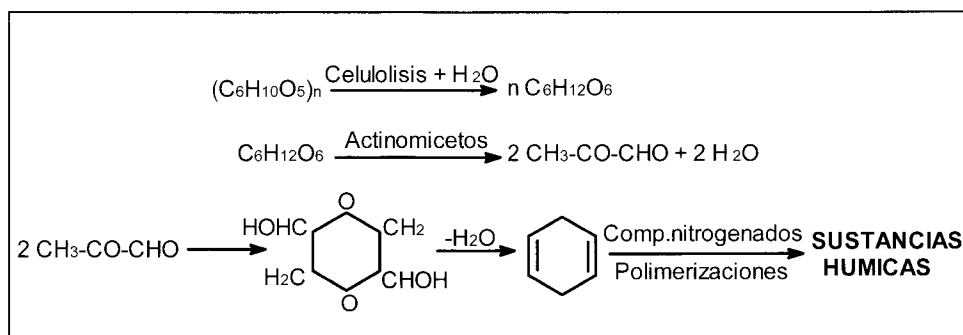


Figura 4.2.- Posible transformación de sustancias húmicas a partir de celulosa (J.P. Martin y K. Haider, 1971).

Una primera transformación bajo la acción de las bacterias celulolíticas, particularmente mixobacterias, conduce a una simplificación de la molécula, la formación de glúcidos sencillos. Después, los actinomicetos y ciertos hongos provocan una ciclación de los compuestos obtenidos, dando núcleos quinónicos pigmentados, susceptibles de fijar los compuestos nitrogenados y de polimerizarse. Como intermediario de este ciclo de reacciones actúa el metilglioxal, resultante del desdoblamiento de moléculas de glucosa.

Los compuestos que resultan de estas transformaciones se caracterizan por estar formados por moléculas de peso molecular inferior a 5000 y ser relativamente lábiles. Sin embargo, con el tiempo y bajo la influencia de contrastes de humedad, son susceptibles de sufrir una polimerización lenta y progresiva, transformándose entonces en otros mucho más estables.

Otros compuestos, en cambio, como son los aceites, grasas, resinas, ceras, taninos y especialmente ligninas, más resistentes, tienden a permanecer en el suelo en su estado original, o bien son descompuestos lentamente, originando nuevos compuestos de distinta complejidad.

Estos compuestos que vienen apareciendo presentan interés especial, ya que poseen, al menos en parte, una tendencia a unirse con algunos otros nitrogenados. Es con estos materiales con los que parece ser se construye gran parte del humus, y constituye en realidad la base del mismo. Sin estos grupos resistentes, la materia orgánica desaparecería de muchos suelos.

La forma de asociarse los derivados de la lignina a los compuestos nitrogenados es objeto aún de conjeturas. Pero la resistencia que presentan estos compuestos nitrogenados del humus a la descomposición indica algún tipo de combinación.

Si la unión resulta de la actividad sintetizante de los microorganismos, o es una acción única, o ambas cosas a la vez, es algo que no puede ser aún confirmado. Pero el resultado de ello es visible: no solo los compuestos nitrogenados quedan protegidos de la demolición microbiana, sino que además contiene proporciones notables en muchos casos de fósforo, azufre y otros elementos nutritivos. Estos elementos no existirían si las ligninas, ceras, grasas, resinas y taninos, constituidos exclusivamente por C, H y O, estuvieran en el suelo simplemente en sus formas originales.

La escuela alemana de Flaig es la principal defensora en aceptar la lignina como la materia prima originaria del humus. Flaig (1966) sostiene que

las sustancias húmicas son el producto final de la secuencia iniciada con la degradación y demetilación de la lignina a polifenoles sustituidos, seguida por oxidación a quinonas y su condensación con unidades aminoácidos. La figura 4.3. esquematiza la idea de Flaig.

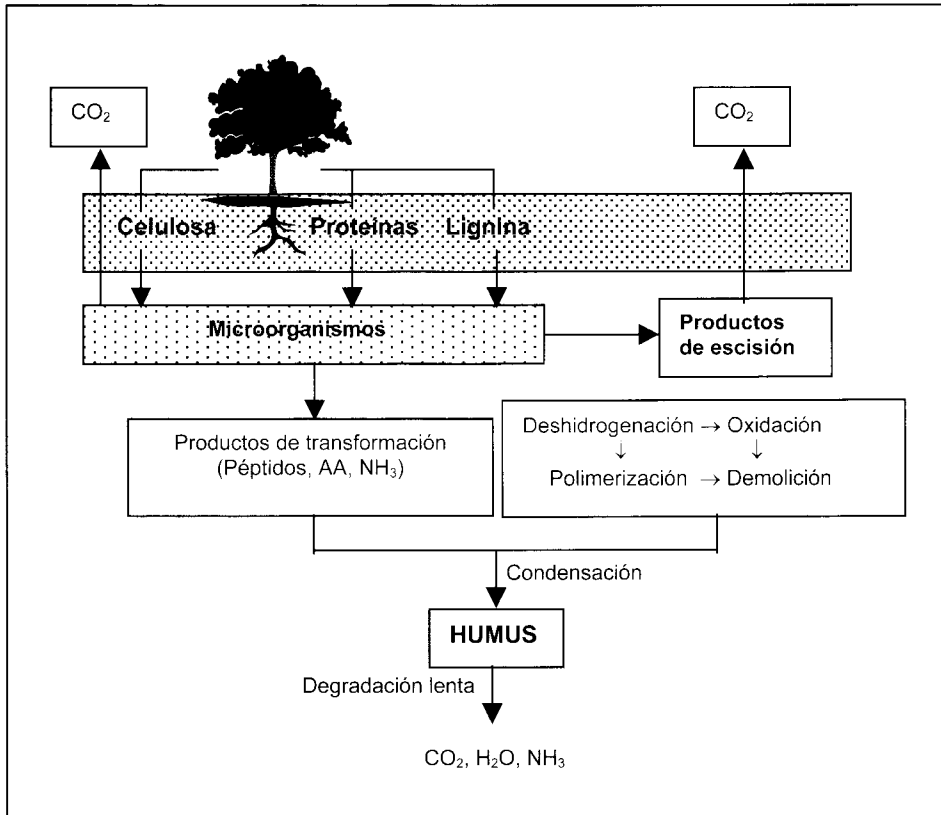


Figura 4.3. Procesos en la formación del humus en el suelo (Flaig, 1966)

Para este investigador, los glúcidos y proteínas de las plantas sirven solamente para suministrar energía y desarrollar los microorganismos, que por autólisis originan péptidos, aminoácidos y amoníaco.

La lignina, cuya posible fórmula se expone en la figura 4.4., mucho más resistente al ataque microbiano, se degrada lentamente mediante reacciones de deshidrogenación, oxidación y polimerización, para dar por una parte dióxido de carbono y diversos productos de demolición. Por condensación de éstos con los compuestos nitrogenados se forma el humus.

Las investigaciones sobre la transformación de la lignina durante su descomposición no permiten decidir si las sustancias húmicas son formadas a partir de restos de lignina de alto peso molecular, o de sus varios productos

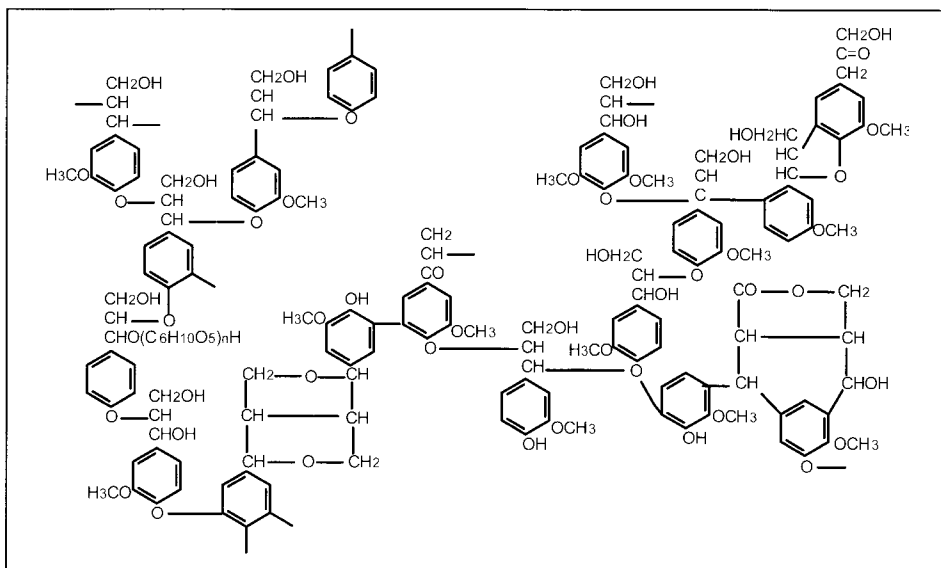


Figura 4.4.- Posible fórmula de la lignina (K. Freudenberg y Neish, 1968).

de descomposición. Sin embargo, hay evidencia de que durante la degradación oxidativa de la lignina se obtiene una serie de compuestos, entre los que se han identificado los representados en la figura 4.5., que también se encuentran en el suelo al descomponerse los tejidos lignificados procedentes de la materia orgánica original.

Los procesos continuos de degradación y polimerización que Flaig sugiere han sido demostrados por él con experiencias realizadas con C¹⁴.

En resumen, la teoría de Flaig impone a la lignina como fuente de grupos que forman las principales unidades estructurales del humus. Y en este sentido, un ejemplo de formación de sustancias húmicas a partir del ácido ferúlico, uno de los componentes obtenidos en la degradación de la lignina, es el que se expone en la figura 4.6.

Las reacciones que considera esenciales comprenden las siguientes etapas:

- 1.- Degradación de la lignina.
- 2.- Descomposición de la cadena lateral.

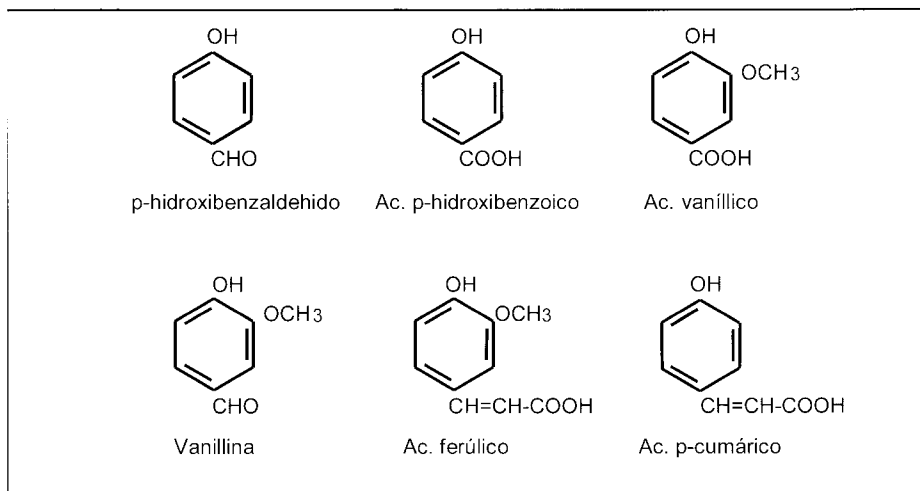


Figura 4.5.- Algunos compuestos identificados en la descomposición oxidativa de la lignina.

- 3.- Demetilación y demetoxilación.
- 4.- Oxidación a quinonas.
- 5.- Dimerización y polimerización.
- 6.- Apertura de núcleos.
- 7.- Adición de compuestos conteniendo nitrógeno.

También los taninos simples y condensados parece ser que pueden contribuir a la formación del humus, mediante la liberación de polifenoles que son oxidados y condensados con aminoácidos.

Además de la celulosa, residuos de lignina alterada y taninos, un grupo de compuestos conocido como poliurónidos puede ser de considerable importancia en la constitución del humus. Se cree que estos compuestos son sintetizados por los microorganismos, formando parte del tejido microbiano.

Son totalmente resistentes a la descomposición rápida cuando los organismos mueren. Como resultado, pueden incrementar notablemente la materia orgánica residual presente en los suelos. Además, al ser compuestos de estructura aromática, fácilmente oxidables, reaccionan en algunos casos de la misma forma a como lo hace la lignina degradada.

Diversos investigadores han establecido que productos oscuros semejantes a los ácidos húmicos pueden ser sintetizados por una variedad de microorganismos, incluso utilizando glicerina o glucosa como una única fuente

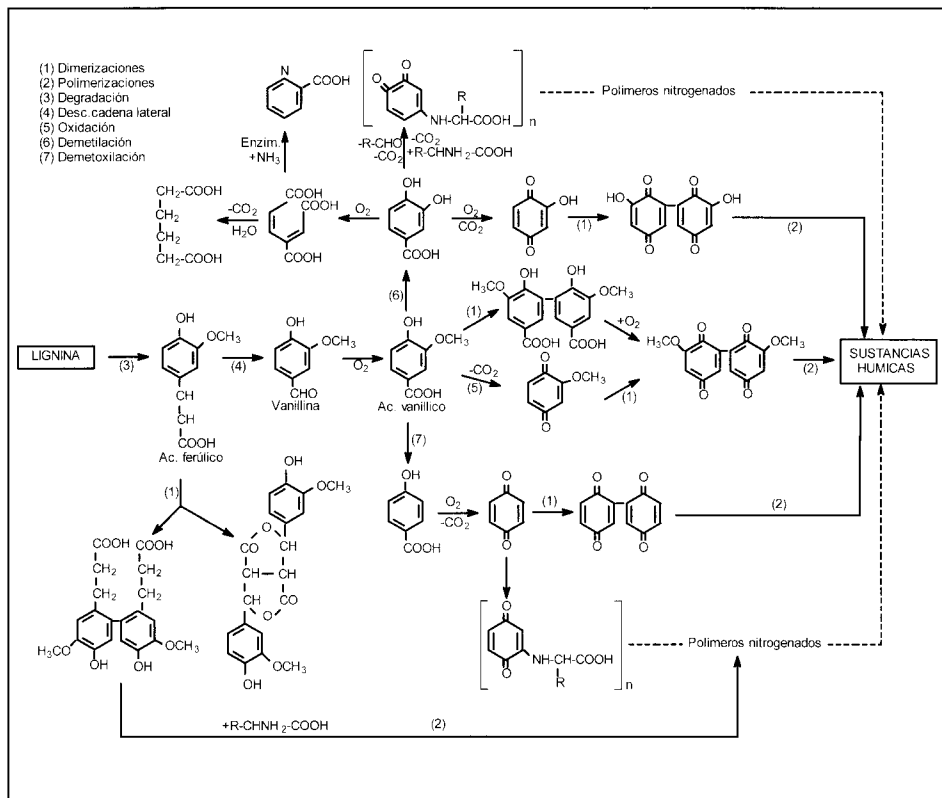


Figura 4.6.- Formación de sustancias húmicas a partir de la lignina, con el ácido ferúlico como intermediario (W. Flaig, 1966).

de carbono. Y dado que estos microorganismos habitualmente viven en el suelo, parece claro que las sustancias húmicas puedan estar compuestas, al menos parcialmente, por estas otras de origen microbiano.

Finalmente, y dentro de las distintas hipótesis para explicar el origen y formación del humus, merece señalarse la basada en una autólisis celular de tipo enzimático.

Esta teoría, defendida por algunos investigadores, mantiene que no parece probable que los componentes húmicos se formen por la condensación lenta de fenoles, quinonas, aldehídos y aminoácidos, ya que de ser así las unidades estructurales se descompondrían por la acción de los microorganismos del suelo antes de que se produjera la condensación. Por tanto, es muy posible que las moléculas húmicas se policondensen o polimericen rápidamente en presencia de grandes concentraciones de sustancias monómeras, pero en un medio exento de microorganismos capaces de descomponer estas moléculas.

Un medio de este tipo existe en todas las células vegetales o microbianas poco después de su muerte, cuando los enzimas autolíticos actúan, pero todavía no ha empezado el ataque de los microorganismos exteriores. Se sabe, entre otras cosas, que las proteínas del protoplasma se hidrolizan pasando a aminoácidos por acción de las proteasas autolíticas, mientras que los fenoles se oxidan por acción de ciertas fenolasas y se transforman en quinonas y, frecuentemente, en polifenoles. Mientras que la concentración de aminoácidos y quinonas en las células muertas es muy grande, la polimerización es posiblemente rápida y sobre todo de tipo químico, de forma que se forman moléculas de humus en el interior de las células que luego quedan libres en el suelo, al atacar los microorganismos la membrana celular. Estos humatos ácidos son posiblemente adsorbidos por las arcillas y los óxidos del suelo, donde quedan aún más protegidos contra los microorganismos.

Pero junto a este material orgánico diverso, que puede dar lugar en mayor o menor proporción al humus, hay que pensar también en los factores externos que pueden regir durante el proceso de la humificación. Temperaturas altas o bajas, suelos húmedos o áridos, silíceos o calizos, ácidos o alcalinos, tiempo, etc., son factores que proporcionan una variabilidad de condiciones que pueden influir notablemente en la marcha del proceso, encauzándolo por caminos distintos y, como consecuencia, dar lugar a compuestos húmicos de distinta composición.

De la exposición hasta aquí realizada se deduce que las distintas teorías que se han elaborado para explicar científicamente la formación del humus en el suelo, están de acuerdo en admitir que la humificación consiste en una serie de procesos de síntesis que conducen a la neoformación de compuestos húmicos de naturaleza coloidal, los cuales derivan de los productos más o menos solubles resultantes de la descomposición de la materia orgánica precursora; y cuya naturaleza depende en gran parte de los factores externos que pueden determinar diversidad de condiciones.

Pero en donde no se está de total acuerdo es en admitir si la lignina y compuestos de ella derivados constituyen la materia prima formadora del humus; si lo son los carbohidratos u otros compuestos que también integran la materia orgánica original; o si lo son todos en su conjunto; en si la formación del humus se debe a la acción sintetizante de los microorganismos o es una acción química, o ambas cosas; en la forma en que los compuestos nitrogenados quedan integrados en las estructuras húmicas neoformadas; y en la secuencia de reacciones que se producen durante el proceso general de la humificación.

Es indudable, pues, que el origen, la naturaleza y la complejidad del humus es extraordinariamente variable, se puede decir incluso que ilimitada. Sus características dependen:

1º) De la naturaleza de los materiales precursores (MP).

2º) De la naturaleza de los agentes biológicos de la humificación (AB): bacterias, hongos, etc.

3º) De la naturaleza del suelo, y particularmente de la roca madre (NS).

4º) De las condiciones biofísicas del ambiente, temperatura, pluviometría, estación, etc., es decir, de los agentes climáticos (AC).

5º) De la duración del proceso de la humificación: tiempo (T).

Por consiguiente, si se designa al humus resultante por H, se puede resumir su estado de evolución mediante la expresión:

$$H = \int (MP, AB, NS, AC, T)$$

H es, por tanto, la integral de la función múltiple constituida por todos los factores que intervienen en su formación. Cada uno de estos miembros es muy diverso, por lo que las posibilidades del humus serán innumerables.

4.2.2. COMPONENTES HUMICOS. AISLAMIENTO Y CARACTERISTICAS.

La extracción, fraccionamiento y purificación de las sustancias húmicas de los suelos es un problema difícil. A pesar de lo mucho que se ha trabajado en este aspecto, no se dispone aún en la actualidad de un método aceptado

universalmente que permita su extracción libre de contaminaciones y, al mismo tiempo, sin que sufran alteraciones en sus estructuras.

Hay que tener en cuenta que en los suelos biológicamente activos, las sustancias húmicas se encuentran formando mezclas complejas con los compuestos húmicos de neoformación. En todo horizonte húmico pueden hallarse en proporciones variables:

1º) Restos aún poco atacados, presentando una estructura organizada, fibrosa o celular.

2º) Productos intermedios, como por ejemplo la lignina más o menos modificada, liberada por desaparición de la celulosa.

3º) Complejos coloidales, formados por síntesis microbiana o de origen residual.

4º) Compuestos solubles, en estado de mineralización o polimerización.

Estas circunstancias, y sobre todo la dificultad de encontrar un reactivo extractante capaz de aislar selectivamente y sin alterar los compuestos húmicos existentes en el suelo, justifican plenamente lo delicado de la extracción y el por qué no pueda realizarse de manera rigurosa en el estado actual de nuestros conocimientos.

Gran número de extractantes ha sido usado para lograr la separación de las sustancias húmicas del suelo. Las tentativas utilizando disolventes orgánicos no han dado resultados plenamente satisfactorios, pues aunque los compuestos extraídos están poco alterados, la extracción parece ser incompleta. Así, se han ensayado una serie de disolventes empleándolos sucesivamente: acetona, etanol, dioxano, dimetilformamida, piridina, EDTA y ácido fórmico. Algunos autores han empleado el bromuro de acetilo, que disuelve en gran parte la materia orgánica fresca, pero no los compuestos húmicos de neoformación. Otros utilizan una mezcla de bromoformo-benceno; la materia orgánica poco transformada queda en la parte superficial, mientras que la materia orgánica humificada y ligada a la parte mineral se encuentra en la fracción pesada.

Pero la mayor parte de los investigadores siguen fieles a la utilización de los reactivos inorgánicos, que ofrecen sin embargo algunos inconvenientes. La sosa diluida, utilizada desde muy antiguo, ejerce generalmente una acción muy drástica y provoca durante el proceso de la extracción la neoformación de compuestos húmicos que no existían antes en el suelo.

Muy empleadas son las sales alcalinas: oxalato amónico, fluoruro sódico y pirofosfato sódico, reactivo éste que parece muy eficaz, ya que dispersa perfectamente el complejo arcillo-húmico, aunque es bastante alcalino y, al igual que la sosa, puede alterar la materia orgánica fresca y originar compuestos húmicos nuevos. No obstante, esta acción puede disminuirse siempre que se utilice en disolución poco concentrada y limitando el número de extracciones sucesivas. O bien, en ciertos casos, añadiendo al reactivo de extracción una sal sódica neutra.

La efectividad de estos últimos extractantes se incrementa también mediante un tratamiento previo del suelo con ácido clorhídrico-fluorhídrico para destruir carbonatos y silicatos.

Debido pues a la variedad de reactivos que pueden ser utilizados, no es de extrañar que aparezcan normalmente en la bibliografía métodos de extracción y separación de compuestos húmicos con sistemáticas parecidas, pero con variantes en cuanto a la naturaleza química y concentración de los reactivos empleados. La utilización de un método determinado dependerá del tipo de investigación a realizar, rapidez de ejecución y exactitud que se pretenda obtener. Pero en cualquier caso, para obtener resultados comparativos dentro de una línea de investigación es indispensable la adopción del que para ese fin sea el más idóneo.

Un fraccionamiento convencional, ampliamente utilizado, se expone en la figura 4.7.

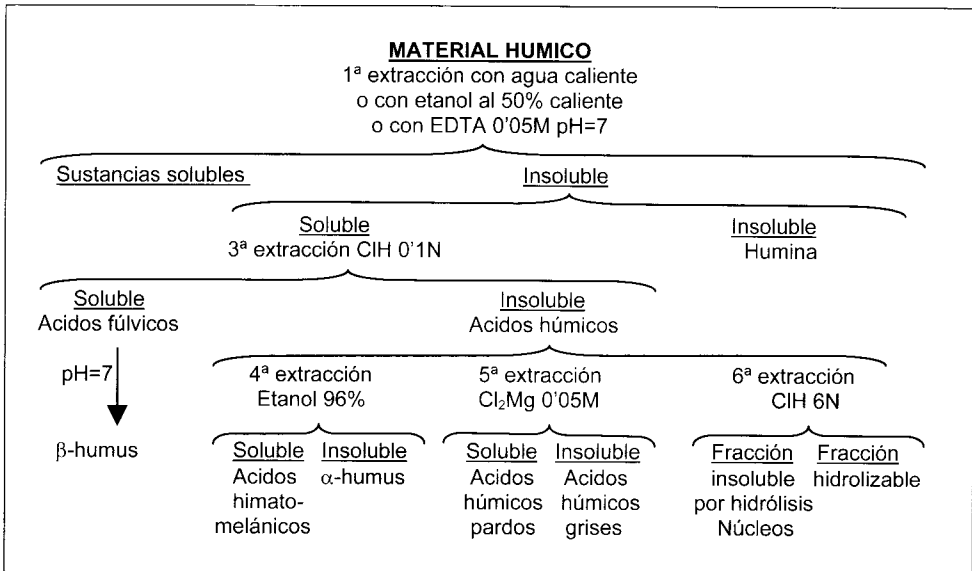


Figura 4.7.- Fraccionamiento de la materia húmica (R.A. Prevot, 1968).

Se utilizan tres tipos de reactivos: neutros, alcalinos y ácidos, logrando así la separación de seis constituyentes:

- 1.- Sustancias solubles.
- 2.- Humina.
- 3.- Ácidos fúlvicos (y β -humus).
- 4.- Ácidos húmicos (y α -humus, ácidos himatomelánicos, ácidos húmicos pardos y grises).
- 5.- Núcleos.
- 6.- Fracción hidrolizable.

Cada uno de estos grupos así separados constituye un conjunto, por lo general, mal definido, de sustancias amorfas, con un marcado carácter coloidal y difícilmente solubles en disolventes orgánicos. De ellos, la humina se considera un producto de envejecimiento de los ácidos húmicos; apenas tiene capacidad de reacción y su proporción en el suelo es escasa.

En los últimos 30 años, los métodos de estudio de estas sustancias han hecho inmensos progresos por adaptación a ellos de nuevas técnicas. La utilización de la cromatografía, espectrofotometría, electroforesis, ultracentrifugación, microscopía electrónica, rayos X, resonancia magnética y paramagnética, radioisótopos, etc, han permitido en el momento actual dilucidar gran parte de sus grupos funcionales y planificar esquemas estructurales con cantidades pequeñísimas de muestra problema en un tiempo muy reducido.

En forma resumida se exponen a continuación los aspectos más importantes que parecen confirmados a través de una amplia labor experimental.

En la actualidad, está ampliamente aceptado que los ácidos húmicos, y también los fúlvicos, son polímeros originados por condensación, que se lleva a cabo por acción intermolecular entre compuestos diferentes, con dos o más grupos funcionales capaces de esterificarse, deshidratarse, oxidarse, etc. En realidad, se considera que se trata de una heteropolicondensación que da lugar a estructuras macromoleculares muy complejas. Esto explica su carácter amorfo y quizás su resistencia al ataque de los microorganismos.

Dentro del grupo de ácidos húmicos se incluyen todas aquellas sustancias que se extraen del suelo por disolventes alcalinos (NaOH, KOH, NH_4OH , $\text{P}_2\text{O}_7\text{Na}_4$, etc). Estos compuestos precipitan en su disolución al acidificar con ácidos minerales, y lo hacen en forma de gel oscuro.

Los pesos moleculares de los ácidos húmicos no se han establecido definitivamente. Mientras que por crioscopia, osmometría y viscosimetría se han obtenido valores comprendidos entre 700 y 2700, usando la ultracentrifugación algunos investigadores los fijan entre 30000 y 50000. Finalmente, otros, mediante tamización molecular han llegado a establecer un rango entre 2000 y más de 100000.

Los ácidos húmicos presentan, frente a los fúlvicos, notables diferencias en algunas de sus características analíticas (Tabla 4.2.).

Tabla 4.2. Algunas características analíticas de los ácidos húmicos y fúlvicos (M. Schnitzer, 1978).

CARACTERÍSTICAS	AC. FULVICOS	AC. HUMICOS
Grado de polimerización	⇒ Aumenta ⇒	
Peso molecular	669	1648
Acidez total /me/g)	10'3	6'7
Carbono (%)	45'7	56'2
Hidrógeno (%)	5'4	4'7
Oxígeno (%)	44'8	35'5
Nitrógeno (%)	2'1	3'2
Azufre (%)	1'9	0'8

Estas diferencias son:

- 1.- Un mayor grado de polimerización.
- 2.- Pesos moleculares más elevados.
- 3.- Menor acidez total.
- 4.- Porcentajes de C y N superiores.
- 5.- Menor porcentaje de H, O y S.

Algunas características importantes de los ácidos húmicos, tales como la velocidad de sus reacciones de intercambio, la movilidad del nitrógeno, y también sus propiedades hidrofílicas, dependen de la relación entre la estructura aromática y alifática. Los compuestos de estructura alifática son más hidrófilos, mientras que los aromáticos lo son menos.

Numerosas experiencias han demostrado también que los ácidos húmicos y fúlvicos son heterogéneos y constan de fracciones generalmente semejantes. Es posible que ambos representen, más que grupos independientes, estadios distintos dentro del proceso general de la

humificación. La mayoría de los investigadores comparten el criterio de que los ácidos fúlvicos son formas iniciales de los productos de degradación de los ácidos húmicos.

En lo que respecta a la estructura de las diversas fracciones que entran a formar parte del humus, se ha comprobado en ellas la presencia de núcleos con anillos iso y heterocíclicos de 5 y 6 carbonos: furano, indol, pirrol, benceno, piridina, quinoleína y naftaleno. Incluso se sugiere la presencia del anillo porfirínico en ciertos ácidos húmicos. El grupo metoxilo es también característico de todos ellos.

Otros grupos funcionales presentes determinados por espectroscopía infrarroja son: $=C=O$ y $=C=C=$, y también la presencia de puentes de un solo átomo: $-O-$, $-N=$ y $-S-$, o de grupos atómicos: $-NH-$, $-CH_2-$, que confieren al humus su estructura esponjosa.

También está suficientemente comprobado que los ácidos húmicos del suelo contienen nitrógeno en cantidad aproximada entre 1-5%. Por hidrólisis con ClH 6N, un 50% del nitrógeno total se encuentra en el hidrolizado, y el 50% restante en el residuo. Tal como puede apreciarse en la figura 4.8., las formas y porcentajes de nitrógeno que pueden aparecer son diferentes.

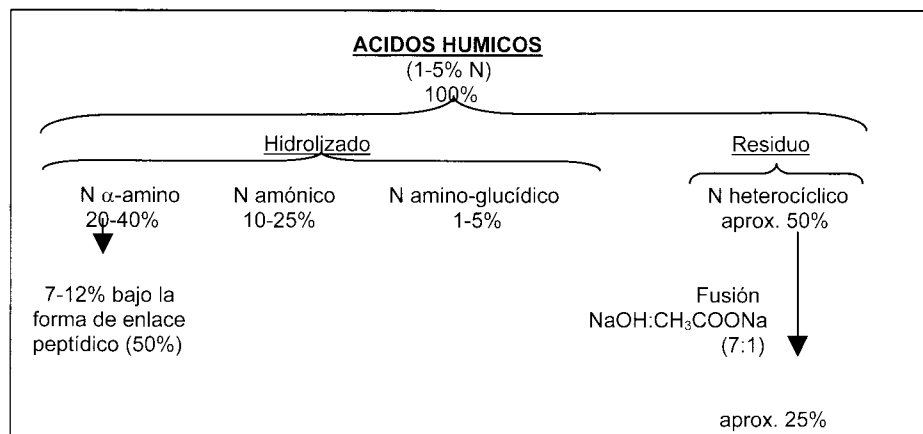


Figura 4.8.- Distribución del nitrógeno en diversas fracciones obtenidas en la hidrólisis ácida de ácidos húmicos (J.Ruchti, 1962).

En el hidrolizado predomina el nitrógeno α -aminoácido, mientras que en el residuo se mantiene el nitrógeno heterocíclico. Por fusión en presencia de una mezcla de sosa caústica y acetato sódico, a $270^{\circ}C$, se llega aún a

desplazar el 25% de este nitrógeno presente en el residuo, que debe ser considerado como una parte de aminoácidos difícilmente hidrolizables, del tipo N-fenilglicina. Recientemente se ha sugerido que el 25% restante en un constituyente de los compuestos heterocíclicos del núcleo.

4.2.3. HIPOTESIS ACERCA DE LA ESTRUCTURA DE LAS SUSTANCIAS HUMICAS.

De todo lo anterior parece deducirse que tanto los ácidos húmicos como los fúlvicos pueden ser considerados como polímeros coloidales, formados por unidades poliestructurales, que a su vez están constituidas por monómeros monoestructurales. Aceptando este hecho, se han elaborado diversas hipótesis para tratar de concretar su estructura. Los modelos propuestos son, sin embargo, muy generales, sin detalles específicos, y no permiten ser aceptados como definitivos.

Como más representativos, se muestran a continuación las estructuras propuestas por Thiele y Kettner, Kukharenko, Felbeck y Chesire y colaboradores.

H. von Thiele y H. Kettner (1953) sugieren que la microestructura de las unidades básicas o monómeros de las sustancias húmicas consta de un núcleo asociado a grupos reactivos y combinado con elementos puente (Figura 4.9).

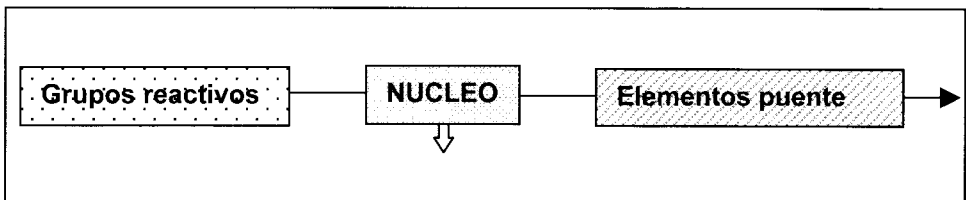


Figura 4.9. Esquema general de las sustancias húmicas propuesta por H. Von Thiele y H. Kettner (1953).

Pero como puede apreciarse en la figura 4.10., al considerar los posibles núcleos, grupos reactivos y unidades atómicas puente que pueden intervenir, la estructura adquiere numerosas posibilidades. Esta puede ser la principal objeción a esta hipótesis.

La estructura propuesta por T.A. Kukharenko (1955) está basada en estudios realizados sobre productos obtenidos en la oxidación alcalina de

ácidos húmicos, semejantes a los de degradación de la lignina (vanillina y derivados). Los sistemas cíclicos obtenidos en tal degradación, y que designa por R, R', R'' y R''', los considera inicialmente unidos a puentes de oxígeno y unidades metileno, formando una estructura de grandes posibilidades (Figura 4.11.).

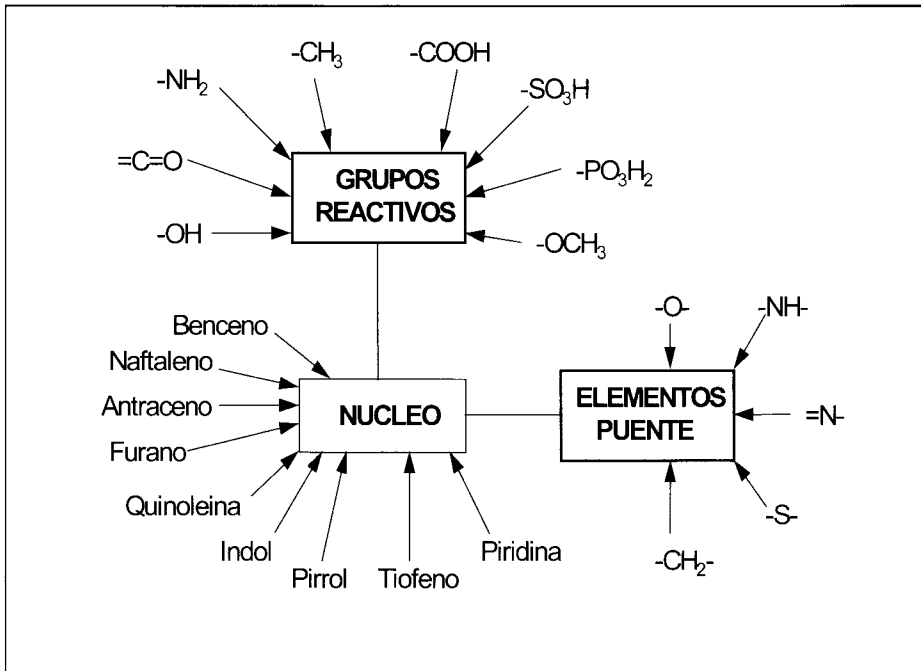


Figura 4.10.- Microestructura de las unidades básicas de los ácidos húmicos (H. Thiele y H. Kettner, 1953)

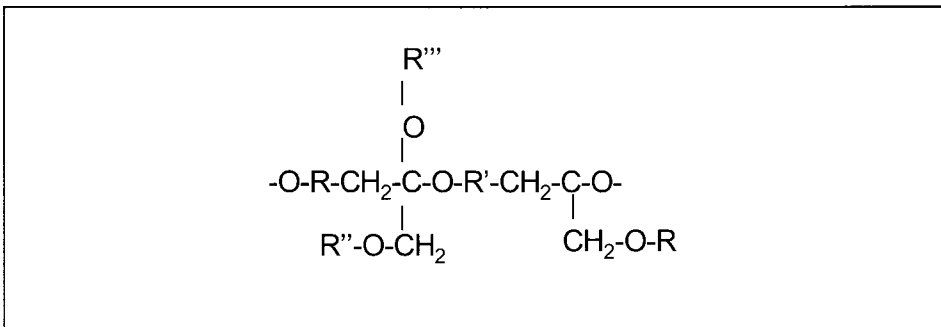


Figura 4.11.- Modelo de estructura general de un ácido húmico (T.A. Kukhareenko, 1955).

En 1965, G.T. Felbeck demostró que los productos de hidrogenación de un suelo orgánico consistían principalmente en largas cadenas de unidades metileno con ramificaciones ocasionales. Los datos del análisis elemental, número de dobles enlaces por átomo de carbono, y la conocida capacidad de las sustancias húmicas para formar quelatos y fijar amoniaco, le hicieron sugerir que la estructura de las sustancias húmicas es básicamente un monómero poliheterocíclico consistente en la condensación de unidades γ -pirona, agrupadas en cadena por puentes metileno. Las unidades fenólicas y aminoácidas se adaptan a la estructura central en la forma en que se expone en la figura 4.12.

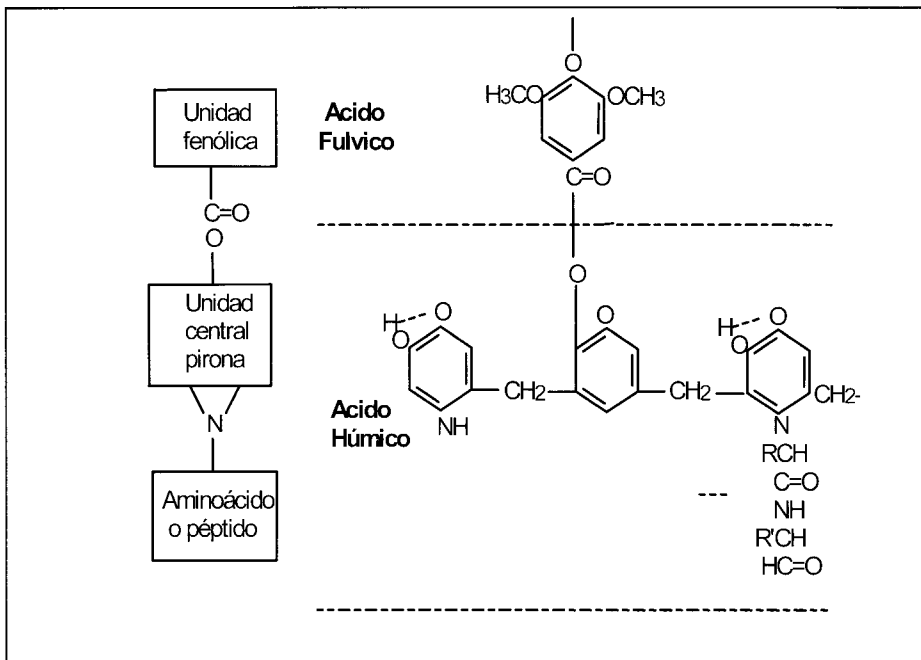


Figura 4.12.- Estructura posible de ácidos fúlvicos y húmicos (G.T. Felbeck, 1965).

La principal objeción a esta hipótesis es que un polímero consistente en unidades γ -pirona no ha sido nunca observado, aunque es una posibilidad.

M.V. Chesire y cols. (1967), consideran que la estructura de los ácidos húmicos consiste en un núcleo policíclico aromático de gran complejidad, al que se hallan unidos los polisacáridos, proteínas, fenoles relativamente sencillos y metales (Figura 4.13.).

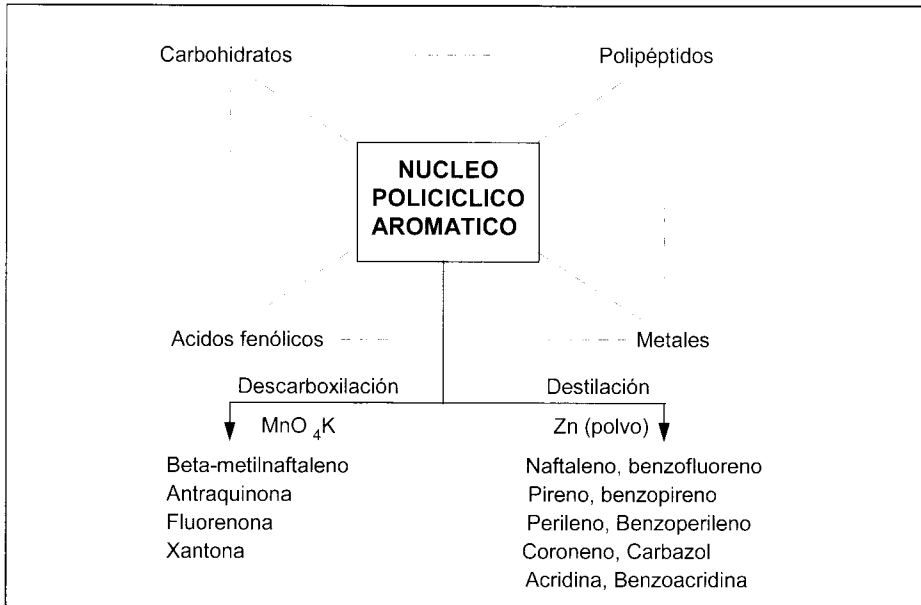


Figura 4.13.- Estructura posible de ácidos húmicos (M.V. Chesre y cols., 1967).

La oxidación del citado núcleo mediante permanganato potásico y la posterior descarboxilación de los ácidos resultantes, por una parte, y la destilación en presencia de polvo de cinc, por otra, les ha permitido reconocer la existencia de numerosos compuestos aromáticos que constituyen la unidad central.

Como conclusión de todo lo anteriormente expuesto, y bajo el punto de vista químico, el humus se puede definir de una forma más completa: El humus no es una sustancia de composición exactamente definida. Ni siquiera una agrupación de compuestos en porcentajes determinados. El humus debe considerarse como un material heterogéneo, constituido por un conjunto de sustancias altamente polimerizadas, con peso molecular relativamente alto, coloreadas del amarillo al negro, amorfas y con unas propiedades coloidales e hidrofílicas muy marcadas. Con estructuras alifáticas y aromáticas en sus moléculas, alta capacidad de cambio, gran densidad de grupos ácidos, carboxílicos y fenólicos, y constituido principalmente por C, H, O y N.

Con este concepto del humus se comprenden fácilmente sus propiedades y las grandes funciones que desempeña en el suelo y en la nutrición de las plantas.

4.3. PROPIEDADES GENERALES DEL HUMUS.

El humus es de naturaleza coloidal, pero a diferencia del coloide mineral del suelo, es amorfo y no cristalino. Su superficie y capacidad de adsorción exceden con mucho a las presentadas por cualquiera de las arcillas.

Los coloides húmicos presentan una gran hidrofilia y, por imbibición en el agua, sufren un notable hinchamiento. Un gel húmico separado por filtración puede retener alrededor de 15 veces su peso de agua, y además con la particularidad de que mientras conserve una ligera humedad, es susceptible de recuperar su anterior estado coloidal. Pero por evaporación, incluso a baja temperatura, se pasa a un estado de irreversibilidad, lo cual puede observarse en la superficie de los suelos con climas cálidos y secos. Lo mismo ocurre por liofilización.

Por desecación en estufa, los geles húmicos sufren una contracción considerable, obteniéndose una materia negra, córnea, escamosa y brillante, que se pulveriza como el carbón y que no se redispersa más en el agua pura.

El humus presenta también una baja plasticidad y cohesión. Color oscuro, poco soluble en el agua, pero soluble en bases diluidas y precipitable por los ácidos.

Como complejo está organizado de igual forma que la arcilla. Lleva innumerables cargas negativas, pero en lugar de estar constituido por silicio, oxígeno, aluminio y hierro, las micelas húmicas están compuestas por carbono, oxígeno, hidrógeno y nitrógeno fundamentalmente, así como de otros elementos como azufre y fósforo. Las cargas negativas proceden de los grupos carboxílicos y fenólicos, de los cuales el hidrógeno puede ser reemplazado por intercambio catiónico.

La capacidad de cambio de cationes de los humus es muy superior a la de las arcillas. Para éstas alcanza, por lo general, de 8 a 150 me/100 g. Para los humus bien desarrollados, entre 300 y 500 me/100 g.

Por acidificación, las dispersiones de humatos floculan bajo la forma de madejas pardas. Esta floculación se asegura a pH=2.

Los álcalis, como hidróxido sódico y potásico, no tienen sólo una acción dispersante, sino que también dan lugar a humatos alcalinos solubles en agua, que se comportan como verdaderos electrolitos.

Por último, y dentro de estas propiedades generales, debe decirse que contrariamente a las arcillas, las dispersiones húmicas son poco sensibles a

los electrolitos en concentraciones débiles. Las sales alcalinas no ejercen acción sobre ellas, y en esa propiedad está basada la separación de los coloides arcillosos de los húmicos.

4.4. FUNCIONES DEL HUMUS EN EL SUELO Y ACCION SOBRE LA NUTRICION DE LA PLANTA.

Las grandes funciones que el humus desarrolla en el suelo son de tipo físico, químico y biológico.

El humus influye notablemente en los caracteres físicos del suelo. Le proporciona un color oscuro, que favorece la absorción de los rayos solares y, por tanto, un aumento de la temperatura. Debido a su débil calor específico, se calienta o enfría rápidamente, de lo que resulta que está más frío que la arena en verano, y más caliente en invierno. Actúa por tanto, como un moderador de las variaciones de temperatura en el suelo.

Es el principal responsable de la estructura granulosa y, en consecuencia, facilita una mayor porosidad. Reduce la viscosidad de las arcillas, con lo que se favorece la aireación y el drenaje.

Gracias a su gran capacidad de retención de agua, mantiene en el suelo un contenido apropiado de ella y tiende a reducir la evapotranspiración. Proporciona también un efecto térmico por el desprendimiento de calor que se origina al ponerse en su contacto. Este poder absorbente, junto al de cimentación en la agregación, hace del humus un agente preventivo de primera importancia de cara a la erosión.

Las principales propiedades químicas del suelo son igualmente reguladas por el humus. Presta su poder amortiguador y hace aumentar su capacidad de cambio, lo que trae consigo el incrementar considerablemente también la reserva de elementos nutritivos para la planta. Ejerce una acción compensadora entre aniones y cationes en la disolución del suelo, y puede formar quelatos de hierro y manganeso, con lo cual se asegura el transporte de estos elementos.

Bajo el punto de vista biológico, el humus sirve de soporte a una multitud de microorganismos, que hacen del suelo un medio vivo. Estos microorganismos, que viven a expensas de él y contribuyen a su transformación, son tanto más numerosos y activos cuanto mayor cantidad

existe en el suelo. El humus es verdaderamente el fundamento de la actividad microbiana de los suelos.

Frente a los vegetales superiores, la función del humus se manifiesta directamente favoreciendo su nutrición mineral. Mediante su descomposición gradual y lenta, por acción de los microorganismos del suelo se puede aprovisionar a las plantas en elementos nutritivos. Y por la formación de complejos fosfo-húmicos, mantiene el fósforo en estado asimilable por las plantas, a pesar de la presencia de caliza y hierro.

Por otra parte, el humus es una fuente de gas carbónico. Su oxidación lenta libera dióxido de carbono que contribuye a solubilizar algunos elementos minerales del suelo, facilitando así su absorción por la planta.

También se ha puesto de manifiesto que el humus muestra acciones específicas sobre la fisiología de la planta: 1º) Acción rizógena, favoreciendo la formación y el desarrollo de las raíces, no sólo principales, sino también las secundarias; 2º) Acción estimulante, que se traduce en una mayor absorción de nutrientes, acompañada de una mejor utilización por la planta. El nitrógeno, a este respecto, presenta un interés particular, puesto que al absorberse bajo la forma mineral, se organiza después en la planta. Una absorción excesiva de nitrógeno, no acompañada de la síntesis por el vegetal de compuestos orgánicos nitrogenados, no tendría ningún efecto sobre el rendimiento, y conduciría a que se presentaran fenómenos de toxicidad. La experiencia muestra que las sustancias húmicas tienen una acción importante sobre la utilización del nitrógeno por la planta.

Este hecho se ha demostrado experimentalmente en cultivos de ryegrass, desarrollados en arena de cuarzo, con disoluciones nutritivas adicionadas, o no, de 2'5 mg/l de humato sódico. Las disoluciones nutritivas contenían dosis crecientes de nitrógeno y todos los otros elementos minerales necesarios a concentración constante (Figura 4.14.).

Como puede observarse, en ausencia de humus el rendimiento crece con la concentración de nitrógeno en la disolución, hasta un punto en que empieza a decrecer por presentarse fenómenos de intoxicación. La presencia de humus, por el contrario, permite un aumento del rendimiento con la concentración en nitrógeno y, asimismo, prolongar hacia fuertes concentraciones su utilización por la planta.

Estas grandes funciones del humus demuestran que el suelo le debe la mayor parte de sus cualidades e, incluso, su productividad.

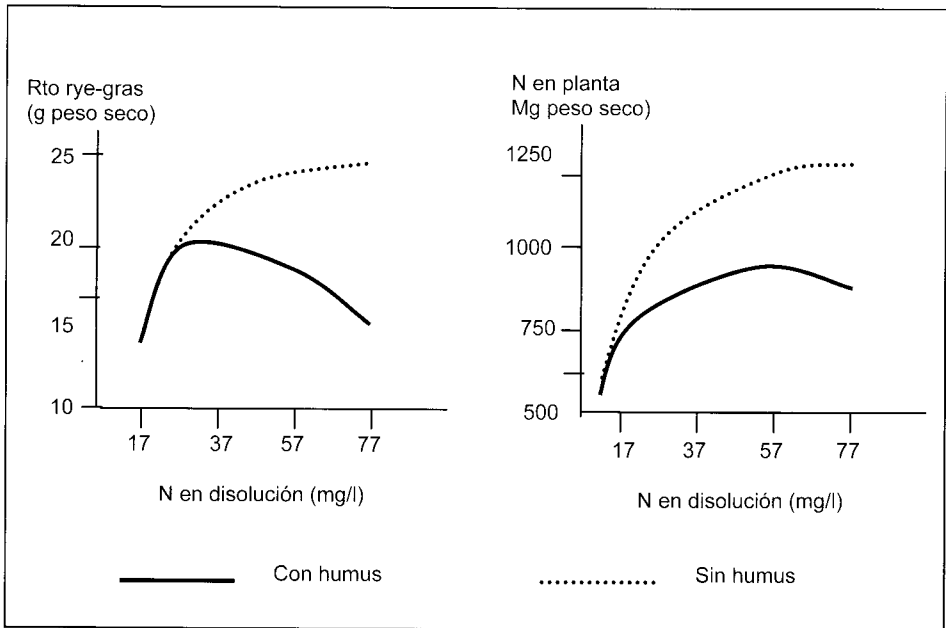


Figura 4.14.- Influencia de la materia orgánica humificada en la utilización del nitrógeno en rye-grass (R. Chaminade, 1966).

5

EL AGUA Y LA ATMOSFERA DEL SUELO.

El agua es el componente mayoritario e indispensable para que las plantas puedan vivir y desarrollarse. Es a su vez el vehículo mediante el cual se transporta los elementos químicos esenciales que el suelo contiene, desde las raíces a las hojas, y los componentes elaborados por éstas a los restantes órganos donde son utilizados; proporciona a los tejidos vegetales la consistencia necesaria para su mantenimiento en el suelo; finalmente, y entre otras funciones, es quien regula la temperatura de la planta evitando con ello, en determinadas circunstancias, cambios bruscos que pueden dañar su crecimiento.

Pero el agua no es solo de importancia directa para la planta. Su comportamiento en el suelo debido a sus particulares propiedades hace que, indirectamente, pueda influir en diversos procesos que facilitan o dificultan su utilización. Altos o bajos contenidos de humedad y las características del suelo, son los factores principales que deben ser considerados.

5.1. ESTADOS DEL AGUA EN EL SUELO.

Cuando el agua cae o se aplica por una lluvia abundante o riego, el agua entra en el suelo, el aire es desplazado y los poros, ya sean grandes o pequeños, quedan rellenos de agua. El suelo se satura de agua y entonces se dice que ha llegado a su "máxima capacidad retentiva". En este caso, una parte del agua es atraída por la gravedad y desciende a las zonas más bajas del suelo, más o menos rápidamente según su permeabilidad y la abundancia de las precipitaciones. Constituye el "agua libre o gravitacional".

Una vez que cesa la aportación hídrica, el agua se desprende de los poros grandes (macroporos) y pasa al subsuelo por su propio peso. Finalizado este drenaje el suelo se dice entonces que está en situación de "capacidad de campo", término que indica la cantidad de agua capaz de ser conservada por el suelo.

A medida que el suelo se va secando debido a la absorción del agua por la planta, o por evaporación directa, el contenido de agua decrece. Cuando en la planta aparecen signos de marchitez se establece la situación de "coeficiente de marchitez" o "humedad crítica". En estas condiciones, las raíces de las plantas pueden absorber todavía algo de agua, pero no la suficiente para cubrir sus necesidades.

Si la pérdida de agua continúa, aparecerá a continuación, en la que va quedando, un marcado aumento en su retención por los sólidos del suelo. Se alcanza así el llamado "coeficiente higroscópico", que corresponde a la cantidad de agua que permanece en un suelo secado al aire.

Finalmente, si el espesor de la película acuosa disminuye progresivamente, su retención sigue aumentando hasta alcanzar los valores máximos. La eliminación del agua retenida en este caso requiere en el laboratorio la utilización de la estufa y el horno.

5.2. FUERZAS DE RETENCION DEL AGUA EN SUELOS NO SATURADOS.

A partir del momento que se alcanza la fase de capacidad de campo, el agua que se mantiene en el suelo rellenando los poros pequeños queda sometida a fuerzas que tienden a retenerla. Una es la atracción de las superficies sólidas para las moléculas de agua, que se conoce como fuerza de adherencia; y otra la atracción de las moléculas de agua entre sí, que se llama fuerza de cohesión.

Ambas fuerzas, actuando conjuntamente, hacen posible que los sólidos del suelo retengan agua y controlen grandemente su movimiento y su utilización. Por adherencia, los sólidos retienen rígidamente en sus intercaras a las moléculas de agua, y éstas a su vez retienen a otras por cohesión.

La fuerza de atracción del suelo para las partículas de agua (adhesión), provoca una acumulación de ésta sobre la superficie de las partículas del suelo, formando una película cuando el agua líquida se pone en su contacto; ello da lugar a una reducción en el movimiento de las partículas de agua, ya que éstas quedan fuertemente adsorbidas. Este agua se conoce como "agua de adhesión", no es aprovechable por las plantas, está siempre presente en todo suelo normal y solo puede eliminarse por desecación.

Si se tiene en cuenta que estas fuerzas que retienen agua en el suelo son fuerzas de atracción superficial, es evidente que cuanto más superficie

tenga el suelo, mayor será la cantidad adsorbida. Los suelos con altos contenidos en arcillas y humus serán más húmedos que aquellos otros con alto porcentaje de arenas.

Más separadas de la esfera de fuerte atracción de las partículas del suelo, las moléculas de agua se mantienen unidas por cohesión y originan una segunda película líquida. Este agua se llama agua de cohesión y está sometida a un cierto movimiento por acción de la gravedad. El mecanismo de esta unión está fundamentado en las cargas negativas y positivas que poseen las moléculas de agua. Estas moléculas son dipolares, ya que la compartición de electrones entre el oxígeno y el hidrógeno produce moléculas cargadas negativamente en el lado del primero y cargadas positivamente en el lado donde sale el protón de hidrógeno. Por ello, tienden a atraerse entre sí por enlace de hidrógeno (Figura 5.1.)

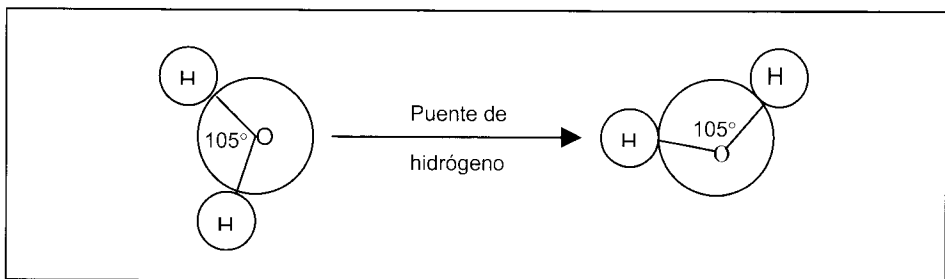


Figura 5.1. Enlace por puente de hidrógeno entre dos moléculas de agua.

En la figura 5.2. se esquematiza la situación en las partículas del suelo de ambos tipos de agua, en relación con las fuerzas que actúan.

Los términos "succión", "tensión" y "potencial húmedo", se usan corrientemente para designar la fuerza con que el agua es retenida en el suelo por estas fuerzas. Se mide en bares, que son unidades de presión casi equivalentes a atmósferas (1 atmósfera = 1'0127 bares), o bien en unidades de pF, concepto que fue introducido por R. Schonfield (1935), simplificando con él la expresión de las constantes de energía. La expresión escrita es muy semejante a la del pH, y puede definirse como el logaritmo de la cifra que expresa, en centímetros, la altura de la columna unidad de agua necesaria para equilibrar la fuerza retentiva. Las equivalencias entre atmósferas y valores de pF quedan más claras con las siguientes consideraciones.

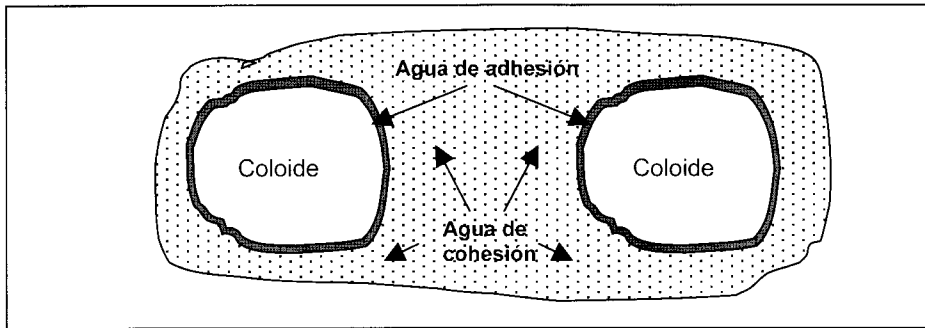


Figura 5.2. Dibujo esquemático que diferencia el agua de adhesión de la de cohesión en las partículas sólidas del suelo.

Una atmósfera es la presión ejercida por una columna de mercurio de 76 cm de altura y 1 cm² de base. El peso de dicha columna será:

$$P = V \times D = B \times H \times D$$

donde: V = volumen, D = densidad, B = base, H = altura.

Por tanto:

$$P = 1 \times 76 \times 13'6 \text{ (densidad Hg)} = 1000 \text{ g/cm}^2 \text{ (aprox.)}$$

La altura H que deberá tener una columna de agua de 1 cm² se deduce a su vez de:

$$P = 1000 = 1 \times H \times 1 \text{ (densidad H}_2\text{O)} = H = 1000 \text{ cm}$$

Este razonamiento permite establecer las equivalencias que se exponen en la tabla 5.1.

La figura 5.3. representa los distintos estados de agua en el suelo, junto con los valores medios de las fuerzas de retención en cada caso.

Una tercera fuerza de retención en estos suelos, y que en determinadas ocasiones debe ser considerada, es conocida como potencial osmótico, que surge de los materiales disueltos en el agua. En la mayoría de los casos, esta fuerza suele ser muy pequeña en comparación con las de atracción superficial antes expuestas. Sin embargo, algunas regiones áridas contienen elevadas concentraciones de sales solubles (suelos salinos).

Tabla 5.1. Equivalencias entre distintas mediciones de la tensión de humedad.

Altura de una columna unidad de agua (cm)	Presión en atmósferas (bares)	Equivalencia en valores de pF
1	1/1000	0
10	1/100	1
100	1/10	2
346	1/3	2.54
1000	1	3
10000	10	4
15849	15	4.2
31623	31	4.4
100000	100	5
1000000	1000	6
10000000	10000	7

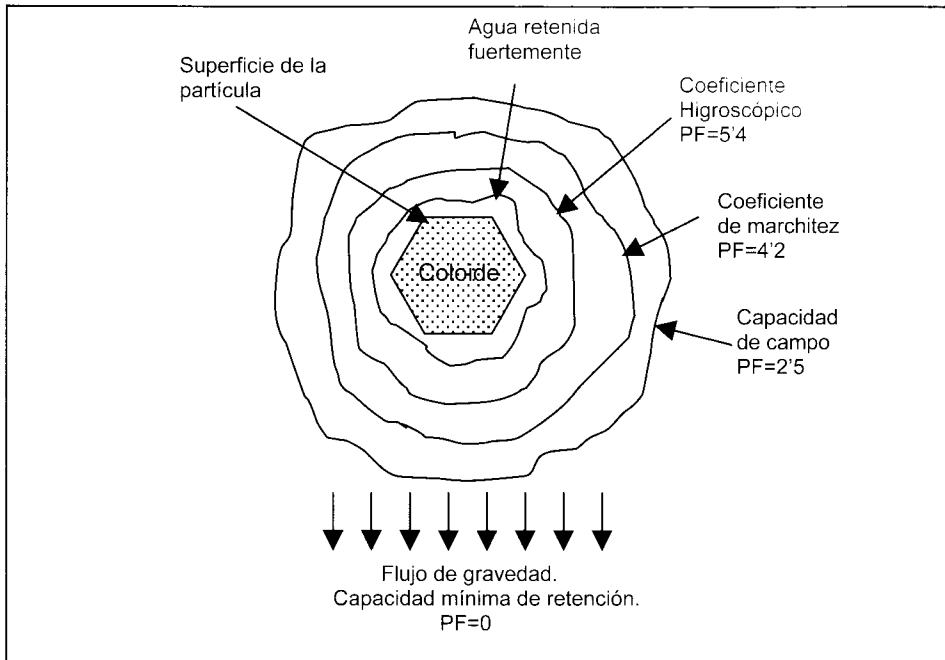


Figura 5.3. Estados del agua en el suelo y valores medios de las fuerzas de retención de los sólidos del suelo en cada caso.

En estos suelos, el potencial osmótico puede superar al correspondiente capilar. La extracción del agua del suelo por la planta aumenta la concentración osmótica de la restante, y por tanto el potencial osmótico aumenta.

5.3. CLASIFICACIONES DEL AGUA DEL SUELO.

5.3.1. EN RELACIÓN CON LAS FUERZAS DE RETENCIÓN.

Basándose en los grados de retención expuestos, el agua del suelo puede clasificarse en: "agua higroscópica", "agua capilar" y "agua gravitacional o libre". Hay que señalar que en esta clasificación no se incluyen otras dos formas de agua que indudablemente se encuentran también en el suelo: agua de constitución, que es la que forma parte de los cristales arcillosos, y el vapor de agua del aire del suelo.

El agua higroscópica equivale a la máxima cantidad de agua que las partículas del suelo pueden adsorber cuando se ponen en contacto con una atmósfera saturada de vapor de agua. Corresponde a la adherida por el coeficiente higroscópico, es decir, con una tensión entre 31 y 10.000 atmósferas. Presenta gran variabilidad, no solo con las condiciones del suelo, sino también en relación con la temperatura y humedad atmosférica.

Al depender básicamente del complejo coloidal, su intensidad se halla en directa relación con el porcentaje de coloides que el suelo posea. Su eliminación sólo se consigue manteniendo la muestra de suelo varias horas a 105-110°C.

El agua capilar es la retenida por las partículas sólidas del suelo mediante fuerzas de tensión superficial. Constituye el agua presente en el suelo que queda retenida entre 0'3 y 31 atmósferas, es decir, en un grado menor que la higroscópica. Puede concretarse como la que queda adherida tanto por la capacidad de campo como por el coeficiente higroscópico. Puede ser eliminada desecando la muestra al aire.

El agua gravitacional o libre es la que se halla por encima de la capacidad de campo, retenida solo por tensiones menores de 0'3 atmósferas. Constituye la llamada también agua de drenaje.

Finalmente, podríamos considerar una cuarta modalidad de agua, la llamada "de constitución", que es aquella que está ligada a la estructura de la

materia. Cuantitativamente es muy poco significativa y nunca puede ser utilizada por la planta.

5.3.2. EN FUNCIÓN DE SU UTILIZACIÓN POR LA PLANTA.

Bajo el punto de vista de su utilización por las plantas, también puede hacerse una clasificación del agua del suelo. Tres tipos pueden delimitarse: "agua no asimilable", "agua asimilable" y "agua superflua" (Figura 5.4.).

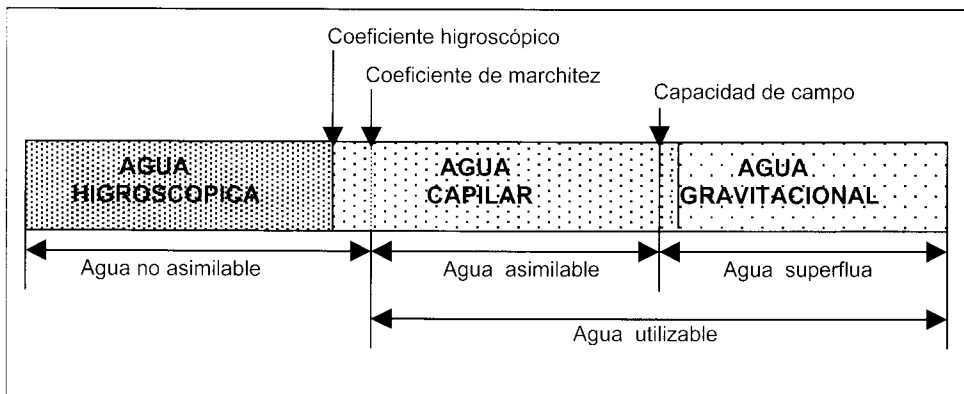


Figura 5.4.- Formas de agua en el suelo en relación con su disponibilidad para las plantas

Agua no asimilable es la que incluye el agua higroscópica y una pequeña parte de la capilar. No es utilizable por las plantas superiores, a excepción de algunas muy adaptadas en regiones áridas. Se encuentra adherida al suelo por el punto de marchitez.

Agua asimilable es generalmente considerada como la porción de agua almacenada en el suelo que puede ser absorbida fácilmente por las raíces de las plantas. Se sitúa entre el coeficiente de marchitez y la capacidad de campo.

Agua superflua es la que excede a la capacidad de campo. Aunque puede ser utilizable, no resulta beneficiosa para las plantas. Las raíces debido a un exceso de agua, quedan desprovistas de nutrientes, pues son arrastrados a las capas más profundas del suelo. Además, carecen de la aireación necesaria y muchos procesos bioquímicos importantes que en el suelo se verifican, como nitrificación, sulfoxidación, fijación de nitrógeno, etc.

quedan fuertemente inhibidos. Diversos procesos químicos que pueden afectar un suministro adecuado de nutrientes pueden también ser causas desfavorables para el desarrollo de la planta.

5.4. MOVIMIENTO DEL AGUA EN EL SUELO.

La lluvia y otras formas de precipitación, junto con los riegos, constituye los aportes de agua a los suelos. De ellos, la lluvia se puede considerar como el más importante, ya que su magnitud influye fundamentalmente en su movimiento y destino.

Cuando la lluvia alcanza la superficie del suelo, el agua tiende a repartirse en tres fracciones. Una se evapora sin llegar a penetrar en el suelo; otra circula por la superficie o se mantiene en ella un determinado tiempo; y una tercera se filtra (Figura 5.5.).

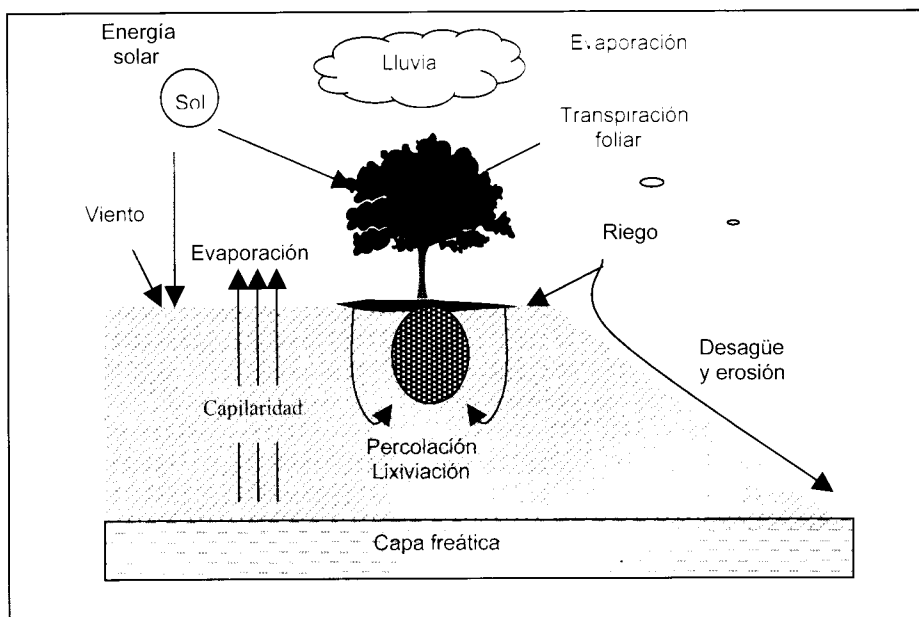


Figura 5.5. Esquema representativo de los movimientos del agua en el suelo.

El desagüe o escorrentía del agua por el desplazamiento superficial se produce por la inclinación que el terreno puede presentar, o por su

impermeabilidad. En algunas regiones húmedas, las pérdidas por este motivo pueden alcanzar cifras alrededor del 50% de la precipitación anual, lo que supone una gran inutilización del agua que puede entrar de esta manera en el suelo.

Este aspecto negativo viene a su vez incrementado por la acción que el desplazamiento provoca en la superficie del suelo, ya que este va sufriendo gradualmente una pérdida de su fertilidad natural al arrastrar el agua gran cantidad de nutrientes indispensables para el desarrollo del cultivo. En muchas regiones de los EE.UU., la reducción de cosechas por este motivo supone una pérdida anual de millones de dólares. La construcción de terrazas a través de la pendiente del suelo, el mantenimiento de la fertilidad del suelo y un cultivo adecuado, pueden ser medios utilizables para reducir y controlar estos perjuicios.

El agua infiltrada es la que condiciona básicamente el contenido final de humedad que se mantiene en el suelo. A medida que va penetrando en éste, reemplaza al aire de los macro y microporos del suelo y, posteriormente, se desplaza hasta el subsuelo, ayudada por las fuerzas de gravedad y capilaridad. Este proceso, denominado "percolación", se verifica como es lógico cuando la cantidad de lluvia depositada es tan elevada que el suelo no puede retenerla en su totalidad.

La rapidez e intensidad de este movimiento, así como las pérdidas de agua que pueden haber, están influenciadas por la magnitud de la lluvia y su distribución, por la evaporación que simultáneamente se produzca, presencia y tipo de cultivos y por las características del suelo, principalmente en lo que se refiere a su textura y estructura.

En mayor o menor grado, la percolación produce siempre pérdidas de nutrientes para las plantas. Esta acción, conocida como "lixiviación" suele ser muy intensa en zonas húmedas, donde los óxidos de calcio y magnesio son arrastrados en gran proporción. El hecho es importante, ya que supone con el tiempo un incremento en la acidez de sus suelos. La solución de este problema está en facilitar la percolación con el fin de reducir arrastres de nutrientes mediante un drenaje del terreno. La construcción de zanjas y el empleo de tubos de drenaje son los medios más efectivos para tal fin, ya que con ello se consigue condiciones más favorables para el desarrollo del cultivo, una mejora en la granulación y aireación del suelo, reducción en los daños por heladas y una sensible elevación de la temperatura en los niveles drenados.

Después de una lluvia, o un riego, el movimiento descendente del agua continúa hasta que el suelo alcanza la capacidad de campo (suelo no

saturado). En esta situación, coexisten en el suelo poros llenos de aire y otros llenos de agua, la evaporación se producirá en la superficie del suelo y las plantas absorberán agua fácilmente de zonas cercanas a sus raíces.

Al ir desecándose el suelo por estos motivos, el agua presente en otras zonas tiende a compensar estas pérdidas desplazándose a los horizontes superficiales, o bien hacia las partes ricas en raíces. Estos movimientos hacen que el equilibrio hidroestático se reestablezca al uniformar la humedad del suelo.

Sin embargo, si la humedad disminuye todavía más, estos desplazamientos van siendo cada vez menores, ya que el agua que queda retenida en las partículas del suelo está tan fuertemente adsorbida que impide su movilidad. En este momento es cuando comienzan las dificultades de los vegetales para proveerse del agua necesaria para su normal desarrollo. Se deduce, por tanto, que los recursos en agua situados en la proximidad de las raíces requieren ser potenciados por el riego.

5.5. UTILIZACION DEL AGUA DEL SUELO POR LAS PLANTAS. FACTORES INFLUYENTES.

Aunque el aprovechamiento del agua por las plantas parece que es más efectivo cuando el contenido de agua en el suelo se sitúa cercano a la capacidad de campo, también lo es el agua de gravitación, aunque ésta última suele pasar al subsuelo antes que las plantas puedan utilizarla.

Pero en ambos casos, la cantidad de agua retenida que puede ser utilizada por las plantas depende de la cantidad presente por unidad de volumen del suelo, y de la profundidad a que las plantas pueden extraerla. Junto a ello hay que considerar también la naturaleza de la planta que se desarrolla, los factores climáticos, principalmente la temperatura y humedad del aire y, por último, la cantidad de agua que puede perderse por evaporación.

El potencial capilar es la principal fuerza que las plantas deben vencer para obtener agua del suelo. En este aspecto, las características y composición del suelo se consideran altamente condicionantes de la retención del agua asimilable y, en consecuencia, de su utilización por la planta.

La influencia que ejerce la textura del suelo es importante. Los suelos de textura fina presentan una elevada capacidad de retención del agua útil. Ello se debe a estar constituidos por numerosas y pequeñas partículas que

proporcionan una gran superficie de contacto con el agua, junto a un elevado volumen de pequeños poros distribuidos entre ellas. Los suelos de textura gruesa no presentan estas características, y por tanto retienen mucha menos agua; en estos casos es conveniente el aporte hídrico en forma de riego para que la planta pueda obtener la que va necesitando.

La estructura del suelo, modo por el cual las partículas del suelo se hallan ordenadas, condiciona así mismo la retención. Cuando se encuentran muy juntas dejan solo una película muy delgada de agua a su alrededor firmemente retenida y muy poco accesible a las plantas. Una estructura más suelta facilita una menor retención y la aparición de un mayor espacio poroso que permite condiciones más adecuadas para su mantenimiento.

El espesor del suelo y su estratificación pueden tener una notable influencia sobre la capacidad de retención hídrica, muy especialmente por su repercusión sobre el movimiento del agua. Al aparecer un cambio textural brusco, suele provocarse un retraso en el movimiento descendente del agua, lo cual da lugar a su almacenamiento en las capas superiores. Este agua es muy accesible a las plantas, ya que al quedar poco retenida, les permite absorber cantidades importantes.

La cantidad de materia orgánica que puede haber en el suelo tiene también una notoria influencia en la capacidad de retención del agua disponible. Esta influencia está fundamentada en su capacidad de adsorber un peso de agua muy superior al suyo propio, y es muy importante cuando se trata de suelos arenosos. En los de textura fina es mucho menor, debido a que en estos gran parte de la materia orgánica se encuentra tan íntimamente asociada a las partículas de arcilla que una misma película de agua envuelve a ambas. La adición al suelo de materiales que incrementen la capacidad de retención hídrica puede ser altamente beneficioso. Polímeros a base de almidón y acrilonitrilo pueden absorber más de 100 veces su peso de agua. En suelos sobre todo arenosos, su utilización constituye una gran ayuda para incrementar y retener el agua presente en ellos.

5.5.1. TRANSFERENCIA DEL AGUA DEL SUELO A LA PLANTA. GENERALIZACIONES.

La mayor proporción de agua que las plantas requieren durante su ciclo vital la obtienen a través de su sistema radicular. Solo una pequeña parte entra directamente a la parte aérea a través de los estomas de las hojas por acción directa de la lluvia, rocío o nieve.

Las raíces de las plantas únicamente pueden extraer agua del suelo si son capaces de aplicar una succión lo suficientemente grande para desplazar a la que se encuentra retenida en los poros del suelo.

Si esta condición se cumple (la succión se crea al perder la planta agua por transpiración), las raíces empiezan a absorber agua en puntos cercanos a ellas, y la película acuosa en los poros del suelo tiende a disminuir; el desplazamiento de la humedad en esta dirección se intensifica, lo cual provoca a su vez un traslado de agua de las zonas cercanas a las de absorción de la planta.

Para algunos suelos, estos desplazamientos son importantes para distancias de unos pocos milímetros. En otros, como los arcillosos pobremente granulados, el movimiento es más lento y escasa la cantidad liberada. Evidentemente, también se producen desplazamientos a mayor distancia, pero no con la rapidez necesaria para cubrir las necesidades de la planta en las fases de mayor crecimiento. Un contenido de materia orgánica apropiado (3-5%) contribuye favorablemente a que estos desplazamientos se efectúen, no solo por su capacidad de retención de humedad aprovechable, sino también por la influencia que ejerce sobre la estructura del suelo y su porosidad.

La presencia de sales en los suelos, tanto si proceden de los fertilizantes aplicados, como de los componentes naturales, es un factor a tener en cuenta en la captación del agua por las raíces. Las sales disueltas crean un potencial osmótico que tiende a retener el agua donde aquellas se encuentran. Este puede ser lo suficientemente elevado para provocar el marchitamiento de la planta, aunque el suelo se encuentre en la capacidad de campo, ya que el valor total de humedad en estos suelos es aquí la tensión del suelo más la presión osmótica de la disolución.

La presión osmótica de la disolución del suelo depende de la cantidad de sal y de agua que el suelo contiene. Por esta razón, a medida que el suelo se seca, la presión osmótica de la disolución aumenta. Para suelos normales, la presión osmótica en el coeficiente de marchitamiento está por debajo de 2 atmósferas, aunque puede ser superior en suelos que han sido fertilizados con compuestos solubles.

El jugo celular en las raíces contiene también sustancias disueltas. Por consiguiente, es capaz de ejercer una presión osmótica contra el agua sin solutos, pero únicamente puede extraer agua del suelo si la presión osmótica en las células radiculares es apreciablemente mayor que la de la disolución del suelo, que es el nombre dado al agua que en él existe. Una elevada proporción de sales alrededor de las raíces reduce notoriamente el poder de la

planta para absorber agua y, en estos casos, la energía que tienen que gastar las plantas para absorber agua aumenta a medida que lo hace la presión osmótica de la disolución en la que se desarrollan. Los suelos con una concentración alta de sales requieren, por tanto, riegos más frecuentes que los suelos similares pobres en sales.

En el conjunto de las anteriores generalizaciones, debe contemplarse también el importante papel que el desarrollo radicular puede ejercer en la absorción del agua del suelo. Está demostrado que durante los periodos de crecimiento favorables las raíces se alargan y extienden, por lo general, tan rápidamente que permiten mantener grandes contactos con la humedad, aún con las reservas de agua restringidas y sin gran ayuda de la capilaridad. Es evidente, por tanto, que la extensión del sistema radicular condiciona en gran medida la cantidad de agua que pueda ser absorbida del suelo.

5.6. BALANCE HIDRICO DEL SUELO.

El "balance hídrico", o "balance de humedad", de un suelo representa de forma aproximada el contenido de agua existente en él en un momento determinado.

Las circunstancias que regulan su establecimiento son:

- 1º) Las aportaciones realizadas por las lluvias.
- 2º) Las necesidades y actuaciones de la vegetación que se desarrolla en el suelo.
- 3º) Las características y situación del suelo.

A partir de estos condicionantes se pueden establecer las siguientes relaciones:

Agua infiltrada = Agua de lluvia – Agua no infiltrada.

Agua no infiltrada = Agua interceptada por la vegetación + Agua de escorrentía superficial + Agua de almacenamiento superficial.

Agua retenida = Agua infiltrada – Agua de drenaje.

El balance hídrico deducido de estas relaciones vendrá representado por:

Balance Hídrico = [Agua retenida + Agua de ascensos capilares + Agua de condensación de los poros del suelo] - [Agua de evaporación + Agua de transpiración + Agua almacenada por la planta]

Hay que señalar de nuevo que los balances hídricos son solo aproximados, y algunas veces no se ajustan a la realidad. El rigor de la medición de datos, la aplicación de fórmulas generales a áreas concretas, la interpretación correcta de la composición del suelo, etc, son factores que pueden falsear, en ciertas ocasiones, el dato final a obtener. Ello no implica, sin embargo, que se pueda subestimar el interés por esta información.

5.7. LA ATMOSFERA DEL SUELO. COMPOSICION.

Con bastante aproximación puede decirse que la cuarta parte del volumen total de un suelo medio, o típico de cultivo está constituido por el aire del suelo, y distribuido en los huecos que forman su porosidad, a través de los cuales circula y renueva de forma continua. Es evidente, por tanto, que la porosidad es el factor más influyente a tener en cuenta en la aireación del suelo.

La composición de la atmósfera del suelo, cuando éste posee una correcta porosidad y se encuentra suficientemente aireado, es similar a la de la atmósfera libre, en lo que respecta a su contenido en nitrógeno, pero presenta algunas diferencias en los otros componentes (Tabla 5.2.).

Tabla 5.2. Composición media (en volumen) de la atmósfera de suelos superficiales bien aireados y de la atmósfera libre.

COMPONENTE	AIRE ATMOSFERICO (%)	AIRE DEL SUELO (%)
Oxígeno	21'0	10-20
Nitrógeno	78'0	78'5-80
Dióxido de carbono	0'03	0'2-3'5
Vapor de agua	Variable	En saturación
Otros gases	Hasta 1	?

En estos casos, las diferencias señalables en la atmósfera del suelo son: un contenido ligeramente menor de oxígeno, una mayor riqueza en vapor de agua, la presencia en proporción variable de diversos gases y una concentración mucho más alta de dióxido de carbono.

Sin embargo, en determinadas situaciones puede presentar amplias variaciones. Y en este aspecto existe una clara diferenciación con el aire atmosférico, cuya composición es bastante estable.

Estas variaciones, que afectan esencialmente a los contenidos en dióxido de carbono y oxígeno, están altamente influenciadas por la cantidad de espacio poroso que el suelo posea, y por la intensidad de reacciones bioquímicas que en él se verifiquen.

En los suelos con poco drenaje, una alta proporción de los huecos que forman la porosidad del suelo quedan rellenos de agua, sobre todo después de una lluvia intensa. Cuando esta situación aparece y el volumen ocupado por el aire es menor del 10% del total del suelo, la renovación del aire se paraliza, ya que se suprime la fuente exterior de suministro. El resultado final es una disminución del oxígeno en el suelo, ya que el existente va siendo consumido por la respiración de las raíces, por el metabolismo de los microorganismos aeróbicos y por los procesos químicos de oxidación que en el suelo se efectúan. Cuando su contenido alcanza valores muy bajos, particularmente como ya se ha indicado, en suelos muy húmedos y de textura fina, se comprueba entonces, y especialmente en frutales, fenómenos de asfixia de las raíces, disminución de la actividad microbiana, ralentización de procesos importantes en la nutrición vegetal, se incrementan los procesos reductores con producción de nitrógeno gaseoso y sulfuros, y se originan formas reducidas de hierro y manganeso.

Estos aspectos negativos para el desarrollo de los cultivos agrícolas también pueden presentarse, excepcionalmente, en suelos que normalmente están bien drenados, por aportaciones continuas de agua en zonas bajas del terreno, o en aquellas otras donde tiende a depositarse durante un cierto espacio de tiempo.

En lo que respecta a las variaciones en el contenido de dióxido de carbono, puede afirmarse que en los suelos de cultivo de textura media, rara vez supera el 1%. Sin embargo, en los horizontes más profundos, o bien en zonas superficiales con gran actividad biológica, puede alcanzar porcentajes próximos al 10%. En este último caso, la aportación amplia de residuos orgánicos explica este incremento. Cuando se incorporan, por ejemplo, grandes cantidades de estiércol, sobre todo si las condiciones de humedad y temperatura son apropiadas, los microorganismos degradantes actuarán intensamente y originarán un gran desprendimiento de dióxido de carbono.

Otros factores influyentes también en la variación de este compuesto en el suelo son: la textura, el pH, la vegetación y la estación que se considere.

Así, en suelos de textura fina y muy húmedos, en donde la aireación es defectuosa, el dióxido de carbono tiende a acumularse. Los suelos ácidos ($\text{pH} < 6$) mantienen una elevada concentración de dióxido de carbono libre, mientras que los básicos ($\text{pH} > 7.5$), por el contrario, favorecen su fijación. Una vegetación intensa provoca una mayor respiración radicular y también un mayor aporte orgánico a su muerte, y ambos casos incrementarán el contenido de dióxido de carbono. Por último, al ser la temperatura un factor limitante de la actividad de los microorganismos, el contenido de dióxido de carbono aumentará en verano, al alcanzarse temperaturas más altas, y descenderá en invierno, puesto que las temperaturas más bajas reducen la actividad microbiana. Estas influencias quedan perfectamente reflejadas en la figura 5.6.

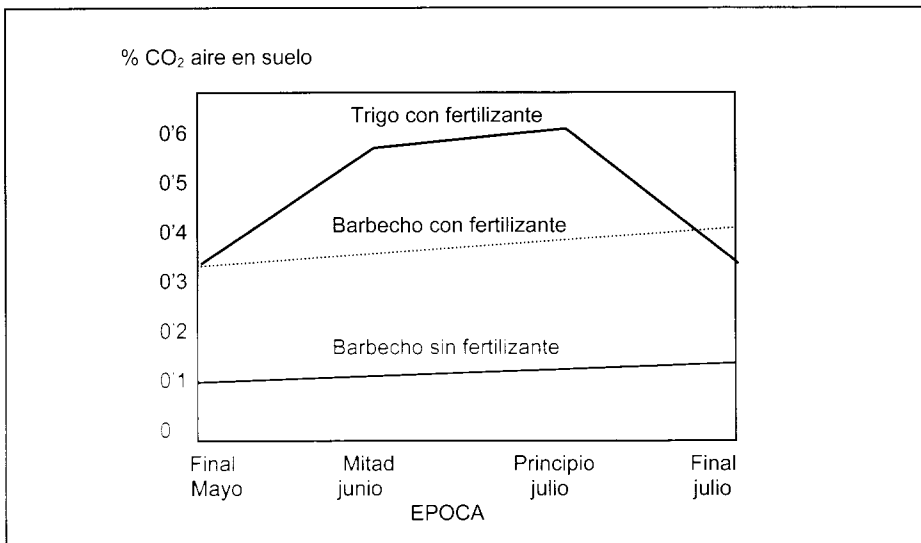


Figura 5.6.- Porcentaje de CO_2 en la atmósfera de un mismo tipo de suelo en distintas condiciones de cultivo de trigo (E.J. Rusell y E.W. Russell, 1964).

5.8. MECANISMOS DE RENOVACION DE LA ATMOSFERA DEL SUELO.

Sin considerar situaciones extremas, la mayoría de los suelos contienen una atmósfera cuya composición es bastante parecida a la de la atmósfera terrestre. Este hecho permite deducir que existen diversos mecanismos por los que el suelo puede evitar un almacenamiento del dióxido

de carbono, producido en las numerosas reacciones biológicas que en él se realicen, y un empobrecimiento en oxígeno por el consumo continuo de los organismos vivientes.

Se aceptan en este sentido diversos mecanismos por medio de los cuales la atmósfera del suelo se regenera. Unos pueden considerarse provocados por factores externos: cambios de temperatura, cambios de humedad, acción del viento o variaciones de presión. Y otro, en realidad el más importante e íntimamente relacionado con la naturaleza del gas: la difusión.

Cambios de temperatura. La oscilación diurna de la temperatura afecta al suelo, y esto provoca una dilatación o contracción del aire. El aire más caliente, y por tanto el más ligero, tiende a ascender y a ser reemplazado por el de menor temperatura. Este efecto será mayor cuando en las capas inferiores esté el aire más caliente, que es lo que sucede en el enfriamiento vespertino. Cuando el aire superior es el que se calienta, que es lo que ocurre por la mañana, el efecto queda más disminuido.

Cambios de humedad. Ya se ha indicado que el aumento de humedad disminuye el volumen de aire en el suelo, ya que es desplazado a la superficie. La evaporación actúa también de forma similar, mientras que el drenaje actúa inversamente. Como es lógico, este efecto depende de forma muy importante de las lluvias y riego.

Acción del viento. El viento puede inyectar o succionar aire del suelo. Su actuación depende de la intensidad con que actúa, dirección, ángulo de incidencia y topografía del suelo. Sus efectos son difíciles de valorar, aunque generalmente se consideran pequeños.

Cambios de presión. Las variaciones de presión comprimen o expanden al aire del suelo, y ello provoca su desplazamiento. En este caso, la textura del suelo influye notablemente. Los suelos arenosos permiten más fácilmente estos cambios, mientras que los arcillosos ofrecen una mayor resistencia al no existir una fácil comunicación.

Difusión. El mecanismo de difusión está basado en la ley de Dalton: "La presión parcial de un gas en una mezcla gaseosa en una dirección determinada es la presión que este gas ejercería solo, estando presente en el volumen ocupado por la mezcla".

A través de este proceso, cada gas tiende a moverse en una dirección concreta por su propia presión parcial, desde zonas de alta concentración a

otras de concentración más baja, hasta que en ambas sea uniforme. De este forma, una concentración más alta de oxígeno en la atmósfera terrestre producirá un movimiento de este gas en el suelo; y un movimiento contrario se producirá simultáneamente para el dióxido de carbono, si la presión parcial de este gas es más alta en el aire del suelo que en la atmósfera libre.

Estos movimientos por difusión están, como es lógico, muy directamente relacionados con la textura del suelo, de forma parecida a como ya se ha indicado anteriormente con los cambios de presión.

6

ADSORCION E INTERCAMBIO IONICO EN SUELOS.

La capacidad de los suelos de adsorber determinadas sustancias es un hecho que se conoce desde hace mucho tiempo. Ya a principio del siglo pasado se había comprobado que cuando el *purín* (orina de ganado) se hacía pasar a través de una capa o columna de suelo, el líquido percolado obtenido aparecía incoloro y exento de amoniaco.

Los primeros estudios serios sobre este tema se iniciaron en 1845 por H.S. Thompson y J. Spence. Estos investigadores descubrieron que la arcilla tenía la propiedad de adsorber amonio cuando hacían pasar agua a través de una columna de suelo mezclado con sulfato amónico, y que el líquido efluente contenía notables cantidades de sulfato cálcico. La mayor parte del sulfato amónico que se había mezclado con el suelo se había convertido, aparentemente, en la correspondiente sal cálcica.

En 1848, Thompson comunicó a otro investigador, J.T. Way, su descubrimiento, y éste inició un estudio detallado del proceso. En 1852, expuso a la Real Sociedad de Agricultura de Londres los resultados de su investigación.

Confirmó primero las anteriores investigaciones realizadas por Thompson, y posteriormente abordó muchos aspectos relacionados con la dinámica del proceso, al que denominó "cambio de bases".

Demostró que las sales de potasio, sodio, calcio y magnesio se comportaban del mismo modo que las de amonio, aunque algunos iones se reemplazaban más rápidamente que otros. Puso de manifiesto la rapidez de intercambio, relacionó su intensidad y limitación para cada suelo con su textura, y valoró la influencia que la temperatura tenía en su desarrollo.

Way demostró también que el intercambio de iones era de naturaleza química y se verificaba en cantidades equivalentes, siendo los aluminosilicatos presentes en el suelo los responsables del intercambio. Preparó en el laboratorio, a partir de disoluciones de alumbre y silicato potásico, aluminosilicatos sintéticos, y observó que presentaban propiedades intercambiadoras análogas a las naturales.

El trabajo de Way puede decirse que fue el primer estudio sistemático de intercambio iónico, y varias de sus conclusiones siguen siendo válidas en el momento actual. Sin embargo, no llegó a establecer el verdadero mecanismo del proceso, ya que lo atribuyó a una reacción química por doble descomposición.

6.1. LAS FRACCIONES COLOIDALES DEL SUELO Y TIPOS DE CARGAS QUE CONDICIONAN EL INTERCAMBIO DE IONES.

La versión actual del proceso de intercambio iónico exige, para su mejor comprensión, el considerar previamente determinados aspectos de las fracciones coloidales del suelo realmente responsables del mismo. Estas fracciones son, fundamentalmente, las arcillas y el humus, y en menor proporción los óxidos hidratados de hierro, aluminio y manganeso.

Al describir las características generales de las arcillas, ya se indicó que estas partículas coloidales llevan ordinariamente una carga negativa, y cuál era su origen. Debido a ello, la partícula coloidal actúa como un enorme anión y miles de iones cargados positivamente, o cationes, son atraídos a la superficie del cristal. La micela, o núcleo, queda por consiguiente rodeada de un conjunto de cationes que, en algunos casos, incluso pueden penetrar en su interior.

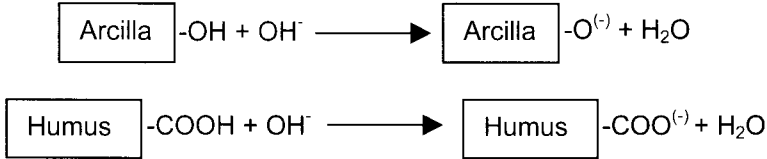
Los otros coloides del suelo, fundamentalmente responsables del intercambio iónico, son los incluidos en la denominación de humus. Las cargas eléctricas de las macromoléculas del humus son de naturaleza análoga a las citadas como variables en las arcillas silíceas, y proceden de la ionización de los grupos -COOH y -OH fenólicos y enólicos, y también de otros con carácter ácido.

La naturaleza variable de las cargas negativas de las arcillas y del humus se fundamenta en que la ionización de los grupos -OH está condicionada por el pH del medio en que se encuentran, ya que al aumentar el pH se incrementa el número de cargas, de acuerdo con una curva de ionización análoga a la de cualquier ácido débil.

Hay que hacer constar, sin embargo, que el intercambio iónico no está exclusivamente basado en la aparición de las cargas negativas anteriormente citadas y consiguiente neutralización de las mismas por cationes. Hoy se sabe que los suelos tienen igualmente posibilidades de adsorción de aniones, debido a la presencia de cargas positivas en otros o en los mismos coloides que antes se han citado, en unas condiciones determinadas de pH. Los

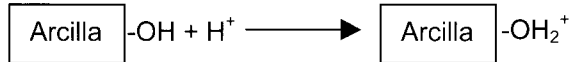
coloides cuya carga eléctrica es función de una ionización tienen un punto isoelectrico, o valor de pH, a partir del cual varía la naturaleza de la ionización, según que la variación del pH sea en sentido creciente o decreciente.

De las cargas anteriormente expuestas, las variables de las arcillas y las del humus obedecen a esta explicación. La ionización por encima del punto isoelectrico sería:

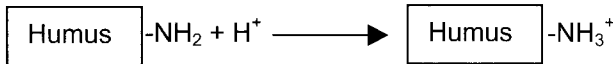


dando lugar a las cargas negativas ya consideradas.

Por debajo del punto isoelectrico, los H^+ son los responsables de la ionización. Para las arcillas:

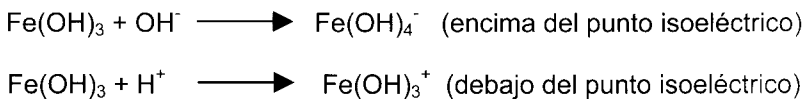


Para el humus, considerando que tiene grupos funcionales capaces de esta ionización, como son los -NH_2 y otros grupos nitrogenados, también ocurriría:



Estas ionizaciones dotan a las partículas coloidales de cargas positivas y, por tanto, les proporciona la posibilidad de adsorber aniones. No obstante, hay que tener en cuenta que el punto isoelectrico de estos coloides es muy bajo (pH=3-4 para el humus, y menor de 3 para las arcillas), y en consecuencia esta ionización difícilmente se da en suelos para estos coloides.

Pero existen en el suelo otras fracciones coloidales capaces de crear cargas positivas y de adsorber aniones en las condiciones de pH que habitualmente se dan en el suelo. Son los óxidos hidratados de Fe, Al y Mn, y otros en mucha menor proporción. En estos casos la ionización sería:



Naturalmente, el rango de pH en el que existe esta última forma está limitado por la solubilización del hidróxido cuando la concentración de H^+ es excesivamente alta. Sin embargo, el punto isoeléctrico de estos coloides corresponde a un pH inferior a 7; en consecuencia, se comportan como coloides electropositivos en las condiciones naturales del suelo, y son los responsables principales del intercambio aniónico.

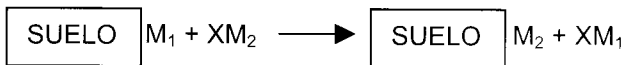
Todo lo expuesto anteriormente pone claramente de manifiesto la existencia en el suelo de partículas con carga eléctrica superficial, las cuales tienden a ser neutralizadas por cationes o aniones que quedan atraídos o fijados en la superficie. Pero evidentemente, en los suelos bajo condiciones naturales, existe una mayor adsorción catiónica que aniónica, ya que las cargas negativas son mucho más abundantes que las positivas. Esto tiene gran importancia agronómica, puesto que el complejo adsorbente permite dejar en reserva los cationes esenciales para la nutrición vegetal: K^+ , NH_4^+ , Mg^{+2} , Ca^{+2} y diversos oligoelementos. Si esto no ocurriese así, es decir, si este almacenamiento no tuviera lugar, las lluvias de invierno podrían originar suelos estériles.

Por otra parte, ello también, justifica por qué en los suelos existe un intercambio catiónico pronunciado y un intercambio aniónico débil.

En cuanto a la capacidad de adsorción de iones de otras fracciones del suelo no coloidales (limo y arena), los datos existentes son pocos y bastante confusos. Al ser materiales de mayor tamaño, su superficie específica es mucho menor, y tampoco existen sustituciones isomórficas creadoras de cargas eléctricas permanentes. Esto hace pensar que sólo los grupos $-OH$ de vértices y aristas pueden originar una pequeña carga. Con este criterio, se acepta generalmente que la capacidad de intercambio iónico de estas fracciones es despreciable.

6.2. MECANISMO GENERAL DEL INTERCAMBIO IONICO. IMPORTANCIA.

En forma condensada y general, el proceso de intercambio iónico en suelos, refiriéndonos concretamente al intercambio de cationes, puede representarse por la reacción:



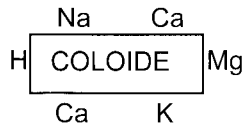
forma general de una ecuación química de intercambio, en la que como en todas su equilibrio estará regido por la ley de acción de masas, pudiéndose

desplazar en uno u otro sentido cuando se varían las condiciones de la reacción (por ejemplo, las concentraciones de uno u otro miembro).

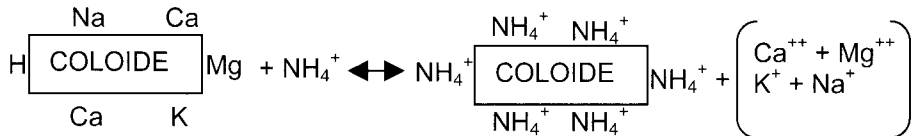
Si en la reacción planteada se elimina por filtración la sal soluble M_1X , y nuevamente se trata el suelo, ya parcialmente saturado de M_2 , por una nueva porción de disolución M_2X , se proseguirá el proceso de sustitución hasta hacerse completo cuando todos los lugares capaces de ser sustituidos en la partícula acidoide coloidal estén saturados con el nuevo catión.

Se comprende fácilmente que en un suelo no ha de existir únicamente el catión designado por M_1 , sino que hay otros, principalmente H^+ , Na^+ , Mg^{++} , K^+ , Ca^{++} , y también muy pequeñas cantidades de oligoelementos. Aplicando a cada uno de estos cationes el mismo razonamiento anterior, se puede considerar que en cada uno de ellos se repetirá la ecuación de sustitución anteriormente indicada, en tanto las interacciones entre unos y otros lo permitan. Cuando se consiga el equilibrio de saturación para cada uno de ellos, se tendrán todos y cada uno de los cationes de la micela coloidal reemplazados por el catión M_2 ; y al conjunto total de todos los miliequivalentes de M_2 necesarios para reemplazar los diversos cationes de 100 g de suelo es lo que se conoce como "capacidad total de cambio de cationes".

Una vez expuesto el aspecto básico del proceso, consideremos un ejemplo sencillo. Supongamos un suelo conteniendo diferentes iones adsorbidos en varios grados de intensidad, según sus cargas y su capacidad de hidratación, a la fracción coloidal:

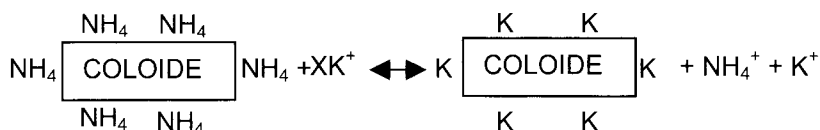


Al tratarlo con una disolución acuosa concentrada de acetato amónico 1N, todos los cationes adsorbidos son reemplazados por ión amonio:



y la fracción coloidal queda saturada de NH_4^+ .

Si este suelo es a continuación tratado (una vez separados los cationes por filtración y lavado con alcohol) con una disolución concentrada de otra sal, por ejemplo ClK 1N, los K^+ reemplazarán ahora a los NH_4^+ :



Al filtrar, el líquido obtenido contendrá la totalidad de NH_4^+ que estaba adsorbido al coloide del suelo. La cantidad de ión amonio en la disolución obtenida, expresada en me/100 g de suelo representa la capacidad de cambio de cationes (CCC) del mismo.

Admitamos que se han tratado 20 g de suelo con 100 ml de acetato amónico 1N; y que el suelo, una vez saturado de NH_4^+ , se trata con 100 ml de ClK 1N. Supongamos que la cantidad de NH_4^+ determinada en la disolución final obtenida es 0'72 g. Estos gramos equivalen a $0'072/0'018 = 4$ me, por ser 0'018 el peso de un miliequivalente de NH_4^+ . Y como 4 me están contenidos en 20 g de suelo, la capacidad de cambio será: $(100 \times 4)/20$ me/100 g de suelo.

Indudablemente que si lo que se ha indicado, concretándolo a los cationes, se aplica también a los aniones, se tendrá también una capacidad de cambio de aniones, y al conjunto de estos procesos se designa con el nombre de intercambio iónico del suelo.

El proceso de cambio catiónico permite, por tanto, poner a disposición de la planta los elementos nutrientes mediante su paso a la disolución del suelo, actuando como un verdadero regulador.

Los procesos de intercambio iónico son reversibles e ilimitados. Por ello, son de importancia trascendental por su decisiva influencia sobre las propiedades físico-químicas de los suelos, en la alimentación de las plantas que crecen en él, en las enmiendas por acidez u otros defectos que los suelos puedan presentar para un determinado cultivo, y en el modo de obrar y de ser retenidos los fertilizantes que se agreguen. De estas reacciones de intercambio iónico, las que se refieren concretamente al intercambio de cationes son de una importancia tan grande que de ellas se ha llegado a decir: "La reacción de cambio de cationes es la segunda por su importancia en la Naturaleza, y solamente es superada por el proceso de la fotosíntesis realizado por las plantas verdes".

6.3. INTERCAMBIO CATIONICO: FACTORES INFLUYENTES.

Diversos factores influyen notablemente en la dinámica de cambio de cationes del suelo. Entre ellos, merecen citarse:

- 1.- Poder de fijación de los cationes de cambio.
- 2.- Capacidad de saturación del suelo y naturaleza de los cationes fijados.
- 3.- Temperatura.
- 4.- Constituyentes coloidales del suelo.

Poder de fijación de los cationes de cambio.

Los cationes que pueden ser retenidos por los coloides electronegativos del suelo, arcillas y compuestos húmicos, son Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^{+} y Na^{+} . También, pero en mucha menor proporción, pueden estar NH_4^{+} , Mn^{+2} , Cu^{+2} , Zn^{+2} y Al^{+3} , éste último principalmente en suelos ácidos. Todos estos cationes, llamados "de cambio" (más o menos hidratados), junto con la capa de agua formada alrededor de las moléculas adsorbentes, permanecen ligados a la molécula coloidal y constituyen una disolución que suele denominarse "interna", en oposición a la "externa" del suelo, que permanece libre (Figura 6.1.).

Para cada catión, las concentraciones en las disoluciones son diferentes, pero existe un equilibrio entre ellas. Toda modificación de la concentración relativa de un catión, interno o externo, lleva consigo una reacción de cambio, debido a la modificación del equilibrio.

Mientras que los movimientos de los cationes en la disolución externa son libres, los de la interna están limitados por los cationes cercanos.

Por esta circunstancia, esta disolución interna suele designarse corrientemente "zona de oscilación catiónica", y está constituida por dos capas: una interior en contacto con las cargas negativas del coloide que es retenida de manera más intensa, y otra exterior que, por el contrario, es más fácil de cambiar.

La disolución externa o disolución del suelo contiene cationes disueltos, pero generalmente en mucha menor proporción que la de los cationes fijados al coloide. El equilibrio que se establece entre la disolución externa e interna puede desplazarse en uno u otro sentido por diversos motivos:

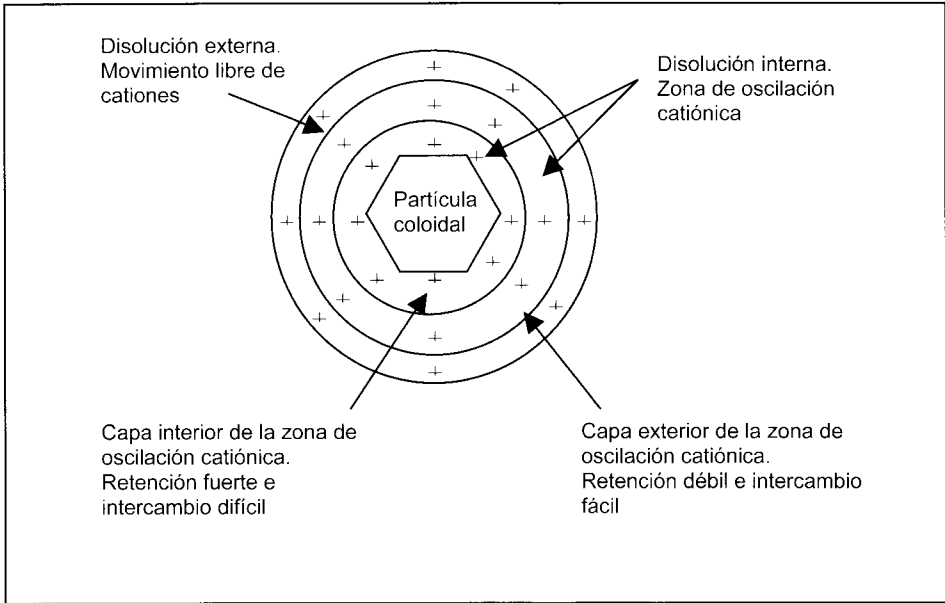


Figura 6.1.- Fijación de los cationes: Disoluciones y equilibrio de cambio.

1º) Por efecto de lluvias o riegos, que provocan la dilución de la disolución del suelo y aportan H^+ por disociación del ácido carbónico formado al disolverse el dióxido de carbono atmosférico en el agua.

2º) Por la absorción de cationes por el sistema radicular de la planta.

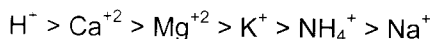
3º) Por la transformación bioquímica de los compuestos amónicos en nitritos y nitratos.

4º) Por la respiración de las raíces del vegetal y microorganismos del suelo que, produciendo dióxido de carbono, provocan la aparición de H^+ .

5º) Por la actividad de los microorganismos del suelo que, al descomponer la materia orgánica, originan notables cantidades de dióxido de carbono y en consecuencia de H^+ .

6º) Por aportación de fertilizantes solubles.

No todos los cationes son adsorbidos con la misma intensidad por el coloide. Se puede establecer una energía de fijación decreciente, según el orden siguiente:



Esta ordenación está establecida teniendo en cuenta la valencia y su estado de hidratación, y basada en datos experimentales.

Cuanto mayor sea el número de cargas que tenga el catión, mayor será su poder de fijación, considerando que otros factores influyentes son los mismos; por ello, los cationes divalentes son más fuertemente adsorbidos que los monovalentes: Ca^{+2} y Mg^{+2} más que K^+ y Na^+ .

Cuando existe una valencia similar, hay que considerar el grado de hidratación, ya que los más intensamente fijados son los menos hidratados. Esto se pone de manifiesto al contemplar las características de los iones Li^+ , Na^+ , K^+ y Rb^+ , expuestas en la tabla 6.1.

Tabla 6.1. Radios iónicos de los elementos alcalinos.

ION ADSORBIDO	Radio en Å (10^{-8} cm)	
	Deshidratado	Hidratado
Li^+	0'78	10'03
Na^+	0'98	7'90
K^+	1'33	5'32
Rb^+	1'49	5'09

El tamaño de estos iones va incrementándose al pasar del Li^+ al Rb^+ ; por tanto, cabría esperar que la posibilidad de su reemplazamiento fuera $Rb^+ > K^+ > Na^+ > Li^+$. Cuando están hidratados, sus correspondientes radios disminuyen y, debido a ello, el Li^+ no puede llegar tan cerca a la superficie de la micela como los restantes iones. El mismo razonamiento se puede hacer entre Na^+ , K^+ y Rb^+ . Gráficamente, la situación se representa en la figura 6.2.

El resultado es que la facilidad de reemplazamiento se invierte, siendo $Li^+ > Na^+ > K^+ > Rb^+$.

Mediante un razonamiento similar, el Ca^{+2} , menos hidratado que el Mg^{+2} , estará más fuertemente adsorbido. Este último, por tanto, será más fácilmente intercambiable.

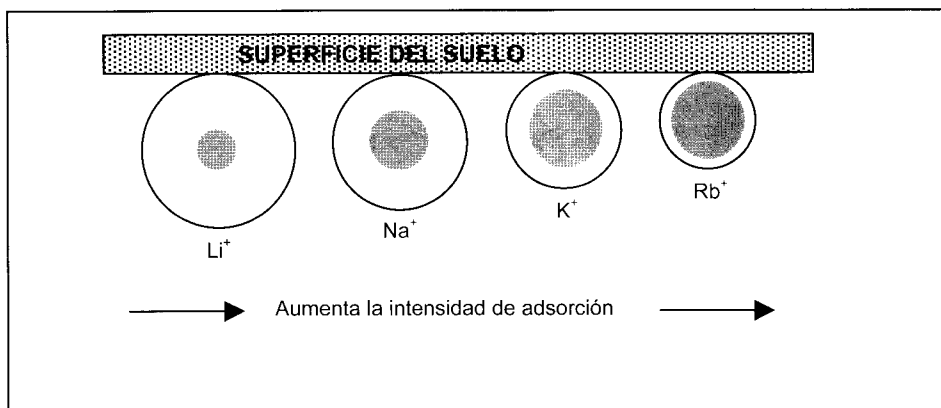


Figura 6.2.- Tamaños relativos de los cationes alcalinos Li⁺, Na⁺, K⁺ y Rb⁺ hidratados.

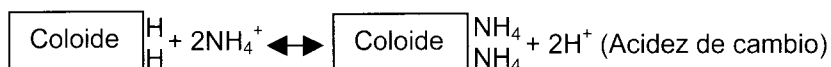
Lo expuesto anteriormente explica los siguientes hechos:

1º) Cuando un suelo se trata con una disolución conteniendo una cantidad equivalente de Ca⁺² y Mg⁺², el suelo fija más Ca⁺² que Mg⁺².

2º) Cuando se pone en contacto un suelo con una disolución que contenga proporciones equivalentes de los tres cloruros: CINH₄, ClK y ClNa, el Na⁺ es el catión que se fija más lentamente, en proporción menor y, además, es posteriormente desplazable con más rapidez.

3º) Cuando se desea que un suelo fije igual cantidad de Ca⁺² que de Na⁺, es preciso que la disolución utilizada contenga quince veces más de Na⁺ que de Ca⁺².

El H⁺ es el más difícil de desplazar, ya que origina después de su liberación una acidez que tiende a limitar el sentido de la reacción.



Los cationes Mn⁺², Cu⁺² y Zn⁺² son adsorbidos muy enérgicamente, y no son desplazados por los otros iones, quedando protegidos contra las pérdidas por lavado; aunque en medio muy ácido, al aumentar el Al⁺³ soluble, éste puede desplazarlos y facilitar su lixiviación.

Capacidad de saturación del suelo y naturaleza de los cationes fijados.

Cuando el complejo coloidal está altamente saturado por un determinado catión y muy poco por otros cationes, éstos son más difícilmente intercambiables.

Así, en aquellos suelos donde generalmente la proporción de Ca^{+2} fijado supera la de otros cationes: Mg^{+2} , K^+ , NH_4^+ , etc (por ejemplo: 80-90% de Ca^{+2} frente al 10-20% de los otros), se observa que estos últimos están fijados con preferencia al Ca^{+2} . El Na^+ constituye una excepción, ya que siempre se fija con dificultad aunque no se encuentre adsorbido.

Por otra parte, también se sabe que si se desea desplazar el Ca^{+2} o el K^+ fijados, ello resulta más difícil cuando la proporción de estos cationes que quedan en el coloide sea pequeña. En cambio, para el caso del Na^+ es al contrario; cuando está fijado es más difícilmente intercambiado cuando se encuentra en gran proporción. El Mg^{+2} presenta un comportamiento intermedio entre el Na^+ , Ca^{+2} y K^+ .

Temperatura.

Está suficientemente comprobado que cuando un suelo se trata con una disolución diluida y se deja hasta que se alcance el equilibrio: Complejo \rightleftharpoons Disolución, al aumentar la temperatura el equilibrio se desplaza y el complejo cede cationes a la disolución. Este hecho pone de manifiesto que el poder adsorbente del suelo disminuye de intensidad al aumentar la temperatura, y tiene una gran importancia agronómica, puesto que contribuye a incrementar la concentración de la disolución del suelo durante la estación cálida, que corresponde al periodo de máxima actividad de la planta.

Componentes coloidales del suelo.

Teniendo en cuenta la distinta capacidad de adsorción de las arcillas silíceas, del humus y de los óxidos de Fe, Mn y Al, que pueden entrar en la composición del suelo, resulta fácil deducir que el mecanismo de cambio catiónico vendrá altamente influenciado según las proporciones de los mismos.

La capacidad de cambio de cationes varía desde menos de 5 me/100 g para suelos que contienen muy poca arcilla o materia orgánica, hasta cerca de unos 200 me/100 g para suelos orgánicos.

6.4. CONSTANTES CARACTERISTICAS DEL COMPLEJO ADSORBENTE.

Las constantes que permiten caracterizar el estado del complejo adsorbente en los suelos son:

- a) Capacidad total de cambio de cationes.
- b) Suma de cationes metálicos de cambio.
- c) Insaturación.
- d) Porcentaje o grado de saturación en cationes metálicos o de bases.

La capacidad total de cambio de cationes corresponde a la cantidad máxima de cationes que el suelo puede fijar. Se expresa en miliequivalentes por 100 g de suelo seco y se expresa por T.

La suma de los cationes metálicos de cambio, designada por S, significa la cantidad total de cationes alcalinos o alcalino-térreos retenidos sobre el complejo adsorbente, cuando se procede a su análisis. Se expresa igualmente en me/100 g de suelo seco.

La insaturación corresponde a la diferencia T-S, y representa la cantidad de H⁺ fijados sobre el complejo. El valor se da también en me/100 g de suelo seco.

Por último, el porcentaje de saturación de bases, o grado de saturación en cationes metálicos, que se designa por V, es el valor obtenido de la relación:

$$V = \frac{S \times 100}{T}$$

El establecimiento de estas constantes es de gran interés en el estudio del suelo, ya que a partir de ellas se pueden deducir muchas de sus características. Puede decirse que los principales tipos de suelos y sus propiedades agrícolas están íntimamente relacionadas con el estado del complejo adsorbente.

Aspectos importantes que en este sentido pueden, entre otros, señalarse son:

1º) Suelos con grandes cantidades de arcilla y materia orgánica tendrán un valor T muy superior al correspondiente a suelos arenosos con bajo contenido en materia orgánica.

2º) Los suelos con predominio de arcillas tipo 2x1 presentan un valor de T superior a aquellos otros en los que predomina el tipo 1x1. Generalmente, estos últimos presentan valores comprendidos entre 10 y 20 me/100 g, los del tipo 2x1 de 40 a 80 me/100 g, y los coloides orgánicos de 300 a 400 me/100 g.

3º) El valor de V de los suelos corrientes, no cultivados, es más alto en las regiones áridas que en las húmedas.

4º) Conociendo los valores de T y S se puede tener una primera aproximación del tipo de suelo. Cuando el complejo adsorbente está casi saturado ($S = T$): a) si lo está por Ca^{+2} o por Mg^{+2} , tendremos Rendzinas o Chernozems; b) si lo está por Na^{+} , se trata de Solonetz. Cuando el complejo presenta una gran insaturación ($T > S$): a) se trata de Podzoles cuando hay una destrucción parcial del complejo; b) son suelos lateríticos si la destrucción del complejo es casi total.

5º) Para suelos con una composición orgánica y mineral determinados, el pH y el nivel de fertilidad se incrementan con un aumento de V.

6º) La facilidad con que los cationes son absorbidos por las plantas está íntimamente relacionada con el valor de V. Así, un suelo con $V=80\%$ proveerá de cationes a la planta mucho más fácilmente que el mismo suelo con un valor de $V=40\%$.

7º) La relación entre V y la asimilación de cationes se modifica con la naturaleza del coloide del suelo. Como regla general, suelos con grandes cantidades de arcillas 1x1 pueden suministrar cationes a las plantas a un valor de V más bajo que los suelos con altos porcentajes de coloides 2x1.

Señalaremos, finalmente, que para muchos suelos minerales medios, de regiones húmedas o de regiones semiáridas, pueden ser representativos los datos que se exponen en la tabla 6.2.

Como puede observarse, existen notables diferencias. Los suelos de regiones áridas están prácticamente saturados de bases, mientras los de regiones húmedas aparecen, comparativamente pobres en cationes metálicos y más ricos en hidrógenos adsorbidos.

Tabla 6.2. Valores aproximados de T, S, T-S y V, en suelos minerales de regiones áridas y húmedas.

CONSTANTES	REGIONES ARIDAS	REGIONES HUMEDAS
T	20-60 me/100 g	12-18 me/100 g
S	19-24 me/100 g	8-12 me/100g
T-S	1-2 me/100 g	4-6 me/100 g
V	92-95%	66-67%
pH (aprox.)	7	5'5-6'0

6.5. DETERMINACION DE LA CAPACIDAD DE CAMBIO DE CATIONES Y DE LOS CATIONES DE CAMBIO.

Se han propuesto numerosos métodos para la determinación de la capacidad de cambio según distintas técnicas y condiciones. En general, y bajo un punto de vista cuantitativo, ninguno de ellos permite obtener resultados totalmente exactos, posiblemente como consecuencia de la existencia de numerosos factores influyentes: composición del suelo, pH, naturaleza de los cationes fijados, etc. Sin embargo, para los fines prácticos, los resultados obtenidos en muchos casos son más que suficientes, y por ello lo que se busca preferentemente es la simplificación y rapidez del método analítico, más que su exactitud total.

En general, todos los métodos clásicos de determinación de T incluyen tres pasos:

1º) Reemplazamiento completo de los cationes de cambio existentes en el suelo.

2º) Eliminación del exceso de disolución saturante mediante lavado.

3º) Desplazamiento del catión adsorbido y su determinación cuantitativa.

Posiblemente, el método más simple es el que utiliza acetato amónico 1N, ya que esta disolución está suficientemente tamponada para que el cambio se haga en condiciones estables de pH=7. Para su realización se utilizan 10 g de suelo de humedad conocida, los cuales se someten a una maceración con 50 ml de una disolución neutra de acetato amónico 1N durante 12 horas. A continuación se coloca la suspensión en un tubo de percolación y se lava con un volumen apropiado de la misma disolución (20 ml). De esta

forma, el acetato amónico satura el suelo con NH_4^+ y se desplazan los cationes adsorbidos, incluso el H^+ . El líquido eluido se completa a un volumen definido, y de él se toman partes alícuotas para determinar Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^+ y Na^+ , admitiéndose que la cantidad de NH_4^+ generalmente fijado sobre el complejo adsorbente es despreciable.

El suelo, que contiene los NH_4^+ adsorbidos, es tratado seguidamente con 200 ml de disolución de ClK 1N. La disolución de cloruro potásico y suelo es filtrada y se determina el NH_4^+ en el filtrado. Los miliequivalentes de NH_4^+ presentes, referidos a 100 g de suelo representan la medida de T.

Si se desea determinar el NH_4^+ intercambiable, éste se extrae del suelo en muestra aparte con disolución de ClK 2N, se alcaliniza el extracto y se destila el NH_3 , recogiénolo sobre un volumen conocido de una disolución de ClH 0'1N. Finalmente, se valora el exceso de éste ácido con disolución de NaOH 0'1N. También se puede recoger el NH_3 en una disolución de ácido bórico.

Generalmente se recomienda que no se utilice la disolución de acetato amónico para el desplazamiento de los cationes de cambio en suelos calizos, debido a que esta disolución disuelve el carbonato cálcico y magnésico en cantidades importantes, y la gran proporción de calcio que pasa a la disolución impide la saturación con NH_4^+ de una porción apreciable de posiciones de intercambio. Por ello, se pueden obtener valores altos para el contenido en Ca^{+2} y Mg^{+2} intercambiables, y valores anormalmente bajos para la capacidad de cambio de cationes.

Para un gran número de suelos españoles se recomienda por ello el empleo de disoluciones de cloruro bórico y trietanolamina o acetato bórico. La utilidad de estas sales se debe a que los gránulos de carbonato cálcico y carbonato magnésico se recubren con carbonato bórico, evitándose una excesiva solubilización de los mismos.

El fundamento de este último método, por tanto, es:

1º) Extracción de los cationes de cambio con una disolución de cloruro bórico y trietanolamina.

2º) Reemplazamiento del Ba^{+2} fijado por Mg^{+2} , mediante una disolución apropiada de sulfato magnésico.

3º) Determinación del Mg^{+2} invertido en reemplazar el Ba^{+2} por valoración del Mg^{+2} presente en una parte alícuota del extracto obtenido con la

disolución de sulfato magnésico, y cálculo de la diferencia con el contenido original de dicha disolución.

También puede evitarse la solubilización de los carbonatos destruyendo estas sales mediante tratamientos sucesivos del suelo con ácido acético 0'5N, saturación con acetato bórico 1N a pH=7, extracción con cloruro amónico y determinación del bario extraído en forma de sulfato.

6.6. INTERCAMBIO ANIONICO: ASPECTOS GENERALES.

Las fijaciones y cambio de aniones se verifican de modo análogo al del cambio de cationes, pero depende fundamentalmente, como ya se expresó en su momento, de la composición y pH del suelo.

El proceso de cambio aniónico, muy débil en la mayor parte de los suelos, presenta en la práctica una gran dificultad de estudio. Muchas de las afirmaciones que para él se aceptan como válidas se han obtenido a partir de lo establecido para el intercambio catiónico, sin que exista una comprobación experimental suficiente.

No obstante, y bajo un punto de vista muy general, a partir de la experimentación realizada, puede decirse que los principales factores que afectan la adsorción y cambio aniónico son: 1º) Concentración de la disolución de aniones; 2º) pH; 3º) Naturaleza del complejo adsorbente; y 4º) Naturaleza del ión.

Concentración de la disolución de aniones.

La cantidad de aniones adsorbidos por el suelo aumenta con la concentración de aniones de la disolución, si bien no todos los aniones tienen la misma capacidad de fijación. Las cantidades máximas adsorbidas son función, por tanto, del anión utilizado.

pH.

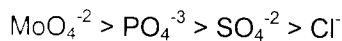
La capacidad de cambio de aniones queda relativamente constante en ciertos límites de pH. Un descenso de éste aumenta la capacidad de adsorción de aniones (pH < 3). Este es el caso general.

Naturaleza del complejo adsorbente.

Los estudios realizados en este sentido en arcillas muestran que cuanto mayor sea su superficie, tanto mayor será su capacidad de cambio aniónico. En cuanto al suelo en su conjunto, esta capacidad está en relación directa con el contenido de arcilla y óxidos de hierro, aluminio y manganeso. Cuanta mayor cantidad exista de estos últimos en el suelo, mayor capacidad de cambio aniónico.

Naturaleza del ion.

Los aniones Cl^- , NO_3^- , SO_4^{-2} y $\text{CH}_3\text{-COO}^-$ son muy poco fijados y, entre ellos, el sulfato lo es más fácilmente. El fosfato comporta la propiedad de fijarse al complejo adsorbente con otros aniones y en el orden siguiente:



La capacidad de cambio aniónico en suelos normales es generalmente baja, sólo unas décimas de miliequivalente por 100 g de suelo. Únicamente en suelos con altos porcentajes de óxidos de hierro pueden presentarse valores de varios miliequivalentes.

6.7. ISOTERMAS DE ADSORCIÓN. FORMULACIONES EMPIRICAS.

Las isotermas de adsorción son una de las técnicas experimentales utilizadas para evaluar los requerimientos de nutrientes de un suelo.

Para su obtención, el procedimiento más usual consiste en equilibrar submuestras del suelo en condiciones isotermas y a presión constante, con una gama de volúmenes iguales de disoluciones con diferentes concentraciones de la sustancia de interés a adsorber, y determinar la cantidad remanente después de la adsorción.

Durante el equilibrio que normalmente se consigue por agitación continua de los tubos en los que se verifica el ensayo, debe evitarse el fraccionamiento físico de las partículas integrantes del suelo. Para ello es recomendable una agitación muy suave, sobre todo cuando los tiempos de equilibrio son largos.

El tiempo requerido para alcanzar el equilibrio debe determinarse previamente. Cuando se trata de intercambiar un catión simple es rápido, ya que son suficientes sólo unos minutos; en otros casos requiere más tiempo.

La representación gráfica de la cantidad adsorbida por el suelo en relación con la concentración de la disolución en equilibrio se denomina isoterma de adsorción. El elemento adsorbido representa lo que puede servir potencialmente para reabastecer la disolución del suelo como consecuencia de la desorción; y la concentración en la disolución en equilibrio expresa la cantidad de elemento directamente asimilable por la planta.

Las isotermas de adsorción presentan siempre una parte de pendiente fuerte frente a concentraciones de disolución bajas, la cual se hace menos abrupta a medida que la concentración aumenta. Curvas de este tipo se obtienen mediante ecuaciones que han sido propuestas para concretar esta relación. Las ecuaciones de Lagmuir y de Freundlich, y en menor grado la de Temkin, son generalmente las más utilizadas.

La ecuación de Lagmuir es corrientemente la más usada. Está basada en criterios físico-químicos, admitiendo que la energía de adsorción es constante e independiente de la cobertura superficial, y que sus constantes tienen un significado físico cuantitativo. Expresa la cantidad adsorbida X a una concentración C_e , como:

$$X = \frac{bX_m C_e}{1 + bC_e}$$

en donde:

X = Cantidad de soluto adsorbido por la matriz.

X_m = Cantidad máxima de soluto que puede ser adsorbido.

b = Constante relacionada con la energía de adsorción, la cual es equivalente a la constante de equilibrio de la reacción de adsorción.

C_e = Cantidad de soluto en la disolución.

Una gráfica lineal se obtiene representando C_e/X en función de C_e :

$$C_e/X = 1/bX_m + C_e/X_m$$

La ecuación de Lagmuir, en su forma simple también ha sido utilizada en suelos o sus fracciones con modificaciones, cuando se considera que existe más de una superficie discreta. Para dos tipos de superficies con diferentes afinidades y capacidades máximas de adsorción, la ecuación puede ser usada de la siguiente forma:

$$X = (X_{m1}b_1C_e)/(1+b_1C_e) + (X_{m2}b_2C_e)/(1+b_2C_e)$$

en la que los números se refieren a los dos tipos de superficie consideradas.

El modelo de Freundlich viene representado por una ecuación puramente empírica, sin que sus constantes tengan significación física:

$$X = KC_e^n$$

en donde:

X= Cantidad de soluto adsorbido por unidad de masa del adsorbente.

K y n: Constantes variables para los distintos sistemas adsorbentes.

C_e= Concentración de soluto en la disolución.

En este caso, una gráfica lineal se obtiene representando log X en función de log C_e:

$$\log X = \log K + n \log C_e$$

La ecuación de Temkin da una representación lineal para X en función de log C_e:

$$X = \alpha + \beta \log C_e$$

siendo α y β constantes.

En la aplicación de los modelos expuestos hay que tener en cuenta que solo constituyen aproximaciones más o menos correctas del proceso que pretenden representar. Por ello, siempre es necesario ajustar los modelos a los datos experimentales mediante la utilización de algoritmos apropiados y selección de criterios adecuados de ajuste.

7

LA REACCION DEL SUELO.

Entre las principales características de los suelos, su reacción es una de las más importantes, ya que su estudio ha puesto de manifiesto la estrecha relación que la une con la configuración de sus estructuras, la meteorización, humificación, movilidad de nutrientes, intercambio iónico, etc, y, en consecuencia, con las especies vegetales que mejor se desarrollan en cada tipo de suelo.

La reacción del suelo viene expresada por el pH, que corresponde a su fase acuosa o disolución salina. Pero tanto ésta como los coloides ionizables en él presentes, son los que regulan sus distintos valores. En función de ellos son posibles tres condiciones: acidez, neutralidad y alcalinidad.

7.1. ORIGEN Y CAUSAS DE LA REACCION DEL SUELO.

La acidez aparece normalmente en suelos localizados en regiones de alta pluviometría, los cuales están sometidos a un continuo y amplio lavado. Debido a ello, el agua disuelve las bases solubles, que percolan y se pierden por lixiviación en proporciones considerables. Junto a esto hay que añadir las que son desplazadas del complejo adsorbente por el hidrógeno, y también las que son captadas por las plantas. Y aunque parte de dichas bases son restituidas por las que resultan de la edafización de los minerales del suelo y por la adición de fertilizantes químicos, el continuo lavado va provocando la aparición de una acidez que viene incrementada, al mismo tiempo por la segregación de las raíces y por los compuestos ácidos que se originan en la degradación de la materia orgánica por los microorganismos. Las labores, aunque indirectamente, también contribuyen a incrementar la acidez, ya que facilitan la circulación del aire y del agua, e intensifican la acción microbiana.

Todas estas circunstancias dan lugar a que el complejo coloidal del suelo fije gran cantidad de H^+ . Y como este hidrógeno, al producirse su disociación, tiende a estar en equilibrio dinámico con la disolución del suelo, esta se enriquece en H^+ y el pH desciende. La figura 7.1. puede servir para ilustrar este aumento de la acidez en la disolución del suelo.

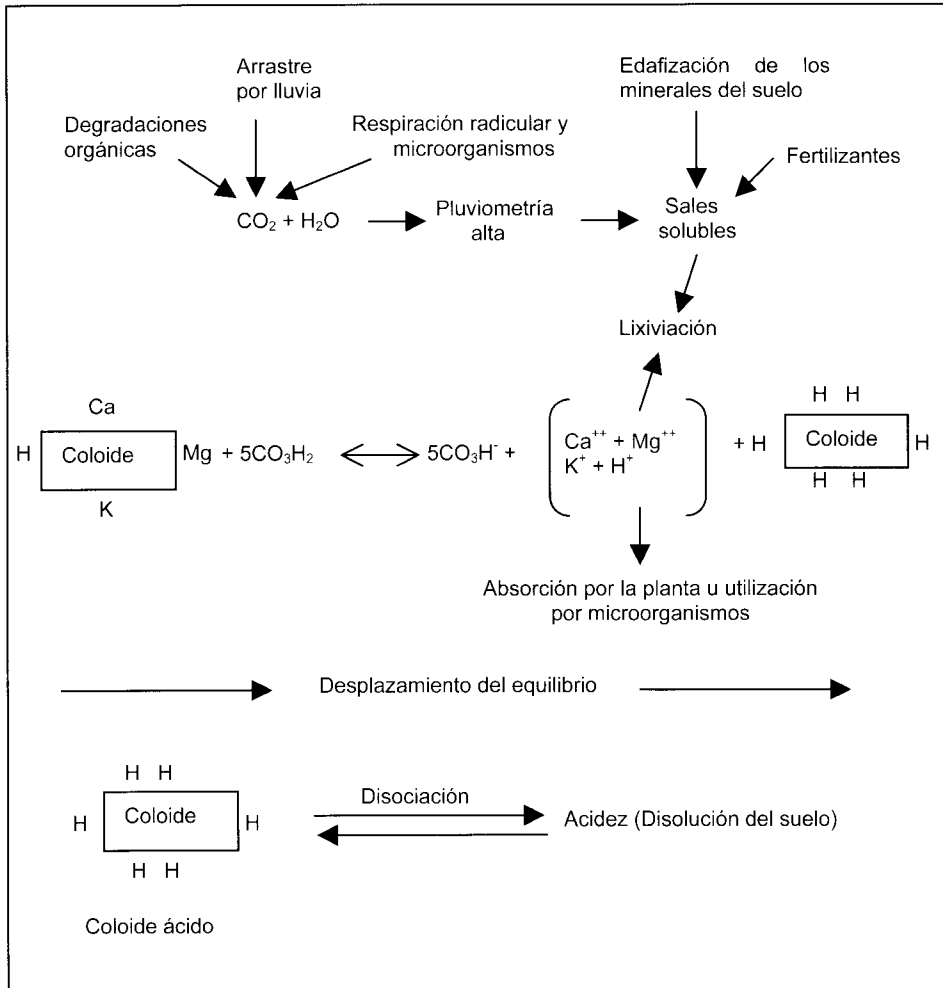
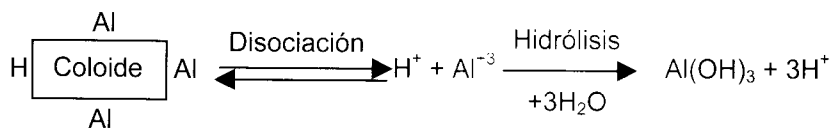


Figura 7.1. Causas que provocan la acidez en suelos con alta pluviometría.

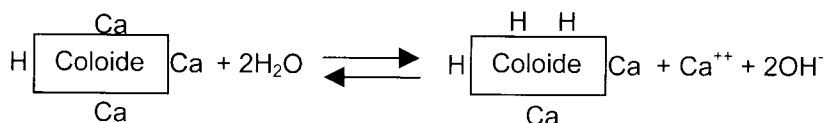
Bajo condiciones muy ácidas, también el aluminio presente en el suelo es una fuente productora de H^+ , ya que gran cantidad del mismo, al estar como Al^{+3} , puede fijarse al coloide por su mayor carga con más firmeza que el H^+ . Los Al^{+3} adsorbidos están en equilibrio con los Al^{+3} de la disolución del suelo, y éstos, a través de su tendencia a la hidrólisis, incorporan H^+ a la disolución. La reacción simplificada puede representarse así:



El efecto de la adsorción, tanto de H^+ como de Al^{+3} , constituye, por tanto, en suelos minerales, la fuente coloidal principal de hidrogeniones a la disolución del suelo. Los Al^{+3} parecen dominar la situación en condiciones muy ácidas ($\text{pH} < 5$), pero a medida que el pH se eleva al nivel normal de los suelos agrícolas, los H^+ adsorbidos se consideran los más importantes en este proceso de acidificación.

En los suelos orgánicos, poco arcillosos, la acidez es debida en gran parte a la disociación de los grupos ionizables del humus.

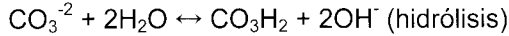
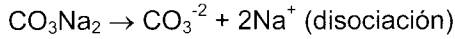
La alcalinidad se produce cuando hay escasez de agua y el complejo coloidal presenta un alto grado de saturación de bases. Por ello, y debido a su carácter básico, puede hidrolizarse dando lugar a un predominio en la disolución del suelo de OH^- sobre los H^+ producidos en la disociación. En un suelo, por ejemplo, saturado de Ca^{+2} , la tendencia a la formación de OH^- es evidente:



Cualquier proceso que pueda favorecer el incremento o el mantenimiento de estos cationes, contribuirá a aumentar la alcalinidad. En este sentido, tienen gran incidencia las aportaciones orgánicas, siempre inferiores a las de los climas húmedos; la disminución de la actividad microbiana por la escasa humedad y aportación vegetal; y los procesos de meteorización de los minerales del suelo, los cuales, en su descomposición, liberan cationes que pueden pasar a enriquecer el complejo coloidal. Estos aumentos son frecuentes en los suelos de regiones áridas y semiáridas, ya que al ser la pluviometría de ellos baja, las aguas de lavado no eliminan los cationes metálicos que van apareciendo durante la meteorización.

En general, esta situación es favorable para la producción de cultivos, y sólo cuando el pH es excesivamente alto, o cuando el sodio es el catión dominante (suelos alcalinos salinos), el crecimiento de las plantas puede efectuarse desfavorablemente. Al haber una abundancia de carbonato sódico, al disolverse éste se hidroliza fácilmente, dando origen a un aumento claro de

OH⁻:



Cuando el complejo coloidal está saturado de Na⁺ en un 15% ó más, o existe en el suelo una apreciable cantidad de carbonato sódico, el pH puede alcanzar valores entre 8'5 y 10.

7.2. VARIACIONES DEL pH DEL SUELO.

El valor del pH de los suelos puede variar ampliamente. En la figura 7.2. se muestran los límites extremos de pH para la mayoría de los suelos de las regiones húmedas y áridas.

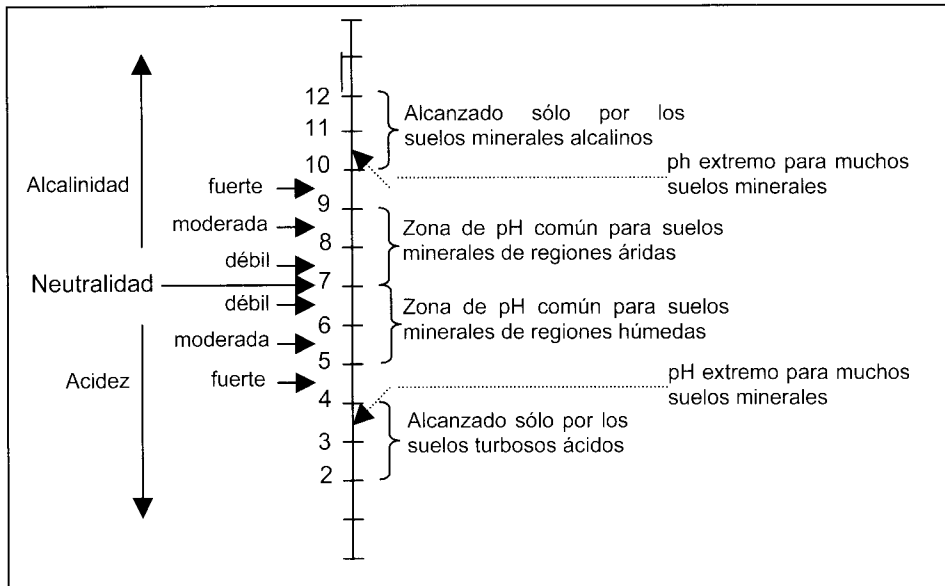


Figura 7.2. pH extremos para la mayoría de los suelos minerales de regiones húmedas y áridas.

En ella se señalan también las relaciones entre los valores de pH y los términos usualmente empleados para describir la reacción del suelo. Para los suelos minerales, los valores extremos van desde 3'5 (acidez muy fuerte) hasta 10 ó más (alcalinidad muy fuerte). Algunos suelos turbosos pueden dar

incluso un pH inferior a 3. En el otro extremo están los suelos sódicos, algunos de los cuales alcanzan un pH próximo a 11.

Los valores comunes de pH obtenidos en suelos de regiones húmedas van desde algo menos de 5 (acidez fuerte) a algo más de 7 (alcalinidad débil). Para los correspondientes a regiones áridas, desde algo menos de 7 (acidez débil) hasta 9 (alcalinidad moderada).

7.3. INFLUENCIA DEL ESTADO Y NATURALEZA DEL COMPLEJO COLOIDAL EN LA REACCIÓN DEL SUELO.

Partiendo de que la reacción del suelo tiene su origen en el complejo adsorbente, algunas características de éste deben ser consideradas por la influencia que pueden ejercer.

Porcentaje de saturación de bases.

La proporción relativa de cationes metálicos intercambiables adsorbidos al complejo coloidal se designa, como ya se indicó en un tema anterior, como "porcentaje de saturación de bases": V . Por tanto, se comprende que el pH esté notablemente relacionado con el estado de saturación del coloide, y que deba ser tanto más elevado cuanto más próximo de 100 esté V . Lógicamente, un bajo valor de V significará acidez, mientras que un V cercano a 100 señalará neutralidad o alcalinidad.

Tipo de coloide.

Está suficientemente demostrado que con el mismo porcentaje de saturación de bases, distintos coloides originan valores diferentes de pH. Esto se debe al hecho de que los diversos materiales coloidales difieren en el grado de disociación del hidrógeno adsorbido. Así, el hidrógeno fijado al humus se disocia fácil y ampliamente, razón por la que el pH de los suelos orgánicos, a un determinado valor de V , es más bajo que otro suelo comparable de naturaleza mineral. Por el contrario, la disociación del hidrógeno adsorbido a los óxidos hidratados de hierro y aluminio es relativamente baja, por lo que los suelos en los que predominan estos coloides presentan valores relativamente altos de pH, para un valor concreto de V . La disociación del hidrógeno adsorbido a las arcillas es intermedia entre la del humus y la de los óxidos hidratados. Estas diferencias pueden verse al comparar los valores de pH que se hallan cuando los distintos coloides presentan aproximadamente un valor de $V=50$ (Figura 7.3.).

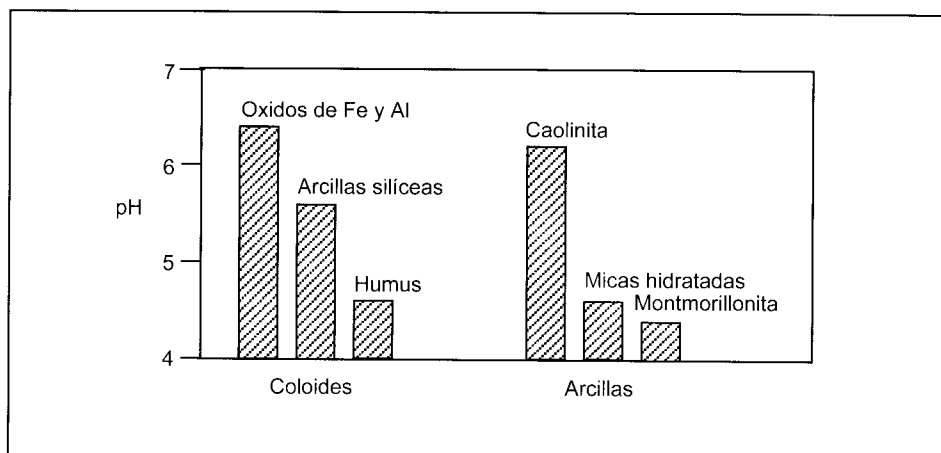


Figura 7.3. Valores medios de pH para diferentes coloides y distintas arcillas para un valor de $V=50$.

Los óxidos hidratados proporcionan un pH entre 6 y 7 ($V_m=6.5$); las arcillas entre 5.2 y 5.8 ($V_m=5.5$); y los coloides orgánicos entre 4.5 y 5 ($V_m=4.7$). Estos valores ponen de manifiesto la importante influencia de la naturaleza del coloide sobre el pH del suelo.

Esta distinta actuación también es notable, como puede verse al considerar concretamente los principales grupos de arcillas silíceas. El grupo de la caolinita es el que menos se disocia, mientras que las del grupo de la montmorillonita son las que lo hacen en mayor grado.

De igual forma, los coloides orgánicos pueden presentar notables variaciones.

Clases de cationes adsorbidos y relación en que se encuentran.

El pH del suelo está relacionado no sólo con la naturaleza de los cationes adsorbidos, sino también con las cantidades relativas de cada uno de ellos. A este respecto, es destacable la presencia de Na^+ , el cual se puede considerar como el más activo en lo que se refiere a la alcalinidad; le sigue el Ca^{+2} , mientras que el Mg^{+2} y el K^+ presentan menor influencia.

Así, los suelos saturados de Na^+ tienen pH más altos que cuando lo están por Ca^{+2} y Mg^{+2} . Y para un valor determinado de V , por ejemplo de 90%, y un valor de $T=20$ me/100 g, la presencia conjunta de Ca^{+2} , Na^+ , K^+ y Mg^{+2} en

relación 13-1-2-2 produce un pH más bajo que cuando la relación sea 10-4-2-2. En este último caso, los 3 me de Na^+ que sustituyen a los 3 me de Ca^{+2} proporcionan el aumento de alcalinidad.

7.4. RELACION ENTRE V, T Y pH DEL SUELO.

Evidentemente, los tres factores anteriormente considerados son distintos y no coordinados entre sí. Por esta razón, difícilmente se puede esperar una perfecta correlación entre V y pH cuando se comparan suelos al azar. Pero en suelos de semejante origen, existe una relación general, si se tiene en cuenta el valor de T, puesto que éste condiciona notablemente la fijación y disociación de los H^+ presentes en el complejo de adsorción.

Investigadores americanos, después de analizar los datos de miles de suelos minerales, han establecido para éstos la ecuación siguiente, que permite relacionar muy aproximadamente pH con V y T:

$$\text{pH} = \frac{87 + V - 0.3T}{24}$$

Usando esta ecuación, se presenta en la figura 7.4. las relaciones entre pH y V, para valores de T entre 13 y 20 me.

Las relaciones expuestas permiten, de forma general, señalar para estos suelos, que:

- 1º) Los suelos totalmente desaturados presentan un pH inferior a 3.5.
- 2º) Aquellos que tengan un pH aproximado de 4, les corresponde un valor de V igual o inferior a 10.
- 3º) Los suelos con acidez media, es decir, pH entre 4.4 y 5.5, pueden presentar valores de V=25-50.
- 4º) Los suelos con $\text{pH}=5.5-6.5$ tendrán valores de V=50-75.
- 5º) Para un $\text{pH}=7$, el valor de V se sitúa entre 75 y 80.
- 6º) Los suelos en los que su complejo coloidal se halle totalmente saturado de cationes metálicos, es decir, V=100, presentan valores de pH superiores a 7.5.

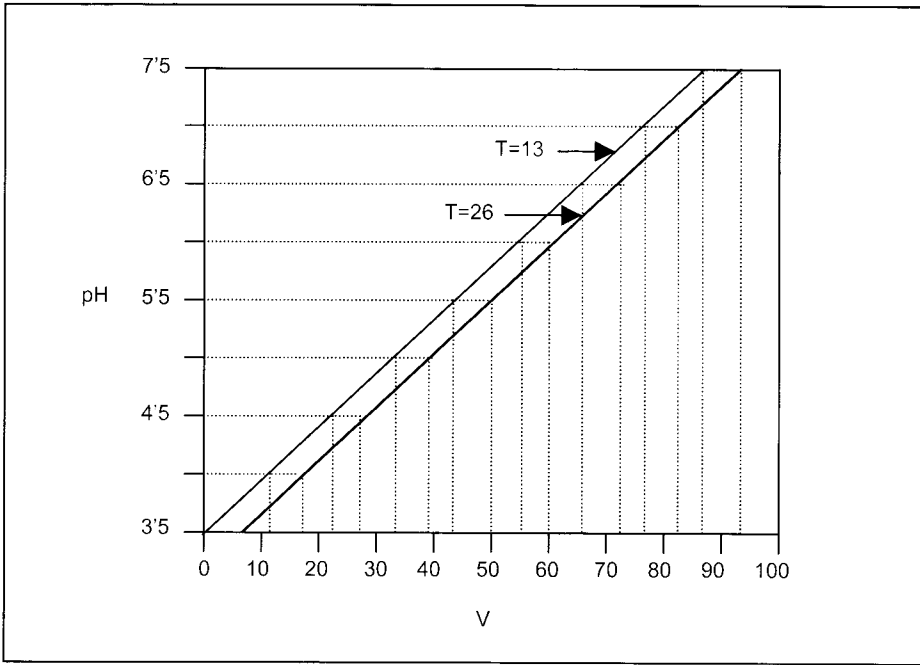
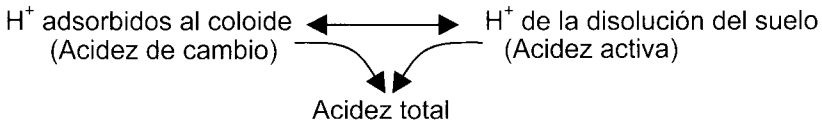


Figura 7.4. Relaciones aproximadas entre pH, V y T en suelos minerales medios.

7.5. MODALIDADES DE LA ACIDEZ DEL SUELO.

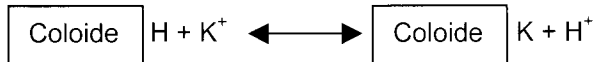
Tal como se ha indicado anteriormente, a medida que los suelos van perdiendo los iones básicos se van convirtiendo progresivamente en ácidos, ya que la proporción de H^+ fijados al complejo coloidal aumenta, produciéndose también un aumento de H^+ en la disolución del suelo, al existir un equilibrio entre ambas fases.

En un suelo ácido, por tanto, existen dos grupos de H^+ : los de la propia disolución del suelo y los retenidos por el complejo coloidal. Para distinguirlos, la concentración en H^+ disociados de la disolución del suelo, se designa como "acidez activa", "actual" o "aparente", y que la correspondiente a los H^+ fijados al complejo y no disociados (pero que pueden hacerlo a medida que se produzca la neutralización de los existentes en la disolución), "acidez de cambio", "de reserva" o "potencial". La suma de ambas constituye la acidez total:



La acidez total es siempre aproximadamente igual a la de cambio, puesto que la cantidad de H^+ de la disolución del suelo es sólo una porción mínima en comparación con la cantidad total.

Lo expuesto se pone de manifiesto experimentalmente. Si una muestra de suelo ácido se trata con agua destilada, se separa después por filtración y se determina su acidez, se comprueba que es muy débil. Esta es la acidez activa, cuya principal característica es la de ser muy reducida y la única que se manifiesta en condiciones normales. Pero si la muestra así tratada se agita de nuevo con una disolución de cloruro potásico, y una vez separada la disolución se determina en ella su acidez, resulta que ésta es mucho mayor. El hecho se explica por el intercambio iónico que ha tenido lugar en el complejo adsorbente:



Aparece así una mayor concentración de H^+ , la cual corresponde a la acidez de cambio, y que solo se pone de manifiesto con el tratamiento adecuado.

La diferencia entre ambas modalidades de acidez se considera debida a la distancia a que se hallan los H^+ de la superficie del coloide. La mayor cantidad de ellos se encuentran en la zona más próxima, mientras que un número más reducido se encuentra más distanciado. Estos últimos son los que realmente se disocian y originan la acidez activa. La figura 7.5. muestra esta situación y el equilibrio que se establece entre ambos tipos de acidez.

Cuando se neutralizan solamente los H^+ de la disolución, éstos son rápidamente reemplazados por algunos de los adsorbidos al coloide, y el equilibrio se establece de nuevo. La acidez de cambio actúa, por consiguiente, como un amortiguador ácido débilmente ionizado, y evita una elevación brusca del pH.

La acidez activa se expresa por el pH de la disolución del suelo, y normalmente se mide mediante la colocación de una suspensión de suelo en agua desionizada en contacto con un electrodo de vidrio de un medidor de pH, leyendo el resultado en la escala del aparato.

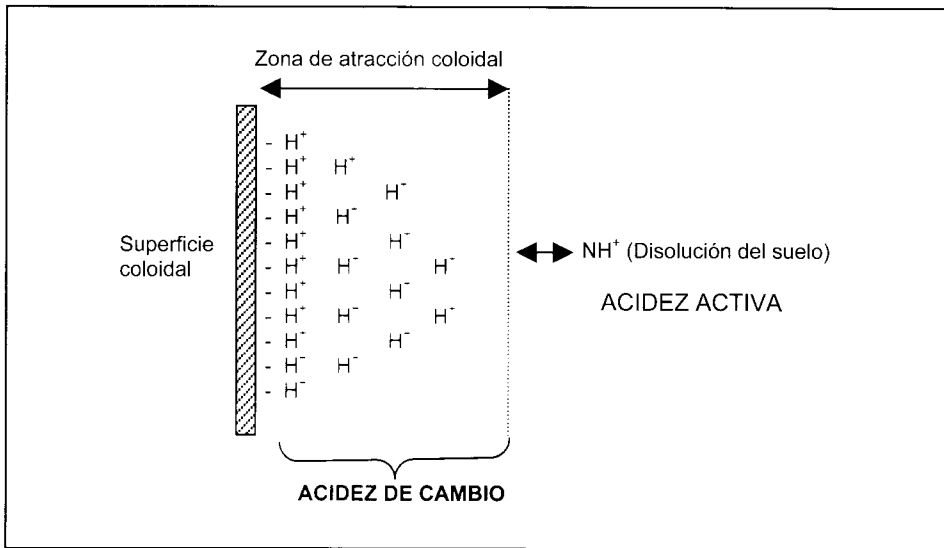


Figura 7.5. Equilibrio entre la acidez de cambio y la acidez activa.

La acidez total sólo puede ser medida por volumetría. Corresponde a la cantidad de cationes metálicos necesarios para reemplazar la totalidad de H^+ de cambio, y no tiene relación inmediata con el pH.

Cálculos aproximados permiten indicar que la acidez de cambio puede ser unas 1.000 veces mayor que la activa en el caso de suelos arenosos, y entre 50.000 y 100.000 veces mayor para aquellos arcillosos ricos en materia orgánica.

7.6. PODER AMORTIGUADOR DEL SUELO. IMPORTANCIA.

Se denomina poder amortiguador del suelo a la resistencia que presenta a modificar su pH cuando se le añaden ácidos o bases. Esta propiedad es de gran importancia, ya que permite mantener el citado pH dentro de límites muy estrechos, evitando modificaciones radicales en el ambiente del suelo que podrían afectar desfavorablemente a las plantas superiores, microorganismos y, sobre todo, al aprovechamiento de los elementos nutrientes.

El poder amortiguador del suelo está directamente relacionado con su contenido coloidal y con la capacidad de intercambio que posea: cuanto mayor

sea ésta, mayor será su poder de amortiguación. En la figura 7.6. se observa claramente esta tendencia. En ella se representan las curvas de amortiguación de cuatro suelos distintos: arenoso, franco, arcilloso y húmico. Los datos representados se obtienen operando con 10 g de suelo en 30 ml de agua, añadiendo cantidades determinadas de $\text{ClH } 0'1 \text{ N}$ ó $\text{NaOH } 0'1 \text{ N}$, y determinando el pH obtenido después de un reposo de 24 h tras cada adición.

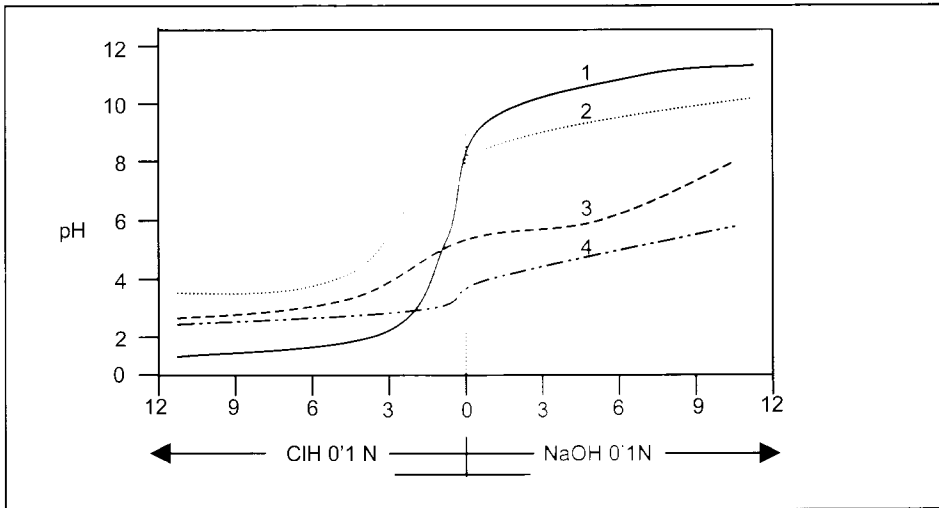


Figura 7.6. Curvas de amortiguación de distintos suelos. 1: Suelo arenoso, 2: Suelo franco, 3: Suelo arcilloso, 4: Suelo húmico.

La capacidad de amortiguación es: húmico > arcilloso > franco > arenoso. Esta diferente actuación se debe al comportamiento del complejo adsorbente. Cuando al suelo se le añade un ácido, éste se disocia al disolverse en agua, originando H^+ , parte de los cuales acidifican la disolución; otra parte se fija al complejo coloidal, desplazando a cationes metálicos. Estos H^+ adsorbidos se disocian poco, siendo por tanto necesarios muchos más H^+ en el complejo para que se produzca el paso de ellos a la disolución. Los suelos que posean una alta capacidad de cambio tendrán, por ello, un alto poder amortiguador.

Lo anteriormente expuesto se refleja en la práctica al considerar la cantidad de caliza necesaria para elevar el pH de la capa arable de suelos de distinta textura a un nivel conveniente (Figura 7.7.). Las cantidades de caliza son mayores para los suelos de textura más fina, es decir, los que contienen grandes proporciones de H^+ intercambiables debido a sus altas capacidades de intercambio.

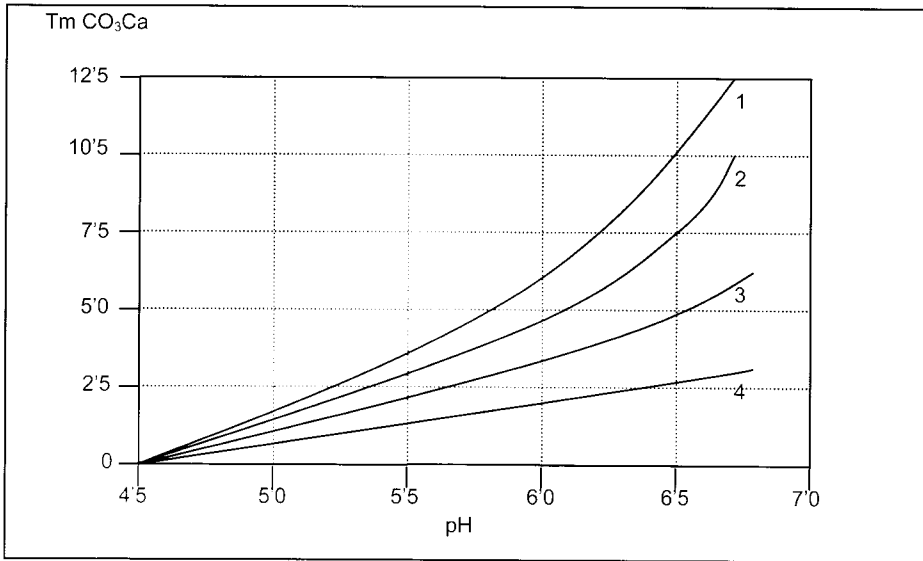


Figura 7.7. Toneladas de caliza requeridas para aumentar el pH en una unidad de una capa de suelo de 17 cm de cuatro suelos diferentes. 1: Suelo franco arcilloso; 2: Suelo franco limoso; 3: Suelo franco arenoso; 4: Suelo arenoso.

Puede observarse igualmente que la cantidad de caliza necesaria para incrementar el pH una unidad es tanto mayor cuanto más alto sea éste. Así, el suelo franco limoso requiere un 30% más de caliza para cambiar el pH de 5.5.

La relación iónica de adsorción puede servir para comparar el poder de amortiguación de los suelos:

$$A = H/S$$

en donde: A = poder de amortiguación, H = me de H⁺ intercambiables, S = me de cationes metálicos intercambiables.

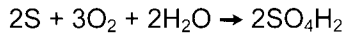
Cuanto menor sea el valor de esta relación, mayor será el poder de amortiguación del suelo.

7.7. MODIFICACION DE LA REACCION DEL SUELO.

7.7.1. ACIDIFICACION.

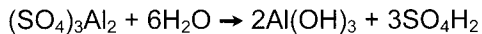
En determinadas ocasiones, es conveniente aumentar la acidez del suelo para favorecer el desarrollo de determinadas plantas, o bien porque existe en él gran riqueza de carbonatos.

Diversos materiales se utilizan para tal fin: azufre elemental, sulfato ferroso, sulfato aluminico, e incluso ácido sulfúrico. El azufre es no solo el más barato, sino también el más eficaz. Se aplica pulverizando semanas antes de iniciar la plantación del cultivo. En el suelo sufre una rápida oxidación, originando como producto final ácido sulfúrico:

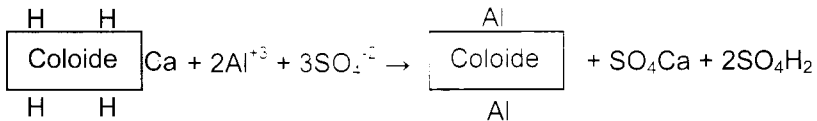


Para plantas que requieren cantidades considerables de hierro se recomienda a veces el sulfato ferroso. Esta sal, por hidrólisis, origina ácido sulfúrico, con lo que cumple la doble misión de acidificar el suelo y proporcionar hierro soluble.

El sulfato aluminico es usado ampliamente en el cultivo de flores. Se hidroliza fácilmente según la reacción:



Cuando se añade al suelo, además de la reacción hidrolítica, el aluminio que se solubiliza puede fijarse al coloide, desplazando H^+ que contribuyen a que el pH sea algo menor:

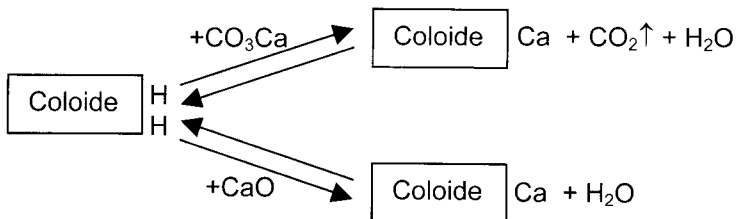


El ácido sulfúrico puede añadirse directamente al suelo mediante un rociado en superficie. Tiene la ventaja de que reaccionan muy rápidamente, pero requiere equipos especiales para su aplicación.

La acidificación del suelo sólo puede ser recomendable en la producción intensiva de cosechas, y sobre superficies relativamente pequeñas.

7.7.2. ALCALINIZACION.

La disminución de la acidez del suelo por adición de compuestos de calcio y magnesio es una práctica común en suelos de regiones húmedas. Los compuestos más generalmente usados son los carbonatos y los hidróxidos de calcio y magnesio (Cales agrícolas), y tienen la ventaja, entre otras cosas, de no dejar en el suelo residuos perjudiciales. Su acción alcalinizante puede representarse así:



En ambos casos hay una neutralización de H^+ y un aumento del calcio intercambiable.

Las cantidades a aplicar dependen de muchos factores: pH, porcentaje de saturación de bases, tipo de cosecha a desarrollar, etc.

7.8. SIGNIFICACION AGRICOLA DEL pH DEL SUELO.

La reacción del suelo condiciona de forma decisiva no sólo la vida de los microorganismos y los importantes procesos en que ellos intervienen, sino también la mayor o menor asimilabilidad de muchos elementos químicos que para la planta son esenciales, y la de otros que a determinadas concentraciones pueden resultar tóxicos y producir en ella graves alteraciones.

El pH y disponibilidad de nutrientes.

La relación general entre el pH del suelo y la disponibilidad de los elementos esenciales se muestra en la figura 7.8.

Los puntos más interesantes a resaltar al considerar las relaciones expuestas son:

1º) La solubilidad de las sales amónicas y nítricas es elevada en todo el intervalo de pH que puede presentar el suelo.

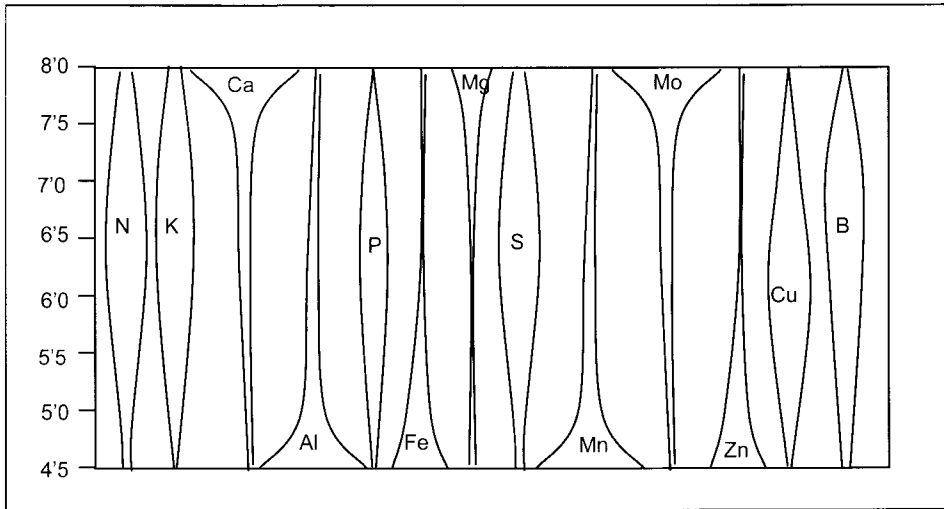


Figura 7.8. Disponibilidad de nutrientes en función del pH del suelo (R.H. Follet, L.S. Murphi y R.L. Donahue, 1981).

2º) La disponibilidad del fósforo disminuye a pH inferior a 6'5, debido a que el hierro y el aluminio se encuentran tanto más solubilizados cuanto menor es el pH, y provocan la precipitación del fósforo como fosfatos insolubles. A pH=6'5, las cantidades de hierro y aluminio solubles son muy pequeñas, con lo que la citada precipitación se reduce. Entre 6'5 y 7, la utilización del fósforo es máxima. A pH superior a 7'5, el calcio provoca su precipitación. Por encima de 8'5, el exceso de sales sódicas contribuye a su solubilización.

3º) La solubilidad del potasio y de los compuestos de azufre es, al igual que en el caso del nitrógeno, alta en todos los valores de pH considerados, aunque la cantidad de azufre en condiciones muy ácidas disminuye debido a las pérdidas por lixiviación.

4º) El calcio y el magnesio son más asimilables a valores de pH elevados. La acidez alta provoca su lixiviación, y ello justifica su menor disponibilidad en estas condiciones.

5º) El hierro, manganeso, cobre y cinc, son altamente disponibles a pH inferior a 5. Al aumentar el pH tienden a insolubilizarse bajo la forma de hidróxidos, de tal forma que en la zona alcalina sus posibilidades de utilización son extraordinariamente escasas.

6º) El boro presenta su máximo de solubilidad en el intervalo de pH=5-7, y se reduce a pH>8.

7º) El molibdeno presenta un comportamiento inverso al hierro y aluminio. A valores de pH bajos precipita con estos elementos, y a valores de pH altos presenta una gran disponibilidad al pasar a la forma de molibdatos solubles.

Considerando todas estas alteraciones en su conjunto, puede decirse que un pH entre 6 y 7 es el mejor para la más fácil asimilación de los elementos nutrientes.

El pH y los organismos del suelo.

En lo que respecta a los microorganismos, está suficientemente reconocido que las bacterias y los actinomicetos actúan mejor en suelos minerales con valores de pH intermedios y elevados. Su actividad se reduce notablemente cuando el pH es inferior a 5.5. La nitrificación y la fijación del nitrógeno atmosférico, por ejemplo, sólo se producen cuando el pH es superior a 5; y la aminización y amonificación se reducen considerablemente a pH más bajos. Una notable excepción, no obstante, se presenta con las bacterias que oxidan el azufre, las cuales parecen indiferentes a la reacción que pueda presentar el suelo. Los hongos son, también, facultativos.

La elevada acidez de los suelos se ha mostrado, también, que inhibe el desarrollo de las lombrices en los suelos.

En las plantas superiores, y debido a los muchos factores fisiológicos que intervienen, es muy difícil correlacionar con alguna exactitud su desarrollo óptimo con el pH del suelo. Por otra parte, las plantas crecen dentro de intervalos de pH muy amplios, lo cual dificulta el poder determinar la reacción más adecuada.

8

LOS ELEMENTOS QUÍMICOS Y LA VIDA VEGETAL.

Los conocimientos actuales acerca del organismo vegetal permiten asegurar que la casi totalidad del mismo (entre el 94 y el 99'5%) se compone de tan solo tres elementos: carbono, hidrógeno y oxígeno. La mayor parte del carbono y el oxígeno lo obtienen directamente del aire, por fotosíntesis, mientras que el hidrógeno deriva, directa o indirectamente, del agua del suelo.

Las plantas, sin embargo, no pueden vivir ni desarrollarse solamente sobre la base de aire y agua, sino que contienen y necesitan cierto número de elementos químicos que, por lo general, les son proporcionados a expensas de las sustancias minerales del suelo y a través del sistema radicular. Aunque estos elementos constituyen sólo una pequeña porción del peso anhidro de la planta (del 0'6 al 6%), no dejan por ello de ser fundamentales para el vegetal, lo que explica que sean considerados junto al carbono, oxígeno e hidrógeno, elementos esenciales para su nutrición.

Es interesante señalar que estos elementos que las plantas obtienen del suelo son los que comúnmente limitan el desarrollo de los cultivos. El crecimiento de las plantas, salvo circunstancias excepcionales, como pueden ser la sequía, bajas temperaturas, suelos anómalos o enfermedades, no se altera seriamente por una deficiencia de carbono, hidrógeno u oxígeno. Esto justifica la importancia de los nutrientes del suelo y de los elementos que contienen.

8.1. LA BUSQUEDA DE LOS ELEMENTOS ESENCIALES.

La búsqueda de los elementos esenciales para las plantas no ha sido posible mediante el análisis químico del suelo exclusivamente, lo que sería lógico admitir en un examen superficial.

Los científicos interesados en este problema no tardaron mucho en darse cuenta de la imposibilidad de emplear el suelo para tal fin. Lograr que éste quede libre de un determinado elemento y, después, controlar la cantidad del mismo puesta a disposición de las raíces enterradas en él es impracticable, ya que ello requeriría tratamientos extraordinariamente drásticos, con la

consiguiente alteración, cuali y cuantitativa, de los restantes elementos y la total destrucción de su equilibrio natural.

Tampoco el análisis directo de determinados tejidos u órganos de la planta podía considerarse como método apropiado para fijar correctamente la situación en ella de los bioelementos esenciales. El análisis de la planta creciendo en cualquier tipo de suelo revela, habitualmente, más elementos de los que hoy tenemos evidencia absoluta de su esencialidad. Podría deducirse, a lo sumo, los elementos más beneficiosos para la planta, pero no establecer de forma concreta los que condicionan su vida.

El método utilizado para la determinación experimental de los elementos esenciales para las plantas ha estado basado en el empleo de las llamadas disoluciones nutritivas. Fue empleado, ya a principios del siglo XIX, por J. Woodward para estudiar el proceso nutritivo de las plantas de menta y, posteriormente, ampliamente utilizado por los grandes fisiólogos vegetales alemanes del siglo XIX, J. Sachs y W. Knop. La planta se cultiva de tal modo que sus raíces se encuentran sumergidas en un recipiente que contiene un medio nutritivo líquido, formado por una disolución acuosa de diversas sales, la cual es renovada una vez agotada. Para lograr un buen crecimiento de la raíz y una normal absorción de los nutrientes, es necesario proporcionarle un buen sistema de aireación, y que la disolución contenga todos los elementos requeridos por la planta en forma conveniente y en proporciones adecuadas. El valor del pH de la disolución se ajusta, en general, alrededor de 6.5. Las ventajas que ofrece el empleo de estas disoluciones son principalmente la eliminación de procesos interferentes entre los elementos químicos que intervienen, así como la posibilidad de añadir o eliminar aquel que interese. La figura 8.1. muestra uno de los sencillos dispositivos que pueden ser utilizados.

Con esta técnica, Sachs y Knop confirmaron, en la segunda mitad del siglo pasado, la esencialidad de los diez primeros bioelementos: carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio, azufre y hierro.

Los demás elementos que hoy día se admiten como esenciales eran prácticamente desconocidos hasta casi cumplido el primer cuarto de siglo actual, a pesar de que, ya en 1869, J. Raulin había descubierto la esencialidad del cinc para las plantas superiores. Este lento progreso en el conocimiento de nuevos elementos esenciales se justifica si se tiene en cuenta que, por esa época, no se tenía un concepto definitivo acerca de los oligoelementos; que el estudio del suelo y la nutrición vegetal estaban en sus inicios; y, finalmente, que no se disponía de los formidables medios que, desde el punto de vista analítico y experimental, se dispone en la actualidad.

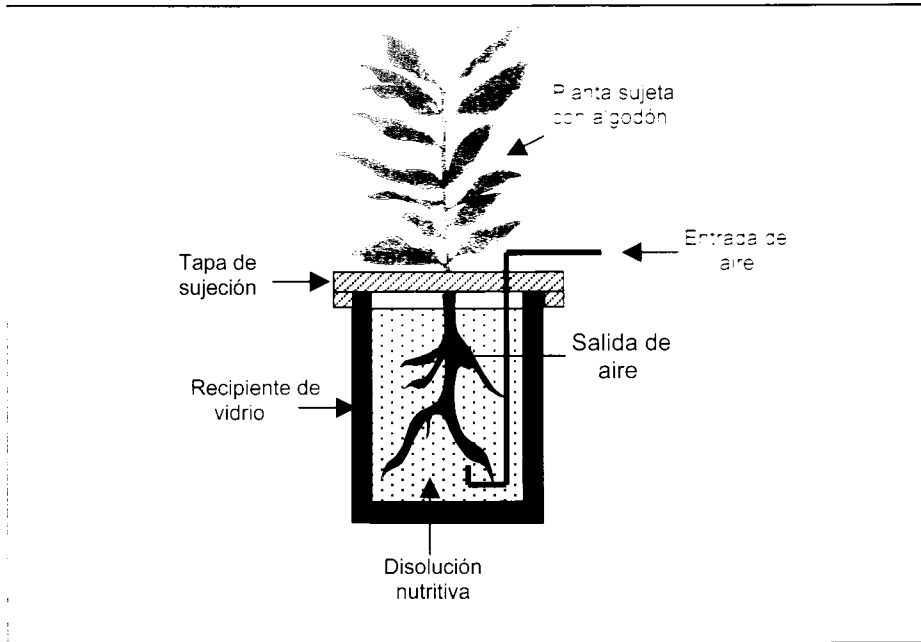


Figura 8.1. Dispositivo empleado para desarrollar un cultivo en disolución nutritiva.

Entre 1920 y 1930 se mejora de modo importante la metodología, y empiezan a hacerse amplios estudios cuantitativos controlando al máximo factores contaminantes y, principalmente, utilizando reactivos suficientemente puros para la preparación de las disoluciones nutritivas. En 1922, J.S. McHarge establece la esencialidad del manganeso; K. Washington, en 1923, la del boro; A.L. Sommer y C.B. Lipman, en 1926, la del cinc; y C.B. Lipman y G. McKinney, en 1932, la del cobre.

En el año 1933, D.R. Hoagland y W.C. Snyder abordan, utilizando disoluciones nutritivas, un estudio en frambuesas sobre uno de los problemas nutricionales más importantes: la asimilación del nitrógeno. Con él se inicia el establecimiento de la esencialidad de otro oligoelemento: el molibdeno.

Hoagland observó que cuando se utilizaban solamente los catorce bioelementos hasta entonces admitidos, y de ellos el nitrógeno bajo la forma de ión nitrato, las frambuesas no se desarrollaban satisfactoriamente. Esto le hizo pensar en la posibilidad de que el fallo de la experiencia se debiera a que el nitrógeno absorbido por la planta bajo la forma de nitrato no sufría, en ella, una reducción adecuada, proceso este admitido ya en ese tiempo. Intuyó

entonces la inclusión en la disolución nutritiva de algunos elementos caracterizados por su intervención en los procesos redox, concretamente molibdeno, cobalto y níquel, y con esta modificación el cultivo prosperó notoriamente, aunque no pudo discernir si el efecto favorable se debía a los tres elementos añadidos o a uno de ellos en particular.

Este resultado le hizo concebir una mejora en la metodología empleada: la utilización de las llamadas, en términos generales *disoluciones* AZ. La disolución A₁₀ aportaba los elementos clásicos: nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio, azufre y hierro, más el carbono, hidrógeno y oxígeno que la planta obtiene del aire y del agua. La disolución A₄ contenía los cuatro elementos aceptados últimamente como esenciales: cinc, boro, manganeso y cobre. La B₇ incluía cobalto, níquel, molibdeno, titanio, vanadio, cromo y wolframio, que tienen cierta similitud química en su actuación en los procesos redox. Por último, la disolución C₁₃ incorporaba, con el deseo de abordar integralmente el problema, los elementos siguientes: aluminio, arsénico, cadmio, estroncio, mercurio, plomo, litio, rubidio, bromo, yodo, flúor, selenio y berilio.

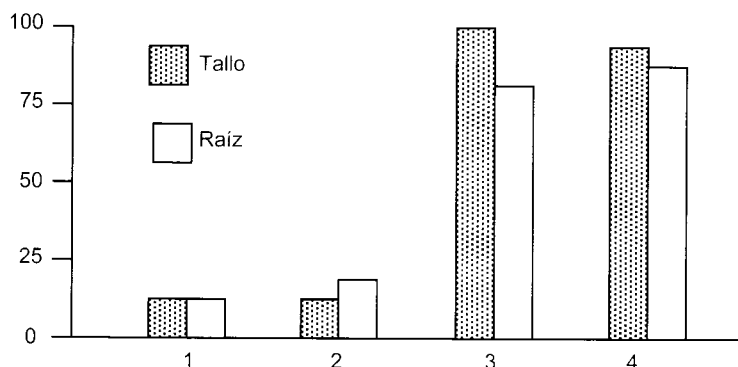
Los resultados obtenidos al utilizar estas disoluciones en el crecimiento de la lechuga permitieron poner claramente de manifiesto la importancia del molibdeno en la nutrición vegetal (Figura 8.2.).

El empleo de la disolución A₁₀ proporcionó un desarrollo muy pobre del tallo y de la raíz. Cuando se utilizó la disolución A₁₀+A₄ hubo un escaso aumento. Podría objetarse que si faltaban en ambos ensayos uno o varios elementos esenciales, ¿cómo fue posible el desarrollo, aún exiguo?. La respuesta es que no faltaban de modo absoluto esos elementos: existían como impurezas en el medio, aportados por los reactivos empleados, no totalmente puros.

El resultado verdaderamente sorprendente apareció con la incorporación a la disolución A₁₀+A₄ de la B₇, que provocó un desarrollo diez veces superior.

Por último, la disolución C₁₃ no aportó mejora alguna, sino tal vez un ligero retroceso. Podía, pues, aventurarse que ninguno de los elementos de esta última se comportaban como esenciales. En cambio, los resultados anteriores demostraban que uno o más de los siete elementos contenidos en la disolución B₇ beneficiaban marcadamente el desarrollo de la planta.

% Crecimiento



- (1) A₁₀ (N, P, K, Mg, S, Fe)
 (2) A₁₀ + A₄ (B, Zn, Cu, Mn)
 (3) A₁₀ + A₄ + B₇ (Mo, Ti, V, Cr, W, Co, Ni)
 (4) A₁₀ + A₄ + B₇ + C₁₃ (Al, As, Cd, Sr, Hg, Pb, Li, Rb, Br, I, F, Se, Be)

Figura 8.2. Crecimiento de lechuga en disoluciones nutritivas AZ

Basándose en estas experiencias, y utilizando plantas de tomate, D.I. Arnon y P.R. Stout establecieron definitivamente, en 1939, la esencialidad del molibdeno. Y finalmente, T.C. Broyer, A.B. Carlton, C.M. Johnson y P.R. Stout, en 1954, la del cloro.

No vamos a entrar aquí en detalles sobre las distintas fórmulas utilizadas para la preparación de las disoluciones nutritivas. Ni tampoco acerca de los dispositivos y métodos que actualmente pueden ser utilizados. Su elección dependerá del estudio que se desee realizar. Pero sí es necesario destacar que el método de cultivo artificial, al que debemos gran parte de los conocimientos actuales, ha permitido resolver muchos problemas importantes planteados dentro del campo de la Química Agrícola: determinar los elementos esenciales para la planta, papel en su nutrición de los distintos elementos; antagonismo de los iones, alteraciones producidas por deficiencias o excesos, etc.

Sin embargo, debe reconocerse que las condiciones del medio así utilizado son muy distintas de las que se observan en la Naturaleza. Muchas de las conclusiones obtenidas deben ser interpretadas con prudencia cuando se pasa de las condiciones del medio a las de los suelos.

8.2. CRITERIOS DE ESENCIALIDAD.

Las experiencias con disoluciones nutritivas han permitido concretar los elementos esenciales para las plantas. Pero el conjunto de todas ellas hicieron ver la necesidad de establecer unos criterios que permitiesen fijar cuándo un elemento podía considerarse esencial. Estos criterios fueron establecidos en 1939 por D.I. Arnon y P.S. Stout, y son los siguientes:

1º) Un elemento no puede considerarse como esencial a menos que su ausencia haga imposible completar las etapas vegetativas o reproductivas de su ciclo vital.

2º) La deficiencia ha de ser específica del elemento en cuestión, y sólo puede ser evitada o corregida mediante suministro de aquel.

3º) El elemento ha de estar directamente implicado en la nutrición de la planta, con independencia de sus posibles efectos en la corrección de condiciones desfavorables, químicas o microbiológicas, del medio externo.

Aunque estos criterios han sido aceptados como válidos y plenamente aplicados a todos los seres vivos, algunos investigadores consideran que el segundo criterio no es totalmente correcto. Por ejemplo, se requiere molibdeno para la fijación del nitrógeno por los *Azotobacter*. En algunas especies, sin embargo, el molibdeno puede ser sustituido por vanadio.

Situación parecida la ofrece el cloro, elemento reconocido como esencial para el crecimiento de los vegetales superiores, el cual puede ser sustituido, en parte, por el bromo sin que el desarrollo normal de la planta se vea alterado. Según el criterio de Arnon, ni el vanadio, ni el bromo, pueden ser considerados estrictamente esenciales para la nutrición de las plantas.

Otro ejemplo, finalmente, está representado por el sodio. Este elemento no está considerado como esencial para todas las plantas, pero se ha demostrado en la práctica que su presencia incrementa el rendimiento en numerosos cultivos. Por tanto, desde el punto de vista económico, el sodio debería ser considerado como esencial.

8.3. MACRO Y MICRONUTRIENTES ESENCIALES Y ELEMENTOS BENEFICIOSOS.

En el momento actual, está suficientemente demostrado y admitido que los elementos esenciales para el desarrollo de todas las plantas son

dieciséis, y cuatro esenciales sólo para algunas. Todos ellos desempeñan funciones muy importantes en la vida de la planta y, cuando están presentes en cantidades insuficientes, pueden producir en ella graves alteraciones y reducir notablemente el crecimiento.

En la tabla 8.1. se clasifican según sus fuentes, su total o parcial esencialidad, y según la magnitud de su utilización por la planta.

Tabla 8.1. Elementos químicos esenciales para las plantas.

NUTRIENTES ESENCIALES PARA LAS PLANTAS			
PARA TODAS		PARA ALGUNAS	
En cantidades relativamente grandes		En cantidades relativamente pequeñas	En cantidades relativamente pequeñas
Extraídos por lo general del aire, en forma de CO ₂ , o del agua del suelo	De los sólidos del suelo	De los sólidos del suelo	De los sólidos del suelo
1. Carbono 2. Hidrógeno 3. Oxígeno	4. Nitrógeno 5. Fósforo 6. Potasio 7. Calcio 8. Magnesio 9. Azufre	10. Hierro 11. Manganeseo 12. Boro 13. Molibdeno 14. Cobre 15. Cinc 16. Cloro	17. Sodio 18. Silicio 19. Cobalto 20. Vanadio

Junto a los elementos citados, otros como rubidio, estroncio, aluminio y bario, aunque no considerados como esenciales, se aceptan hoy día como beneficiosos para el desarrollo de determinados cultivos, ya que se cree que pueden estimular la absorción o transporte de otros elementos esenciales que se encuentran en proporción limitada, o bien inhibir la absorción de otros que se encuentren en exceso.

De los trece elementos esenciales para todas las plantas obtenidos del suelo, seis son requeridos relativamente en grandes cantidades: nitrógeno, fósforo, potasio, azufre, calcio y magnesio, y se designan con el nombre de

macronutrientes o *elementos primarios*. Por ello, el crecimiento de la planta puede reducirse notablemente cuando hay escasez de ellos en el suelo; porque resulten asimilables muy lentamente; o porque no mantengan un equilibrio adecuado con los otros elementos esenciales. Estas limitaciones se presentan frecuentemente en el caso del nitrógeno y del fósforo.

Los otros elementos: hierro, manganeso, cobre, cinc, boro, molibdeno y cloro, son utilizados por las plantas superiores en muy pequeñas cantidades y, en consecuencia, son llamados *micronutrientes*, *elementos vestigiales*, *trazas*, *raras*, *menores* y, más corrientemente, *oligoelementos*.

Hay que indicar, como dato comparativo, que los animales requieren 15 de los 16 elementos que son esenciales para las plantas (el boro no es esencial para los animales), pero éstos requieren también sodio, yodo, selenio y cobalto.

8.4. ELEMENTOS NO ESENCIALES CONTENIDOS EN LAS PLANTAS.

Aunque las plantas necesitan esencialmente, para su normal desarrollo, sólo unos pocos elementos, en forma de sales minerales, pueden absorber, y de hecho lo hacen con frecuencia, otros elementos presentes en el suelo o en la disolución nutritiva. Unos sesenta elementos diferentes han sido hallados en unas u otras especies vegetales superiores. Estos elementos no esenciales (níquel, plomo, mercurio, arsénico, litio y rubidio, por ejemplo) son absorbidos por las raíces en pequeñas cantidades, siempre que se encuentren en el medio nutritivo en forma de sal soluble. E incluso las plantas absorben, si están a su alcance, ciertos elementos como el plutonio, que no se encuentra corrientemente en la Naturaleza en cantidades apreciables. Un caso típico en este aspecto lo constituye el aluminio. Este elemento, muy abundante en la corteza terrestre, es absorbido por muchas especies vegetales y es causa de alteraciones muy llamativas en determinados órganos de la planta. En la hortensia, por ejemplo, las flores normalmente rojas o blancas, pueden tomar color azul o violeta si la planta absorbe aluminio en abundancia.

El selenio constituye otro ejemplo digno de ser citado. Diversas especies vegetales son capaces de absorber notables cantidades de este elemento. No es tóxico para la planta, o lo es sólo muy ligeramente, pero cuando los animales se alimentan de vegetales que contienen selenio, puede producir en aquellos la enfermedad conocida como *intoxicación alcalina*, que se manifiesta con vértigos continuos.

8.5. ORIGEN Y FORMAS DE LOS ELEMENTOS ESENCIALES UTILIZADOS POR LAS PLANTAS.

Las sales minerales son las suministradoras de los elementos nutritivos que las plantas requieren para el desarrollo de su ciclo vital. Proceden de las rocas de la litosfera, las cuales, y a través de muy diversos, se van degradando lentamente hasta convertirse en compuestos solubles. En el agua del suelo, estos compuestos se disocian en mayor o menor grado en cationes y aniones, pudiendo mantenerse libres en la disolución o fijarse merced a sus cargas eléctricas, a las partículas coloidales.

En el suelo existen, por tanto, dos fuentes generales de nutrientes fácilmente asimilables por la planta. Por una parte, nutrientes adsorbidos por los coloides, y por otra los que forman parte de la disolución del suelo. En ambos casos, los elementos esenciales están presentes como iones, pero con la particularidad de que los cargados positivamente (cationes) son adsorbidos por los coloides en su mayor parte, mientras que los cargados negativamente (aniones), y una pequeña fracción de cationes, se hallan en la disolución del suelo.

Esta reserva alimenticia, fácilmente asimilable por la planta, desde el punto de vista cuantitativo es muy pequeña en comparación con la cantidad total inasimilable, pero también presente en el suelo. Casi el 98% de los bioelementos del suelo se encuentran formando parte de restos orgánicos, materiales húmicos, compuestos inorgánicos difícilmente solubles o minerales. Representan, sin embargo, una reserva nutritiva, que va siendo preparada lentamente por meteorización o mineralización del humus. En su forma asimilable, sólo el 2%, aproximadamente, se presenta adsorbido a las partículas coloidales del suelo, y menos del 0'2% en su disolución.

Es necesario indicar que un elemento muy importante, el nitrógeno, no es constituyente de las rocas. Su presencia en el suelo y en las aguas naturales se debe a la descomposición de diversos compuestos orgánicos nitrogenados, de origen animal o vegetal, a la fijación del nitrógeno atmosférico por determinados microorganismos o, en menor proporción, al arrastre por lluvias del fijado por descargas eléctricas.

Las formas de los elementos esenciales utilizados por las plantas se presentan en la tabla 8.2.

Tabla 8.2. Formas iónicas de los elementos esenciales utilizados por las plantas.

MACRONUTRIENTES	MICRONUTRIENTES
Carbono..... CO_3^{-2} , CO_3H^-	Hierro..... Fe^{+2} , Fe^{+3}
Hidrógeno..... H^+	Manganeso..... Mn^{+2} , Mn^{+4}
Oxígeno..... OH^-	Boro..... BO_3H_2^- , BO_3H^{-2}
Nitrógeno..... NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^-	Molibdeno..... MoO_4^{-2}
Fósforo..... PO_4H_2^- , PO_4H^{-2}	Cobre..... Cu^+ , Cu^{+2}
Potasio..... K^+	Cinc..... Zn^{+2}
Azufre SO_3^{-2} , SO_4^{-2}	Cloro..... Cl^-
Calcio..... Ca^{+2}	
Magnesio..... Mg^{+2}	

8.6. ALTERACIONES EN LA PLANTA POR DEFICIENCIAS DE LOS ELEMENTOS ESENCIALES. CONSIDERACIONES.

Los estados patológicos debidos a la escasez de oligoelementos pueden apreciarse en las plantas, muchas veces, por síntomas y alteraciones metabólicas observados a simple vista, incluso con signos específicos que permiten identificar al elemento causante de la enfermedad. Tal es el caso de la sintomatología peculiar de la deficiencia de hierro, en los vegetales conocida como clorosis férrica, la cual es fácil de diagnosticar con bastante precisión por la desaparición casi total del color verde en los casos agudos.

Sin embargo, cuando se quieren estudiar estos asuntos con objetividad y rigor, hay que utilizar métodos científicos que demuestren cómo la alteración o disfunción metabólica obedece exclusivamente a la falta de un bioelemento. En este aspecto, los análisis químicos del suelo y de la planta, aún con sus limitaciones, muestran mayor validez que el simple examen de la sintomatología.

Análisis del suelo.

Se apoya en el hecho de que el suelo es el medio o fuente nutritiva por excelencia de las plantas. Supone, por lo tanto, que la determinación de alguna característica de ese suelo, o del nivel de los bioelementos en él existentes, puede definir la posible alteración deficitaria de la planta sobre él cultivada. Se trata, pues, de un método indirecto.

Ahora bien, se ha dicho ya que el contenido total de un determinado nutriente en el suelo, es decir, su disponibilidad teórica, resulta insuficiente para discernir el estado de nutrición de los cultivos.

Tal vez sea de utilidad aclarar este concepto. Si en un laboratorio se entrega una muestra de suelo para determinar fósforo, hierro, etc, el método a seguir diferirá sustancialmente según se consideren o no criterios exclusivamente químicos. En el primer caso, el material se tratará del mismo modo que una roca o cualquier otra sustancia en la que se pretenda determinar la cantidad exacta de un elemento químico; de aquí que de ordinario se emplee un procedimiento drástico previo, tal como la digestión ácida o la calcinación, al objeto de poder realizar correctamente la determinación ulterior. Pero si con los datos resultantes se quisiera conocer, desde un punto de vista biológico, el grado de utilidad para las plantas del elemento analizado, se cometería un error gravísimo. En efecto, lo importante no es el contenido total, sino la proporción que en las condiciones del suelo problema puede ser asequible para la planta, es decir, lo que se ha indicado y se admite como "elemento asimilable". La cuestión está en discriminar qué fracción del elemento en cuestión está en disposición, por así decirlo, de ser captada por la planta.

Pero esta determinación, aparentemente sencilla, implica dificultades grandes. Es evidente que para correlacionar el dato analítico de un elemento en el suelo con su potencial nutritivo, han de emplearse técnicas extractoras tan semejantes como sea posible a las que la propia planta utiliza. Para determinar el nivel nutritivo del fósforo, por ejemplo, sería absurdo acudir a los ácidos nítrico, perclórico o sulfúrico, como extractantes, siendo así que las raíces no utilizan reactivos tan poderosos. Los valores no serían comparables. Esta es la primera complicación que surge en el análisis del suelo cuando se pretende diagnosticar deficiencias minerales, y lo que justifica el número considerable de disoluciones extractoras propuestas.

Por otra parte, no se puede admitir, inicialmente, que el mecanismo extractor de una solanácea sea en todo idéntico al de otras plantas, por ejemplo las del género Citrus. Todo ello lleva a admitir que se necesitaría disponer de tantas disoluciones extractoras como suelos, nutrientes y plantas hubiese, con lo que el problema carecería de soluciones prácticas.

Pero las consideraciones anteriormente expuestas no significan que el análisis de los suelos sea totalmente inadecuado para fines de diagnóstico. Es indudable que el estudio a fondo de su génesis y características permite prever estados deficitarios futuros, y que su adecuado manejo puede dar lugar, en muchos casos, a procedimientos preventivos de eficacia notable.

Análisis de la planta.

Durante muchos años se ha pensado que el análisis del vegetal podría eliminar muchos de los aspectos negativos que el análisis de los suelos presenta, y que la hoja, sede de la fotosíntesis y órgano regulador del trasiego de nutrientes en el vegetal, podía ser utilizada como material indicador.

Ahora bien, la determinación de un elemento en la hoja, al objeto de identificar deficiencias minerales, implica precisamente el establecimiento del nivel nutritivo normal de ese elemento.

¿Cómo puede determinarse ese nivel para cada bioelemento, por debajo del cual la planta es deficiente?. Dos líneas están perfectamente establecidas. Una basada en la metodología de las disoluciones nutritivas. Consiste, como ya se ha expuesto, en cultivar ejemplares de una misma especie en una serie de vasos de vegetación, con la única variación en el medio nutritivo del nivel del elemento a estudiar. Por lo general, habrá plantas de deficiente desarrollo frente a otras normales, y el contenido correspondiente en la hoja podrá estimarse como nivel divisorio entre salud y enfermedad. Esta es la sistemática, tradicionalmente seguida por los fisiólogos vegetales.

La otra vía, preferida por los agroquímicos, aplica las mismas ideas, pero con criterio más realista, a experimentos de campo, ya que los resultados muy concretos de laboratorio no siempre pueden generalizarse al medio natural, bastante diferente y en el que participan numerosos factores. Quizá lo más correcto sea la consideración conjunta de ambas líneas: las disoluciones nutritivas para centrar el problema y las experiencias de campo al objeto de confirmarlo en una amplia gama de condiciones.

Sin embargo, los resultados del análisis foliar que normalmente se obtienen con una u otra sistemática sirven solamente para dictaminar casos extremos, pero no son suficientes para el diagnóstico preciso y concluyente de los estados iniciales.

Un avance mayor de la cuestión parte de considerar que la hoja, como órgano integrante de un ser vivo, no es un material inerte a la manera de un trozo de roca o de acero que ingresa en un laboratorio para ser analizado, sino que el tejido foliar, por esa condición biológica, es esencialmente dinámico. Este concepto fundamental ha de tenerse muy en cuenta, en evitación de errores importantes. Hay que pensar que el nivel foliar de un elemento no es constante, ya que los procesos de absorción, transporte y localización de nutrientes, íntimamente relacionados con los de biosíntesis en general, determinarán lógicamente variaciones de importancia. Dicho de otro modo,

debe aceptarse que el nivel foliar de un elemento en un instante dado (N_i) es el que resulta de la suma algebraica siguiente:

$$N_i = N_r + N_a - N_e$$

en donde: r = reserva, a = absorción, e = emigración.

Con este concepto dinámico de la hoja, es razonable admitir que para conseguir diagnósticos precoces que ayuden a prevenir más que a curar, la metodología se complicará en razón a que las diferencias entre los estados normales y el contenido de las alteraciones patológicas son, a menudo, pequeñas. Entonces el instrumento analítico puede fallar, no por imprecisión, sino porque el material a analizar, dada su naturaleza biológica, no puede adscribirse a una situación fija. Este punto aparece claramente en la figura 8.3.

En ella, la línea de puntos señala la evolución del contenido de hierro en hojas cloróticas, mientras que la línea continua corresponde a plantas normales de la misma especie (limonero Verna). Puede observarse cómo los niveles fluctúan a lo largo del ciclo vegetativo, con lo que un valor de 65 ppm, por ejemplo, puede significar normalidad o deficiencia según se considere el periodo enero-febrero o agosto-septiembre. Esto prueba lo impropio de asignar a un número fijo el carácter definidor del estado de nutrición.

Por otra parte, si se continúa el estudio de las gráficas, se observa que las diferencias existentes entre plantas sanas y enfermas no son las mismas. Por ello, los errores analíticos, susceptibles de producirse, podrán conducir a errores fisiológicos, tanto más graves cuanto más pequeñas sean aquellas diferencias. En el caso que se comenta, habrá mayor peligro de ello en el mes de febrero que en el de junio, por ejemplo.

Resultados experimentales realizados en campo, teniendo en cuenta las evoluciones a lo largo de los ciclos vegetativos correspondientes a la misma especie en suelos distintos, se representan gráficamente en la figura 8.4.

Puede observarse que los estados agudos de clorosis férrica dan siempre valores por debajo de 69 ppm, mientras que los superiores a 83 ppm definen estados fisiológicos de plena normalidad. La franja que delimitan esos dos niveles se denomina "zona crítica", y significa que las plantas en ese estado son susceptibles, con gran probabilidad, de ser deficitarias, dependiendo el grado de esa probabilidad del momento del ciclo vegetativo en que se tomó la muestra.

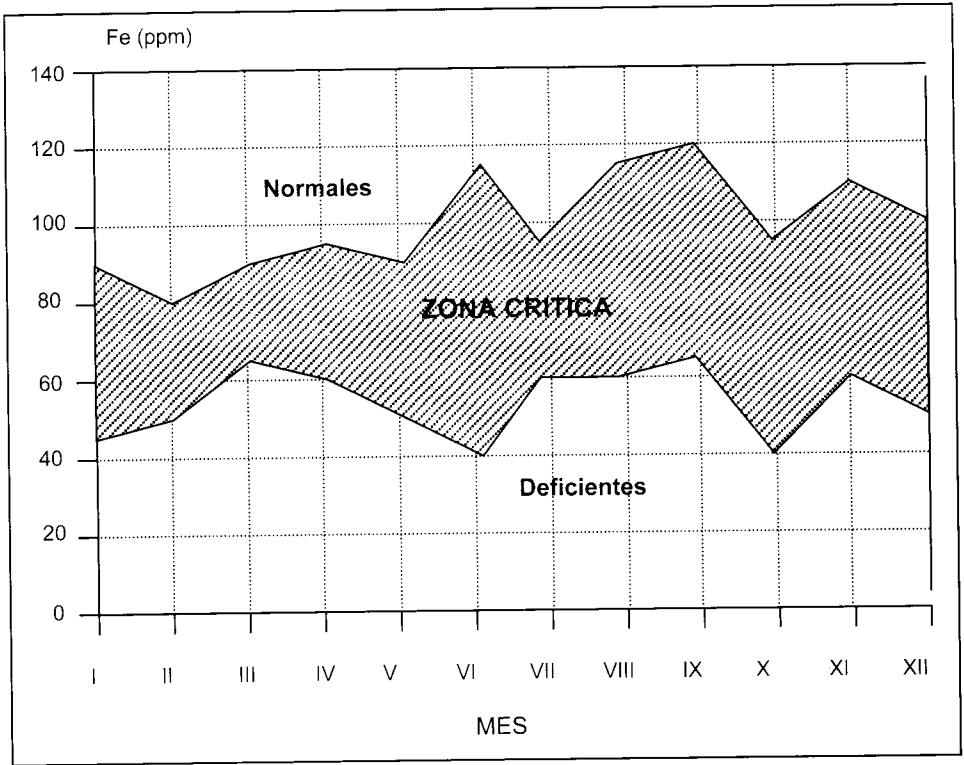


Figura 8.3. Evolución del hierro en hojas de Citrus limón normales y deficientes en Fe, durante un ciclo anual (O. Carpena, 1967).

Con ese criterio se consigue mayor significación biológica al sustituir el término "nivel crítico" por el de "zona crítica", que considera todas las situaciones posibles en el ciclo de la planta, y no unas muy concretas de escasa significación práctica.

8.7. EFECTOS TOXICOS DE LOS ELEMENTOS MINERALES.

El desarrollo normal de las plantas puede verse altamente afectado cuando la concentración de los elementos esenciales o no esenciales en estado asimilable del suelo excede de un cierto nivel. Esta influencia, sin embargo, dependerá grandemente del elemento que se considere. Algunos, como el silicio, no son tóxicos; otros, como el arsénico, cromo y plata, son muy tóxicos, aún en mínimas concentraciones.

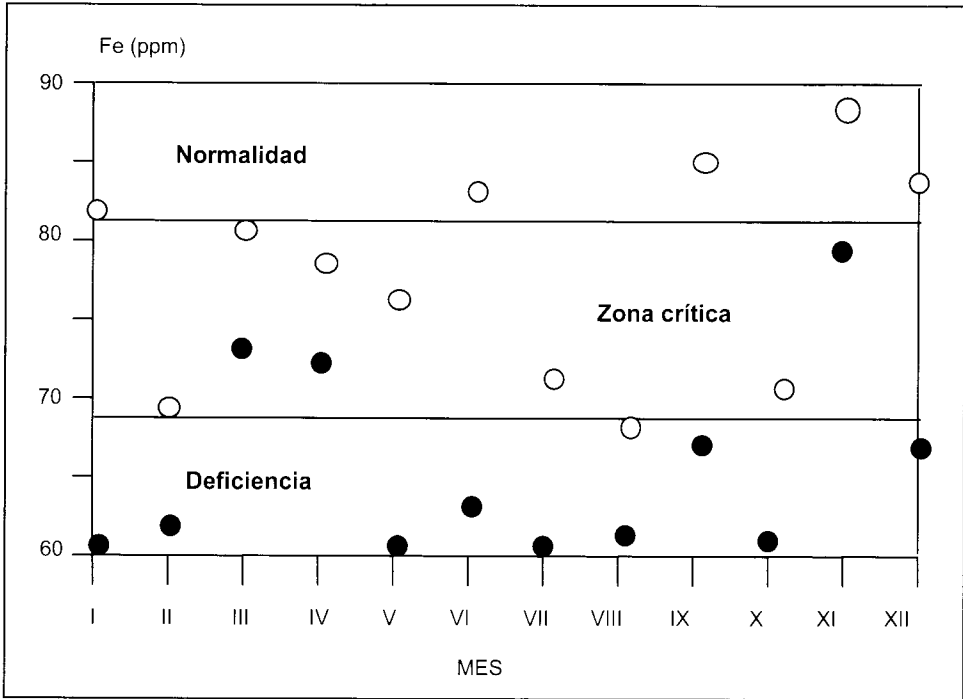


Figura 8.4. Zona crítica para el establecimiento de deficiencias de Fe en Citrus limón, a lo largo de su ciclo vegetativo.

En general, los macronutrientes son mucho menos tóxicos que los micronutrientes, y su concentración puede superar ampliamente el nivel óptimo sin que el crecimiento se vea aparentemente afectado. Este hecho se observa, entre otros elementos muy particularmente en el caso del potasio, el cual puede ser absorbido y almacenado por la planta sin que aparezcan en ella alteraciones, ni tampoco mejoras, en su desarrollo o producción. Es lo que se conoce como *consumo de lujo* del potasio.

Para los micronutrientes la situación es diferente, ya que los márgenes entre nivel óptimo y toxicidad están muy cercanos, y para algunos de ellos, tal como ocurre con el boro, un ligero exceso puede originar grandes alteraciones.

Los efectos tóxicos que puedan producirse dependen también del grado sensibilidad que presente la planta sujeta a dichos excesos, y puede variar notablemente de una especie a otra. Así, por ejemplo, el manganeso puede ser tóxico a un determinado nivel para la col, y no serlo para la avena.

9

ABSORCION DE LOS ELEMENTOS NUTRITIVOS POR LAS PLANTAS.

Las plantas adquieren sus nutrientes esenciales para su desarrollo a través de las hojas y de las raíces. El dióxido de carbono es absorbido a través de los estomas, y es la fuente principal suministradora de carbono y oxígeno. El agua y los restantes elementos químicos que generalmente se incorporan a la planta por sus raíces también pueden ser absorbidos por las hojas. Las aplicaciones por vía foliar de estos últimos pueden ser utilizadas cuando surgen deficiencias que requieren ser subsanadas de forma inmediata.

Sin embargo, la absorción de los elementos nutritivos por las plantas se efectúa mayoritariamente por medio de las raíces jóvenes, al nivel de los pelos radiculares. Durante el periodo de actividad de la planta se desarrollan de una manera continua, y están continuamente renovándose, ya que su vida es muy corta, tan solo de varios días. A medida que la raíz se alarga, se va incrementando su número, con lo que se amplía el contacto de la planta con nuevas partes del suelo. En condiciones normales pueden llegar a alcanzar una cifra de 200-300 pelos por milímetro cuadrado, lo cual representa una gran superficie en la captación de nutrientes.

Aparte de la función absorbente que realizan estas raicillas, segregan sustancias dotadas de cierto carácter ácido que les permite solubilizar, en parte, compuestos difícilmente solubles, situados en sus cercanías: fosfatos, carbonatos, óxidos de hierro y manganeso, etc. Esta acción solubilizante, en la que también participa el dióxido de carbono producido durante la respiración radicular, hace que la planta disponga de mayores posibilidades para su alimentación.

9.1. MECANISMO DE ABSORCION. TEORIAS.

El mecanismo de absorción de los elementos nutritivos, en las fases sólida y líquida del suelo, puede explicarse mediante dos teorías: 1ª) La teoría del intercambio por contacto; y 2ª) La teoría del intercambio del ácido carbónico. Ambas han sido ampliamente criticadas, pero continúan siendo,

entre otras, las más aceptadas por las posibilidades que presentan teniendo en cuenta los conocimientos que se tienen del suelo y de la planta en su conjunto.

Según la hipótesis del intercambio por contacto, los iones pueden ser transferidos de los coloides a la raíz, sin aparecer como iones libres en la disolución del suelo. Sus autores explican que existe un contacto entre los espacios de oscilación de los iones adsorbidos. Un ión adsorbido electrostáticamente por una partícula sólida, sea la raíz de una planta o una micela coloidal, no queda retenido con demasiada fuerza, sino que oscila dentro de un determinado y pequeño volumen. Cuando el volumen de oscilación de un ión coincide en parte con el del otro, puede establecerse entre ellos un intercambio. Un diagrama representativo de esta hipótesis se muestra en la figura 9.1.

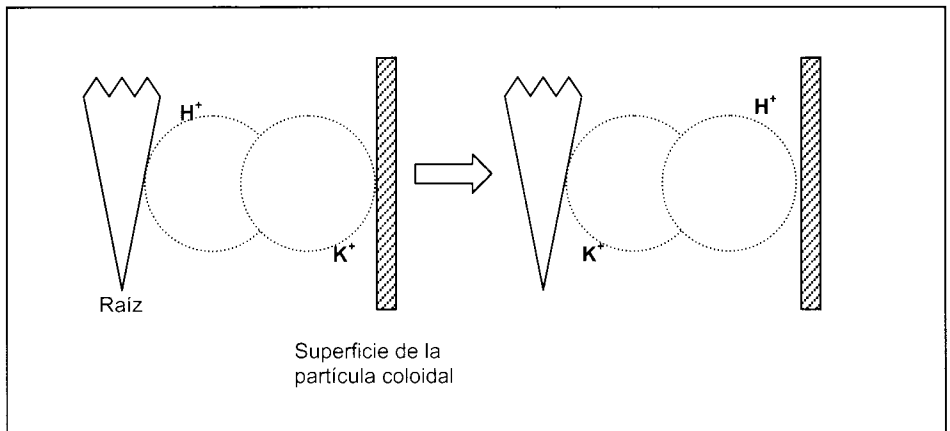


Figura 9.1. Absorción de nutrientes mediante intercambio por contacto.

En la teoría del intercambio del ácido carbónico, la disolución del suelo desempeña un papel importante, ya que representa el medio para el intercambio de iones entre la raíz y las partículas coloidales. Según esta teoría, el dióxido de carbono liberado por la respiración de la raíz origina ácido carbónico al ponerse en contacto con la disolución del suelo. Posteriormente, el ácido carbónico se disocia para formar H^+ y CO_3H^- . Los iones H^+ se difunden hasta el coloide y son intercambiados con los cationes adsorbidos sobre su superficie. Estos, que estaban inicialmente adsorbidos sobre la superficie coloidal, son liberados a la disolución del suelo. En esta situación pueden difundirse libremente hasta la superficie de la raíz y ser absorbidos a cambio

de H^+ , o en forma de iones equilibrados con ión bicarbonato. El mecanismo representativo de esta teoría se expone en la figura 9.2.

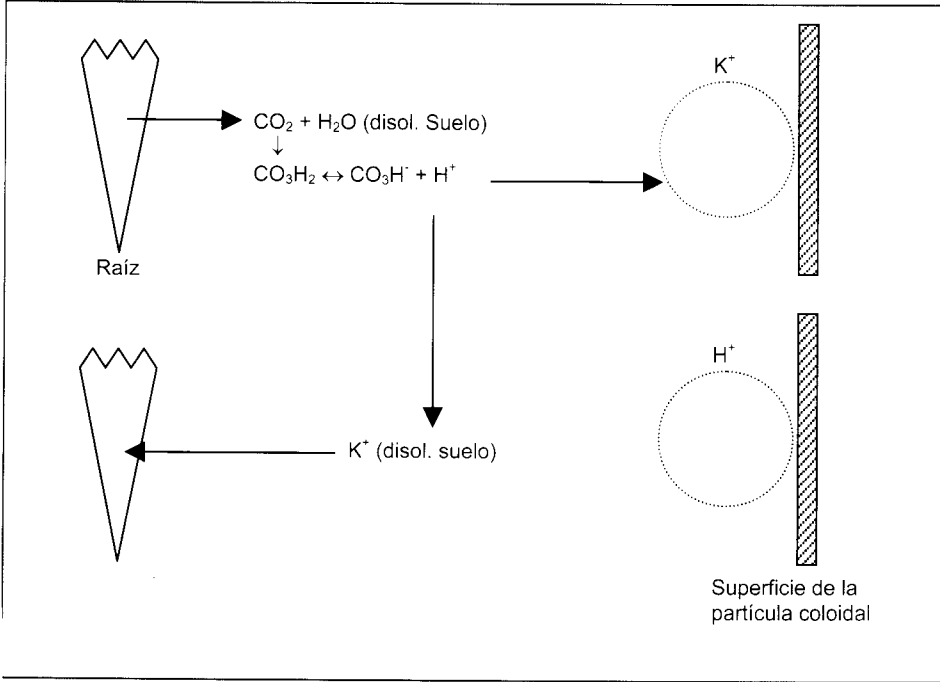


Figura 9.2. Absorción de nutrientes mediante intercambio por medio del ácido carbónico.

Es posible que en ciertos suelos se verifiquen ambos tipos de intercambio, dependiendo la intensidad relativa de estos dos mecanismos de diversas variables, como pueden ser: contenido de la disolución del suelo, pH, grado de saturación del coloide y naturaleza de los cationes adsorbidos.

Las teorías expuestas conducen a considerar que un elemento es *asimilable* cuando se encuentra en estado soluble en la disolución del suelo, o cuando está incorporado en el enjambre de iones fijados al complejo adsorbente; y es *inasimilable* cuando es inmóvil, incorporado, por ejemplo, a una molécula sólida mineral u orgánica.

En el primer caso, los iones de la disolución están sometidos a una agitación térmica que les lleva a desplazarse continuamente a través de todo el espacio ocupado por el agua del suelo, yendo así de las paredes externas de las partículas sólidas hasta la superficie libre de las películas de agua. y

cuando no son captados por las raíces retornan en sentido inverso. Cuando de la disolución del suelo, un ión pasa a la planta, es necesario, para que las necesidades de ésta sean cubiertas y que su equilibrio no se retrase, que este ión sea reemplazado por otro del mismo elemento liberado por el complejo, y que éste último sea suministrado por la liberación de iones procedentes de las reservas del suelo.

Un esquema muy general que puede resumir los distintos movimientos e intercambios de iones entre el suelo y la planta, en su aspecto global se expone en la figura 9.3.

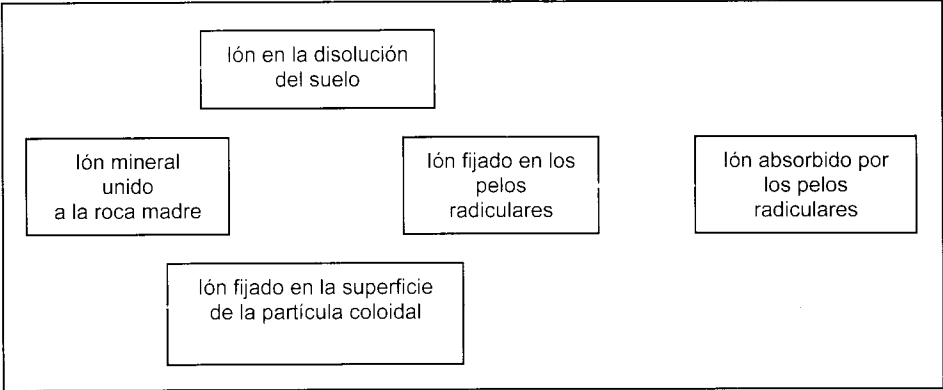


Figura 9.3. Esquema representativo de los distintos movimientos e intercambio de iones entre el suelo y la planta.

Cuando un elemento es inasimilable hay que tener en cuenta dos posibilidades: a) que el elemento esté englobado en una molécula mineral difícilmente alterable; o b) que se encuentre solamente de una manera eventual al margen de las condiciones de absorción. El primer caso está representado, por ejemplo, en el potasio incluido en la estructura resistente de los silicatos, o por el fósforo en el estado de fosfato aluminico cristalizado. En ambos casos, estos elementos se consideran como inertes, constituyendo una reserva que no interviene más que a un largo plazo. El segundo caso agrupa los iones bloqueados en los poros cercanos a las raíces, los atrapados entre unidades cristalinas de algunas arcillas, o los asociados al humus en forma de compuestos organominerales con posibilidades de ser degradados por los microorganismos del suelo. Bajo estas diversas formas, los elementos nutritivos constituyen un potencial de iones que pueden convertirse en asimilables más fácilmente y en un periodo de tiempo más breve.

En su aspecto cuantitativo, la absorción de los elementos nutrientes por las plantas puede alcanzar, para el caso de los macronutrientes, valores del orden de 100 Kg/Ha, e incluso más de 200 Kg/Ha, particularmente para el potasio. Las cantidades varían según el elemento de que se trate y según la planta. El nitrógeno y el potasio son generalmente los elementos mayoritariamente absorbidos. Los otros macronutrientes, en comparación con los anteriores, son absorbidos en cantidades mucho menores, a excepción del calcio que para determinadas plantas es importante.

Los micronutrientes son siempre absorbidos en cantidades cien a mil veces inferiores a las de los macronutrientes.

9.2. FACTORES INFLUYENTES EN LA ABSORCIÓN MINERAL.

Un amplio número de factores influye grandemente en la absorción de los elementos nutrientes por la planta y, en consecuencia, en su composición posterior. Todos ellos están íntimamente relacionados entre sí, por lo cual es muy difícil concretar la verdadera influencia de cada uno por separado. No obstante, y de forma general, admitiendo una cierta constancia de los demás frente a cada uno en particular, puede darse una suficiente información. Pueden clasificarse en tres grupos, según su relación con el suelo, con la planta o con las condiciones climáticas.

9.2.1. RELACIONADOS CON EL SUELO.

Textura.

Los suelos de textura fina presentarán, debido a la gran superficie de sus partículas constituyentes, mayores posibilidades de contacto con los pelos absorbentes que los de textura gruesa. En otro aspecto, y también por el mismo motivo, una mayor facilidad de actuación de los agentes de alteración con liberación de nutrientes asimilables a la disolución del suelo o al complejo adsorbente coloidal.

Porcentaje de oxígeno en el aire del suelo.

La absorción mineral se inhibe por la ausencia de oxígeno en el aire del suelo. Por ello, no sólo es importante un porcentaje adecuado de oxígeno,

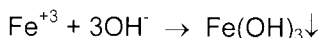
sino también lo es la proporción en la que se difunde para mantener una conveniente presión parcial en la superficie de la raíz. A medida que la atmósfera se enriquece en oxígeno, la absorción aumenta, al igual que la respiración.

Las intensidades máximas de absorción varían según la planta, y son fiel reflejo de su adaptación al medio. En general, las raíces no empiezan a reducir su absorción hasta valores inferiores del 10% de oxígeno en el medio. En el arroz, al desarrollarse en condiciones de completa inmersión en el suelo, el valor anterior viene a ser del 3%.

pH del suelo.

La reacción del suelo afecta generalmente a la absorción por su influencia en el estado de asimilación del nutriente, o en la cantidad del mismo disponible. Los casos más representativos de esta influencia son: bloqueo o inhibición, precipitación recíproca y volatilización.

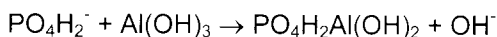
El bloqueo se produce a determinados valores de pH, en los que el elemento, debido a sus características físico-químicas se transforma en inasimilable al pasar a formar parte de un compuesto insoluble. Este es el caso, por ejemplo, del hierro, manganeso y cobre, los cuales a pH básico precipitan, originando hidróxidos insolubles:



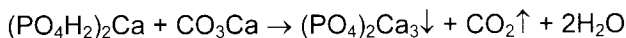
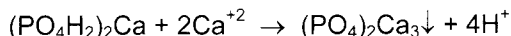
La precipitación recíproca es un proceso químico de doble precipitación. Es la que se presenta en suelos ácidos, ricos en hierro o aluminio, en donde el fósforo soluble en estado de PO_4H_2^- precipita con Fe^{+3} y Al^{+3} , o con sus hidróxidos correspondientes. En condiciones de alta acidez, la reacción que se produce es:



Mientras que si las condiciones del suelo son de baja acidez, la reacción es:



O bien en suelos calizos, básicos, cuando se adicionan al suelo fertilizantes fosfatados solubles:



La volatilización se presenta específicamente en el nitrógeno. Cuando los fertilizantes amónicos se aplican a la superficie de suelos cálidos y básicos la absorción del nutriente puede reducirse notablemente por pérdidas de amoniaco:



Menos directa, pero también digna de ser señalada, es la influencia sobre las actividades de los microorganismos del suelo. Algunas de estas pueden quedar, en determinadas condiciones de pH, inhibidas o paralizadas. Tal es el caso de la nitrificación a pH ácidos, lo cual origina una menor absorción del nutriente.

Interacciones iónicas.

Los elementos nutritivos en estado de iones pueden ejercer los unos sobre los otros acciones que conducen a reducir o aumentar su absorción por la planta, mediante mecanismos no totalmente establecidos, de naturaleza físico-química, química o biológica. Estas interacciones se conocen respectivamente como antagonismos y sinergismos.

Se dice que hay antagonismo entre dos iones A y B cuando manteniéndose constante A, el otro B tiende a inhibir la absorción del primero si su concentración aumenta en el medio. El efecto llega a ser máximo cuando la concentración de B llega a ser mayor que la de A.

Los principales antagonismos que se presentan en la nutrición de las plantas cultivadas se observan entre sodio/calcio, potasio/calcio, potasio/magnesio y calcio/magnesio. Un ejemplo del antagonismo potasio/calcio y potasio/magnesio se puede observar en la figura 9.4. Los datos representados corresponden a una experiencia realizada sobre maíz, utilizando disoluciones nutritivas.

Se observa que al aumentar la concentración de potasio en el medio, la absorción del calcio, y más aún la del magnesio, disminuyen.

Normalmente, estos antagonismos no suelen presentarse cuando los iones fijados al complejo coloidal guardan una debida proporción. En este sentido, se admite que un complejo bien equilibrado debe contener: 70-75% de calcio, 8-15% de magnesio y 2-2'5% de potasio. Cuando las relaciones K/Mg, K/Ca y Mg/Ca, expresadas en miliequivalentes son superiores a la unidad, es frecuente que aparezcan.

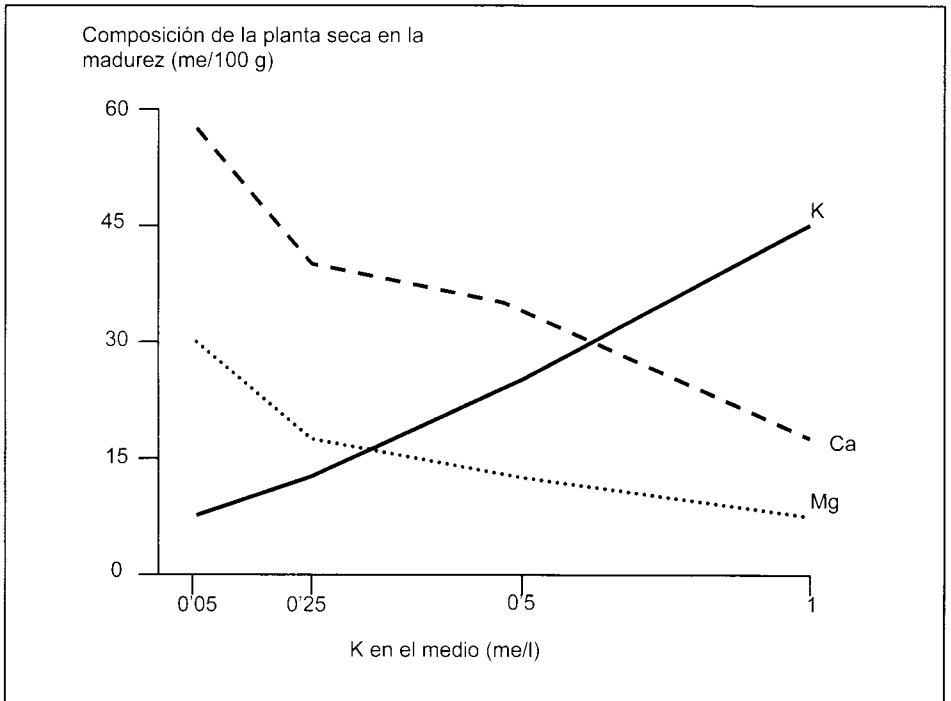


Figura 9.4. Antagonismos K/Ca y K/Mg en maíz (G. Barbier, 1936).

El sinergismo se puede definir como la acción excitante que produce un elemento A sobre la absorción de otro B, contribuyendo ambos a favorecer o aumentar el desarrollo de la planta. Un ejemplo que pone claramente de manifiesto este efecto se muestra en la figura 9.5. Los datos representados en este caso corresponden a una experiencia de campo con espinacas.

Como puede observarse, al añadir mayor cantidad de fertilizante nitrogenado, más debe elevarse la cantidad de potasio. Se puede ver también que en ausencia de fertilizante nitrogenado los rendimientos son menores, aunque las dosis de nitrógeno sean más elevadas.

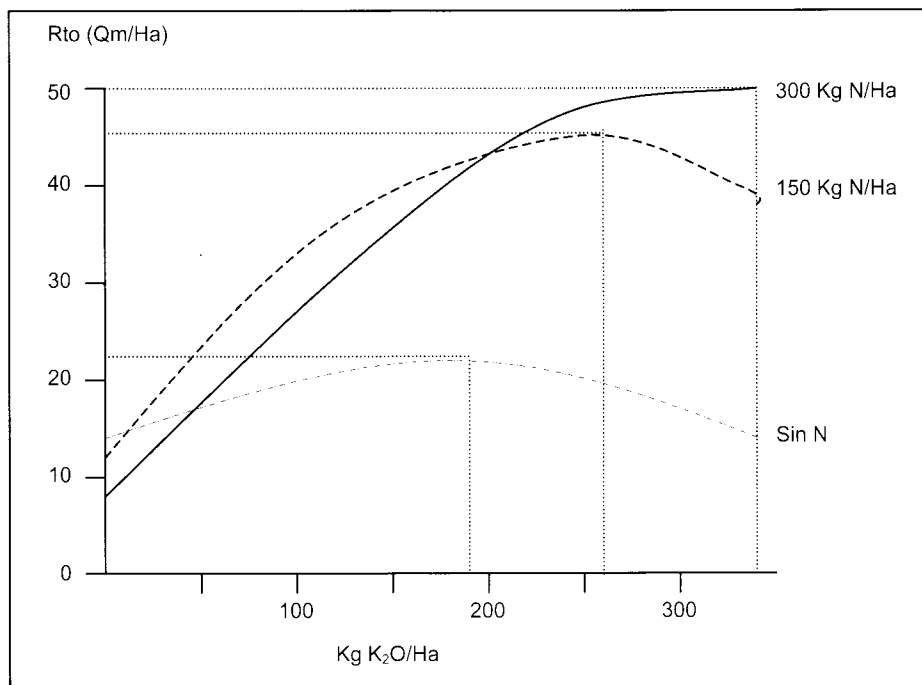


Figura 9.5. Sinergismo N/K en espinacas (A. Anstett, 1961).

9.2.2. RELACIONADOS CON LA PLANTA.

Naturaleza de la planta.

Las plantas difieren unas de otras en su poder de absorción. Plantas distintas cultivadas en un mismo suelo pueden tener una alimentación mineral diferente, tanto bajo el punto de vista cualitativo como cuantitativo. E incluso variedades distintas de una misma especie vegetal no actúan del mismo modo. El análisis de cultivos asociados de leguminosas y gramíneas, por ejemplo, pone de manifiesto que las leguminosas son siempre más ricas en nitrógeno, calcio y magnesio, mientras que las gramíneas absorben más

fácilmente potasio. En el trigo está perfectamente demostrado que, con la misma productividad, los de primavera tienen exigencias superiores a los de otoño. Y en el caso de la remolacha está comprobado que la azucarera, cuando se cultiva seleccionada, presenta unas menores necesidades de sustancias minerales para la elaboración de 100 Kg de azúcar.

Fase de desarrollo.

Las plantas jóvenes absorben rápida e intensamente los elementos minerales. Su proporción, referida a materia seca, es entonces máxima, después disminuye aunque la absorción prosigue durante el crecimiento, debido al predominio creciente de los glúcidos que se van sintetizando.

Las gráficas siguientes, obtenidas a partir de datos experimentales, demuestran que es frecuente encontrar porcentajes de cenizas elevados en la planta joven, y bajos cuando alcanza la madurez (Figuras 9.6. y 9.7.).

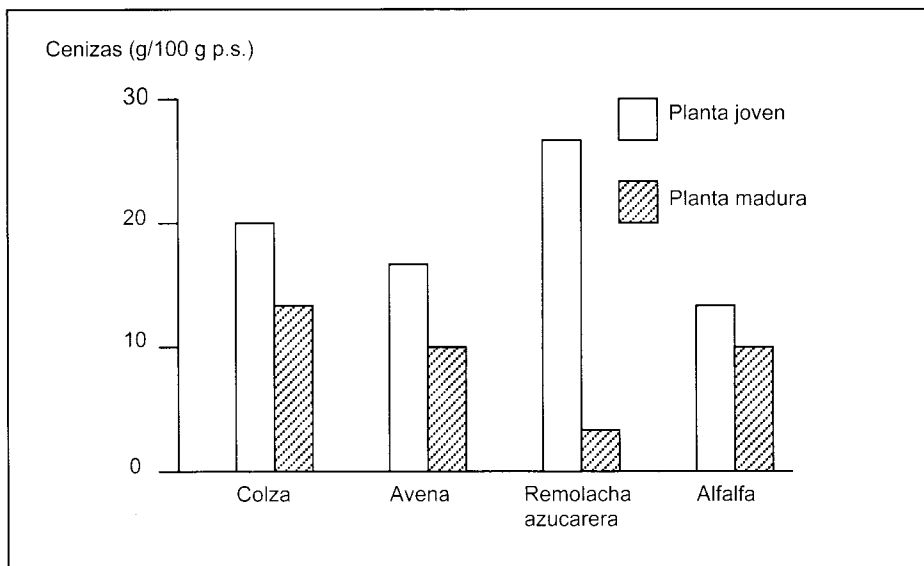


Figura 9.6. Contenido de cenizas en plantas jóvenes y adultas de cebada. Valores medios de diversas estimaciones.

Las plantas jóvenes suelen ser por ello corrientemente utilizadas para determinar los elementos asimilables del suelo, y para la caracterización de las deficiencias minerales que, generalmente, pueden presentarse en los cultivos.

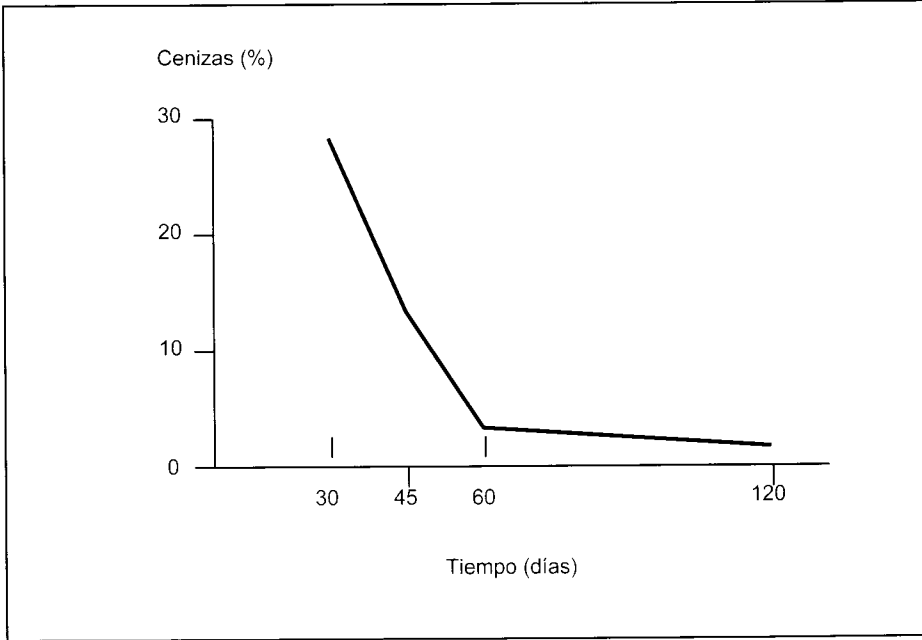


Figura 9.7. Contenido en cenizas en plantas jóvenes y adultas de diversos cultivos. Valores medios de diversas estimaciones.

9.2.3. RELACIONADOS CON LAS CONDICIONES CLIMATICAS.

Temperatura.

En general, dentro de los límites fisiológicos (0-40°C), un aumento de la temperatura provoca una mayor absorción de iones. Ello puede atribuirse, entre otras causas, a que la disolución del suelo tiende a estar más concentrada. Sin embargo, cuando se superan los 40°C, la absorción se va paralizando, debido posiblemente a la deshidratación de los enzimas que intervienen directamente en el proceso, o bien porque se inhibe la síntesis de algún componente indispensable.

Las temperaturas bajas, por el contrario, aparte de provocar una disminución en la solubilidad de los componentes de la disolución del suelo, dificultan muchas reacciones bioquímicas que intervienen en el transporte de los nutrientes hacia el interior de las plantas.

Humedad.

También, y generalizando, la absorción mineral se incrementa al aumentar, dentro de unos límites, la humedad del suelo. Hay que tener en cuenta que el agua es requerida por la planta para la producción de glúcidos, para mantener la hidratación del protoplasma y como vehículo para el traslado de los nutrientes absorbidos por la raíz. Estos procesos tienden a reducirse al disminuir la humedad del suelo, y ello explica, aparte de la lixiviación, el mayor agotamiento de las reservas del suelo en climas húmedos. La influencia de este factor se pone de manifiesto en la experiencia representada en la figura 9.8.

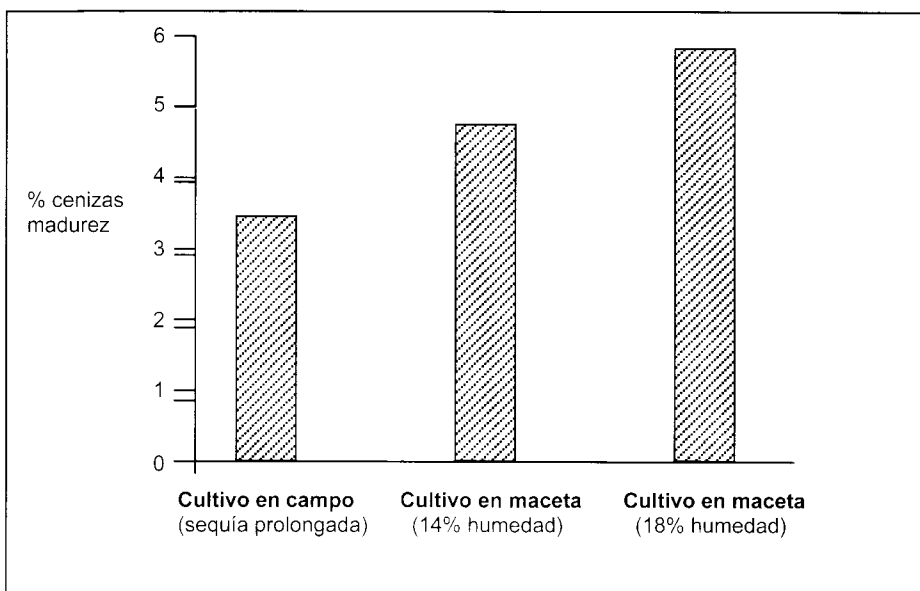


Figura 9.8. Influencia de la humedad sobre la composición mineral de la avena (J. Gasola, 1934).

Se cultivó avena en campo y en maceta con la misma fertilización. En las macetas la humedad se mantuvo al 14% en un caso y al 18% en otro. Se observa claramente que una humedad apropiada favorece la absorción de los nutrientes minerales.

Luz.

La luz no tiene sobre la nutrición mineral más que un efecto indirecto. Un aumento de la iluminación produce un incremento de las reservas carbonadas y de la transpiración. Por consiguiente, tiende a favorecer.

10

EL NITROGENO EN LA PLANTA.

El nitrógeno es un elemento esencial para todos los seres vivos. Además de ser un componente específico de las proteínas, está presente en la mayor parte de las combinaciones orgánicas de las plantas y es totalmente volátil por calcinación. Este último hecho ha sido, posiblemente, la causa que ha retrasado el desarrollo de la información sobre su esencialidad. No obstante, puede decirse que ya en la segunda mitad del siglo XVII se admitía, como resultado de las experiencias realizadas por J.R. Glauber (1650) y por J. Mayow (1670), que las plantas requerían nitratos para su crecimiento, y que estos compuestos debían considerarse como el "principio de la vegetación".

La demostración definitiva de la esencialidad del nitrógeno fue establecida a partir de 1847 por J.B. Lawes y J.H. Gilbert, fundadores de la Estación Experimental de Rothamsted.

En el momento actual está suficientemente demostrado que el nitrógeno es el factor limitante más común del crecimiento de las plantas, y que un deficiente suministro puede provocar notables descensos en la producción vegetal, fuente ésta, directa o indirecta, de las sustancias proteicas que aseguran la nutrición del hombre y de los animales en general.

10.1. ORIGEN, CONTENIDO Y FORMAS.

Si se exceptúa el caso de las leguminosas y de algunos otros organismos vegetales muy concretos, capaces de fijar el nitrógeno molecular atmosférico por vía simbiótica microbiana, y las pequeñas cantidades de amoníaco gaseoso que las partes aéreas de las plantas pueden fijar de la atmósfera en determinados momentos, es en el suelo donde la mayor parte de las plantas cultivadas encuentran el nitrógeno que les es necesario.

Las proteínas y compuestos con ellas relacionados, que constituyen en gran parte la materia nitrogenada depositada en el suelo a la muerte del vegetal, junto con la añadida al mismo de otras procedencias, son directamente de poco valor para las plantas superiores. Pero este material, por

la acción de los microorganismos del suelo, es degradado y transformado sucesivamente, mediante un conjunto de procesos químicos y bioquímicos, dando lugar a productos simples, que aparecen casi siempre en forma de compuestos amónicos, nitrosos y nítricos. Bajo estas formas, y mediante su sistema radicular, la planta absorbe el nitrógeno que le es necesario para la síntesis de sus tejidos. Aproximadamente, se considera que este elemento constituye el 2 % en peso seco de las plantas.

Los mayores contenidos de nitrógeno en las plantas se encuentran en los tejidos jóvenes. En estos, el porcentaje suele oscilar entre 5'5 y 6'5 % en peso seco. A medida que la planta avanza en edad, la proporción de celulosa aumenta, el porcentaje de nitrógeno disminuye y se eleva la relación C/N. Las hojas suelen ser más ricas en nitrógeno, pero su valor disminuye durante la floración. De todas las especies, las leguminosas son las que están mejor provistas de nitrógeno.

En la planta, el nitrógeno se encuentra fundamentalmente bajo forma orgánica. Las materias nitrogenadas de reserva están esencialmente constituidas por proteínas, que difieren según las especies vegetales. Pero el nitrógeno no se encuentra solo bajo forma proteica, sino también en forma de compuestos más simples, que constituyen los intermediarios entre los compuestos nitrogenados minerales absorbidos y las sustancias proteicas de síntesis. Así, el nitrógeno se encuentra en moléculas tan importantes como las purinas, pirimidinas, porfirinas, vitaminas, alcaloides y enzimas.

En los órganos vegetativos, tales como las hojas, se encuentra al lado de proteínas cloroplastidiales o citoplasmáticas, del 20 al 40 % de nitrógeno bajo la forma soluble, en gran parte como aminoácidos libres, y también como aminoácidos amidados (asparragina y glutamina). Bajo estas formas, las sustancias nitrogenadas sintetizadas en la hoja contribuyen a la síntesis de las proteínas.

La urea, ácido úrico, alantoína, ácido cianhídrico combinado en forma de glucósidos, y otros compuestos nitrogenados diversos están igualmente presentes en los vegetales, aunque en débil proporción.

El nitrógeno puede hallarse en la planta bajo formas inorgánicas, compuestos amónicos, nitritos y nitratos, pero solamente constituyendo una pequeña proporción del total. Los nitratos se encuentran siempre en cantidades más o menos importantes cuando en la planta se presentan anomalías metabólicas que impiden la síntesis proteica. El tallo de la planta parece ser el lugar preferente de almacenamiento. Los valores máximos suelen observarse en el periodo que precede inmediatamente a la floración.

10.2. INTEGRACION EN LA PLANTA.

10.2.1. ABSORCION.

La forma de asimilación del nitrógeno (nitrato o amoniacal) depende en gran manera de la edad de la planta y de la especie; y también del pH del suelo, de su composición, e incluso de la pluviometría anual. La remolacha manifiesta una marcada preferencia por el nitrógeno nítrico, explicable porque los suelos más apropiados para este cultivo tienen un $\text{pH} = 7\text{-}7.5$, que corresponde al valor óptimo de nitrificación. El maíz y la cebada se desarrollan de forma satisfactoria en suelos privados de sus nitratos, utilizando sólo nitrógeno amoniacal. En los suelos ácidos, normalmente sometidos a lluvias continuas, y donde se inhibe notablemente la nitrificación, las plantas pueden adaptarse a una asimilación amoniacal: árboles frutales, patatas, arroz, etc.

Sin embargo, en la mayoría de los suelos cultivados, las plantas superiores absorben el nitrógeno del suelo fundamentalmente en forma de nitrato. Esta preferencia es comprensible si se tiene en cuenta, aparte de la reacción, el poder adsorbente del suelo. Los coloides pueden fijar ampliamente los iones amonio, mientras los nitrato conservan una completa movilidad. Esto trae como consecuencia una menor utilización del nitrógeno amoniacal y una mayor posibilidad de absorción del nitrógeno nítrico, salvo, como es lógico, en suelos muy húmedos, en los que suele haber pérdidas importantes de nitratos por lixiviación. Por otra parte, hay que tener en cuenta que en los suelos de cultivo, los iones amonio añadidos se oxidan rápidamente a nitratos y, por tanto, siempre será ésta la forma presente en mayor proporción en la disolución del suelo.

10.2.2. REDUCCION DEL NITRATO.

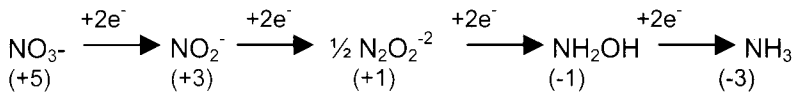
Los conocimientos actuales del metabolismo vegetal permiten asegurar que el nitrógeno absorbido bajo la forma de nitrato no puede ser utilizado por la planta. Para que ello sea posible, es necesario previamente su reducción hasta la forma amónica. Es entonces cuando puede incorporarse como constituyente de los diversos compuestos nitrogenados que integran su organismo.

La reducción del nitrato a la forma amónica precisa de una determinada energía. En este aspecto, los glúcidos de reserva de la planta y las sustancias fotosintéticas, no solamente le proporcionan los esqueletos carbonados necesarios para la incorporación del grupo amonio, sino también la energía y el hidrógeno requerido para esta reducción. Muchos investigadores han

observado que, en condiciones de elevada reducción de nitratos y de asimilación en la oscuridad, los niveles de glúcidos en la planta disminuyen de modo significativo. La disminución de los niveles de glúcidos en estas mismas condiciones, pero en la luz, no es tan grande, a causa de los efectos compensadores de la fotosíntesis.

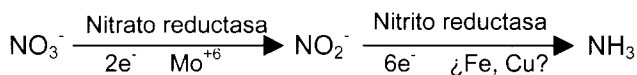
La reducción del NO_3^- a NH_4^+ no se verifica en una sola etapa. Gran número de experiencias empleando bacterias, hongos y plantas superiores, han puesto de manifiesto que la reducción del nitrato a amoníaco se verifica a través de la forma nitrito. Este hecho está confirmado con la identificación de nitritos en los tejidos vegetales, y el aislamiento de un enzima capaz de catalizar esta reducción. Si se suministra a plantas de tomate empobrecidas en nitrógeno una dosis copiosa de nitrato cálcico, después de 36 horas se presentan nitritos, que desaparecen seguidamente.

Respecto a otros posibles estadios intermedios, algunos investigadores, basándose en consideraciones puramente químicas, propusieron, a fines del siglo pasado, que la reducción biológica del nitrato a amonio debía efectuarse en cuatro pasos sucesivos (ganancia de dos electrones en cada uno de ellos), a través de las formas nitrito, hiponitrito e hidroxilamina:

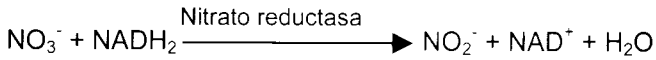


Basándose en estos criterios, los bioquímicos buscaron, y aparentemente encontraron en diversos organismos (bacterias, hongos, algas y plantas superiores), los correspondientes enzimas, a los que denominaron nitrato-reductasa, nitrito-reductasa, hiponitrito-reductasa e hidroxilamina-reductasa. Estos enzimas fueron caracterizados como metaloflavoproteínas dependientes de piridín nucleótidos.

En el momento actual, sin embargo, se admite mayoritariamente que la reducción ocurre sólo en dos etapas, ninguna de las cuales requiere ATP, ni compuestos de carbono. En una primera fase, el nitrato se reduce a nitrito en una reacción que implica dos electrones y está catalizada por el enzima nitrato reductasa. Después, el nitrito se reduce a amoníaco en una reacción que implica seis electrones y catalizada por nitrito reductasa:



El enzima nitrato-reductasa es una flavomolibdoproteína formada por tres grupos prostéticos: el FAD (flavin adenin dinucleótido), citocromo b y molibdeno. El NADH₂ (nicotinadenin dinucleótido reducido), en las plantas superiores es el donador primario de electrones:



La reducción del nitrato a amoniaco está catalizada por una ferropoteína: ferredoxina nitrato reductasa. Este enzima utiliza específicamente ferredoxina como transportador de electrones que recoge de otros sistemas enzimáticos como donadores de electrones.

Al admitir que el nitrato debe ser reducido a amoniaco para que el nitrógeno pueda entrar en el sistema metabólico, se debería observar una asimilación de nitrógeno más rápida cuando se emplea una fuente amónica en lugar de nitrato. En este aspecto, la experimentación realizada ha demostrado que la asimilación de amoniaco es notablemente más rápida en comparación con la asimilación de nitrato, y que las plantas sanas, con un contenido normal de glúcidos, absorben la forma amónica con tanta rapidez a su sistema metabólico que, incluso durante períodos de alta absorción de nitrógeno, sólo se encuentran vestigios de amoniaco libre en los tejidos de la planta. Al igual que con la reducción y la asimilación de nitrato, la asimilación de amoniaco depende, en parte, de la de glúcidos existentes en la planta. Sin embargo, debido a la rapidez de asimilación de nitrato, las reservas de glúcidos de una planta que utilice amoniaco como única fuente de nitrógeno, pueden disminuir hasta un nivel peligrosamente bajo. Por ejemplo, en el caso de la tomatera puede producirse un crecimiento blando, succulento, sin frutos y con mucha parte vegetativa, como consecuencia de una fuerte escasez de glúcidos.

Como fuente metabólica nitrogenada para su crecimiento, muchas plantas pueden utilizar también nitrógeno orgánico, además del nitrógeno inorgánico. Muchos de los aminoácidos y de las aminas suministrarían, así, nitrógeno aprovechable para el crecimiento de la planta. También la urea representa una buena fuente de nitrógeno orgánico. Con algunas posibles excepciones, éstos son los únicos compuestos nitrogenados capaces de suministrar a la planta nitrógeno absorbible en las cantidades requeridas para permitir un crecimiento normal.

10.2.3. BIOSINTESIS DE LOS AMINOACIDOS.

Aminación reductora.

En general, se considera que los compuestos orgánicos iniciales que aparecen durante la asimilación del nitrógeno son los aminoácidos. En la mayoría de los casos, los receptores iniciales del nitrógeno amónico formado en el proceso reductor de los nitratos, o del absorbido directamente como tal, son los α -cetoácidos libres del citoplasma, principalmente el ácido α -cetoglutarico, el cual mediante una aminación reductora origina ácido glutámico.

Experiencias realizadas con sulfato amónico, y seguidas por vía radioquímica (N^{15}), han demostrado que el compuesto marcado más abundante que en un principio se origina es el ácido glutámico. La reacción que se admite es reversible, y en ella el amoniaco reacciona primeramente con el ácido α -cetoglutarico para dar ácido α -iminocetoglutarico, que posteriormente es reducido a ácido glutámico en presencia de NADH y por la acción catalizadora del enzima deshidrogenasa glutámica, que contiene cinc (Figura 10.1.).

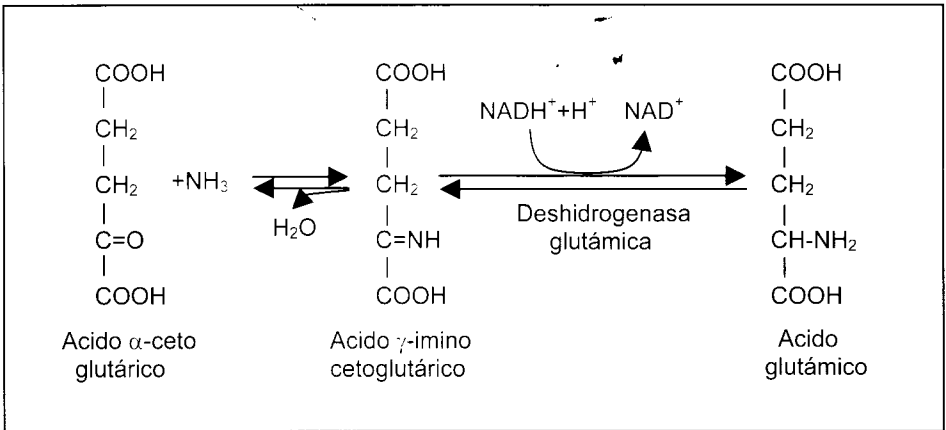


Figura 10.1. Formación del ácido glutámico por aminación reductora.

Esta reacción se ha considerado hasta hace unos años como la principal puerta de entrada del aminoácido en el metabolismo vegetal.

Existen también pruebas indirectas en favor de la aminación directa, pero en mucha menor proporción, del ácido oxalacético y del ácido fosfoenolpirúvico para formar ácido aspártico y alanina, respectivamente; y de la aminación reversible del ácido fumárico para formar ácido aspártico en presencia del enzima aspartasa (Figura 10.2.).

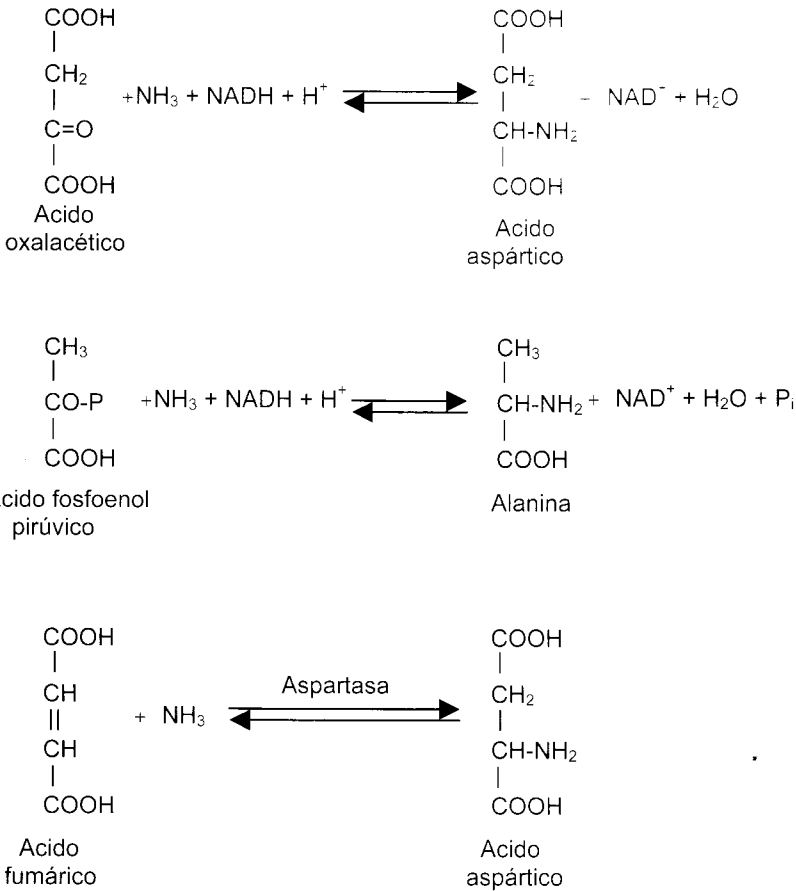


Figura 10.2. Diversas formas de aminación directa.

Sin embargo, muy recientemente, los trabajos de P.J. Lea y B.J. Milfin (1974), B.J. Milfin y P.J. Lea (1977) y T.A. Skokut y cols. (1978), han demostrado la existencia de una alternativa más importante consistente en dos

reacciones en serie, realizadas en los cloroplastos y catalizadas por glutamina sintetasa y glutámico sintetasa (Figura 10.3.). Las dos reacciones pueden resumirse en la forma siguiente:

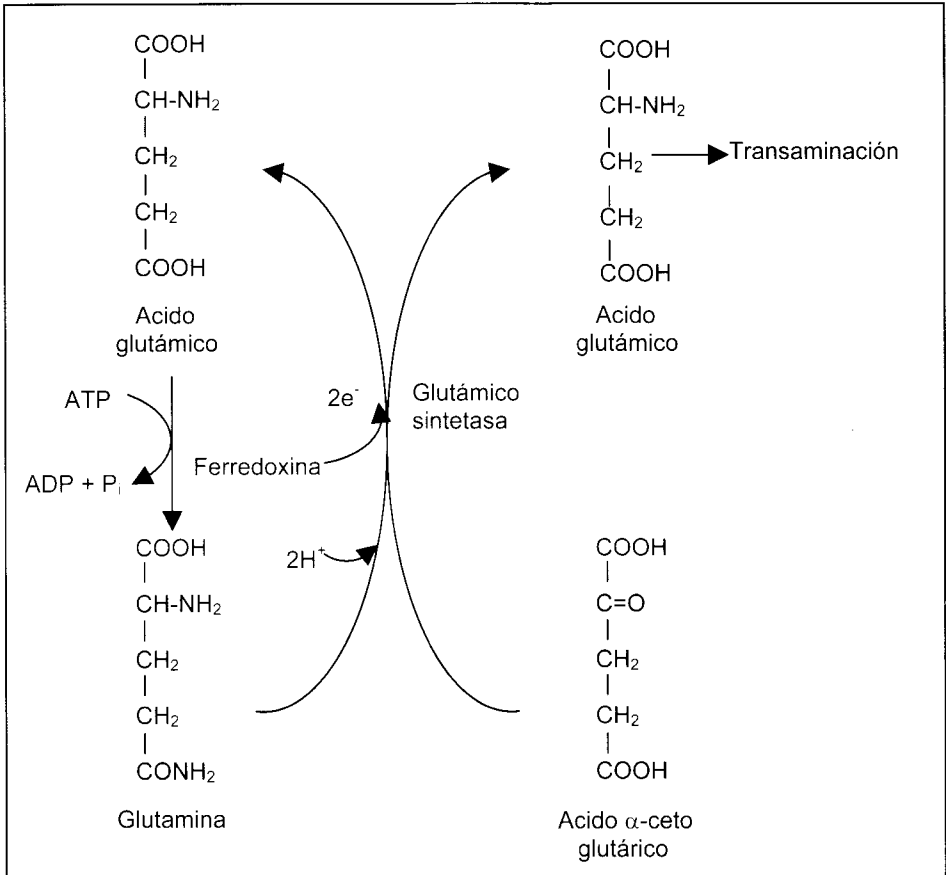
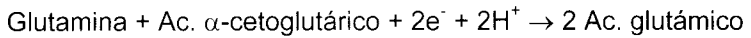


Figura 10.3. Reacciones de la glutamina sintetasa y glutámico sintetasa en la síntesis de aminoácidos (P.J. Lea y B.J. Milfin, 1974).

El sistema es más o menos similar al de la deshidrogenasa glutámica anteriormente expuesto. La mayor diferencia entre ambas reacciones es su afinidad por el amoníaco. Esta es mucho más alta para la glutámico sintetasa,

que es capaz de incorporar el amoniaco en menor proporción a los aminoácidos. Actualmente se considera que la glutamina sintetasa es la mayor aceptora del amoniaco en los cloroplastos, y que el enzima proporciona la más importante vía de asimilación de amoniaco en plantas verdes.

Transaminación.

Una vez que el nitrógeno inorgánico ha logrado entrar en la materia orgánica de modo primario, a través de la aminación reductora de los cetoácidos, los aminoácidos resultantes pueden transferir su grupo amino a otros α -cetoácidos para formar nuevos aminoácidos. Este proceso recibe el nombre de "transaminación", y puede considerarse como el más importante en la biosíntesis de los aminoácidos. Hay que resaltar, sin embargo, que la mayor parte de las reacciones de transaminación se realizan con la intervención de ácido α -cetoglutárico o de ácido glutámico como componentes esenciales.

Los enzimas que participan en las reacciones de transaminación se denominan transaminasas. Son específicos para cada caso y se nombran añadiendo al término genérico los nombres del aminoácido que transfiere el grupo amino y del obtenido como producto final. Así, el enzima que cataliza la transferencia de un grupo amino desde el ácido glutámico al grupo carbonilo del ácido oxalacético, para formar ácido aspártico, se denomina transaminasa glutámico-aspártica.

También está definitivamente establecido que las reacciones de transaminación llevan consigo la participación del fosfato de piridoxal en calidad de coenzima. Según parece, el fosfato de piridoxal, que se encuentra fuertemente unido al enzima, acepta un grupo amino del aminoácido para formar fosfato de piridoxamina, originando por otra parte el correspondiente α -cetoácido. A continuación, el fosfato de piridoxamina cede el grupo amino a otro α -cetoácido, formando un nuevo aminoácido y regenerando el fosfato de piridoxal. La reacción, considerando el ácido glutámico como dador y el ácido oxalacético como aceptor, se representa en la figura 10.4.

La transaminación de los ácidos glutámico y aspártico conduce a la síntesis de la mayoría de los aminoácidos requeridos para la formación de proteínas. Algunos son sintetizados mediante otras secuencias de reacciones, pero en cualquiera de estas vías, el ácido glutámico o los aminoácidos que de él derivan ocupan una posición preferente.

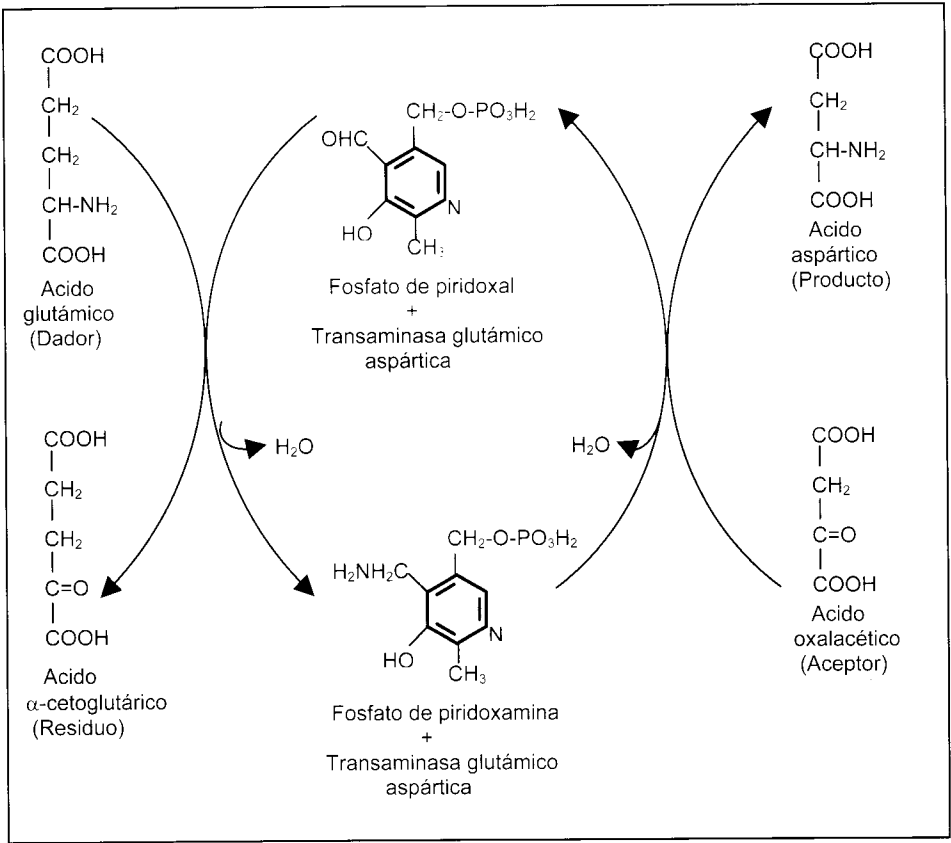
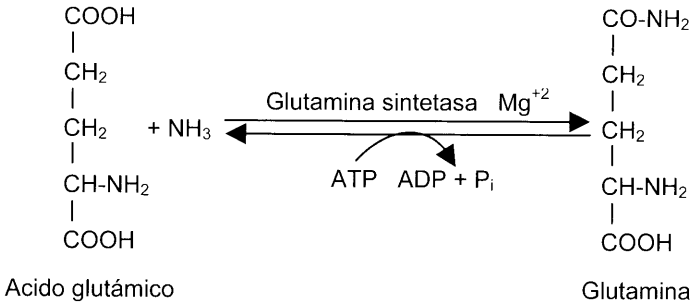


Figura 10.4. Proceso de transaminación en la biosíntesis de aminoácidos.

10.2.4. BIOSÍNTESIS DE LOS AMINOACIDOS AMIDADOS.

Los aminoácidos amidados asparragina y glutamina, encontrados en cantidades relativamente grandes en muchas plantas (posiblemente después de una fertilización nitrogenada amónica intensa), se consideran como compuestos que quedan en reserva para la formación de proteínas, evitando una acumulación tóxica de amoníaco y elevación del pH.

La glutamina se origina a partir del ácido glutámico, por la acción del enzima glutamina sintetasa, activada por un cofactor metálico: Mg^{+2} . Se requiere también el consumo de ATP:



Se supone que la síntesis de la asparragina a partir del ácido aspártico tiene lugar de la misma manera, con la intervención de un activador metálico y de ATP. Sin embargo, la asparragina sintetasa no ha sido aún aislada a partir de tejidos vegetales.

Hay que señalar también que ciertas plantas con jugo celular muy ácido (pH=5), pueden fijar el amoniaco, no por la formación de aminoácidos, sino por neutralización de sus ácidos orgánicos carboxilados (acético, oxálico, málico, etc.) para formar las sales amónicas correspondientes.

El paso, por tanto, del nitrógeno mineral a nitrógeno orgánico en la planta, que a grandes rasgos se ha expuesto en este apartado, puede resumirse en su conjunto a través del esquema simplificado que se expone en la figura 10.5.

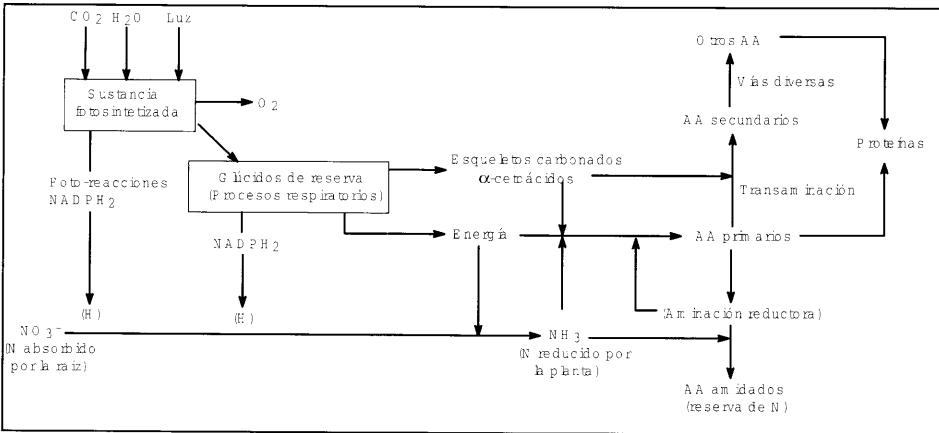


Figura 10.5. Esquema representativo de la integración del nitrógeno en la planta.

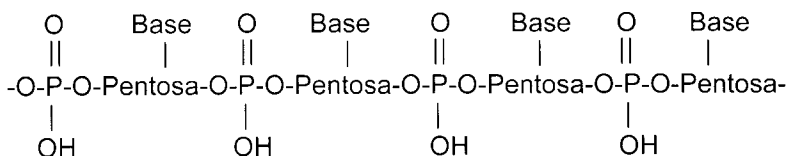
La energía y poder reductor para la transformación del nitrato a amoníaco procede de la respiración (NADPH_2). El verdadero proceso asimilativo es la aminación reductora de los α -cetoácidos derivados de la respiración y de la fase oscura de la fotosíntesis. El ácido α -cetoglutárico es el principal captador de amoníaco. Los aminoácidos primarios originados durante esta aminación reductora pueden ceder el grupo $-\text{NH}_2$ a otros cetoácidos que aparecen durante el metabolismo celular a través del proceso de transaminación. A partir de estos aminoácidos se derivan los restantes aminoácidos, cuyos esqueletos carbonados proceden de productos intermedios del metabolismo de los hidratos de carbono del ciclo de Calvin y del ciclo oxidativo de la pentosa fosfato. A partir de los aminoácidos se originan finalmente las proteínas, ácidos nucleicos y gran número de otros compuestos de nitrógeno.

10.2.5. BIOSÍNTESIS PROTEICA. ASPECTOS BÁSICOS.

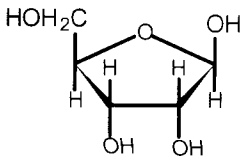
Tal como se ha indicado, los aminoácidos que la planta sintetiza constituyen las unidades estructurales de las proteínas, compuestos estos que forman el material básico de las células y de los enzimas, así como de numerosos anticuerpos y hormonas. Por ello, el conocimiento, aunque sea algo superficial, de cómo se verifica la síntesis proteica es de gran importancia. Sin embargo, para poder abordar el tema es necesario decir algo acerca de los ácidos nucleicos, por el relevante papel que desempeñan en la misma.

Ácidos nucleicos.

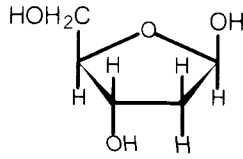
Los ácidos nucleicos son los compuestos que controlan la síntesis bioquímica de las proteínas, y son las moléculas responsables de la transferencia genética de los caracteres durante la reproducción celular. Están formados por grandes moléculas con estructura de polímero, compuestas por unidades más simples llamadas nucleótidos, que a su vez están formadas por tres componentes: una base nitrogenada derivada de la purina o de la pirimidina, una pentosa o desoxipentosa y un agrupamiento fosfórico. Se llama nucleósido a la combinación base-pentosa. Los nucleótidos se encuentran unidos entre sí por puentes pentosa-fosfato:



Los ácidos nucleicos se clasifican en dos grandes grupos, según la pentosa existente en ellos: ácidos ribonucleicos (ARN), que contienen ribosa, y ácidos desoxirribonucleicos (ADN), que contienen desoxirribosa. La diferencia entre estos dos azúcares se encuentra en el segundo carbono:

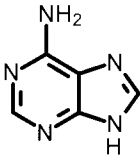


Ribosa
(β -D-ribofuranosa)

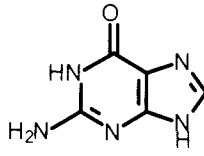


Desoxirribosa
(β -D-2-desoxirribofuranosa)

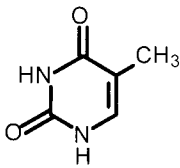
Las bases nitrogenadas de los ácidos nucleicos derivan de la purina y de la pirimidina. La adenina y la guanina son las purinas que se encuentran en estos compuestos, y la timina, citosina y uracilo pertenecen al grupo de las pirimidinas:



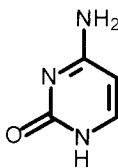
Adenina
(6-aminopurina)



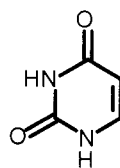
Guanina
(2-amino-6-hidroxipurina)



Timina
(5-metil uracilo)



Citosina
(2-hidroxi-6-amino pirimidina)



Uracilo
(2,4-dioxipirimidina)

También en lo que respecta a estos compuestos, hay aquí una diferencia entre los ADN y los ARN. La timina, de tipo pirimidínico, se encuentra solamente en los DNA, mientras que el uracilo, derivado de la misma base, es exclusivo de los ARN.

Estudios utilizando técnicas de difracción de rayos X, indican que la molécula de ADN posee una estructura en doble hélice, con los dos filamentos unidos entre sí por puentes de hidrógeno, que se establecen entre pares de bases.

Numerosos autores han estudiado también los contenidos relativos en bases de diferentes nucleótidos. Los análisis químicos de la molécula de ADN muestran que existe en ella una relación 1:1 entre la adenina y la timina y entre la guanina y la citosina. Estos resultados hacen suponer que se establece un emparejamiento de bases entre los dos filamentos helicoidales, entre una purina y una pirimidina, no entre dos purinas, ni entre dos pirimidinas. Sin embargo, la cantidad de adenina-timina en relación con la de guanina-citosina puede variar de una molécula a otra de ADN.

Se considera que la molécula de ADN es capaz de autocopiarse, es decir, de sacar réplicas de sí misma. Probablemente, en condiciones apropiadas y en presencia de los enzimas necesarios, las dos cadenas pueden escindirse al desarrollarse la doble hélice, y cada filamento mitad regenerar la mitad que le falta, sacando de sus reservas las bases necesarias.

El ARN tiene también una estructura helicoidal, y está formado por una secuencia de nucleótidos ordenados de la misma manera que en el ADN pero en el emparejamiento de bases, el uracilo ocupa el lugar de la adenina.

Los actuales conocimientos bioquímicos parecen indicar que el ADN puede dirigir la síntesis del ARN actuando como un molde o modelo. De esta forma, la información genética puede pasar del ADN a la molécula de ARN en el curso de la síntesis, la cual, a su vez, dirigirá la síntesis de las proteínas específicas.

Existen dos clases de ARN: los ARN de los ribosomas, o ARN-mensajeros, y los ARN de transferencia. Estos nombres aluden a sus diversas funciones. Desde el punto de vista químico, los dos tipos se distinguen, fundamentalmente, por su peso molecular y su composición en bases. El ARN de transferencia también se denomina ARN-soluble.

Esquema y etapas.

La síntesis de las proteínas se esquematiza en la figura 10.6.

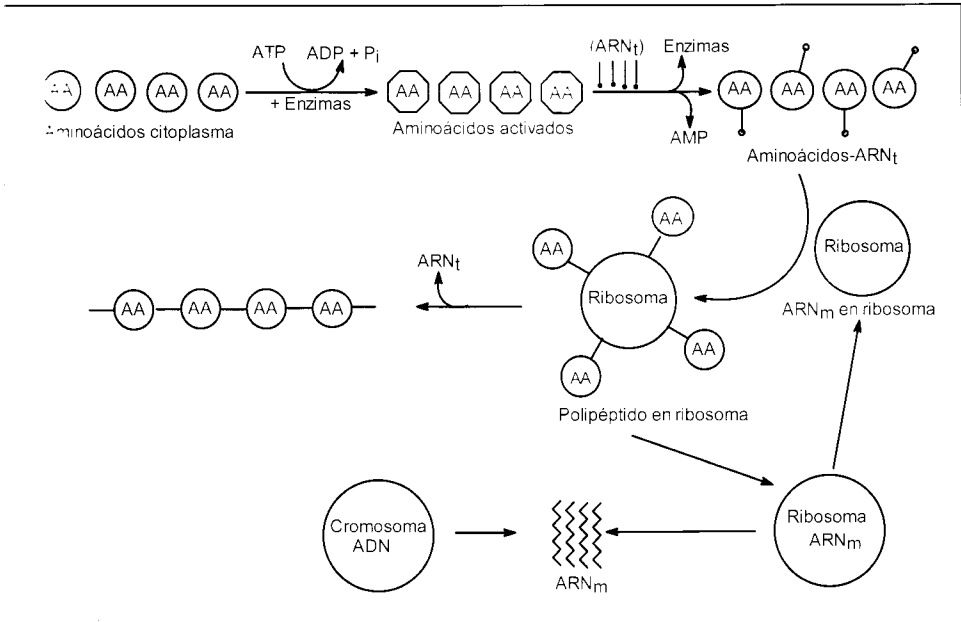
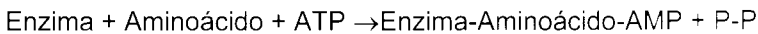


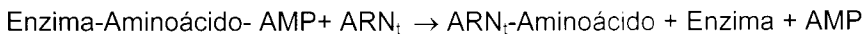
Figura 10.6. Representación esquemática de la biosíntesis proteica y de la participación de los ácidos nucleicos.

Puede dividirse en las siguientes etapas:

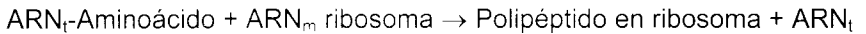
1º) Activación de los aminoácidos libres del citoplasma celular. Consiste en la selección de aminoácidos concretos presentes en el citoplasma. Un enzima de activación específico para cada aminoácido realiza la reacción. Teniendo en cuenta que en el citoplasma celular hay unos 20 aminoácidos distintos, existirán otros tantos enzimas de activación diferentes. En presencia de ATP, el enzima activador cataliza el enlace enzima-aminoácido-monofosfato de adenosina, con separación de dos grupos fosfato:



2º) Unión del aminoácido activado al ARN de transferencia. El aminoácido activado se une a una molécula de ARN de transferencia específica para cada aminoácido:



3°) Formación de enlaces péptidos sobre el ribosoma. La formación de los polipéptidos se efectúa en la superficie de los ribosomas, pequeñas partículas submicroscópicas constituidas por un 65% de ARN, y en donde se encuentran los que actúan como matriz para la síntesis proteica. Se admite que los ADN dirigen la formación del ARN-mensajero. Los complejos ARN_t-aminoácido llegan al ARN -mensajero del ribosoma, en donde tiene lugar una polimerización ordenada de los aminoácidos:



4°) Liberación de polipéptidos. Finalmente, el polipéptido sintetizado se separa del ribosoma:



10.3. FUNCIONES.

Las grandes funciones del nitrógeno en la planta hay que considerarlas sobre la base de su participación como constituyente de un gran número de compuestos orgánicos que son esenciales en su metabolismo. Además de formar parte, como ya se ha visto, de la estructura de todas las proteínas y de moléculas tan importantes como las purinas y las pirimidinas, es componente de los ácidos nucleicos (ADN y ARN), básicos para la síntesis proteica. El nitrógeno se encuentra también como constituyente de las clorofilas y enzimas del grupo de los citocromos (núcleo porfirínico), indispensables para la fotosíntesis y respiración; en varios coenzimas, como fosfato de piridoxal (transaminación aminoacídica) y los nicotinamida-adenin-dinucleótidos (NAD y NADP). Muchos fosfátidos, alcaloides, glucósidos, etc., son compuestos de nitrógeno, abundantes e importantes en la planta.

10.4. ALTERACIONES POR DEFICIENCIA Y EXCESO.

Al estar involucrado el nitrógeno en tantos procesos vitales, no es de extrañar que su deficiencia afecte grandemente el crecimiento de la planta. Una insuficiente nutrición en nitrógeno se manifiesta, en primer lugar, por una vegetación raquítica. La planta se debilita, se desarrolla poco, las hojas permanecen pequeñas, adquieren una notable rigidez y toman un color verde amarillento; el peciolo se acorta y las nerviaciones son más pronunciadas, ya que el desarrollo de las partes suculentas se retrasa. En los casos de grave deficiencia, las hojas adquieren una coloración anaranjada, púrpura o violácea

en los bordes, y la floración es muy escasa. Debido a que el elemento es muy móvil en las plantas, la deficiencia se acusa primero en las hojas más viejas, ya que hay un desplazamiento hacia las más jóvenes.

La vegetación deficiente de nitrógeno viene acompañada de una maduración acelerada del fruto y de una disminución del rendimiento. Esto ocurre más frecuentemente cuando no se administran cantidades adecuadas de otros elementos nutritivos. En algunas especies de frutales, la superficie foliar disminuye notablemente, las yemas tardan en abrir, los brotes jóvenes no crecen y los frutos son pequeños y ácidos, aunque más coloreados. En los agrios, los frutos suelen presentar un contenido mayor de fósforo, debido al parecer a que en condiciones de deficiencia de nitrógeno, el fósforo tiende a acumularse.

La forma más corriente de remediar una deficiencia de nitrógeno es por aplicación de nitratos que penetran rápidamente en la zona radicular de la planta, con tal de que haya suficiente humedad del suelo. La urea es un fertilizante nitrogenado muy adecuado para aplicarlo rápidamente por pulverización foliar. Generalmente, el efecto inicial del nitrógeno de la urea aplicado por vía foliar es más rápido, mayor y de más corta duración que los tratamientos comparables de nitrógeno por el suelo. La urea se utiliza al 0'9 % sin mojante y conteniendo menos del 0'25 % de biuret.

La deficiencia de nitrógeno, sin embargo, es poco probable que se presente en los suelos cultivados. El agricultor, sabedor de la importancia del nitrógeno, suele emplear ampliamente los fertilizantes nitrogenados, llegando incluso a abusar de los mismos con el deseo de forzar la producción sin reparar en la calidad. Muchas veces, esos aumentos no se ven correspondidos por incrementos económicos de cosecha, pero no se reflexiona en esto, deslumbrado por las reacciones, a veces espectaculares, con que las plantas responden a estos fertilizantes.

La abundancia nitrogenada en la planta presenta signos contrarios a la deficiencia. Cantidades excesivas originan plantas muy suculentas, con pocas partes leñosas, disminución muy marcada en el desarrollo de las raíces y con un amplio desarrollo vegetal aéreo. Las hojas toman un color verde muy oscuro y la maduración se retrasa. En muchos cereales alarga el periodo de crecimiento, lo que trae consigo un mayor contenido en paja con relación al grano. Y en muchos cultivos, especialmente en ciertos granos y frutos, como cebada y melocotones, la calidad desciende notablemente.

En los agrios, el exceso de nitrógeno produce fruto con piel gruesa, bajo porcentaje de jugo y poco contenido en vitamina C. Elevadas dosis de

nitrógeno pueden originar, incluso, otras deficiencias que no aparecerían caso de emplearse el nitrógeno a dosis normales. El crecimiento vigoroso que resulta de aplicar con exceso el nitrógeno, provoca también la rápida utilización de otros elementos, que si no se encuentran en cantidades suficientes en forma asimilable, pueden ocasionar deficiencias, como la de cobre, por ejemplo. El exceso de nitrógeno puede ocasionar un crecimiento tan rápido que la planta no pueda proveerse al mismo ritmo del cobre que le es necesario, originándose, con tal motivo, la enfermedad conocida como "exantema" o deficiencia de cobre. En este y otros casos, parece aconsejable el suplementar con oligoelementos, e incluso con magnesio, la fertilización de los árboles, al objeto de que queden mejor satisfechas las necesidades de estos elementos. Con ello se puede evitar el desequilibrio fisiológico que ocasiona la rápida asimilación del nitrógeno y el subsiguiente crecimiento vigoroso de la planta.

También es digno de señalar que una abundancia nitrogenada de la planta puede dar lugar a una mayor sensibilidad a las enfermedades y a las condiciones climatológicas, como sequías y heladas. Al quedar los tejidos durante largo tiempo verdes y tiernos, es más fácil la penetración de esporas germinadas que, una vez en su interior, encuentran en los jugos ricos en nitrógeno una alimentación muy apropiada para su desarrollo.

11

EL NITROGENO EN EL SUELO.

11.1. ORIGEN, CONTENIDO Y FORMAS.

Bajo condiciones naturales, el nitrógeno del suelo no proviene de la degradación de la roca madre. Todo el que normalmente se encuentra en él deriva, en última instancia, del que existe en la atmósfera terrestre a través de los distintos procesos de fijación, fundamentalmente de tipo biológico.

La transformación del nitrógeno molecular atmosférico en nitrógeno del suelo utilizable actual o potencialmente por las plantas, se realiza principalmente según dos procesos: 1°) El nitrógeno puede oxidarse y pasar a la forma de óxidos, por acción de las descargas eléctricas, y estos compuestos, a su vez, trasladados al suelo por la lluvia y depositados en él como ácido nitroso o nítrico. La magnitud de este proceso, aunque no carece de importancia, es pequeña en comparación con las cantidades de nitrógeno molecular que se convierte en orgánico en virtud del proceso: 2°) Fijación biológica, es decir, por medio del conjunto de reacciones gracias a las cuales los organismos vivos integran el nitrógeno molecular en sus estructuras como componente de diversos compuestos. Ciertos microorganismos que viven libremente en el suelo, y otros que viven simbióticamente con determinadas plantas (principalmente leguminosas), son capaces de realizar esta incorporación; ambos grupos son los principales responsables de que se mantenga a un cierto nivel el nitrógeno contenido en el suelo.

La mayor parte del nitrógeno presente en los suelos minerales se encuentra, por tanto, formando parte de la materia orgánica que en el suelo se deposita a la muerte de los citados microorganismos y de las plantas que de ellos se benefician. En esta forma, el nitrógeno no es aprovechable por la planta. Sin embargo, tal como se indicó al considerar la planta, este nitrógeno puede ser transformado y liberado bajo la forma de compuestos más sencillos, mediante un conjunto de procesos fundamentalmente de tipo bioquímico. Todos los suelos contienen en su seno una pequeña cantidad de nitrógeno en forma de compuestos relativamente simples, como aminoácidos, sales amónicas y nitratos. De estos compuestos, especialmente las sales amónicas y nitratos es de donde las plantas obtienen su nitrógeno.

Todo lo expuesto debe aceptarse tan solo en condiciones naturales. Pero en los suelos cultivados, el nitrógeno puede aparecer también por la adición que el hombre realiza de fertilizantes nitrogenados obtenidos sintéticamente a partir del nitrógeno atmosférico o mediante la adición, también de residuos orgánicos de diversa procedencia. Estos hechos explican el por qué el nitrógeno total presente en los suelos cultivados puede variar entre límites bastante amplios, entre 0'01 y 0'5 % y a veces más, aunque lo más frecuente es que oscile alrededor del 0'1 %. En general, puede decirse que la mayoría de los suelos cultivados no son suficientemente ricos en nitrógeno. Los suelos ricos son una excepción, salvo donde hay una acumulación de materia orgánica por falta de mineralización.

El nitrógeno varía más en cantidad en el suelo que los otros elementos esenciales para el desarrollo vegetal, también absorbidos del suelo. En los suelos cultivados considerados en su conjunto, dentro de los límites de una zona climática o dentro de los confines de una finca y, frecuentemente incluso, dentro de una pequeña parcela, el contenido en nitrógeno varía según las condiciones de drenaje, topografía y textura del suelo.

Suelos con un drenaje insuficiente presentan corrientemente altas cifras de humedad y poca aireación; en estos casos, y frente a sus equivalentes con un mayor drenaje, suelen hallarse en ellos un mayor contenido de materia orgánica y nitrógeno. En cambio, los suelos arenosos contienen por lo general menos materia orgánica y nitrógeno que los de textura fina. Esto hay que atribuirlo a la menor humedad y a la más rápida oxidación que se produce en los suelos de textura gruesa.

Repetidamente, también se ha comprobado que en suelos con una textura, topografía y drenaje similares, el contenido en nitrógeno varía frecuentemente con las prácticas de cultivo. Por ejemplo, en la Estación Experimental de Missouri se observó que el contenido de nitrógeno existente en los 18 cm superficiales del suelo en que se había cultivado trigo continuamente, por espacio de 50 años, era de 1978 Kg/Ha, y que el de un suelo similar cultivado con una rotación de maíz, avena, trigo y trébol, durante el mismo periodo de tiempo, era de 2166 Kg/Ha. En ninguno de los casos se aplicó fertilizantes.

Las condiciones climáticas influyen notablemente sobre el contenido de nitrógeno en los suelos. En este sentido, los resultados de diversas experiencias han puesto de manifiesto que un aumento de la temperatura hace disminuir el contenido de nitrógeno, bajo condiciones análogas de humedad, ya que al aumentar la velocidad de mineralización de la materia orgánica presente en el suelo aparece una mayor proporción de compuestos nitrogenados simples

solubles, los cuales, en parte, pueden perderse por lixiviación. El valor absoluto de este descenso depende, como es lógico, de la intensidad de los restantes factores del medio, especialmente la lluvia y vegetación. Pero dentro de zonas en las que estas condiciones sean semejantes, el promedio de materia orgánica y nitrógeno tiende a aumentar dos o tres veces por cada 10°C de disminución de temperatura.

También se ha comprobado que al aumentar la humedad por efecto de las precipitaciones o riegos, permaneciendo constante la temperatura, el nitrógeno aumenta. La explicación de este hecho está no sólo en la reducción de la actividad microbiana, sino también en la aparición de una mayor vegetación en estas condiciones.

La composición química del suelo, en lo que respecta a otros nutrientes esenciales, íntimamente relacionados con un adecuado desarrollo de la vegetación, y los procesos de erosión a los que el suelo puede estar sometido, son otros factores que pueden ejercer una influencia sobre la acumulación y actividad de la materia orgánica del suelo y en su nitrógeno.

El nitrógeno que se halla en el suelo, prescindiendo del que pueda estar en forma elemental como nitrógeno gaseoso en la atmósfera o agua del suelo, o adsorbido en las superficies de los sólidos en pequeña proporción, puede ser generalmente clasificado como inorgánico y orgánico, siendo esta última forma la predominante.

El nitrógeno inorgánico del suelo incluye las formas:



Se cree también que existe NH_2OH , pero como compuesto intermediario en la formación de nitritos a partir del amoníaco, y en determinadas circunstancias.

Las formas nitrito y nitrato se encuentran exclusivamente, o casi exclusivamente, como iones libres en la disolución del suelo. La amónica, en su mayor parte, se encuentra como amonio cambiante y no cambiante, y solamente en pequeña proporción en la disolución del suelo. Ordinariamente, el amonio cambiante y el contenido en la disolución del suelo, junto con las formas nitrito y nitrato, constituyen en conjunto menos del 2 % del nitrógeno total en los suelos. Estas formas son, sin embargo, de gran importancia, pues son las utilizadas por las plantas.

El nitrógeno orgánico se halla como proteínas, aminoácidos libres, aminoazúcares y otras sustancias complejas, en gran parte no identificadas. Estas últimas se originan en las distintas etapas de la humificación y son altamente resistentes a su degradación.

11.2. DINAMICA DEL NITROGENO EN EL SUELO. PROCESOS GENERALES

En todos los suelos, y de forma continua, existen considerables entradas y salidas de nitrógeno, acompañadas de muchas transformaciones complejas. Algunos de estos cambios pueden controlarse más o menos por el hombre, mientras otros están más allá de su control. El conjunto de todos estos procesos constituye una parte importante del ciclo general del nitrógeno en la Naturaleza.

El nitrógeno presente en suelos cultivables procede de materiales diversos: restos de cultivos, abonos verdes, estiércol, fertilizantes comerciales y nitratos aportados por lluvias, así como por la fijación del nitrógeno atmosférico realizada por ciertos microorganismos.

Gran parte del nitrógeno así incorporado al suelo sufre grandes transformaciones antes de ser utilizado por los vegetales superiores. Las proteínas son degradadas, originando productos de descomposición más sencillos y, finalmente, parte del nitrógeno aparece en forma de nitrato. Aún entonces no queda sin transformar, pues es apropiado tanto por los microorganismos como por las plantas superiores para construir sus estructuras proteicas, o reducido, en determinadas condiciones, a su estado elemental.

Las pérdidas se deben a la absorción del cultivo, a la erosión, lixiviación y a su volatilización en condición gaseosa, tanto en forma elemental como en forma de óxidos o de amoníaco.

La dinámica del nitrógeno en el suelo está, pues, altamente influenciada por tres grandes procesos, cada uno de los cuales depende, a su vez, de un conjunto de secuencias íntimamente ligadas entre sí. La distribución de estos procesos puede resumirse en la forma siguiente:

Ganancias de nitrógeno por el suelo.

a) Fijación del nitrógeno atmosférico por microorganismos que viven libremente en el suelo.

b) Fijación del nitrógeno atmosférico por *Rhizobium* u otras bacterias simbióticas.

c) Aportes por el agua de lluvia y nieve.

d) Aportaciones de nitrógeno en fertilizantes, estiércol y plantas verdes.

Transformaciones del nitrógeno en el suelo.

a) Aminificación, o degradación bioquímica de las proteínas y otros compuestos complejos nitrogenados en aminoácidos y aminas.

b) Amonificación, o transformación bioquímica de los aminoácidos, aminas en amoníaco.

c) Nitrificación, u oxidación bioquímica del amoníaco a ácido nítrico.

d) Síntesis proteicas de los microorganismos del suelo, a partir de los compuestos que se originan en el transcurso de los anteriores procesos.

Perdidas de nitrógeno en el suelo.

a) Desnitrificación, o reducción bioquímica de los nitratos bajo condiciones anaeróbicas.

b) Reacciones químicas de los nitritos bajo condiciones aeróbicas.

c) Pérdidas por volatilización del amoníaco, principalmente en suelos alcalinos, cálidos y húmedos.

d) Lixiviación de los nitratos.

e) Asimilación de los nitratos por las plantas superiores.

f) Fijación del amonio por las arcillas con entramado en expansión y en suelos con alto contenido en materia orgánica.

11. 3. GANANCIAS.

11.3.1. FIJACION BIOLÓGICA. TIPOS.

Está perfectamente establecido que el nitrógeno únicamente se puede incorporar en los sistemas biológicos cuando está combinado con ciertos elementos, como el hidrógeno o el oxígeno. En la actualidad, esta fijación se verifica industrialmente en gran escala a través del proceso Haber-Bosch, consistente en la síntesis directa del amoníaco a partir del hidrógeno y del nitrógeno atmosférico a temperatura y presión altas, en presencia de catalizadores.

Sin embargo, aunque la fabricación del amoníaco y otros fertilizantes nitrogenados alcanza hoy cotas muy altas, debe señalarse que la mayor parte del nitrógeno fijado tiene un origen biológico. Según J. Chatt (1976), puede fijarse alrededor de 176×10^6 Tm/año, cantidad cuatro veces superior a la fijada por la industria química.

En la Naturaleza, la fijación del nitrógeno es una facultad reservada a unos cuantos géneros de bacterias y ciertas algas azul-verdosas, que pueden clasificarse dentro del grupo de las bacterias con el nombre de Cianobacterias. Ningún organismo superior presenta esta capacidad, a pesar de que algunos pueden hacerlo indirectamente, a través del establecimiento de asociaciones simbióticas con bacterias fijadoras de nitrógeno. La relación más conocida es la que se verifica entre las plantas leguminosas y diversas bacterias del género *Rhizobium*. Otras bacterias fijadoras de nitrógeno viven asociadas con plantas huéspedes, y muchas viven libremente en el suelo o en el agua. Unas son fotosintéticas, otras requieren oxígeno, y otras, finalmente, solamente pueden vivir en medios anaerobios o faltos de oxígeno.

Todos estos microorganismos se caracterizan por poseer un potente equipo enzimático que les permite fijar directamente el nitrógeno atmosférico; y como en el proceso industrial, el producto inicial que se forma es el amoníaco. Disponen además de un enzima común, la nitrogenasa, que es básicamente el que regula el proceso.

Fijación no simbiótica.

La capacidad de ciertos microorganismos para fijar nitrógeno sin vivir en simbiosis con plantas superiores fue puesta de manifiesto, por primera vez en 1891 por S. Winogradski.

Un cierto número de bacterias heterótrofas es capaz, gracias a la energía liberada por la oxidación del carbono orgánico, de fijar nitrógeno molecular de la atmósfera y de hacer, así, la síntesis de sus constituyentes celulares. Este es el hecho esencial que explica por qué un suelo se enriquece por sí solo en nitrógeno.

Esta fijación puede ser realizada en el suelo por diversas bacterias. Unas aerobias, que actúan en suelos ligeros, bien aireados, ricos en calcio y pobres en nitrógeno asimilable. Estas bacterias, en presencia de un exceso de nitrógeno, tienden a no proliferar para dar paso a otros gérmenes no fijadores de nitrógeno; pero sí lo hacen cuando cesa la actividad de estos últimos al faltar el nitrógeno. Pertenecen a este grupo los géneros *Azotobacter*, *Azomonas*, *Azotococcus*, *Beijerinckia* y *Derxia*. Son todos bastante parecidos: ovoides o en forma de varillas, a veces móviles, formando colonias que se desarrollan bien en medios de agua faltos de oxígeno. Ninguno es capaz de crecer sin aire. *Azotobacter chroococcum* y *Azotobacter vinelandii* son las especies más conocidas dentro del grupo citado, aunque raramente se encuentran en suelos con pH inferior a 6.

Otras bacterias anaerobias del género *Clostridium* actúan, por el contrario, en suelos pesados, mal aireados, o bien en las zonas relativamente profundas de suelos más ligeros, al eliminarse el oxígeno de las capas superficiales por la acción de microorganismos aerobios, especialmente especies butíricas, que liberan una gran cantidad de ácidos a partir de los glúcidos. Son todos anaerobios obligados, y aunque toleran a veces trazas de oxígeno, su metabolismo no puede utilizarlo para nada. En condiciones desfavorables pueden formar esporas, muy resistentes al calor y a la sequedad. El *Clostridium pastorianum*, ampliamente distribuido en el suelo y el más conocido y estudiado, fue el primer microorganismo fijador de nitrógeno que se descubrió, en 1893, por Winogradski.

Ambos grupos de microorganismos fijan cantidades notables de nitrógeno bajo condiciones de laboratorio, pero no se ha establecido todavía qué cantidad fijan bajo condiciones de campo, si bien se sabe que la cantidad fijada está influida no sólo por la naturaleza y cantidad del alimento energético disponible en el suelo, sino también por el contenido de nitrato, fosfatos, calcio, hierro y molibdeno. Los suelos turbosos ofrecen casi siempre las condiciones ideales, ya que contienen grandes cantidades de materia orgánica con una relación C/N alta, y son pobres en nitratos. Por el contrario, cuando existe en el suelo una abundancia de nitratos, la fijación del nitrógeno se reduce, ya que entonces las bacterias tienden a utilizar el nitrógeno de ellos, con preferencia al de la atmósfera. En general, ha habido una especulación considerable acerca de las cantidades de nitrógeno que fijan estos microorganismos que viven

libremente en el suelo. Algunas estimaciones se han establecido entre 20 y 45 Kg/Ha año, pero las cifras que parecen más correctas, basadas en trabajos recientes, indican un grado de nitrificación alrededor de 6-10 Kg/Ha año.

Aunque estos dos grupos de bacterias son, posiblemente, la fuente de la mayor parte de nitrógeno que se agrega al suelo mediante la fijación no simbiótica, recientemente se sabe que otros microorganismos son capaces también de fijar el nitrógeno atmosférico.

Algunos son autótrofos anaerobios, como determinadas bacterias reductoras de sulfatos. Son organismos que aprovechan los átomos de oxígeno de los sulfatos para su respiración, produciendo sulfuros y agua. Tres géneros se conocen dentro de este grupo: Desulfovibrio, Desulfatomaaculum y Desulfomonas, aunque hay que señalar que la propiedad no es general dentro de ningún género. Algunas especies Desulfovibrio presentan una importancia ecológica en el mar, ya que es probablemente el único género fijador marino que no necesita luz. Se le considera como el principal contribuyente del nitrógeno fijado biológicamente en los sedimentos marinos.

Se sabe también que un determinado grupo de bacterias, clasificadas como facultativas, son capaces de crecer con o sin oxígeno del aire, cuando están provistas de nitrógeno fijado; pero sólo pueden fijar nitrógeno anaerobioticamente. En algunas especies de los géneros Klebsiella, Citrobacter y Bacillus, se ha demostrado esta capacidad nitrificadora, tanto en suelos como en agua.

Por último, y dentro de los microorganismos que viven libremente en el suelo, también deben citarse diversos autótrofos anaerobios, que aprovechan la luz para fijar el dióxido de carbono y multiplicarse (fotótrofos). Entre ellos, algunos pertenecientes a los géneros Chromatium y Chlorobium oxidan los sulfuros, el azufre o los tiosulfatos, mientras absorben la luz con la clorofila y los pigmentos carotenoides, y la energía obtenida en el proceso la utilizan para su crecimiento y para fijar nitrógeno. Otros son autótrofos aerobios, como determinadas algas cianofíceas de los géneros Nostoc, Anabaena y Gleocapsa. Algunos investigadores consideran que la fijación del nitrógeno por estas algas es muy superior a la correspondiente a Clostridium pastorianum o Azotobacter chroococcum. Se desarrollan en suelos, troncos de árboles, rocas, etc. Se consideran también los únicos fijadores de nitrógeno importantes en los mares, océanos y arrecifes de coral.

Fijación simbiótica con leguminosas.

Durante muchos siglos ha sido reconocido que algunos cultivos como trébol, alfalfa, guisantes, habas, lentejas, soja, altramuces y otros, revitalizaban el suelo de alguna manera, haciendo posible el desarrollo de grandes cosechas de cereales, después de que aquellas plantas ocuparon el suelo.

La causa de estos efectos beneficiosos intrigó a los científicos durante mucho tiempo. A mediados del siglo pasado se observó la presencia de nódulos en las raíces de las leguminosas, y Lachman, en 1858, informó acerca de la producción de estos nódulos por acción bacteriana. M.W. Beijerinck, en 1888, aisló el microorganismo, y se le dio el nombre de *Bacillus radicicola*. Hoy se describen como género *Rhizobium*.

Las leguminosas constituyen una familia del grupo de las fanerógamas, ampliamente extendida, tanto en regiones templadas como en las tropicales. Comprende tres subfamilias: Papilionáceas, Mimosáceas y Cesalpináceas. De ellas, las Papilionáceas son las que presentan mayor número de especies formadoras de nódulos, entre un 80 y 90 %; las Mimosáceas sólo un 25 %; y las Cesalpináceas sólo unas pocas. Pero entre las tres, según W.D.P. Steward (1967), agrupan más de 12.000 especies fijadoras de nitrógeno.

Casi todos los suelos contienen estos fijadores simbióticos en estado de vida latente, bajo la forma de bacteroides, y dotados de una cierta movilidad. Al contacto con los pelos absorbentes de las raíces de las leguminosas, ellos penetran en los tejidos donde se multiplican, fijan el nitrógeno molecular y elaboran su protoplasma, que luego es utilizado simbioticamente por la planta. Solamente una pequeña parte de los pelos radiculares llega a infectarse, y de ésta únicamente una fracción forma nódulos.

Las bacterias se agrupan en un lado del pelo radicular y excretan una sustancia u hormona, posiblemente ácido indolacético, que provoca el rizamiento de la punta del pelo radicular. Respondiendo a la abundante provisión de alimento aportado por la planta, aumenta rápidamente el número de microorganismos que penetran en la corteza de la raíz por medio de un filamento infectivo. La infección estimula también a la planta y produce un racimo de células en el tejido meristemático, que se convierte en nódulo; y dado que los nódulos están conectados con el sistema vascular de las raíces, los procesos de la fotosíntesis llegan hasta ellos.

La fijación de nitrógeno se efectúa entonces de forma continua hasta la formación de semillas, momento en el que generalmente empieza a decrecer por envejecimiento de los nódulos. Sin embargo, las bacterias se hacen

parásitas si por cualquier motivo se restringe el aporte de glúcidos, como por ejemplo cuando se mantiene la planta en la oscuridad, o hay deficiencia de boro (disminución del transporte glucídico). Este parasitismo se presenta también normalmente en nódulos viejos.

La mayoría de los nódulos en las especies cultivadas anuales, como guisantes o soja, se forman durante un periodo de una o dos semanas, mientras que en las especies de mayor duración, como los tréboles, se están formando menos nódulos a lo largo de la mayor parte de la época de desarrollo, desprendiéndose cada otoño.

Es digno de señalar que esta fijación simbiótica difiere de la no simbiótica en que una sustancia, similar a la hemoglobina, aparece desempeñando un papel esencial en el proceso, pues los nódulos activos son ricos en este pigmento. Su presencia es de gran interés teórico, a causa de que la hemoglobina es característica de los vertebrados, y no se encuentra ni en los microorganismos ni en las plantas. Esta sustancia, algunas veces llamada leghemoglobina, parece ser esencial, pues existe una buena correlación entre su cantidad en el nódulo y la velocidad de fijación de nitrógeno. Los nódulos inútiles tienen un color pálido e incluso verdoso. La función de la leghemoglobina es suministrar oxígeno a las bacterias constituyentes del nódulo y, por otra parte, mantener una actuación óptima del enzima nitrogenasa, que es quien regula el proceso de la fijación.

Ciertas relaciones existentes entre el huésped y la bacteria influyen sobre la fijación de nitrógeno. Por ejemplo, una cepa de *Rhizobium* puede provocar la formación por parte de un huésped de sustancias que inhiban el desarrollo de la bacteria y, en consecuencia, se fija poco nitrógeno, porque los nódulos contienen una pequeña cantidad de tejido bacteriano. Sin embargo, en otro huésped de distinta especie, la misma cepa de *Rhizobium* puede provocar nódulos normales y producirse entonces una fijación eficaz de nitrógeno. Esta relación entre el huésped y la bacteria ha sido denominada "especificidad de la planta huésped". Por ello, a cada leguminosa corresponde, o se encuentra asociada, una especie distinta de *Rhizobium*. La bacteria que forma nódulos en la soja, por ejemplo, no puede infectar la alfalfa. EL conocimiento de esta especificidad es de gran importancia en Agricultura, ya que con ello se puede asegurar que los microorganismos que infectan una determinada planta de cultivo sean los más eficaces. La experimentación realizada en este sentido en los últimos años ha puesto de manifiesto en determinadas leguminosas (soja y trébol) la presencia de proteínas específicas que sirven de unión con las células del correspondiente *Rhizobium*, pero no a cualquier otro. Las cepas efectivas producen menos pero mayores nódulos, y de mayor vida, que las cepas inefectivas o no específicas.

Las bacterias adecuadas pueden aportarse al suelo de dos formas diferentes: a) Añadiendo suelo de un campo donde la cosecha se ha desarrollado con éxito; o b) Mezclando las bacterias obtenidas de un cultivo puro con la semilla antes de la siembra. Las bacterias, una vez establecidas en el suelo, pueden permanecer en él, como ya se indicó anteriormente, durante años sin que se cultive ninguna leguminosa. Entre las especies más importantes merecen citarse *Rhizobium japonicum* (soja), *Rhizobium trifolii* (trébol) y *Rhizobium meliloti* (alfalfa).

Un hecho importante y ampliamente demostrado es que las plantas leguminosas no se nodulan convenientemente si el suelo es bastante rico en nitrógeno bajo la forma de sales amoniacales, y sobre todo de nitratos. El motivo no debe atribuirse a una modificación de las propiedades del microorganismo, ya que éste después de un cultivo prolongado en un medio adicionado de nitratos, no pierde su poder infectante. Algunos investigadores sugieren que ello puede ser debido a que los nitratos, al estimular energícamente el crecimiento radicular, determinan una exfoliación rápida de las partes externas de la zona cortical, con lo que la planta se defiende contra la penetración del germen hasta los tejidos que dan lugar a la formación del nódulo.

La cantidad de nitrógeno fijado por una leguminosa depende no sólo de la calidad de la cepa bacteriana presente, sino también de las condiciones externas. Las muchas cepas de *Rhizobium* que infectan las raíces de las distintas especies de leguminosas tienen un margen de tolerancia bastante amplio frente a la reacción del suelo. La reacción óptima es la comprendida entre un pH de 5.5 y 7, aunque se ha citado que pueden desarrollarse en un suelo que tenga un pH de 4, si existe nitrógeno combinado disponible. En general, los límites extremos se encuentran entre pH 5 a 10.

Otros factores nocivos para los microorganismos son: la desecación del suelo, temperaturas por debajo de 0°C o por encima de 50°C, la aireación deficiente y la falta de una cantidad, siquiera pequeña, de molibdeno. La presencia de este elemento para que se realice el mecanismo de fijación del nitrógeno por las leguminosas está bien demostrada. Las plantas pueden desarrollarse perfectamente bien y sus raíces estar relativamente bien noduladas en suelos con un contenido muy bajo en molibdeno, pero los nódulos no fijan nitrógeno.

En estos casos, el que existe en la planta se encuentra en los nódulos, en lugar de encontrarse en raíces y partes aéreas, y sólo cuando hay un suministro adecuado del elemento en el suelo es cuando en las partes aéreas empieza a encontrarse en límites normales. Investigadores australianos han

puesto de manifiesto que en algunos suelos de Australia, sobre los que se desarrollaba trébol, si se les añade solamente unos kilos de molibdato sódico, la planta se desarrolla con normalidad. Se estima que el contenido en molibdeno de los nódulos puede oscilar entre 5 y 25 ppm en peso seco, dependiendo en gran manera de la planta huésped. Bajos contenidos en calcio y fósforo reducen también la actividad fijadora del nódulo.

También parece aceptarse que el *Rhizobium* requiere cobalto y cobre, ya que estos elementos participan en la síntesis de la leghemoglobina.

Aunque no se conoce perfectamente cómo tiene lugar el transporte de nitrógeno fijado simbioticamente desde el nódulo a la planta huésped, se acepta de forma general que o bien tiene lugar una lisis de las células bacterianas, que dejan libres compuestos nitrogenados solubles en el citoplasma de la célula vegetal, o bien las células bacterianas excretan productos nitrogenados solubles al citoplasma de la célula radical. Es bastante difícil decidir cuál de estas teorías es la correcta, o si se verifican los dos procesos a la vez.

La creencia de que estos microorganismos no fijan nunca nitrógeno antes de formarse el nódulo en la planta, ha sido aceptada durante muchos años. Sin embargo, en las últimas décadas se han aislado rizobios conocidos como de "crecimiento lento", que pueden fijar nitrógeno en medios totalmente libres de materia vegetal; son, no obstante, especies muy concretas y muy sensibles al oxígeno.

En lo que respecta a la cantidad fijada de nitrógeno mediante los cultivos de leguminosas, se calcula que puede ser superior a los 100 Kg/Ha año.

Las leguminosas pueden excretar algunas veces compuestos nitrogenados en el suelo, aunque no se sabe ciertamente cómo y cuándo lo hacen. Se sugiere que ello se deba a que la fijación transcurre más rápidamente que su utilización, y entonces el nitrógeno excedente se excreta. El hecho ha sido repetidamente observado en cultivos mixtos de una leguminosa con una no leguminosa, o de cereales con una leguminosa. Casi siempre hay un aumento del contenido de nitrógeno en la planta no leguminosa, al compararlo con el contenido de la misma en cultivo único.

Es evidente que la presencia de nódulos en las raíces de una leguminosa no significa necesariamente que se fijan cantidades apreciables de nitrógeno. También los nemátodos u otras bacterias pueden provocar proliferaciones similares a nódulos en las raíces de las leguminosas; y otras

que pueden producir hiperplasias semejantes a nódulos en las raíces de algunas plantas no leguminosas. Algunos investigadores sostienen que los microorganismos que hay en ellos fijan nitrógeno.

Fijación simbiótica con no leguminosas.

La asociación simbiótica entre leguminosas y las bacterias del género *Rhizobium* constituye el sistema más complejo y desarrollado de fijación biológica del nitrógeno, pero no es el único. Por ejemplo, el Aliso, que es una especie maderera muy extendida en los EE.UU., contiene bacterias fijadoras de nitrógeno aún no identificadas en nódulos radiculares, que no son muy distintos de los de las leguminosas.

Otra simbiosis observada existe entre un pequeño helecho acuático, *Azolla pinnata*, y un alga cianofícea, *Anabaena azollae*, capaz de realizar la fotosíntesis y la fijación de nitrógeno. Esta alga es muy difícil de cultivar fuera de su planta huésped, pero el helecho sí crece perfectamente si hay nitrógeno fijado disponible. Los agricultores de Vietnam han utilizado las propiedades de estas algas, desarrollando *Azolla* entre los arrozales sumergidos, lo cual constituye un importante abono verde para el cultivo del arroz (I. Watanabe y cols., 1977).

También se han encontrado recientemente bacterias fijadoras de nitrógeno que viven asociadas a raíces de ciertas gramíneas tropicales. La gramínea *Digitaria decumbens* soporta poblaciones de una bacteria, *Spirillum lipoferum*, reconocida como fijadora de nitrógeno. Esta bacteria no forma estructuras nodulares concretas, sino que simplemente crece en la superficie de las raíces. Un interesante hallazgo posterior fue que entre las plantas de maíz que crecían en campos deficientes en nitrógeno, unas cuantas eran mayores que las demás. Cuando estas plantas excepcionales se sometieron a un exhaustivo estudio, se encontró *Spirillum lipoferum* asociado a sus raíces. Este descubrimiento, realizado en 1975, provocó un gran entusiasmo, puesto que implicaba que el maíz podía crecer sin fertilizantes, si se lograba establecer la adecuada asociación bacteria-raíz. Sin embargo, la experimentación realizada en distintos laboratorios con el fin de incrementar la producción de maíz mediante la inoculación con *Spirillum lipoferum*, no han dado aún resultados verdaderamente positivos. Se sigue investigando la naturaleza de dicha asociación.

Entre las simbiosis más curiosas se encuentran las que involucran bacterias fijadoras de nitrógeno que colonizan a los termites y a las carcomas. Estos insectos, que viven con una dieta exclusiva de madera, poseen

microorganismos que segregan enzimas para la digestión de la celulosa. Hoy se sabe que reciben también ayuda dietética de otra población de microorganismos capaces de fijar nitrógeno atmosférico. La madera es una fuente escasa de nitrógeno biológico; por tanto, estas bacterias que viven en el tubo digestivo de los termes y las carcomas proporcionan a éstos una parte del nitrógeno que requieren durante su ciclo vital.

El enzima nitrogenasa y bioquímica de la fijación.

Actualmente se admite que la reacción química completa de la fijación del nitrógeno es la misma cuando se verifica por el proceso de Haber-Bosch, que cuando se realiza en la célula viva. Primero debe romperse el triple enlace de la molécula de N_2 , y luego deben unirse tres átomos de hidrógeno a cada átomo de nitrógeno. En el proceso de Haber, el hidrógeno se presenta en forma de gas molecular; en la mayoría de las bacterias fijadoras de nitrógeno se extrae de moléculas orgánicas como la glucosa, que es el principal azúcar producido en la fotosíntesis. Los átomos de hidrógeno son transferidos de la glucosa al nitrógeno a través de una red de moléculas intermediarias. Las experiencias de L.D. Antoniw y J. I. Sprent (1978) así lo han puesto de manifiesto.

La molécula base en la fijación biológica del nitrógeno es el enzima nitrogenasa. Todos los organismos que fijan el nitrógeno contienen este enzima, cuya estructura no parece diferir significativamente de una especie a otra. Además, ningún organismo carente de nitrogenasa puede fijar nitrógeno.

El aislamiento del enzima se consiguió por primera vez en 1960, a partir de *Clostridium pastorianum*, en los EE.UU. En los últimos años se han obtenido ya nitrogenasas de un gran número de microorganismos, incluido *Rhizobium*.

El enzima está formado por dos proteínas completamente distintas, de color pardo oscuro, muy complejas, y ninguna de las dos es activa sin la otra (Figura 11.1.).

La mayor, denominada Componente I, presenta un peso molecular entre 218.000 y 227.000, y consta de cuatro subunidades, cada una de las cuales es una cadena simple de aminoácidos, veinticuatro átomos de hierro y dos de molibdeno. La más pequeña, conocida como Componente II, tiene un peso molecular entre 55.000 y 66.000, y está formada por dos subunidades y cuatro átomos de hierro. En ambos casos, el hierro va acompañado por el mismo número de átomos de azufre. La vida media del enzima en contacto con el aire es muy corta.

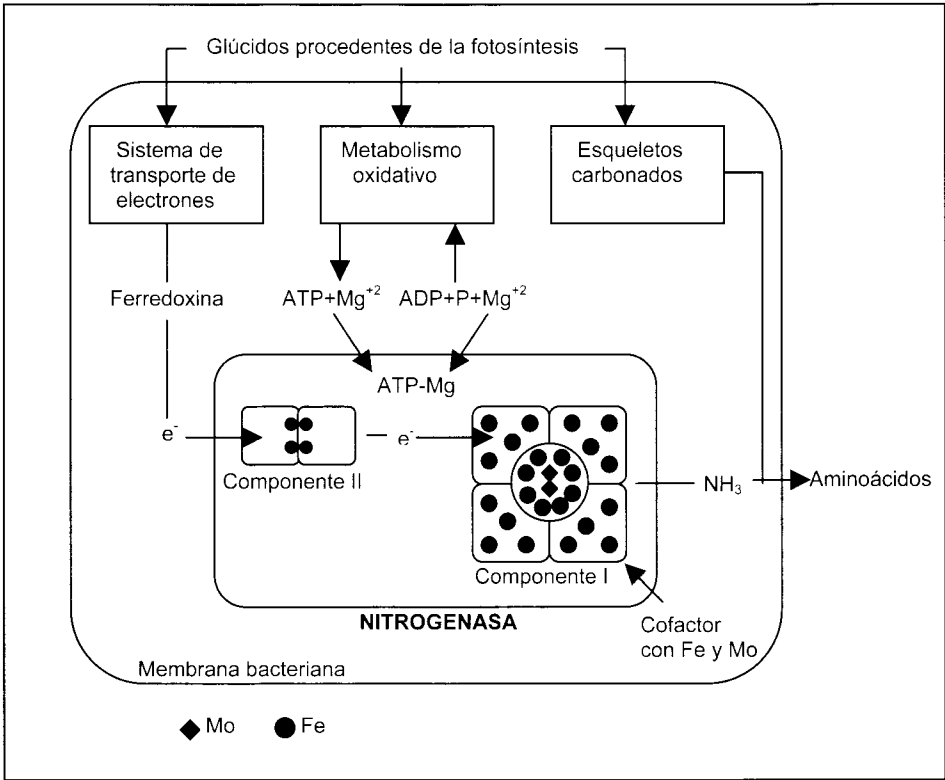


Figura 11.1. Esquema del enzima nitrogenasa y fases de la fijación (W.J. Brill, 1977).

Un aspecto importante a señalar también es que las dos proteínas que integran los Componentes I y II son muy parecidas en todos los microorganismos que se han aislado. Tanto es así, que se puede mezclar la proteína grande de un determinado microorganismo con la pequeña obtenida de otro sin que se pierda su actividad enzimática.

Una de las características del enzima es que para poder actuar necesita ATP, el cual es hidrolizado a ADP con producción de energía. Esta energía, que procede del metabolismo de la glucosa, es utilizada en parte para romper el enlace existente entre átomos de nitrógeno.

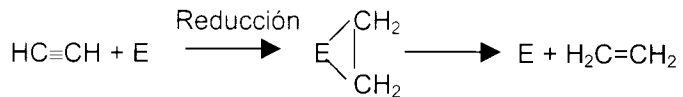
La actuación del enzima también requiere la presencia de Mg^{+2} , aunque no se sabe aún la función que verdaderamente desempeña. Se sugiere que el Mg^{+2} actúa como puente de unión entre el Componente II y el ATP.

A pesar de que se conocen bastantes propiedades del enzima, no puede concretarse aún, en el momento actual, la verdadera forma de actuar. El esquema que se expone es uno de los varios que se han propuesto, en función de los resultados experimentales que se van obteniendo.

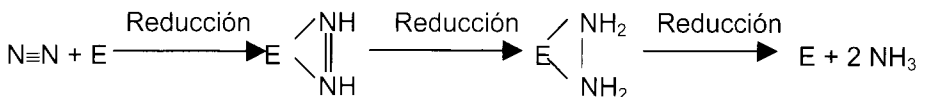
Para transferir átomos de hidrógeno basta un transporte activo de electrones. Los protones o núcleos de hidrógeno pueden soltarse y captarse libremente a través del medio acuoso de la célula. Los electrones procedentes de los glúcidos son donados primero al Componente II y luego al Componente I, en donde ocurre la verdadera reducción del nitrógeno. El funcionamiento de ambos componentes requiere energía, que se proporciona en forma de ATP Y en presencia de Mg.

El mecanismo de síntesis de amoniaco es, en su conjunto, el mismo en todas las especies fijadoras de nitrógeno, aunque en las bacterias fotosintéticas los electrones y el ATP quedan transferidos directamente al enzima nitrogenasa.

La fase final del proceso de la fijación, la reducción del nitrógeno, es la que en el momento actual está menos aclarada. Se han propuesto diversas teorías, pero ninguna puede aceptarse como definitiva. Una de las posibles supone que la reducción transcurre a través del estado intermedio de la diimida, mediante un mecanismo similar que se supone ocurre en la reducción del acetileno. En este caso, y en ausencia de nitrógeno, se ha comprobado que el enzima convierte el acetileno en eteno:



La molécula de nitrógeno se parece a la del acetileno por su tamaño y por la presencia del triple enlace. Por ello, parece lógico suponer que el enzima actúa de forma similar sobre las dos moléculas. De suceder así, uno de los compuestos intermedios de la fijación del nitrógeno podría ser la molécula de diimida:



La diferencia entre ambos procesos parece estar en el hecho de que al utilizar acetileno como sustrato de la nitrogenasa, la reducción se verifica en un solo paso, y el producto liberado es el eteno. La acción del enzima sobre el

nitrógeno podría ser distinta: cada átomo de nitrógeno se reduciría tres veces, adquiriendo tres electrones y convirtiéndose en molécula de amoníaco.

Los aspectos bioquímicos de la fijación del nitrógeno están, en estos últimos años, en periodo de amplio estudio, sobre todo en el campo de la manipulación genética. La idea más ambiciosa se halla centrada en la transferencia de genes de un organismo fijador de nitrógeno (genes *nif*) a otro no fijador. Algunas experiencias han dado resultados iniciales positivos. J. Postgate (1981), en una reciente publicación, informa del éxito conseguido en la transferencia de genes *nif* de *Klebsiella pneumoniae* a otra bacteria no fijadora de nitrógeno, *Escherichia coli*, común del tracto digestivo humano.

Ello, sin duda, abre la posibilidad de que en un futuro se pueda disponer de plantas superiores capaces de fijar por sí solas el nitrógeno atmosférico. Sin embargo, esta meta es difícil de alcanzar. Hay que tener en cuenta que aunque la transferencia genética pudiera realizarse, la planta requeriría subsiguientemente una amplia modificación de su estructura y de su metabolismo, con las consecuencias negativas que ello podría ocasionar.

11.3.2. OTRAS APORTACIONES.

Distintas formas de nitrógeno que se hallan en la atmósfera o que se producen en ella son devueltas continuamente al suelo por la lluvia o por la nieve: amoníaco, óxido nitroso, ácido nitroso y nítrico, y combinaciones orgánicas.

El amoníaco procede, sobre todo, de los lugares industriales que fabrican o utilizan amoníaco, y algo del que se escapa de la superficie del suelo a causa de las reacciones que allí ocurren.

El ácido nítrico se atribuye a su formación, junto al óxido nitroso, durante las descargas eléctricas atmosféricas. Estudios recientes, sin embargo, sugieren que tan sólo un 10 ó un 20 % del ácido nítrico presente en la atmósfera procede de la fijación por descargas eléctricas; el resto se cree que proviene de los gases industriales desechados, o posiblemente del suelo.

El nitrógeno orgánico puede acreditarse posiblemente por los residuos orgánicos finamente divididos, que son arrastrados a la atmósfera desde la superficie de la tierra.

Todas estas distintas formas de nitrógeno atmosférico están siendo continuamente devueltas al suelo por la lluvia y nieve. La cantidad total del nitrógeno fijado, llevado de esta manera al suelo, ha sido estimada

variablemente del orden de 1 a 20 Kg/Ha año, dependiendo de la estación y de la localidad. Estas cifras son mayores, por lo general, alrededor de las áreas de intensa actividad industrial, y como norma, son mayores en las zonas tropicales que en las templadas. También conviene señalar que el nitrógeno amoniacal añadido al suelo, casi siempre es en cantidades mayores que bajo la forma de nitratos, y que mientras la incorporación de éstos es casi igual en todas partes, la forma amoniacal muestra notables variaciones.

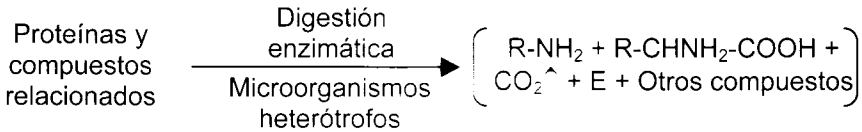
Finalmente, deben considerarse como importantísimas las aportaciones de nitrógeno al suelo bajo la forma de estiércol, plantas verdes y residuos diversos; y sobre todo las aportaciones de fertilizantes sintéticos. Las cantidades de nitrógeno que la planta toma del suelo son importantes, y, siendo limitadas las reservas del mismo, éste se empobrecería si el agricultor no interviniese para reemplazar extraído por las cosechas, o perdido por otros esta restitución, la fertilidad de los suelos se derrumbaría, y los rendimientos bajarían en grandes proporciones.

Durante mucho tiempo, el agricultor no ha tenido a su disposición más que el nitrato de Chile, el sulfato amónico de recuperación, procedente de la destilación de la hulla, y los materiales orgánicos naturales o artificiales citados anteriormente. Estas fuentes de nitrógeno bastaban antiguamente para cubrir las limitadas necesidades de la agricultura. Sin embargo, ya no serían hoy suficientes, debido al aumento de la demanda en el mundo entero. Gracias a la síntesis industrial del amoniaco, se dispone hoy de una variada gama de fertilizantes nitrogenados que permiten mantener en los suelos agrícolas un contenido adecuado de nitrógeno para el desarrollo de sus cultivos.

11.4. TRANSFORMACIONES.

11.4.1. AMINIFICACION Y AMONIFICACION. MECANISMOS Y FACTORES INFLUYENTES.

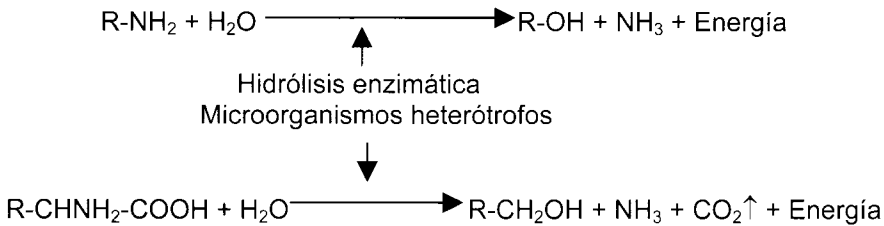
Como ya se ha indicado anteriormente, la materia nitrogenada que se deposita en el suelo de forma natural a la muerte del vegetal, junto con la añadida al mismo de otras procedencias, es directamente de poco valor para las plantas superiores. Puede, sin embargo, ser fácilmente utilizada por los microorganismos del suelo, tanto vegetales como animales. Como resultado de la digestión enzimática realizada por estos organismos, sus componentes principales: proteínas y compuestos relacionados, son degradados a otros más simples, principalmente a aminas y aminoácidos. De aquí que el proceso sea llamado "aminización" o "aminificación":



Mediante esta digestión, los diversos organismos del suelo obtienen la energía necesaria para su desarrollo, y al mismo tiempo se libera dióxido de carbono.

Las condiciones que favorecen la aminificación parecen ser las mismas que las que contribuyen al buen desarrollo vegetativo de la planta, en lo que concierne a la temperatura, humedad y aireación del suelo. Es muy conveniente un drenaje adecuado del suelo y la presencia de calcio, ya que las bacterias degradadoras, que son los principales microorganismos que intervienen en el proceso, son en gran parte aerobias y no proliferan en medio ácido.

El nitrógeno de las aminas y aminoácidos así liberado, puede tener dos destinos. Puede ser utilizado por diversos microorganismos del suelo para construir sus propias estructuras y formar parte del nuevo complejo proteico del suelo. O bien puede ser transformado por otros en productos simples, que aparecen casi siempre en forma de compuestos amónicos. El proceso enzimático en el que el nitrógeno aparece en esta última forma recibe el nombre de "amonificación":



Los microorganismos que intervienen en estos procesos de degradación son muy variados. Es muy difícil concretar cuáles son los que verdaderamente intervienen o predominan, ya que ello depende básicamente de la constitución química del material orgánico incorporado al suelo, condiciones climáticas, y de las características del suelo en donde los fenómenos de sinergia y competencia juegan un papel importante. No obstante, las bacterias de los géneros *Pseudomonas*, *Proteus*, *Bacillus* y *Bacterium*, parecen ser los microorganismos amonificantes más extendidos en

los distintos tipos de suelos. En notable proporción, también intervienen muchas especies de actinomicetos y hongos.

En general, los mismos organismos y condiciones que facilitan la aminificación también promueven la amonificación.

Estos dos eslabones del ciclo del nitrógeno, la aminificación y la amonificación, son muy complejos y, sobre todo, difíciles de estudiar. La aminificación primero, y la amonificación después, se realizan sobre sustancias de estructuras muy diversas: proteínas, aminoácidos complejos, azúcares aminados, ácidos nucleicos, bases purínicas, amidas, aminas, fosfátidos, ácido úrico, etc. Y es evidente que el metabolismo de estos compuestos será diferente en el suelo, tanto en lo que se refiere a su naturaleza como a su velocidad de transformación.

Un segundo aspecto a considerar, y que complica notablemente el estudio de estos dos procesos, es el hecho de que las sustancias nitrogenadas orgánicas están siempre asociadas en los tejidos vegetales, y en proporción variable, a compuestos carbonados del tipo de celulosas, hemicelulosas, pectinas y ligninas. Cuanto mayor sea ésta, tanto mayor será el aumento de la población bacteriana y, por tanto, la utilización del nitrógeno en la formación de la sustancia celular con una producción de amoníaco proporcionalmente menor. Los residuos vegetales deben tener una relación C/N inferior a 20 para que pueda liberarse inmediatamente cierta cantidad de amoníaco. Cuando esta relación es superior a 30, la cantidad de amoníaco liberada será nula o escasa, a menos que siga la descomposición.

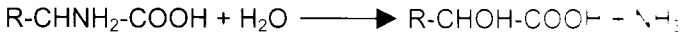
Esto explica por qué la edad y la especie de la planta influyen grandemente en el proceso de la amonificación. Las plantas adultas, con tejidos más lignificados, son atacadas lentamente, con débil liberación de amoníaco. Las jóvenes, por el contrario, con tejidos ricos en proteínas, liberan cantidades apreciables de amoníaco, pero al ser ricas en glúcidos y hemicelulosas, los fenómenos de reutilización serán más intensos.

Finalmente, hay que tener en cuenta la complejidad que el suelo, como medio de reacción, puede presentar en cuanto se refiere a su textura, composición química, reacción, humedad, aireación, temperatura, microorganismos, etc. Estos factores pueden influir también ampliamente en el metabolismo de la aminificación y amonificación.

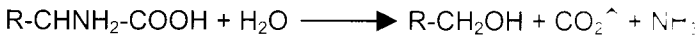
De lo expuesto se deduce que las reacciones bioquímicas que se producen en estos procesos pueden ser muy diferentes, y que la proporción de nitrógeno convertido finalmente en amoníaco dependerá, en cada caso, de

os factores influyentes que predominan. Las principales formas de desaminación se resumen en las siguientes reacciones:

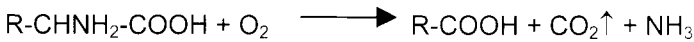
Hidrólisis:



Hidrólisis con descarboxilación:



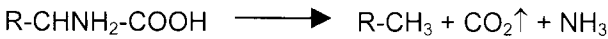
Oxidativa con descarboxilación:



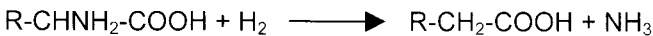
Desaturación:



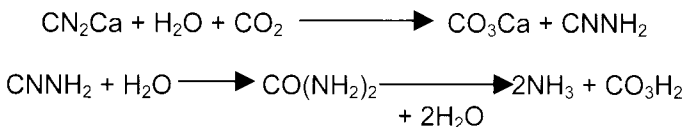
Reductriz con descarboxilación:



Reductriz:



En proporción habitualmente más pequeña que las proteínas, los tejidos animales y vegetales contienen también sustancias nitrogenadas no proteicas. La orina, por ejemplo, es rica en urea y ácido úrico, y al incorporarse a la cama de los animales para la obtención del estiércol, se introduce en el suelo. También ciertos fertilizantes, como la cianamida cálcica son metabolizados después de su transformación en urea. Para la cianamida cálcica, las reacciones que se desarrollan son:



El nitrógeno amoniacal producido en esta etapa de la amonificación, puede tener varios destinos:

1°) Volatilizarse en parte a la atmósfera. Esto sólo puede producirse cuando la liberación efectiva del amoníaco sea intensa, la fijación al suelo débil y las condiciones de nitrificación desfavorables.

2°) Puede ser absorbido directamente por las plantas superiores, a menudo incluso fácilmente, una vez fijado al suelo por neutralización, o adsorbido a los coloides del suelo. Las plantas jóvenes de casi todas las clases son especialmente capaces de ello, aunque al parecer crecen mejor si pueden aprovechar alguna cantidad de nitrógeno en forma de nitrato.

3°) Grandes cantidades son apropiadas por algunos de los mismos amonificantes o por otros organismos para su síntesis, que al morir incrementan la materia nitrogenada del suelo.

4°) Puede ser fijado en una forma no utilizable biológicamente en el entramado de ciertas arcillas. La ilita y arcillas semejantes tienen una significativa capacidad de fijación de ion NH_4^+ .

5°) Por último, cuando la síntesis vegetal y animal está satisfecha temporalmente, el nitrógeno amoniacal puede tomar otra dirección: se oxida por diversas formas bacterianas, que lo usan no sólo como fuente de nitrógeno, sino también como fuente de energía. Así se llega a una nueva fase bioquímica: la nitrificación.

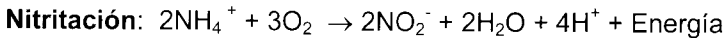
11.4.2. NITRIFICACION. MECANISMOS Y FACTORES INFLUYENTES.

Cuando las condiciones son favorables, una parte del amoníaco liberado en el proceso de amonificación es inmediatamente oxidado a nitrato, que es la forma principal de utilización del nitrógeno por los vegetales superiores. En suelos apropiados para el desarrollo de los microorganismos nitrificantes, esta oxidación es tan rápida que el amoníaco casi no puede detectarse, y es muy difícil ponerlo en evidencia en cantidades apreciables. Esta oxidación la efectúan un conjunto de bacterias muy sensibles a los agentes externos y comprendidas en un grupo bastante reducido de especies aerobias. Unas oxidan el amoníaco a nitrito en una primera fase conocida como nitración. Estas son las nitrosobacterias: Nitrosoglaca. Otras, en una segunda etapa, oxidan los nitritos a nitratos, es la nitratación. Son las nitrobacterias: Nitrobacter, Nitrocystis y Bactoderma, las responsables de ello.

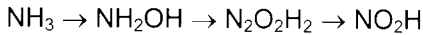
Estas bacterias se encuentran en todos los suelos normales, salvo en aquellos muy ácidos o turbosos, y predominan en los horizontes superficiales. Son todas autótrofas y muy sensibles a condiciones ambientales extremas.

Investigaciones recientes indican que la nitrificación puede también ser realizada por ciertos hongos del suelo del género *Aspergillus*, aunque se desconoce la extensión de su actuación en el proceso total. La mayoría sólo pueden oxidar el amonio a nitrito.

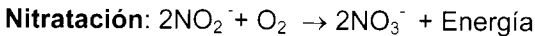
Las reacciones que se originan durante estas oxidaciones enzimáticas son bastante complejas, pero pueden ser resumidas, de forma simple, como sigue:



En realidad, esta oxidación parece que se verifica en tres etapas:



El primer paso está comprobado que se realiza, mientras que el segundo y el tercero son más dudosos.



Algunos aspectos importantes se deducen de estas ecuaciones de nitrificación, proporcionando un conocimiento que puede aclarar las reacciones que suceden cuando se aplican al suelo fertilizantes nitrogenados comerciales, tanto en forma orgánica como amoniacal.

En primer lugar, la reacción requiere oxígeno molecular. Por tanto, ambos procesos se producirán más fácilmente en los suelos bien aireados.

Un segundo hecho es que la reacción libera iones hidrógeno, lo cual trae como consecuencia una acidificación del suelo cuando los fertilizantes amoniacales, y la mayor parte de los orgánicos nitrogenados, son convertidos a nitratos. Esto explica por qué la utilización continuada de tales formas de nitrógeno origina un cierto descenso del pH del suelo, principalmente en su zona superficial.

Un tercer punto importante es que al estar implicados en el proceso los microorganismos del suelo, la rapidez y extensión de la transformación estará influenciada grandemente por las condiciones ambientales, así como por la humedad y temperatura del suelo.

Los principales factores que afectan a la nitrificación son: 1°) Contenido de ión amonio y relación C/N de la materia orgánica del suelo; 2°) Reacción

del suelo y presencia de diversos elementos esenciales; 3°) Aireación del suelo; 4°) Humedad del suelo; y 5°) Temperatura.

Contenido de ión amonio y relación C/N de la materia orgánica del suelo.

Al ser el ión amonio el sustrato para las bacterias nitrificantes, es lógico que un suministro de este ión es el requerimiento esencial para la nitrificación. Si las condiciones no favorecen la liberación de amoníaco de la materia orgánica, o si no se añaden a los suelos fertilizantes amónicos, no habrá nitrificación. Pero aún en el caso de que la amonificación se produzca, si la relación C/N del suelo es demasiado alta, parte del amoníaco liberado de la materia orgánica será utilizado por los microorganismos del suelo, y así se inicia una extraordinaria reproducción y multiplicación. Como resultado, todo nitrógeno orgánico aprovechable del suelo se convierte rápidamente en formas orgánicas de tejidos microbianos. La nitrificación llega así, más o menos, a un punto de estabilidad, ya que también se produce un descenso en nitrógeno amoniacal, consumido por los organismos de degradación.

Después que la materia carbonada ha sido descompuesta parcialmente, y el material energético no es ya muy abundante, la asimilación del nitrógeno se aminora y aparecen en el suelo subproductos amoniales. En ese momento, las condiciones volverán a ser favorables para la nitrificación, y los nitratos podrán originarse y ser utilizados por las plantas. Sólo cuando la relación C/N ha descendido por debajo de 20 ó 25 habrá una liberación neta de nitrógeno mineral. De esta forma, y análogamente a lo indicado en la amonificación, la razón C/N, a través de su influencia selectiva sobre los microorganismos del suelo, ejerce un control poderoso sobre la nitrificación y la presencia del nitrógeno en forma de nitrato en el suelo.

Los hechos apuntados hay que tenerlos en cuenta en muchos casos, y tienen una gran importancia en la práctica agrícola. Por ejemplo, al tratar de cultivar cereales en zonas donde poco antes se ha efectuado un arado e incorporado al suelo los residuos de la cosecha anterior. Si estos residuos, constituidos por tallos secos, raíces, etc., se hallan en gran cantidad, el nuevo cultivo se desarrolla con insuficiente nitrógeno, ya que los microorganismos, al degradar los citados restos (relación C/N alta), compiten con la planta para obtener del suelo el nitrógeno que necesitan. En estos casos se requerirá, por tanto, incrementar el contenido de nitrógeno del suelo mediante un aporte complementario de fertilizantes nitrogenados.

Reacción del suelo y presencia de diversos elementos.

Las bacterias nitrificantes, aunque existen en todo suelo laborable, aparecen en mayor cantidad en los suelos fértiles. Su número depende en gran manera de la reacción del suelo. En este aspecto, una reacción ligeramente alcalina es la más favorable. Los límites de pH entre los que la nitrificación tiene lugar se sitúan entre 5'5 y 8, con un óptimo entre 6'9 y 7'5. A medida que aumenta la acidez del suelo, la nitrificación se debilita debido a la sensibilidad de los organismos nitrificantes a bajo pH.

Las bacterias nitrificantes requieren también un suministro adecuado de calcio, fósforo, cobre y magnesio, aunque no se ha determinado sus exactas necesidades. Otros oligoelementos como hierro, molibdeno, boro, wolframio y vanadio, se consideran estimulantes en concentraciones bajas, pero se transforman en inhibidores a concentraciones superiores al 1 %. Un exceso de cloruros paraliza la acción de estos microorganismos

Aireación del suelo.

Las bacterias nitrificantes son microorganismos aerobios típicos. No producen nitratos en ausencia de oxígeno molecular. Por ello, cualquier procedimiento que aumente la aireación del suelo favorecerá la nitrificación. El arado y prácticas de cultivo son operaciones favorables para ella, ya que permiten la rápida difusión del aire hacia el interior y hacia el exterior del suelo. Los suelos que son de textura gruesa, o que poseen una buena estructura, facilitan este movimiento y aseguran un suministro adecuado de oxígeno para las nitrobacterias.

Los resultados experimentales obtenidos en condiciones controladas de laboratorio, permiten afirmar que la máxima nitrificación aparece cuando el porcentaje de oxígeno en el aire del suelo es del 20 %, casi igual al que posee la atmósfera terrestre

Humedad del suelo.

La actuación de las nitrobacterias está altamente controlada por el contenido de agua del suelo. En general, la nitrificación tiende a disminuir tanto en condiciones de excesiva humedad, como en aquellas de escasez.

En realidad, existe para cada suelo un óptimo de humedad, por encima y por debajo del cual hay más lentitud en la producción de nitratos.

Este óptimo varía con la textura del suelo y aumenta con el contenido en coloides. Ordinariamente, para suelos cultivados varía entre el 12 y 18 % de agua. Por esta razón, la nitrificación puede reducirse notablemente en verano por insuficiente humedad, así como en invierno y en zonas de alta pluviometría.

Temperatura y tiempo.

La temperatura más favorable para el proceso de la nitrificación puede situarse entre 27 y 30°C, aunque puede variar según las regiones, por adaptación o selección de los organismos nitrificantes. A temperatura de 0°C o inferiores la nitrificación no se produce, pero por encima de 15°C empieza, y va aumentando progresivamente en intensidad hasta alcanzar su actividad máxima alrededor de los: 30°C.

En condiciones de campo, sin embargo, no se obtienen temperaturas constantes, y por ello, al fluctuar la temperatura la magnitud de la nitrificación dependerá, en gran parte, del periodo de tiempo que se mantenga a una determinada temperatura. En la figura 11.2. se pone claramente de manifiesto la influencia de las fluctuaciones de temperatura en la nitrificación.

Los nitratos del suelo formados durante el proceso de la nitrificación, o aquellos que pueden ser aportados en forma de fertilizantes, pueden tener destinos diferentes:

- 1°) Una parte puede ser metabolizada por los microorganismos vivos para su síntesis protoplasmática.
- 2°) Otra puede ser utilizada por los vegetales superiores para poder desarrollar su ciclo vital.
- 3°) Parte, y debido a su gran solubilidad y nula retención por los coloides, perderse por drenaje a las capas profundas del suelo.
- 4°) En pequeña proporción, y mediante ciertas reacciones químicas, pueden originar óxidos, en los que el nitrógeno se halla en su menor grado de oxidación.
- 5°) Finalmente, y por acción de determinados microorganismos, dar lugar a otros compuestos reducidos en el proceso conocido como "desnitrificación". El nitrógeno así producido retorna de nuevo a la atmósfera.

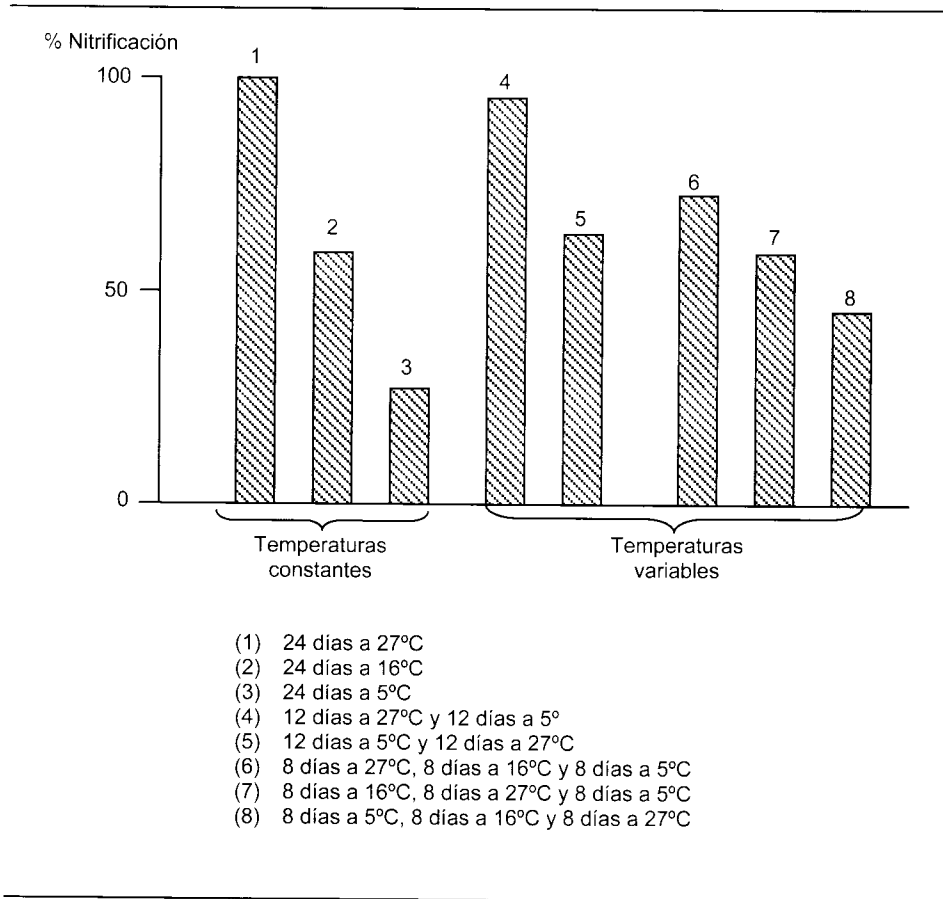


Figura 11.2. Interrelaciones tiempo/temperatura y nitrificación (P. Chandra, 1962).

11.5. PERDIDAS.

11.5.1. DESNITRIFICACION. MECANISMO Y FACTORES INFLUYENTES.

Normalmente, la mayor parte del nitrógeno nítrico que aparece en el suelo durante el proceso de la nitrificación, o del aporte por medio de fertilizantes, es utilizada por los vegetales superiores para la síntesis de sus tejidos. Sin embargo, en ciertas condiciones, particularmente en suelos pesados, mal aireados y húmedos, un cierto número de microorganismos son

capaces de utilizar en anaerobiosis el oxígeno de los nitratos para realizar sus propias oxidaciones. El resultado de todo ello es una reducción de estos nitratos, es decir, una desnitrificación, que puede ser más o menos amplia, según el germen que la produzca. Aunque el término final de esta reducción es nitrógeno molecular, según las condiciones pueden formarse cuerpos intermedios como nitritos, óxidos de nitrógeno, ácido hiponitroso e hidroxilamina. Se ignora, sin embargo, si estos compuestos se acumulan realmente en el suelo.

El descubrimiento de esta reducción biológica de los nitratos en el suelo es antiguo, pues fue puesta en evidencia por C.F. Schoenbein en 1868, y en 1882 se reconoció su mecanismo. No obstante, el proceso aparece aún muy oscuro, si no en sus reacciones químicas, sí al menos en los que respecta a sus condiciones ecológicas determinantes y en su importancia agronómica.

El proceso que parece ser el que corresponde a la realidad, puede indicarse según las reacciones que se exponen en la figura 11.3.

Los microorganismos responsables de la desnitrificación son especies bacterianas heterótrofas del género *Pseudomonas*, *Micrococcus*, *Bacillus* y *Achromobacter*, y autótrofas del género *Thiobacillus*. El óptimo de temperatura en lo que respecta a su actuación es de 27-30°C.

Factores influyentes.

El proceso de la desnitrificación es afectado notablemente por los siguientes factores: 1°) pH del suelo; 2°) Nivel de humedad y porcentaje de oxígeno del aire del suelo; y 3°) Cantidad de azufre y materia orgánica presente.

Influencia del pH. Se ha estudiado la influencia del pH del suelo sobre la desnitrificación en condiciones de laboratorio, incubando muestras iguales de suelo a distintos pH y en condiciones anaerobias, durante períodos de tiempo comprendidos entre dos y tres semanas. Los resultados obtenidos muestran, en general, que a ciertos valores superiores a 7 (entre 7 y 8'5), las mayores pérdidas aparecen como N_2 , y en menor proporción como N_2O . En cambio, a pH inferiores (entre 5 y 7), las pérdidas fueron mayormente como N_2O , y en mucha menor proporción como N_2 . Parece ser, por tanto, que al aumentar la acidez del suelo se inhibe la reducción del óxido nitroso a nitrógeno.

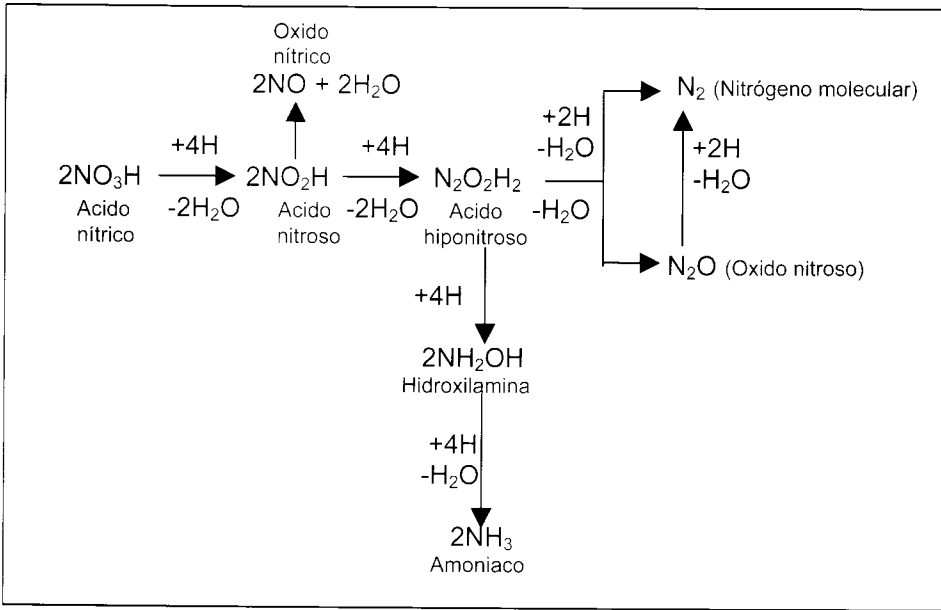


Figura 11.3. Secuencia de reacciones que se acepta pueden producirse durante el proceso de desnitrificación.

Nivel de humedad y porcentaje de oxígeno del aire. Durante mucho tiempo se ha considerado que los suelos saturados de agua son los más propicios para que la desnitrificación se efectúe. Sin embargo, hoy se admite, como resultado de experimentaciones más precisas, que en ausencia de oxígeno, el aumento del porcentaje de humedad del suelo no intensifica la desnitrificación. Sólo en el caso de que en el suelo exista una proporción de oxígeno determinada, la desnitrificación se intensifica al aumentar el contenido de agua. La explicación de este hecho debe buscarse, por tanto, en la exclusión del oxígeno por encharcamiento del suelo, más que a la presencia del agua por sí misma.

En lo que respecta a la influencia directa del contenido de oxígeno en la atmósfera del suelo, los resultados obtenidos en experiencias de campo resultan contradictorios en muchos casos. No obstante, estudios de laboratorio indican un aumento de la pérdida de nitrógeno a medida que disminuye el contenido de oxígeno, aunque también muestran que las pérdidas no son muy elevadas hasta tanto no haya una ausencia casi total de oxígeno.

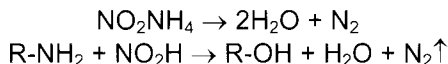
Cantidad de azufre y materia orgánica presente en el suelo. Está suficientemente demostrado que las aplicaciones de azufre al suelo pueden originar una reducción en el contenido de nitrógeno inorgánico en los suelos, ya que, al ser utilizado el oxígeno de los nitratos por los microorganismos que oxidan el azufre a ácido sulfúrico, el nitrógeno se pierde en forma molecular. En estos casos, las plantas que en el suelo vegetan pueden sufrir, temporalmente, una falta de nitrógeno, a causa de la competencia que les hacen los microorganismos que oxidan el azufre, si el nitrógeno disponible bajo la forma de nitratos no es suficiente para atender las necesidades de ambos.

La mayor o menor proporción de materia orgánica del suelo también puede influir en la desnitrificación. Suelos muy bien provistos de materia orgánica descomponible, como por ejemplo los suelos que reciben estercoladuras fuertes, desnitrificarán los nitratos prontamente, aún cuando estén bien aireados, probablemente a causa de que existen muchas zonas de suelo en las que los microorganismos están utilizando el oxígeno de estos nitratos, al no disponer del oxígeno necesario.

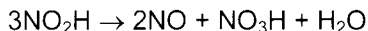
11.5.2. DESCOMPOSICION DE NITRITOS.

La pérdida de nitrógeno gaseoso en suelos ácidos bien drenados a partir de nitritos, ha sido puesta de manifiesto frecuentemente, aunque no hay acuerdo total entre los científicos, no sólo en lo que se refiere a su mecanismo, sino también a su magnitud real en el suelo. La mayor parte creen que se trata de reacciones complejas, y en las que intervienen a la vez microorganismos y reacciones químicas.

Las reacciones que se han propuesto como posibles, en suelos con pH entre 5 y 7, son:



En ciertos casos (a pH inferior a 5), se sugiere también:



No se considera, sin embargo, que estas descomposiciones puedan tener gran importancia en los suelos normales de cultivos.

11.5.3. VOLATILIZACION DEL AMONIACO.

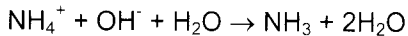
Las pérdidas de amoniaco en el suelo por volatilización pueden producirse en distintas circunstancias:

1°) Cuando hay un aporte grande en la superficie del suelo, o a poca profundidad, de materiales orgánicos fácilmente degradables, ricos en sustancias nitrogenadas y en neto predominio sobre los hidrocarbonados, es decir, materiales con una relación C/N baja. Se admite que cuando ésta alcanza valores por debajo de 15, las pérdidas de amoniaco pueden ser importantes, muy particularmente cuando el porcentaje de humedad del suelo y su temperatura alcanzan valores elevados.

Las pérdidas pueden evitarse, en parte, mediante la colocación de los citados materiales a una prudente profundidad, o bien con una labor de arado amplia.

2°) En suelos muy húmedos, mal aireados y en climas cálidos. En estos casos, la nitrificación se inhibe grandemente y poco amoniaco se oxida a nitrato. Las pérdidas pueden ser notables, sobre todo cuando la temperatura rebasa los 30°C.

3°) En suelos alcalinos, con bajo contenido en coloides y, por tanto, con débil capacidad de cambio. En un medio con estas características, la fijación del amoniaco (sobre todo si la temperatura es elevada) será escasa, ya que las sales amónicas tienden a desprender el amoniaco según la reacción.



Esta situación se presenta frecuentemente.

También se ha comprobado que el nitrógeno bajo la forma de amoniaco se pierde más en suelos ricos en sodio y potasio que en los que lo son en calcio y magnesio, debido posiblemente a que el pH de los primeros es más elevado que el de los segundos

11.5.4. LIXIVIACION DE LOS NITRATOS.

El nitrógeno nítrico es extraordinariamente soluble en agua y no es retenido por los coloides del suelo. Desciende arrastrado por el agua, a una velocidad que depende de la textura del suelo y de la importancia de las precipitaciones. El proceso tiene importancia, sobre todo, en el periodo de

otoño-invierno, durante el cual el movimiento del agua es descendente, y en donde las raíces son muy poco activas.

Estas pérdidas por lixiviación serán siempre mayores en un suelo desnudo que en otro cubierto (por ello son interesantes los cultivos intercalados, que ocupan el suelo durante el invierno). En este aspecto, experiencias realizadas en Versailles han mostrado pérdidas anuales de nitrógeno nítrico por lavado que varían de 30 a 150 Kg/Ha en suelos desnudos, y de 30 a 80 Kg/Ha en los cultivados. Durante algunos inviernos secos, la lixiviación es casi nula. Por el contrario, en suelos con buen drenaje, y durante algunos inviernos muy lluviosos, las pérdidas por lavado pueden ser tan intensas que, al final del invierno, no se encuentren ni trazas de nitrógeno nítrico en el suelo.

El empleo de N^{15} ha permitido conocer mejor los movimientos del nitrógeno en el suelo. Puede admitirse que el nitrógeno nítrico aportado o formado en el suelo, y que no aparece en las aguas de drenaje, queda almacenado temporalmente en estado orgánico, al ser utilizado por los microorganismos del suelo. Este nitrógeno reaparecerá más tarde en estado mineral en el circuito del nitrógeno. Las pérdidas, por tanto, por lavado del suelo, no tienen realmente la importancia que se les atribuía antiguamente, antes de ponerse en evidencia esta circunstancia.

También hay que hacer constar que, aunque el nitrógeno nítrico desciende en el suelo arrastrado por lavado, inversamente también puede subir por capilaridad en los períodos de sequía, tanto en lo que respecta al nitrógeno aportado por los fertilizantes comerciales, como el que se forma a más profundidad por mineralización. Se localiza a veces, entonces, en las capas superficiales del suelo en cantidades que, en ocasiones son importantes, fuera del alcance de las raíces, a la espera de que una lluvia o un riego lo haga descender. También en este sentido se ha demostrado que esta localización puede representar en verano más de 90 Kg/Ha de nitrógeno por término medio, los cuales se sitúan en su mayor parte en los 5 a 10 primeros centímetros del suelo, y resultan a veces inutilizables por el cultivo.

11.5.5. EXTRACCION POR CULTIVOS.

El nitrógeno es eliminado en parte del suelo por las cosechas. El cultivo intensivo y continuo de los suelos, sin intercalar leguminosas en las alternativas, e incluso el cultivo esmerado del suelo, dejándolo sin malas hierbas, empobrece el suelo en nitrógeno. Y en estas condiciones, los nitratos originados son fácilmente perdidos por lixiviación.

No pueden darse datos concretos de estas pérdidas de nitrógeno del suelo, pues existen grandes variaciones, debidas por una parte a las condiciones climáticas, naturaleza de la planta cultivada, características del suelo, etc.; y por otra según los rendimientos y la importancia de los residuos de las cosechas que se restituyen al suelo. En agricultura intensiva, oscila entre 50 y 250 Kg/Ha año, pero normalmente puede aceptarse como término medio una salida máxima de 100 Kg/Ha año.

11.5.6. FIJACION DEL AMONIO POR ARCILLAS Y MATERIA ORGANICA.

Los iones amonio pueden, en alguna proporción, introducirse en la red de algunas arcillas tipo 2x1, principalmente illita y montmorillonita, quedando bajo la forma no intercambiable.

El mecanismo de esta fijación es similar al del potasio, y se realiza mediante el reemplazamiento de cationes que se hallan entre las unidades cristalinas de las arcillas por el NH_4^+ , cuando la humedad es alta. En condiciones de sequedad, los NH_4^+ quedan atrapados entre estas unidades cristalinas, y así permanecen durante largos períodos de tiempo, como amonio no utilizable.

En general, esta pérdida de nitrógeno no puede considerarse como definitiva para la planta. Sólo es eventual y, realmente, su significación agrícola no se considera que sea muy grande.

La fijación del amonio por suelos con gran cantidad de materia orgánica también es posible. El mecanismo no está suficientemente establecido, aunque se cree que los grupos hidroxilo presentes en la materia orgánica pueden ser los principales responsables de la fijación, y además que su magnitud depende en gran parte del porcentaje de carbono en la materia orgánica.

11.6. CICLO DEL NITROGENO EN LA NATURALEZA. BALANCE.

La gran importancia de los tres procesos dentro del ciclo total del nitrógeno en la Naturaleza se pone de manifiesto claramente en la figura 11.4.

Muchos intentos se han hecho para establecer las ganancias y pérdidas del nitrógeno en la Naturaleza. El balance sólo puede hacerse con cierta aproximación, por disponer sólo estimaciones más o menos exactas.

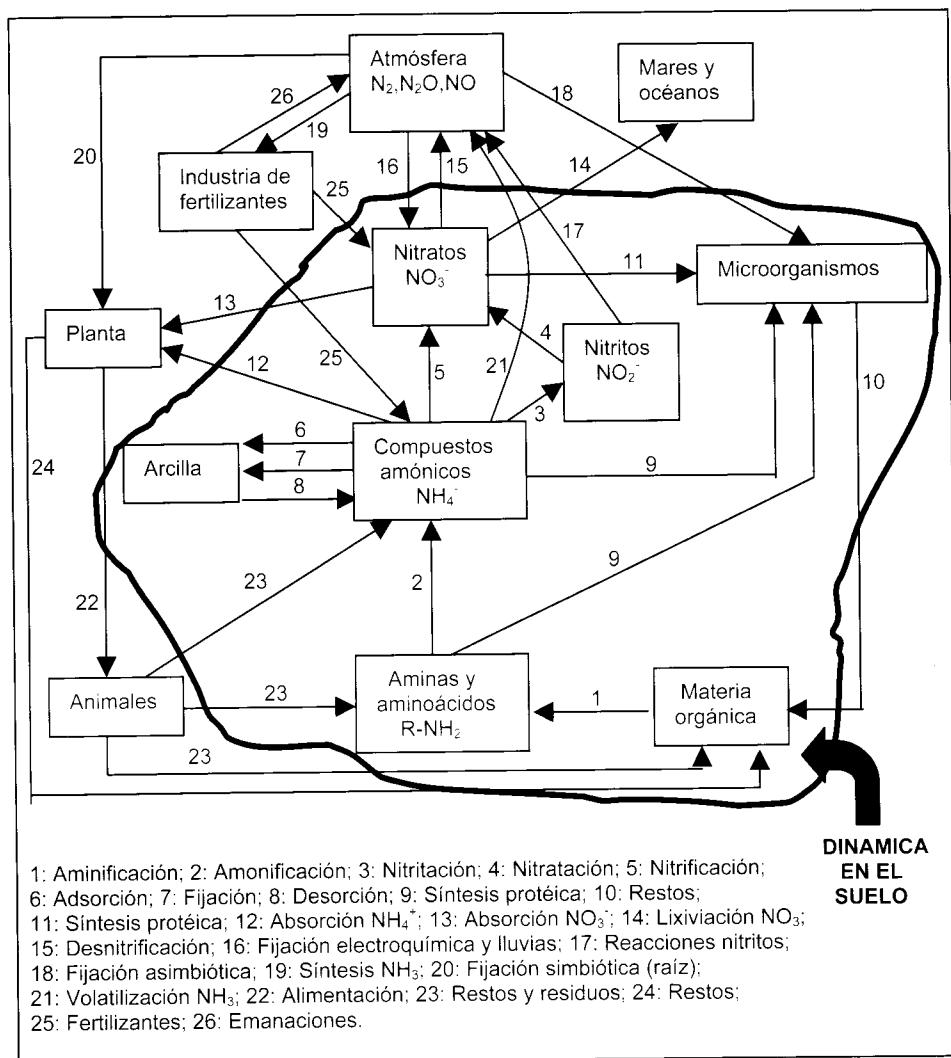


Figura 11.4. Ciclo del nitrógeno en la Naturaleza.

En la tabla 11.1. se exponen cálculos según D. Werner (1980). Los datos expuestos suponen, por tanto, que el nitrógeno está siendo introducido en la corteza terrestre en forma fijada a razón de unos 450 millones de Tm/año. Si la desnitrificación no interviniera, el nitrógeno fijado se acumularía poco a poco en

los suelos, hasta alcanzar. transcurrido un determinado periodo de tiempo, concentraciones tóxicas.

Tabla 11.1.

Movimiento global entre el nitrógeno del suelo y el nitrógeno atmosférico, en millones de Tm/año (D. Werner, 1980).

	GANANCIAS¹	PERDIDAS¹
Producción industrial	46	
Fijación biológica	100-250	
Precipitación NO ₃ ⁻ /NO ₂ ⁻	60	
Precipitación NH ₃	140	
Desnitrificación		200-300
Volatilización NH ₃		165

(1) Millones de Tm

Sin embargo, estas cifras, que podrían ser aceptadas hace unos años, no pueden serlo en la actualidad. La cantidad de nitrógeno fijado industrialmente ha ido aumentando últimamente de forma extraordinaria. Según datos proporcionados por la Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI), en el año 1980 se consumieron, con bastante aproximación, en el mundo 62 millones de Tm de nitrógeno en forma de fertilizantes. Para el año 2000 supone que este consumo puede superar los 150 millones de Tm.

Por otra parte, si a este nitrógeno se le suman las cantidades fijadas por el aumento en el cultivo de leguminosas en muchas partes del mundo, puede alcanzarse pronto una situación en la que, a menos que los fertilizantes y los desechos nitrogenados se manejen con precaución, ríos y lagos se recarguen con el nitrógeno transportado por las aguas que afluyen a ellos; en estas corrientes de agua, y también en las aguas subterráneas próximas, la concentración de nitrógeno podría alcanzar niveles tóxicos. EL problema también se agudiza por distribución de los desechos orgánicos de una población en continuo crecimiento. Es indudable que en un próximo futuro deberán buscarse soluciones para corregir el desequilibrio que se está produciendo entre las entradas y salidas de nitrógeno en todos los continentes.

12

EL FOSFORO EN LA PLANTA.

Las primeras determinaciones que sugieren la esencialidad del fósforo en la vida vegetal se remontan a 1834, año en el que J.B. Boussingault inicia sus célebres experiencias de campo en Alsacia.

En 1840, el químico alemán Justus von Liebig deduce la necesidad del fósforo, basándose en numerosos análisis de suelos y plantas. En la primera edición de su libro "La Química y sus aplicaciones a la Agricultura", ya estableció que los fosfatos son necesarios para la formación de semillas, y como consecuencia de sus experiencias sugiere la idea de que el fósforo bajo la forma de fosfato insoluble de los huesos podía transformarse, en más o menos soluble, por tratamiento con un ácido mineral.

Simultáneamente, J.B. Lawes, conocedor de los estudios de Liebig, realiza asimismo una amplia experimentación para aprovechar el valor fertilizante de fuentes comunes de fósforo, como harina de huesos, apatito y fosfatos de rocas. Junto con J.H. Gilbert, producen el llamado "apatito-ácido sulfúrico" (en términos actuales el superfosfato de cal), y unos años después exponen, entre otros principios, que todos los cultivos requieren fósforo, aunque la cantidad presente en la planta no debe considerarse una medida de la cantidad requerida.

En 1856, Salm-Horstmar, utilizando disoluciones nutritivas, concretó también esta esencialidad.

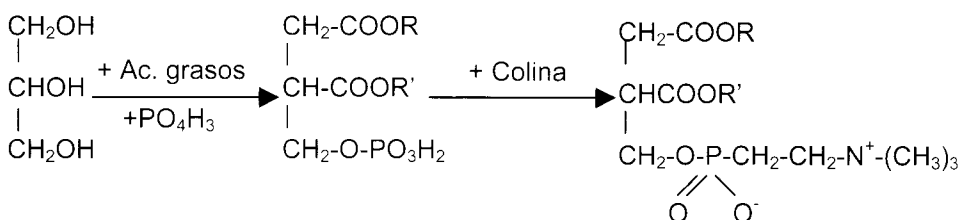
12.1. CONTENIDO, FORMAS Y COMPUESTOS IMPORTANTES.

El fósforo se encuentra en todos los tejidos de la planta en una concentración variable, según la parte del aparato vegetativo que se considere. Su valor medio, expresado en P_2O_5 , puede situarse entre 0'5 y 1 % de materia seca.

La mayor parte lo absorben las plantas en forma de PO_4H_2^- , y en menor proporción como PO_4H^{2-} . De hecho, la absorción del primero es diez veces más rápida que la del segundo, aunque hay que tener en cuenta que en ello influye notablemente el pH del suelo. Otras formas por las que el fósforo puede ser, posiblemente, absorbido por las plantas son: $\text{P}_2\text{O}_7^{-4}$ y PO_3^- , así como ciertos fosfatos orgánicos solubles.

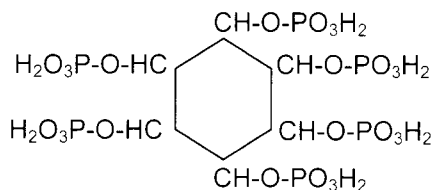
Bajo la forma de fosfatos, principalmente de potasio y magnesio, se le encuentra en pequeña proporción. Mayoritariamente se halla formando parte de una gran variedad de combinaciones orgánicas integradas en los grupos: fosfolípidos, fosfoprótidos y fosfoglúcidos.

Los fosfolípidos forman parte fundamentalmente de la estructura del protoplasma, y por su hidrólisis enzimática se desdoblan en sus constituyentes. A este grupo pertenecen las lecitinas, que son fosfoaminolípidos que contienen como base nitrogenada colina:



Los fosfoprótidos son los constituyentes de los núcleos celulares. Por hidrólisis originan ácido fosfórico acompañado de aminoácidos o bases púricas. Estas grandes moléculas contienen un 10 % de ácidos nucleicos, y en estos el ácido fosfórico es uno de los componentes de los nucleótidos integrantes, sirviendo de puente de enlace a la molécula de pentosa (ribosa o desoxirribosa) del nucleótido inmediato (Ver 10.2.5. Biosíntesis protéica).

Los fosfoglúcidos son ésteres obtenidos en la reacción del ácido fosfórico con diversos azúcares. Un gran número de éstos se combina con el ácido fosfórico y juegan un papel preponderante en los metabolismos hidrocarbonados. Entre ellos hay que destacar la fitina, que es la sal cálcico-magnésica del éster exafosfórico de un alcohol cíclico, el inositol:



La fitina contiene 22 % de fósforo, 12 % de calcio y 1'5 % de magnesio, y constituye una fuente de reserva de fósforo, particularmente en los granos, tubérculos y rizomas. Es soluble en agua y desaparece del grano durante el curso de su germinación, asegurando con ello el desarrollo de la nueva planta.

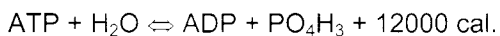
Pero el fósforo, además de formar parte de los elementos plásticos de la planta, se encuentra también en ella como constituyente esencial de numerosos coenzimas como: NAD (nicotinamida-adenin-dinucleótido), NADP (nicotinamida-dinucleótidofosfato), FAD (flavin-adenin-dinucleótido), CoASH (coenzima A), LIPS₂ (ácido lipóico o tióctico), UDP (uridin-difosfato), TPP (pirofosfato de tiamina), PAL (fosfato de piridoxal),

Mención especial en esta enumeración de compuestos importantes con fósforo en la planta la merece, por la amplitud de su participación, los compuestos fosforilados encargados del almacenamiento y transporte de la energía necesaria para la realización de sus procesos vitales.

Las sustancias clave en este tipo de transporte energético son tres derivados de la adenosina. En el monofosfato de adenosina (AMP o ácido adenínico), una molécula de ácido fosfórico se esterifica con la fracción ribosa de la adenosina. El difosfato de adenosina (ADP) contiene dos radicales fosfóricos, el primero de los cuales está unido a la ribosa, igual que sucede con el monofosfato, mientras que el segundo está unido al primer radical fosfórico. En el trifosfato de adenosina (ATP) existe aún un tercer radical fosfórico unido a los dos del ADP.

En la figura 12.1. se representan los compuestos que dan lugar a los distintos fosfatos de adenosina. así como la secuencia de reacciones que dan lugar al ATP.

Durante el proceso de la fotosíntesis. la energía luminosa es convertida en energía química y almacenada en los enlaces de las moléculas orgánicas que se van sintetizando. La ruptura de los enlaces carbono-carbono de estos compuestos libera lentamente energía a través de una serie de reacciones escalonadas, reguladas por enzimas. y que es almacenada en el ATP. De esta forma, la energía liberada en la oxidación de compuestos como glúcidos, lípidos, prótidos, etc., es rápidamente utilizada en la síntesis del ATP, a expensas del ADP y ácido fosfórico. Cuando el ATP se hidroliza con un ácido o con un enzima apropiado, se separa el fosfato terminal y queda en libertad una cantidad relativamente grande de energía:



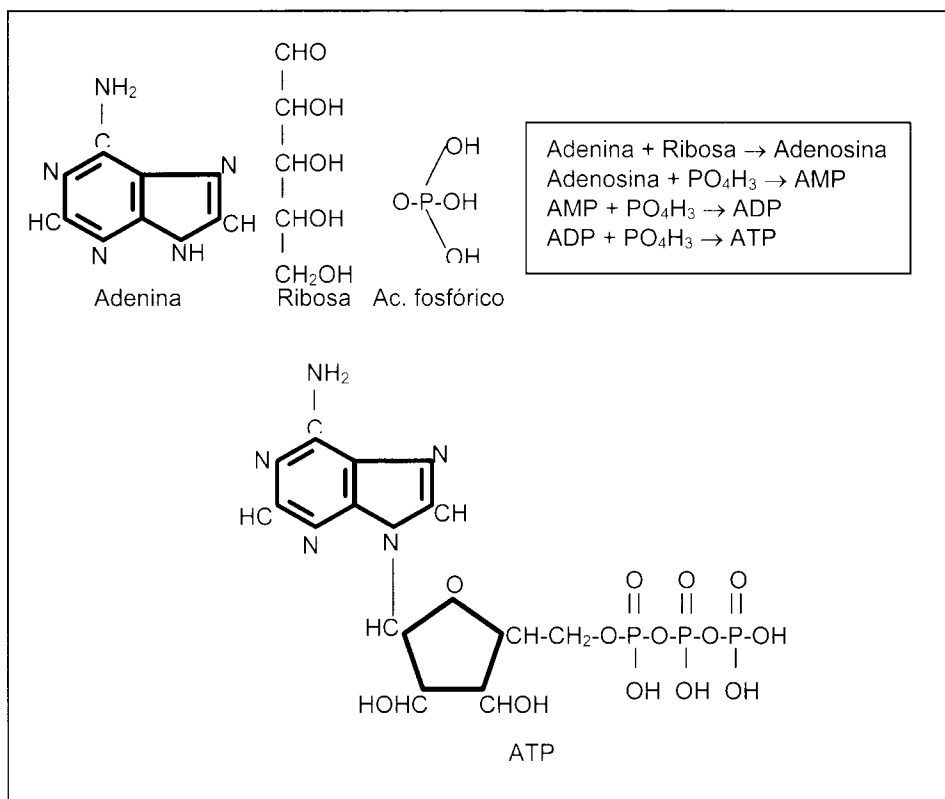
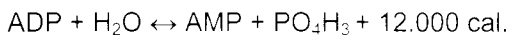


Figura 12.1. Componentes y fórmula del ATP.

También al hidrolizarse el ADP con separación de su fosfato terminal se produce una nueva liberación de energía:



El AMP resulta difícil de hidrolizar, y sólo origina una cantidad de energía pequeña: 3000 calorías/mol aproximadamente. El ATP constituye pues un compuesto importantísimo intermediario entre las reacciones que liberan y consumen energía.

12.2. FUNCIONES.

Sin adentrarnos en lo muy particular, y sin pretender tampoco abarcar la totalidad de procesos metabólicos en los que el fósforo interviene, se resumen a continuación algunos aspectos bioquímicos que claramente ponen de manifiesto la esencialidad del fósforo en el metabolismo vegetal. Entre ellos se omite el gran papel que desempeña en la síntesis proteica, por haber quedado suficientemente expuesto en el tema correspondiente al nitrógeno en la planta.

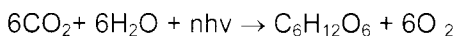
12.2.1. BIOGENESIS DE LOS GLUCIDOS.

La fotosíntesis o asimilación del CO_2 por las plantas verdes constituye el proceso más importante, tanto desde el punto de vista cualitativo como cuantitativo, que se verifica en la Tierra.

Esta circunstancia se pone de manifiesto con sólo considerar que, directa o indirectamente, todos los seres vivos incapaces de realizar por sí mismos el proceso de la fotosíntesis viven de la asimilación de las plantas, y con ello resulta posible la vida en la forma actual.

La energía necesaria para este proceso es la luz, la cual es captada por el pigmento de las hojas, la clorofila, mediante un mecanismo complicado. Los productos orgánicos que se originan constituyen los materiales de partida de que disponen los seres vivos para los numerosos procesos de síntesis y degradación. Todos ellos conducen finalmente a la producción de CO_2 , el cual se integra de nuevo en los compuestos orgánicos por el camino de la fotosíntesis.

Globalmente, la reacción fotosintética se puede representar así:



donde ν representa cuantos de luz, es decir, energía radiante.

La fotosíntesis tiene lugar en los cloroplastos, orgánulos que contienen la clorofila junto con capas proteicas que contienen los enzimas fotosintéticos. Las reacciones que tienen lugar se suelen agrupar en dos fases: 1º) Reacciones fotoquímicas; y 2º) Reacciones en fase oscura. El proceso total, de una forma muy esquemática, se representa en la figura 12.2.

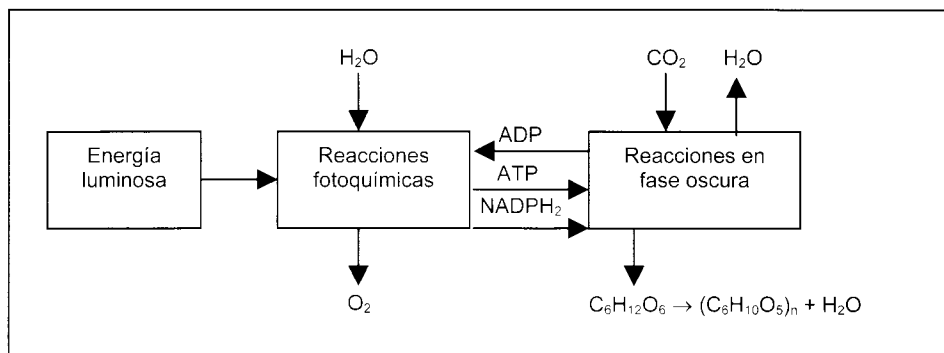


Figura 12.2. Esquema resumido del proceso de la fotosíntesis.

Las reacciones fotoquímicas tienen por objeto almacenar la energía necesaria para la síntesis de compuestos carbonados en la segunda fase.

Estas reacciones fotoquímicas se pueden clasificar a su vez en: 1°) Parte cíclica de las reacciones fotoquímicas; y 2°) Parte no cíclica.

Parte cíclica de las reacciones fotoquímicas. La energía luminosa absorbida por la clorofila provoca la expulsión de un electrón energético de su molécula. Este electrón es captado o transferido a un sistema redox especial: la ferredoxina, proteína con hierro. Este transportador de electrones va perdiendo energía para volver finalmente a la molécula de clorofila, constituyendo un ciclo. La energía cedida en este transporte electrónico es almacenada por las células en forma de ATP, mediante el paso de fosfato inorgánico P_i a ADP y ATP, con su correspondiente sistema enzimático (Figura 12.3.).

Parte no cíclica. En esta parte no cíclica, la planta utiliza para almacenar energía no sólo ATP, sino también NADPH₂ (forma reducida del fosfato de nicotinamida-adenin-dinucleótido). En la emisión de electrones interviene, además de la clorofila, otro pigmento no identificado, que podría ser la clorofila b. Los electrones emitidos por este último pigmento bajo la acción de los fotones son captados por la cadena transportadora de electrones y transferidos a las moléculas de clorofila que han quedado cargadas positivamente, al emitir ellas a su vez electrones. En el transcurso de esta transferencia electrónica se libera energía, que se utiliza en la formación de ATP.

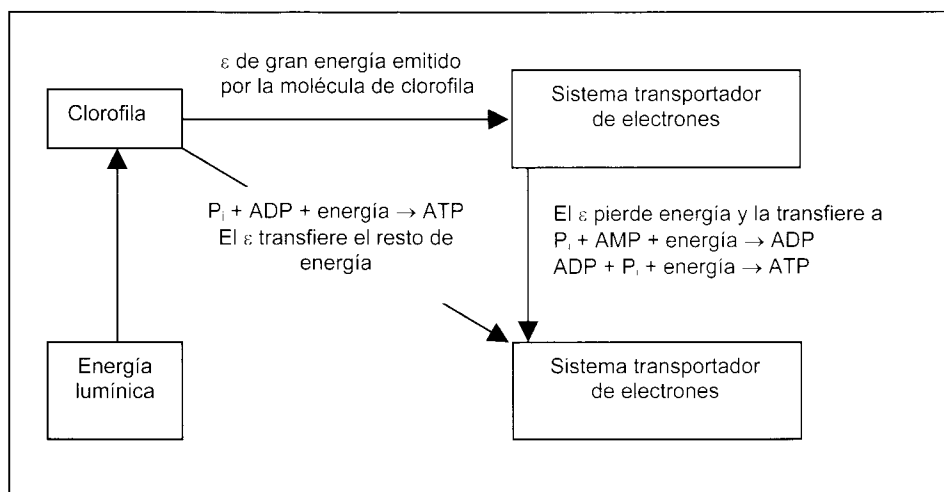
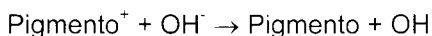
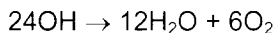


Figura 12.3. Parte cíclica de las reacciones fotoquímicas de la fotosíntesis.

El pigmento, que ha quedado cargado positivamente al emitir un electrón, capta un ión hidroxilo procedente de la ionización del agua y origina:

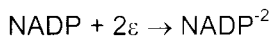


El grupo OH es un radical inestable, y 24 de estos radicales se combinan dando:

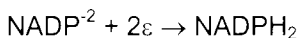


y este oxígeno es el que se desprende en la fotosíntesis.

Los electrones emitidos por la clorofila a, bajo la acción de la luz visible, son captados por moléculas de NADP para dar:



y este ión negativo reacciona con iones H⁺ procedentes de la ionización del H₂O que suministran los OH⁻ y dan NADPH₂:



Así se transfiere la energía lumínica absorbida por la clorofila. Por cada 24 moléculas de H_2O que toman parte se forman 12 de ATP y 12 de $NADP^{2-}$ (Figura 12.4.).

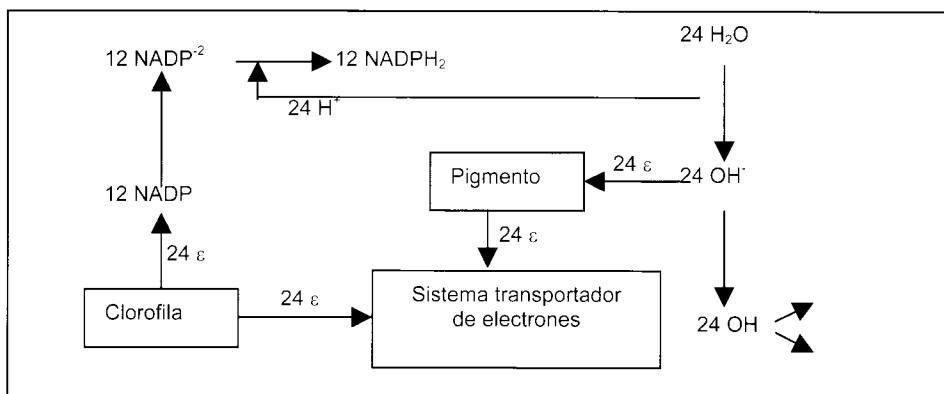


Figura 12.4. Parte no cíclica de las reacciones fotoquímicas en la fotosíntesis.

La segunda parte del proceso fotosintético son las reacciones en fase oscura, en las que el CO_2 es transformado en hidratos de carbono. Es puramente bioquímica y no requiere luz. La serie de reacciones de este proceso ha sido posible ponerlas de manifiesto gracias al empleo de carbono radiactivo.

Como aceptor del CO_2 actúa en la planta el difosfato de ribulosa (Ri-DP), el cual se forma por acción de un enzima: la carboxidismutasa, que cataliza la adición del CO_2 al difosfato de ribulosa y la disociación del producto originado, lábil, en dos moléculas de ácido 3-fosfoglicérico, el cual constituye el primer producto concebible de la fotosíntesis. Todos los enzimas que intervienen en el ciclo de la asimilación del CO_2 se encuentran en los cloroplastos. En la figura 12.5. se presenta un esquema representativo inicial de esta segunda fase.

12.2.2. BIOSÍNTESIS DE LOS LÍPIDOS.

Los lípidos son sintetizados a partir de la triosafosfato obtenido como intermediario de uno de los productos de la glucólisis y del acetilcoenzima A, producido por descarboxilación oxidativa del ácido pirúvico. Las principales reacciones de estas síntesis tienen lugar en el citoplasma, y en ellas el fósforo desempeña también un gran papel.

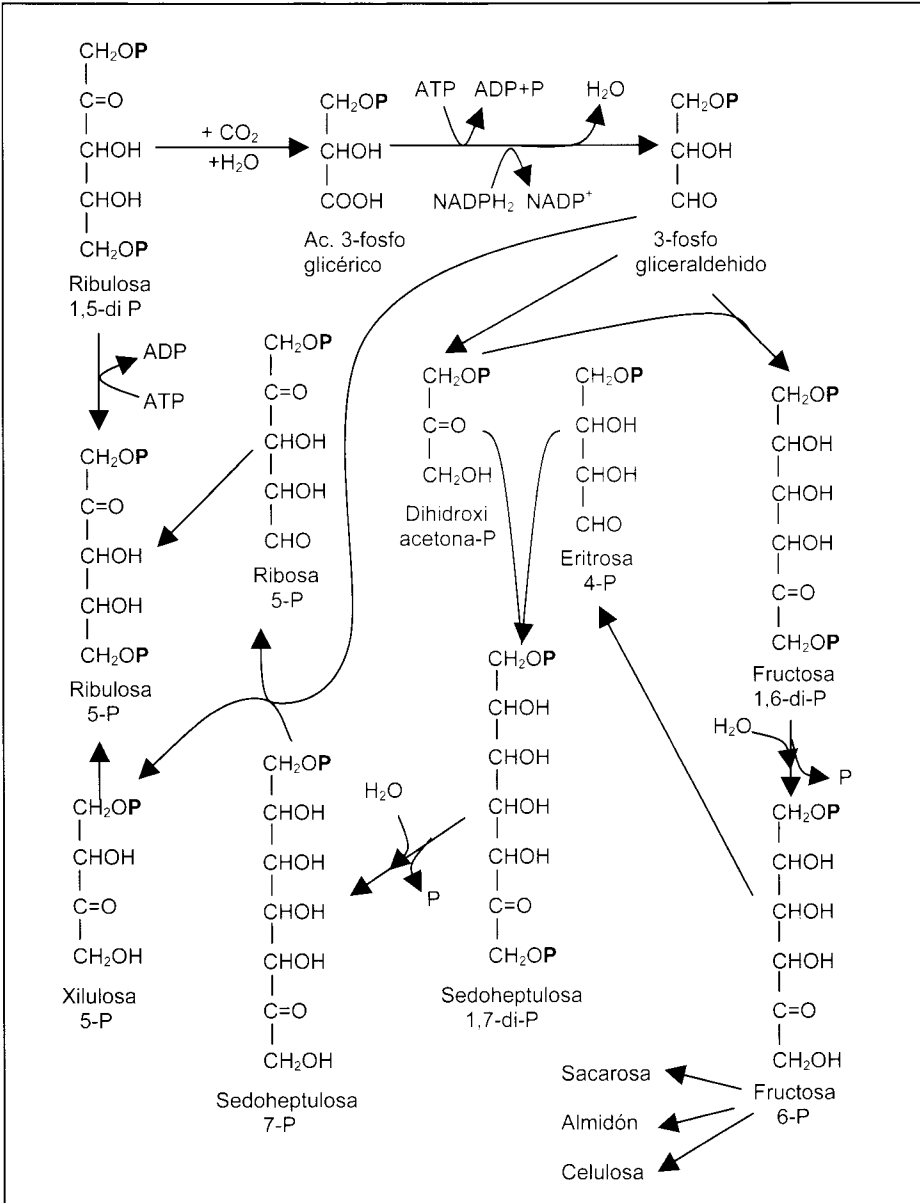


Figura 12.5. Diversas etapas del Ciclo de Calvin, fase oscura de la fotosíntesis (M. Calvin, 1956).

De forma resumida, se exponen en la figura 12.6. las reacciones iniciales en la biosíntesis de los lípidos.

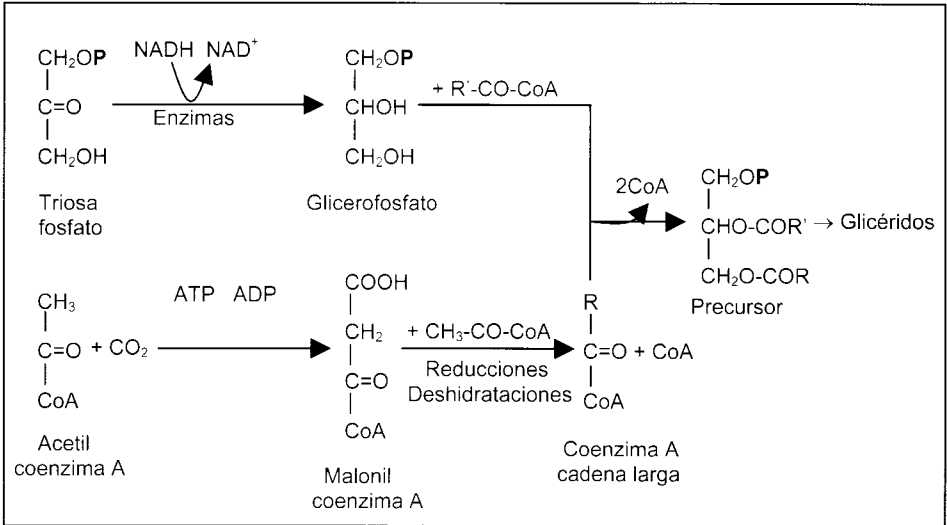


Figura 12.6. Reacciones iniciales en la biosíntesis de los lípidos.

12.2.3. SÍNTESIS DE CLOROFILAS Y COMPUESTOS CAROTENOIDES.

También en las primeras reacciones que es la síntesis del núcleo pirrólico (constituyente de participan compuestos con fósforo (Figura 12.7.).

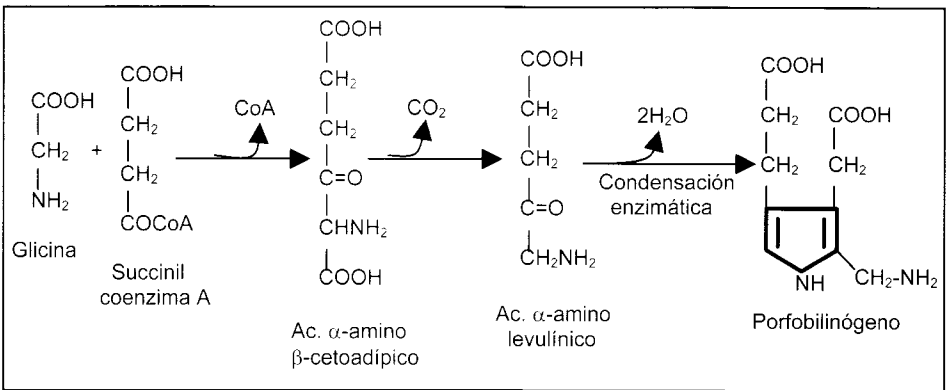


Figura 12.7. Primeras reacciones en la síntesis de las clorofilas.

La síntesis de los carotenoides es otro ejemplo importante de la participación del fósforo en el metabolismo vegetal. Estos compuestos se sintetizan a partir de una "unidad biológica", el isopentenil pirofosfato (IpPP), cuyo precursor es el ácido mevalónico. Este puede proceder del acetilcoenzima A, y requiere ATP para su transformación (Figura 12.8.).

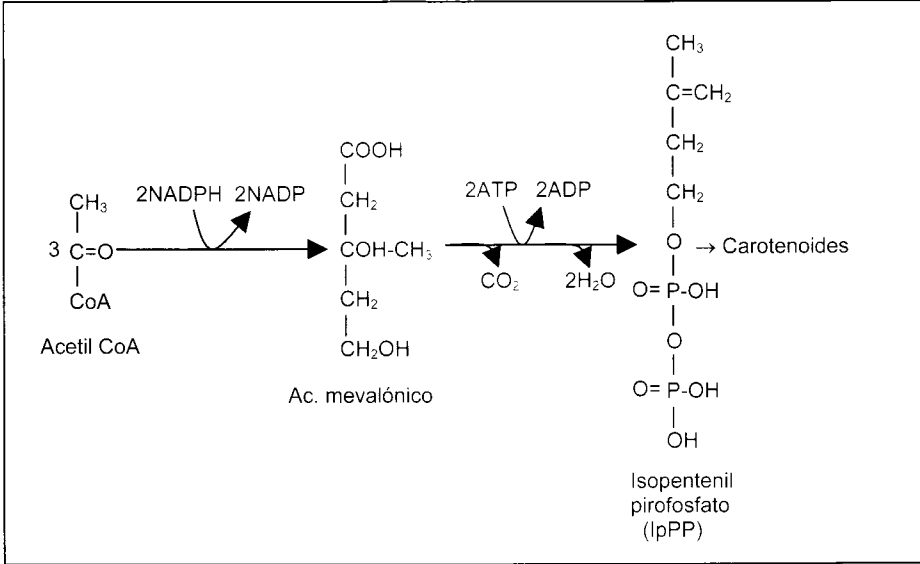


Figura 12.8. Primeras reacciones en la síntesis de compuestos carotenoides.

12.2.4. GLUCOLISIS Y METABOLISMO DE LOS ACIDOS ORGANICOS.

La respiración vegetal es el proceso químico por el que el protoplasma vivo degrada ciertas sustancias orgánicas, dejando libre energía que utiliza en diversas actividades metabólicas. En contraste con la fotosíntesis, en la que la energía solar se transforma en energía química que queda unida a moléculas orgánicas, la respiración consiste en una serie de transiciones en que una parte o toda la energía vinculada a las moléculas orgánicas se libera.

Para que estas reacciones se produzcan, deben estar presentes un conjunto de enzimas que realizan una doble misión: primero dividen las moléculas orgánicas en otras más sencillas; y segundo, y quizás más importante, las transforman en moléculas con fósforo orgánico, que facilitan la transferencia de energía a enlaces fosfatos ricos en ellas.

Entre las muchas reacciones englobadas en el proceso de la respiración vegetal, la glucólisis es el término utilizado para describir la secuencia de reacciones mediante las cuales un azúcar hexosa es convertido en ácido pirúvico.

El proceso puede dividirse en dos etapas: a) Conversión de glucosa en fructosa-1,6-difosfato; y b) Escisión de la fructosa-1,6-difosfato y formación del ácido pirúvico (Figura 12.9.).

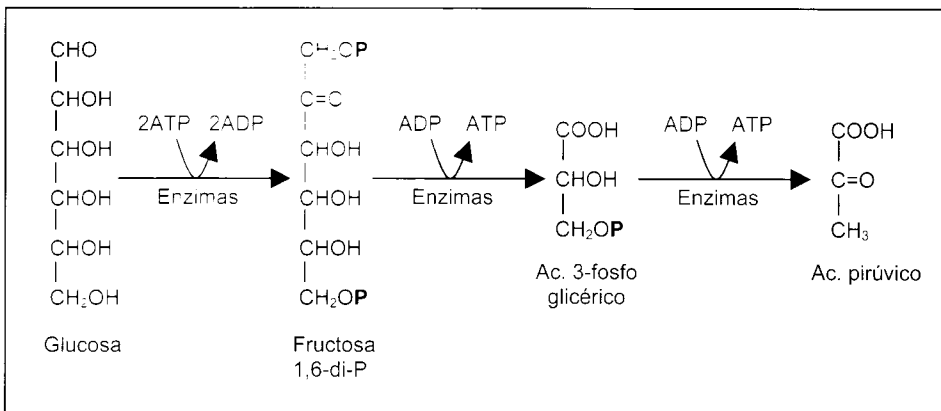
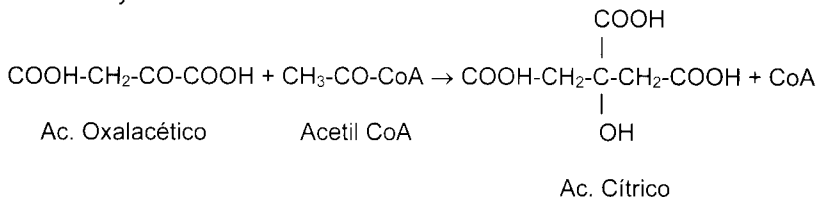


Figura 12.9. Principales etapas de la glucólisis.

La oxidación completa del ácido pirúvico se efectúa durante el proceso respiratorio por intermedio de una serie de ácidos orgánicos. Estos ácidos se producen a partir de los ácidos pirúvico y oxalacético, los cuales originan un ciclo (ciclo de Krebs), al final del cual se regenera una nueva molécula de pirúvico. Para que esta condensación pueda efectuarse, el ácido pirúvico se transforma primeramente en acetilcoenzima A. Este compuesto es el enzima de transferencia de grupos acilo más importante en los seres vivos, y constituye una molécula de estructura muy compleja y en la que el fósforo se encuentra como constituyente. La primera reacción, por tanto, de este ciclo es la condensación del acetilcoenzima A con el ácido oxalacético para formar ácido cítrico y liberar coenzima A:



A partir del ácido cítrico se desarrollan una serie de reacciones en las que se originan los diversos fitoácidos, regenerándose al final de nuevo ácido oxalacético. Los coenzimas NADP, FAD, CoASH y TPP, en los que el fósforo, como ya se ha indicado, forma parte como constituyente, desempeñan un papel fundamental en estas reacciones.

12.3. ALTERACIONES POR DEFICIENCIA Y EXCESO.

Los síntomas generales de la falta de fósforo están ligados a un desarrollo anormalmente débil del vegetal, tanto en su parte aérea como en el sistema radicular. Ello es consecuencia, tal como se ha visto, de que el elemento es un participante básico en casi todos los procesos de crecimiento y síntesis de sus compuestos constituyentes. Las características más específicas cuando existe deficiencia aparecen en las hojas, que se hacen más delgadas, erectas, de menor tamaño que las normales y con las nerviaciones poco pronunciadas. Debido a la elevada movilidad del fósforo en la planta, y a causa de la tendencia que presentan las hojas jóvenes a obtener de las más viejas los elementos móviles en condiciones de deficiencia, las hojas antiguas son las primeras que muestran los síntomas. En los árboles frutales, las hojas tienden a tomar tonos pardos rojizos, se necrosan y se caen precozmente; la madurez del fruto se retrasa, con un aumento de la acidez y una producción disminuida. En la patata, la deficiencia provoca la aparición de manchas grises en la parte central y un sistema radicular notablemente reducido.

También está comprobado que el fósforo es necesario especialmente para la formación de semillas. En los cereales se observa una sensible disminución del número de espigas, un debilitamiento de sus cañas y una menor resistencia a las enfermedades y daños por heladas. Cuando hay falta de fósforo, la cosecha puede reducirse en un 50 %. Presenta asimismo una relación estrecha con la producción de vitaminas.

Las alteraciones por exceso de fósforo se observan experimentalmente sólo en cultivos en medio líquido. En ciertos suelos enriquecidos fuertemente por aportaciones masivas y repetidas de fertilizantes fosforados solubles, son frecuentes clorosis férricas por la insolubilización que sufre el hierro ante dichos excesos.

13

EL FOSFORO EN EL SUELO.

13.1. ORIGEN, CONTENIDO Y FORMAS.

Diferentemente al nitrógeno, que como ya se ha visto puede incorporarse a los suelos por medio de la fijación bioquímica por microorganismos, el fósforo no tiene tal ayuda microbiana. Este elemento procede sólo de la descomposición de la roca madre durante el proceso de la meteorización, y representa alrededor del 0'1 % de la corteza terrestre. Su contenido, pequeño en las rocas primitivas o sedimentarias (0'03-0'08 %), es notablemente más elevado en las rocas volcánicas (0'1-0'3 %), las cuales constituyen la fuente original del fósforo, y en donde se le encuentra sobre todo como inclusiones apatíticas. Estas formas fosfatadas, a la demolición de las rocas, se han ido concentrando en yacimientos más o menos importantes sobre toda la superficie del globo.

Los geólogos admiten, en general, que los mayores depósitos de fosfatos, los sedimentarios, son de origen orgánico. Tales depósitos pueden haberse formado en el fondo del mar. En efecto, el agua oceánica contiene indicios de fosfatos (0'1 ppm como término medio), que los organismos marinos se apropian y almacenan en sus cuerpos. Al morir, sus restos se acumulan en el fondo del mar, y al descomponerse la materia orgánica y perderse parte de los carbonatos solubles, el fósforo se concentra bajo la forma de fosfatos. En algunos casos, las capas de fosfatos calizos han sido elevadas, posteriormente, por movimientos tectónicos sobre el nivel del mar, concentrándose aún más sus fosfatos por la lixiviación de los carbonatos más solubles. Se cree que este es el origen de los fosfatos del sudeste de los EE.UU. En algunos de estos depósitos se encuentran todavía huesos y dientes de peces prehistóricos.

Otros yacimientos de fosfatos pueden tener como origen las deyecciones de aves. Así aparecen los depósitos de guano, en los que el ácido fosfórico constituyente de dichos residuos, después de ser lixiviados, se ha combinado con el calcio de las rocas presentes en las zonas donde se efectúan estas deyecciones. Tales yacimientos se encuentran en numerosas islas del Océano Indico y sobre costas de diversos países tropicales como Vietnam, Madagascar, etc.

La cantidad de fósforo total del suelo, expresada como P_2O_5 , en raras ocasiones sobrepasa el valor del 0'5 % (1500 ppm ó 3360 Kg/Ha), y puede clasificarse, en general, como inorgánico y orgánico.

El fósforo inorgánico es casi siempre predominante, excepto en los suelos donde la materia orgánica se halla en una gran proporción. El orgánico suele ser mayor en las capas superficiales que en el subsuelo, debido a la acumulación de materia orgánica en las mismas. Debe indicarse también, en cuanto al contenido total, que generalmente suele ser más alto en los suelos jóvenes vírgenes y en las áreas donde las lluvias no son excesivas. En los suelos cultivados, debido a que poco de este elemento se pierde por lixiviación, y de que las eliminaciones por cosechas son generalmente pequeñas, tiende a acumularse en las capas superficiales.

Son muy numerosos los compuestos inorgánicos que se encuentran en los suelos. Pero la mayor parte pueden clasificarse en dos grandes grupos: 1°) Los que contienen calcio; y 2°) Los que contienen hierro y aluminio. Los primeros son los que verdaderamente predominan y los que, bajo un punto de vista agronómico, tienen mayor importancia. En la tabla 13.1. se expone una relación de los más comunes en cada grupo.

Tabla 13.1. Compuestos más comunes de fósforo en el suelo

COMPUESTOS QUE CONTIENEN CALCIO	COMPUESTOS QUE CONTIENEN HIERRO Y ALUMINIO
Flúor apatito: $(PO_4)_2Ca_3.F_2Ca$	Variscita: $PO_4Al.2H_2O$
Carbonato apatito: $(PO_4)_2Ca_3.CO_3Ca$	Stremgita: $PO_4Fe.2H_2O$
Hidroxi-apatito: $(PO_4)_2Ca_3.Ca(OH)_2$	Vivianita: $(PO_4)_2Fe_3.8H_2O$
Oxi-apatito: $(PO_4)_2Ca_3.CaO$	Dufrenita: $PO_4Fe_2(OH)_3$
Fosfato tricálcico: $(PO_4)_2Ca_3$	Wavellita: $(PO_4)_2Al_3(OH)_3.5H_2O$
Fosfato bicálcico: $PO_4HCa.2H_2O$	Taranakita: $(PO_4)_8H_6Al_5K_3.18H_2O$
Fosfato monocálcico: $(PO_4H_2)_2Ca.H_2O$	

Entre los fosfatos de calcio, el flúor-apatito es el más insoluble del grupo y, por consiguiente, el que contiene el fósforo en forma menos aprovechable. Sólo los fosfatos mono y dicálcico son fácilmente asimilables por las plantas; pero excepto en suelos recientemente fertilizados, estos compuestos están presentes en cantidades extremadamente pequeñas, ya que con facilidad se transforman en compuestos más insolubles.

Los fosfatos de hierro y aluminio son fosfatos hidroxilados, extremadamente insolubles y muy estables en suelos ácidos. Es posible que estos fosfatos de hierro y aluminio aparezcan en muchos suelos en forma de películas de pequeño grosor, retenidas en la superficie de los cristales de arcilla.

El fósforo orgánico que ha sido identificado específicamente en el suelo se encuentra, sobre todo, bajo tres formas más o menos degradadas: fosfolípidos, ácidos nucleicos y fitina y derivados. Constituyen, junto a otros compuestos no identificados, entre el 20 y 80 % del fósforo total del suelo, pero su proporción en la disolución del suelo es probablemente pequeña.

La existencia de los fosfolípidos en los suelos se desprende de hechos experimentales. En primer lugar, la colina, un producto de descomposición de la lecitina (uno de los fosfolípidos), se aisló en extractos de suelo hace ya muchos años. Una segunda evidencia es el hallazgo por numerosos investigadores de fósforo orgánico en los extractos alcohólicos y etéreos, ya que la solubilidad en alcohol y en el éter es una propiedad característica de los fosfolípidos. El valor más alto descrito en la bibliografía es tan solo de 34 ppm de fósforo en forma de este compuesto. Algunos investigadores, sin embargo, indican que las cantidades presentes rara vez exceden de 3 ppm de fósforo como fosfolípidos.

La presencia de ácidos nucleicos en los suelos ha sido deducida, también, por evidencias indirectas. A lo largo de varios años, muchos compuestos, la mayor parte de los cuales son productos hidrolíticos del ácido nucleico, han sido aislados en los hidrolizados de los suelos. Estos compuestos incluyen ácido fosfórico, azúcar en forma pentosa, adenina, uracilo, xantina y algún otro. Todos estos hallazgos sugieren que constituyentes de los ácidos nucleicos están presentes en el suelo pero no prueban necesariamente la existencia de ácidos nucleicos intactos en la materia orgánica del mismo.

Diversos tipos de fosfatos de inositol se han identificado en los suelos. Debe mencionarse que la presencia de estos compuestos es quizá superior a la de los fosfolípidos y de los ácidos nucleicos. Algunos investigadores sugieren que la presencia en el suelo de fosfatos de inositol es de origen microbiológico.

Sin embargo, no todo el fósforo orgánico del suelo debe ser asociado íntimamente con la fracción del humus de la materia orgánica. Se ha puntualizado que, al contrario del carbono o del nitrógeno, todo el fósforo orgánico puede ser total y fácilmente eliminado del suelo mediante extracción

con reactivos alcalinos. Y aunque aproximadamente del 40 al 50 % del fósforo orgánico del suelo puede ser identificado como ácidos nucleicos, fosfatos de inositol y fosfolípidos, el resto está ampliamente sin identificar.

13.2. DINAMICA DEL FOSFORO EN EL SUELO. FACTORES INFLUYENTES.

De lo expuesto anteriormente se deduce que la mayor parte del fósforo normalmente presente en los suelos no es aprovechable por las plantas, debido a su gran insolubilidad; y que el elemento, para que pueda ser asimilado, es necesario que se encuentre como PO_4H_2^- ó PO_4H^{-2} en la disolución del suelo. En consecuencia, el mantenimiento de una adecuada concentración de fósforo en éste será condición indispensable para que la planta adquiera el desarrollo satisfactorio.

Normalmente en todos los suelos, la cantidad de fosfato asimilable que contiene la disolución es muy pequeña (en la mayor parte de los casos del orden de 0'1 a 1 mg $\text{P}_2\text{O}_5/\text{l}$). Esta cantidad depende de la modificación del equilibrio dinámico que mantiene la disolución con los compuestos inorgánicos insolubles o fijados por una parte, y la formación y descomposición de la materia orgánica por otra. Este equilibrio puede representarse esquemáticamente tal como se expone en la figura 13.1.

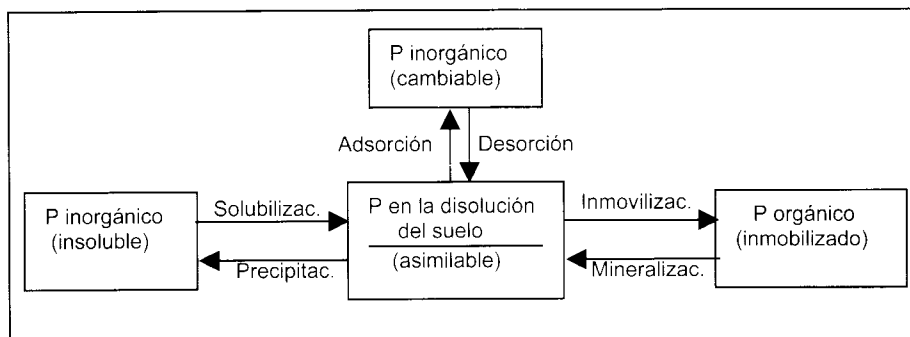


Figura 13.1. Equilibrio de las distintas formas del fósforo en el suelo

Varios son los factores que pueden modificar este equilibrio. De todos ellos, el pH del suelo es realmente el que condiciona el tipo de reacciones y situaciones posteriores que pueden aparecer en el suelo y que controlan, en definitiva, el aprovechamiento de las formas asimilables del fósforo por las plantas.

13.2.1. FOSFORO INORGANICO.

En primer lugar hay que recordar que la clase de ión fosfato varía con el pH de la disolución. Entre los límites de pH 4 y 10 que presentan los suelos, existen las tres formas de ortofosfatos: PO_4H_2^- , PO_4H^{2-} y PO_4^{-3} . Cuando el pH es bajo, la forma monovalente tiende a dominar, y su concentración es máxima a pH=4 y mínima a pH=9. Lo contrario ocurre con la forma divalente, que empieza a aparecer a pH=4 y alcanza su máximo a pH=9. Los dos iones están en equilibrio a un pH=7, tal como puede apreciarse en la figura 13.2. Los iones PO_4^{-3} aparecen en débil cantidad en el intervalo de pH=9-10.

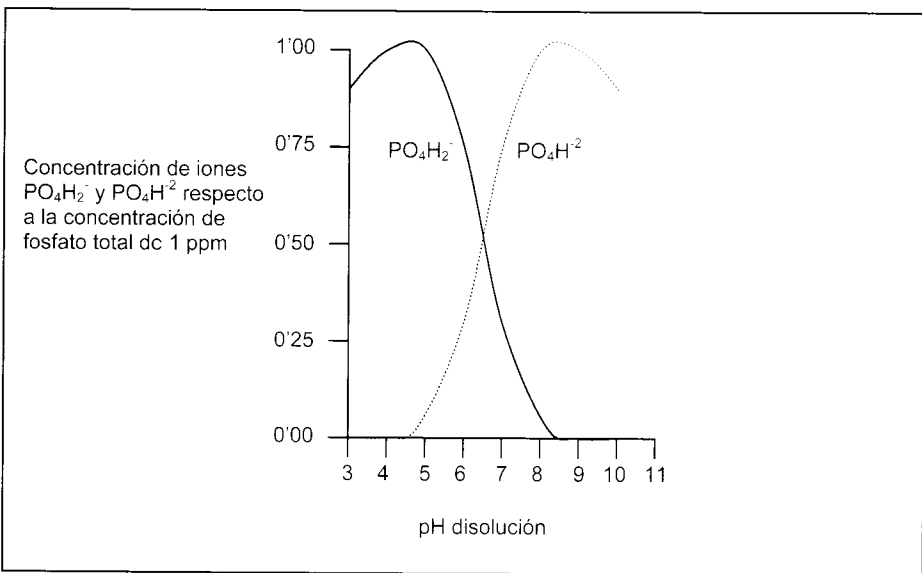


Figura 13.2. Concentración de iones PO_4H^{2-} y PO_4H_2^- en disolución en relación con el pH.

Por tanto, considerando solamente el factor pH, la asimilación del fósforo por las plantas sería normal a pH bajos, es decir, cuando la disolución del suelo presentara una acidez notable, ya que la forma PO_4H_2^- es la más asimilable.

Ahora bien, si el mismo grado de acidez existe en un suelo normal, se obtienen resultados distintos. Al ir aumentando la acidez del suelo, aumenta también la solubilidad de los hidróxidos libres de hierro y aluminio, originándose Fe^{+3} y Al^{+3} , que pasan a la disolución. En la figura 13.3. puede apreciarse esta solubilización con el descenso de pH.

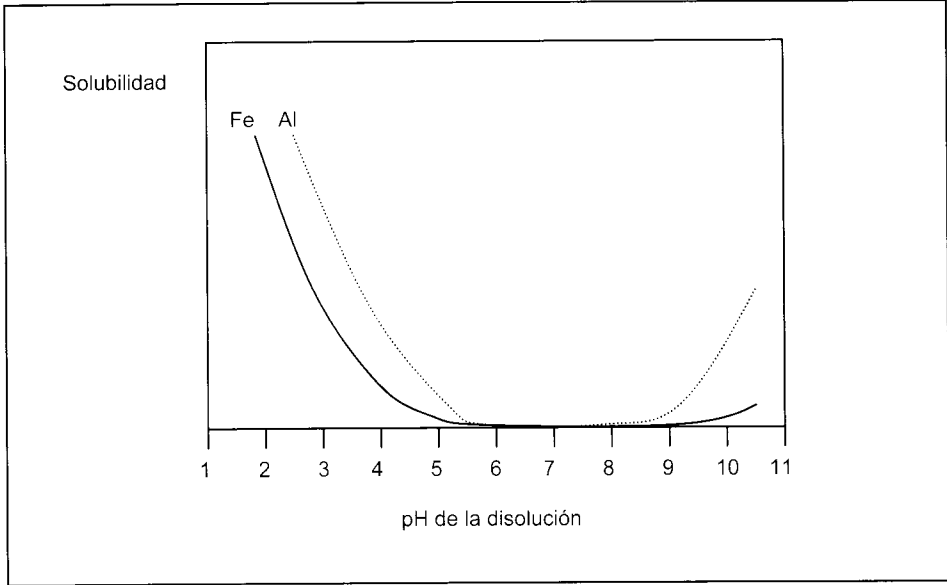
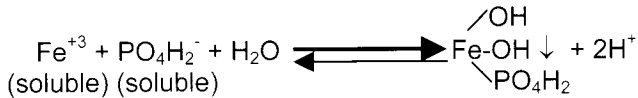


Figura 13.3. Relación entre el pH y solubilidad de hierro y aluminio.

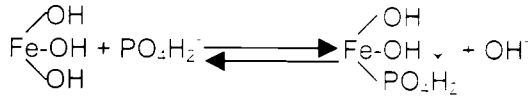
En estas condiciones de alta acidez, tanto los Fe^{+3} como los Al^{+3} precipitan inmediatamente los PO_4H_2^- también presentes en la disolución, originándose compuestos insolubles en los que el fósforo resulta inservible para la planta. En el caso del Fe^{+3} sería:



Evidentemente, el equilibrio de esta reacción tiende a desplazarse ampliamente hacia la derecha, ya que la concentración de Fe^{+3} y Al^{+3} a valores de pH menor de 4 supera de forma notable la de PO_4H_2^- , quedando sólo cantidades ínfimas de fósforo en esta última forma.

Pero esta reacción no es la única que puede presentarse en los suelos ácidos. El PO_4H_2^- puede también reaccionar con los óxidos hidratados de estos mismos elementos en unas condiciones de menor acidez.

El proceso, en realidad, es distinto al anteriormente expuesto, y consiste en una primera fase en una adsorción del PO_4H_2^- por el hidróxido coloidal, que posteriormente deriva a la insolubilización, lenta pero progresiva, del fósforo fijado. Los compuestos que se forman como resultado final de esta fijación son fosfatos hidroxilados, semejantes al caso anterior:



Gráficamente, el proceso puede representarse como se expone en la figura 13.4.

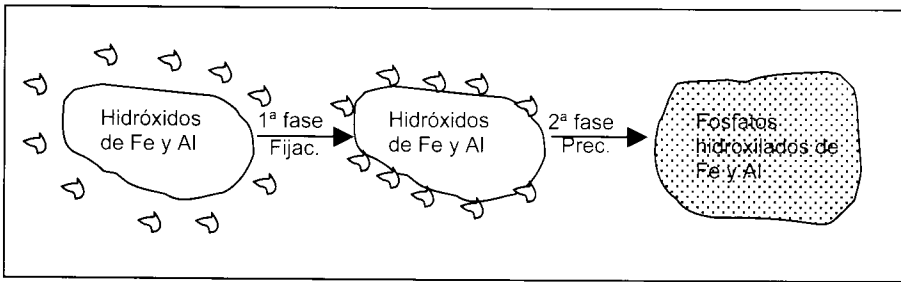


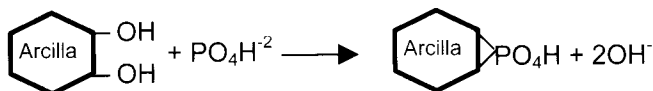
Figura 13.4. Diagrama representativo de la insolubilización del fósforo soluble por la acción de hidróxidos de hierro y aluminio.

Mediante este mecanismo, que parece que puede realizarse en una amplia zona de pH, se originan diversos fosfatos minerales básicos conteniendo hierro, aluminio, o ambos a la vez. También las grandes cantidades de estos óxidos hidratados presentes en el suelo conducen a que notables cantidades de fósforo soluble queden insolubilizadas.

Otras formas de insolubilización del fósforo, que normalmente se presentan en suelos moderadamente ácidos, son reacciones en las que se encuentran involucradas las arcillas silíceas y en donde las fijaciones y cambio de aniones se producen según un mecanismo análogo al del cambio de cationes.

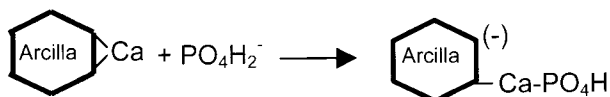
La primera posibilidad de fijación es el reemplazamiento de grupos -OH por los aniones fosfato en la superficie de la arcilla, posibilidad que será tanto mayor cuanto mayor sea la acidez del suelo y su capacidad de

saturación. La fijación va acompañada de la liberación de una alcalinidad de cambio. Para PO_4H^{-2} la reacción sería:

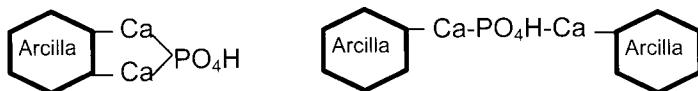


El poder de fijación varía con el tipo de arcilla, siendo probablemente caolinita y haloisita las que lo tienen más alto. En el caso de la caolinita, aumenta con la disminución del diámetro de la partícula, lo que indica que se trata de un cambio aniónico.

Una segunda posibilidad es la fijación a la arcilla por medio de los cationes a ella adsorbidos, los cuales actúan de unión con los aniones fosfato. Los Ca^{+2} , Mg^{+2} , Al^{+3} y Fe^{+3} , realizan fundamentalmente esta función puente. En el caso del calcio, el más frecuente, puede representarse como sigue:



También se sugieren las formas:



La intervención del calcio en este mecanismo está probada cuando se hace adsorber Ca^{+2} a una arcilla. Se puede observar que el porcentaje de fijación del anión fosfato aumenta, sin que se alcance el umbral de precipitación del fosfato cálcico. Con esto también queda demostrado que se trata de una fijación y no de una precipitación.

Otros cationes normalmente fijados por las arcillas silíceas, como K^+ y Na^+ , presentan una acción puente con el anión fosfato mucho más reducida. De igual forma, conviene indicar que cuando la fijación del anión fosfato se verifica sobre una arcilla que tiene ya adsorbido Ca^{+2} y Fe^{+3} , lo hace primeramente por intermedio del calcio, y después por el hierro.

Por último, hay que señalar el bloqueo eventual de los iones fosfato por acción de algunas arcillas en determinadas condiciones. Estos iones fosfato en su forma libre, o bien adsorbidos en las superficies internas, pueden quedar atrapados entre sus unidades cristalinas cuando la distancia entre éstas se reduce a valores inferiores a 10 Å. La hidratación de estas arcillas

Los coloides húmicos sin salificar no provocan la fijación del anión fosfato. Por el contrario, al fijarse sobre la arcilla pueden desplazar a los que pueden estar adsorbidos a ella, provocando así una solubilización del fósforo. Tampoco los humatos alcalinos fijan el anión fosfato de una disolución de fosfatos alcalinos, pero sí en cambio dispersan los fosfatos cálcicos, favoreciendo el paso del anión a la disolución. Estos hechos explican por qué los coloides húmicos ejercen una acción protectora sobre los aniones fosfato, evitando grandemente su fijación irreversible.

¿Cuál sería entonces el pH adecuado del suelo para el máximo aprovechamiento del fósforo inorgánico?. La contestación a esta pregunta se encuentra al analizar los procesos anteriormente expuestos que a modo de ilustración, y tomando como base unas condiciones medias, se representan en la figura 13.5.

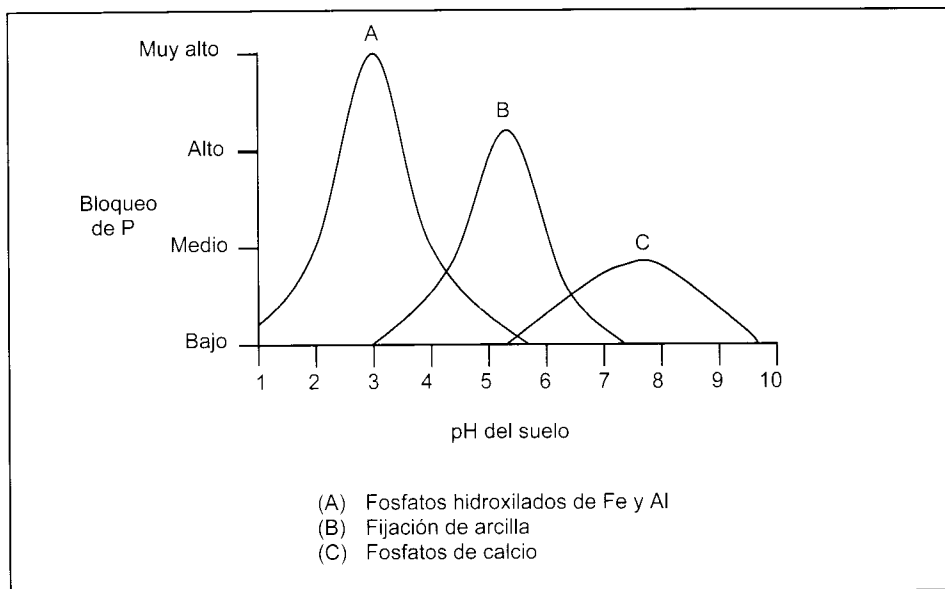


Figura 13.5. Gráficas representativas mostrando la precipitación y fijación coloidal del fósforo inorgánico para varios valores de pH de suelos minerales medios.

La precipitación del fósforo bajo la forma de fosfatos hidroxilados insolubles de hierro y aluminio es máxima entre pH comprendidos entre 3 y 4. Al aumentar el pH, esta precipitación se debilita, y se anula prácticamente, al alcanzar el valor de 5.5. A partir de éste se inicia la precipitación como fosfatos cálcicos, la cual se incrementa hasta alcanzar un máximo entre pH 8 y 9.

Entre estas dos precipitaciones o fijaciones químicas extremas se encuentra un rango de pH entre 3'5 y 7, donde una parte de los coloides del suelo adsorben estas formas utilizables del fósforo, manteniéndolas en una forma fácilmente cambiabile. A un valor de pH=6'5, esta adsorción existe, y la precipitación cálcica (que pueden darse conjuntamente) es mínima. Por ello, es este valor el que puede considerarse como punto de máxima disponibilidad del fósforo para los cultivos.

Los últimos factores a considerar, y que pueden afectar grandemente el aprovechamiento del fósforo inorgánico, lo constituyen la materia orgánica presente y los microorganismos del suelo.

Un alto contenido de materia orgánica y su rápida descomposición origina una alta población de microorganismos, los cuales, al necesitar fósforo para el desarrollo de su ciclo vital, retienen temporalmente una cierta cantidad del que pudiera ser utilizado por el cultivo. Este hecho es, sin duda, un aspecto negativo. Pero junto a él hay que considerar un efecto positivo: algunos compuestos de la degradación orgánica tales como ácidos orgánicos (cítrico, oxálico, málico, etc.), se supone que participan activamente en la formación de complejos con el hierro y aluminio, con lo que se reduce notablemente la posibilidad de precipitación de los fosfatos inorgánicos. En ese entorno, el humus que se va originando, al formar humatos cálcicos puede retener, como ya se ha indicado anteriormente, los aniones fosfato y evitar su precipitación.

También el fósforo mineral puede presentar transformaciones por la acción de los microorganismos edáficos. Tres procesos pueden presentarse: 1°) La transformación de los metafosfatos en ortofosfatos; 2°) La reducción de los fosfatos a fosfitos, hipofosfitos y fosfuros; y 3°) La solubilización de los fosfatos insolubles, con mucho el más importante.

El mecanismo de la solubilización de los fosfatos insolubles por vía microbiana es tan solo conocido por la participación del dióxido de carbono. El desprendimiento de este compuesto durante los procesos metabólicos y de respiración permite una cierta solubilización de los fosfatos insolubles naturales. En presencia de agua, el dióxido de carbono forma ácido carbónico, que disuelve poco a poco la partícula fosfatada insoluble. Los iones fosfato así liberados, pueden ser absorbidos por los microorganismos o raíces vegetales, o bien adsorbidos por los coloides minerales. Numerosas pruebas experimentales han puesto de manifiesto esta liberación del fósforo por el dióxido de carbono. Una de ellas, por ejemplo, es haciendo pasar sobre determinados suelos corriente de dióxido de carbono y corriente de aire. En el primer caso se suele obtener una cantidad mayor de las formas solubles. Hay

que tener en cuenta, no obstante, que esta solubilización por vía microbiana de los fosfatos insolubles naturales depende de diversos factores: la naturaleza química de los fosfatos y su estructura cristalina, contenido en materia orgánica, vegetación, etc.

13.2.2. FOSFORO ORGANICO.

No se tiene en la actualidad una información clara sobre la dinámica en el suelo del fósforo orgánico. Aunque algunos autores sugieren que la fitina puede ser adsorbida directamente por la planta, los más aceptan que este compuesto fosforado se comporta en el suelo como los fosfatos inorgánicos, es decir, formando fitinatos de hierro y aluminio no aprovechables en suelos ácidos, y fitinatos cálcicos insolubles en los alcalinos.

El comportamiento de los ácidos nucleicos parece ser diferente, aunque el resultado final conduce a una escasa utilización del fósforo constituyente y a una reducción de su degradación. Los ácidos nucleicos son adsorbidos fuertemente por las arcillas en suelos ácidos, y con ello su degradación queda bloqueada al ataque de los microorganismos vivos. La fijación es mucho menor en suelos neutros y alcalinos.

Aparte de estos mecanismos químicos de fijación del fósforo orgánico, debe considerarse también el proceso bioquímico de su mineralización, es decir, la transformación del fósforo orgánico en ortofosfatos.

Las primeras investigaciones de este proceso, iniciadas en la segunda década del siglo pasado en condiciones de laboratorio, mostraron que en un medio salino glucosado, con ácido nucleico como única fuente de nitrógeno y fósforo, el *Bacillus mycoides*, *Bacillus subtilis* y *Proteus vulgaris*, mineralizaban respectivamente 23'3, 15'5 y 18'9 % del fósforo orgánico presente. Si una fuente suplementaria y más fácilmente asimilable de nitrógeno, como sulfato amónico, era añadida al medio, la mineralización se elevaba por las mismas bacterias a 51'2, 37'8 y 42 %. Otros autores prosiguieron estas investigaciones a partir de 1950, y aislaron posteriormente gran número de microorganismos capaces de mineralizar el fósforo orgánico. Experiencias basadas en el estudio de cultivos puros en medio salino con glucosa, nitrato amónico y glicerofosfato sódico, nucleinato sódico o lecitina como fuente de fósforo y dosificación del fósforo mineralizado por precipitación con molibdato amónico, señalaron que una treintena de estas cepas podía realizar esta mineralización. Las especies más activas, al menos sobre el nucleonato, fueron las Eurobacterias del género *Bacillus* y las levaduras. También ciertos tipos de hongos eran capaces de descomponer el nucleonato y el glicerofosfato.

Sin embargo, este tipo de experiencias de laboratorio no fueron admitidas de forma definitiva, ya que se habían realizado sobre cultivos puros, no utilizando suelo. Los trabajos posteriores realizados sobre suelos de pH y vegetación diferente mostraron una mineralización global del fósforo, superior en los suelos vírgenes que en los mismos cultivados, y superior en los suelos calizos que en los suelos ácidos. Y también, en función de los suelos utilizados, que la actividad era mayor en los suelos arenosos no humíferos que en los arcillosos y arcillosos humíferos.

Aunque se reconoce que por esta vía los microorganismos del suelo desarrollan un importante papel en la solubilización de formas insolubles de fósforo, hoy se acepta más la idea de que es la captación de iones fosfatos por las plantas donde los microorganismos desempeñan la función más decisiva. Se sabe que las micorrizas (simbiosis entre hongos del suelo y raíces de las plantas) aumentan la absorción del fósforo por los vegetales, debido a que las hifas del hongo que surgen de la raíz micorrizada amplían la zona de absorción de la planta, explorando un volumen de suelo mucho mayor que el que puedan utilizar las plantas que no posean esta simbiosis. De esta forma, las plantas se benefician directamente de la acción de los microorganismos, que a su vez reciben de ella fuentes de carbono asimilable.

En los últimos años ha despertado gran interés el estudio de asociaciones entre hongos de la micorriza VA (vesículo arbuscular) y raíces de diversas plantas. En este sentido, las leguminosas ofrecen un interesante modelo de estudio, ya que son capaces de formar, junto a este tipo de asociación, la ya conocida de tiempo: leguminosa-Rhizobium. Un ejemplo claro de estas posibilidades se expone en la figura 13.6.

La experiencia se realizó en condiciones de campo, en una parcela cuyo suelo era fuertemente fijador de fósforo, y con un contenido en fósforo asimilable de 9'2 ppm. Se utilizó como planta testigo alfalfa, y el hongo que se inoculó fue el *Glomus mosseae*. La inoculación conjunta *Rhizobium*+*Glomus* mostró un incremento en la cosecha de aproximadamente un 200 % sobre el testigo sin inocular.

Es evidente, sin embargo, que esta línea de trabajo requiere aún una mayor investigación para obtener resultados definitivos.

13.3. PERDIDAS DE FOSFORO EN LOS SUELOS.

Las pérdidas que el fósforo puede experimentar en los suelos son: Extracción por cultivos, lixiviación, erosión y volatilización.

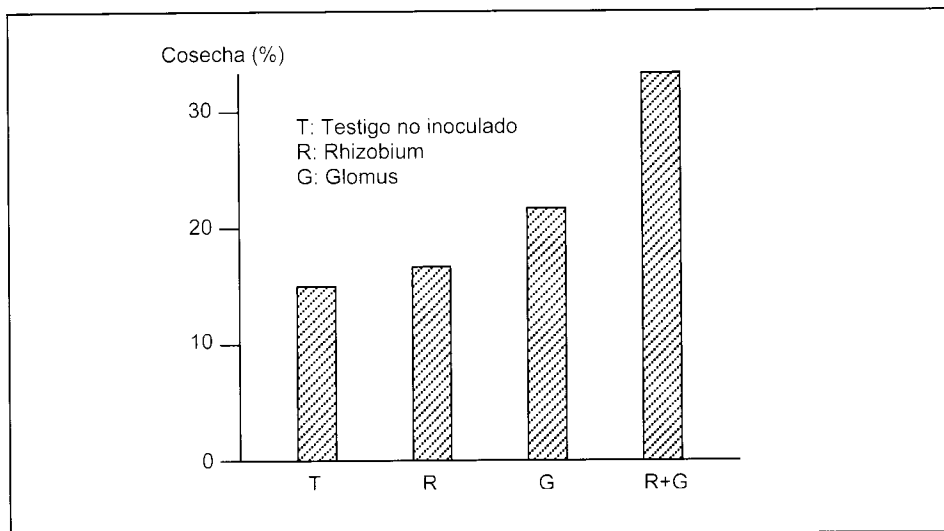


Figura 13.6. Efecto de Glomus y Rhizobium sobre el crecimiento de alfalfa (G.Azcon de Aguilar y cols., 1980).

13.3.1. EXTRACCION POR CULTIVOS.

La exportación de fósforo por los cultivos, según datos obtenidos a este respecto, suele oscilar, por término medio, entre 4 y 6 Kg/Ha. La cantidad de 6 Kg/Ha es aproximadamente el 0'4 % del contenido medio del fósforo en la capa arable de un suelo cultivado. Estos valores son notablemente más bajos que los correspondientes al nitrógeno (28 Kg/Ha, aproximadamente el 0'9 % del contenido en la capa arable). En aquellos suelos donde se practica un cultivo intensivo, la eliminación de fósforo puede ser más elevada, y debe ser compensada con la adición de fertilizantes.

13.3.2. PERDIDAS POR LIXIVIACION.

La proporción de fósforo en la disolución del suelo está corrientemente comprendida entre 0'1 y 1 mg/l. Por ello, las pérdidas de fósforo en los suelos por efecto de la lixiviación son sumamente bajas. Se requerirían por tanto miles de años para que estas pérdidas puedan tener significación. Sin embargo, cuando se añaden al suelo fertilizantes fosfóricos solubles, estas pérdidas pueden ser ya apreciables en un plazo corto, si se trata de suelos arenosos y turbosos, que tienen poca tendencia a reaccionar con el fósforo. Sin embargo,

los suelos tienen gran capacidad para reaccionar rápidamente con los fosfatos solubles y reducir su solubilidad, con lo que las pérdidas por lixiviación quedan minimizadas.

13.3.3. PERDIDAS POR EROSION.

Aunque el fósforo sustraído por la erosión incluye una notable cantidad de compuestos relativamente no utilizables por las plantas, la cantidad de fósforo utilizable en el material erosionado suele ser notable. Esto se debe a que las partículas finas del suelo donde se encuentra el fósforo son levantadas más fácilmente que las partículas gruesas. Además, ordinariamente es más adecuado para las plantas el fósforo situado en las capas superficiales del suelo que el de las capas inferiores. Por esta razón, no es sorprendente que los suelos erosionados resulten deficientes en fósforo y requieran cantidades mayores de fertilizantes fosfatados que los suelos que han sufrido poca erosión.

Las pérdidas de fósforo en el suelo por erosión pueden ser notables en algunos lugares. Aunque no pueden darse valores concretos, en algunas localidades de los EE.UU. se sugieren pérdidas hasta de 11-12 Kg/Ha.

13.3.4. PERDIDAS POR VOLATILIZACION.

Bajo condiciones oxidantes, y a los valores medios de pH de los suelos, el fósforo es estable como ortofosfato, y no se halla sujeto a pérdidas por volatilización. Sin embargo, bajo condiciones anaerobias, el fósforo puede desprenderse del suelo como fosfamina. Experiencias realizadas a escala de laboratorio, incubando fosfato amónico con suelos en condiciones de anaerobiosis, durante 42 días a 24°C, muestran que estas reducciones se producen a través de formas intermedias de fosfitos (PO_3^{-3}) e hipofosfitos (PO_2H_2^-).

3.4. CICLO DEL FOSFORO EN LA NATURALEZA Y SU PROBLEMA BAJO EL PUNTO DE VISTA AGRICOLA.

La problemática del fósforo en el suelo, contemplada dentro del ciclo total del elemento en la Naturaleza (Figura 13.7.) permite señalar, en un análisis final, hechos importantes bajo el punto de vista agronómico:

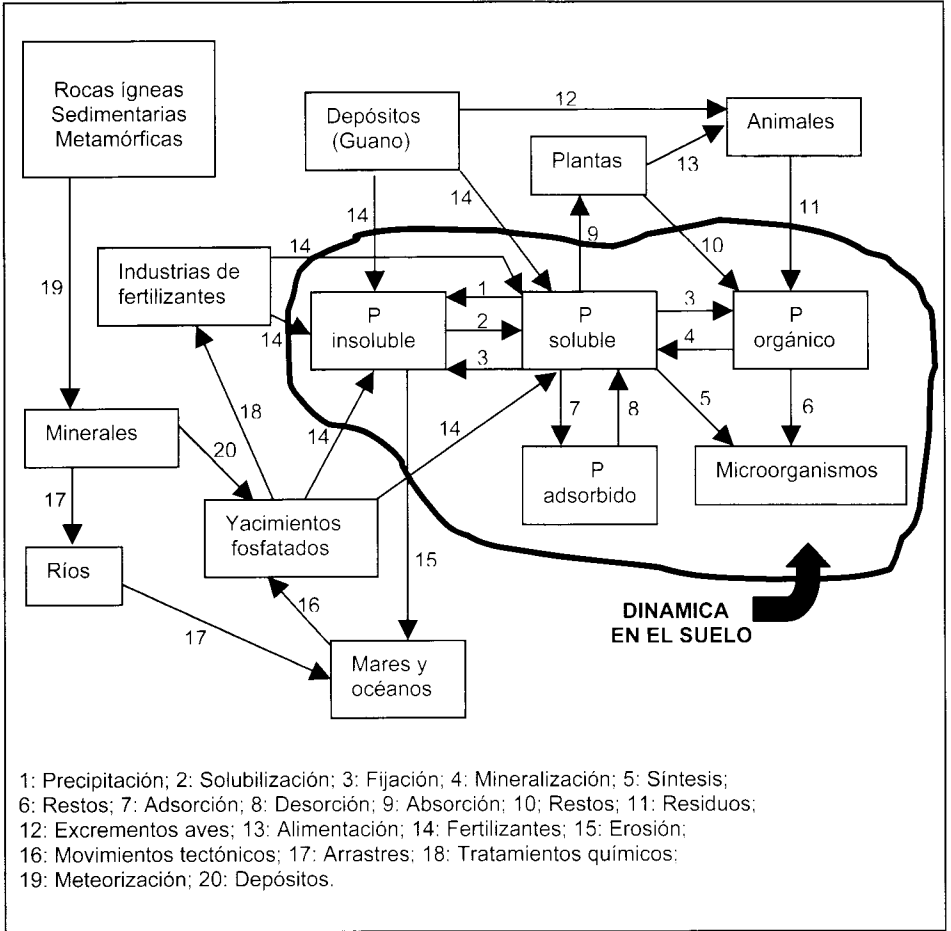


Figura 13.7. Ciclo del fósforo en la Naturaleza.

1º) Una cantidad total pequeña se encuentra normalmente presente en los suelos.

2º) Falta de aprovechamiento del fósforo natural, ya que casi en su totalidad no es utilizable por la planta.

3º) Insolubilización amplia cuando se añaden al suelo fertilizantes solubles.

4º) Necesidad de añadir altas dosis de fertilizantes para una baja utilización por la planta.

5º) Pérdidas económicas por el motivo anterior.

Estos aspectos, que deben considerarse como negativos, son en parte reducidos por tres circunstancias favorables:

1º) Escasa eliminación del fósforo por los cultivos.

2º) Pequeñas pérdidas por lixiviación.

3º) Grandes reservas de fosfatos a nivel mundial.

Los esfuerzos, por tanto, deben dirigirse por una parte a lograr el máximo aprovechamiento del fósforo natural del suelo, y por otra a encontrar la forma más conveniente para retrasar la insolubilización de los compuestos de fósforo añadidos como fertilizantes solubles. Todos los factores que puedan ayudar a conseguir estos objetivos deben tenerse muy en cuenta.

14

EL POTASIO EN LA PLANTA.

La esencialidad del potasio es reconocida a partir de la segunda mitad del siglo pasado. En 1856, W. Salm-Horstmar cultivó plantas en disoluciones nutritivas controladas, dedujo como resultado de su trabajo que el potasio, entre otros elementos, era uno de los que debía considerarse esencial para el crecimiento de las plantas, especialmente para el caso de los cereales. Diez años más tarde, en 1866, H. Birner y B. Lucanas, utilizando técnica hidropónica, demostraron que el potasio era esencial para la floración, y que su función no podía ser desempeñada por ningún otro elemento de su grupo. En 1868, F. Nobbe ratificó también esa esencialidad.

Desde entonces, numerosos investigadores han demostrado repetidamente, y de forma concluyente, la esencialidad del potasio, aunque para algunos el sodio puede reemplazarlo parcialmente sin que en la planta se observen alteraciones en su normal desarrollo.

En experiencias hidropónicas realizadas con remolacha azucarera, este reemplazamiento parece ser que puede alcanzar hasta el 80 %; también en una proporción muy elevada en plantas de patata. Sin embargo, en todos los casos ensayados, las plantas tratadas con un amplio suministro de potasio y bajo de sodio se desarrollan mejor que cuando se utilizan amplias dosis de sodio y bajas de potasio.

14.1. CONTENIDO Y FORMAS.

El potasio es absorbido por las raíces bajo la forma de K^+ , y es un elemento siempre importante cuantitativamente en las cenizas vegetales, bajo la forma de óxido potásico.

Su contenido en la planta puede fluctuar ampliamente, dependiendo de la especie, del órgano que se considere y del contenido asimilable del suelo (Tabla 14.1.).

Tabla 14.1. Contenido en potasio (% K₂O de materia seca) de diversas plantas cultivadas (A. Demolón, 1972)

CULTIVO	ORGANO	%K ₂ O (m.s.)
Trigo	Grano	0'35-0'70
	Paja	1'00-1'60
Patata	Tubérculo	2'00-3'50
	Tallos-Hojas	1'60-4'70
Remolacha	Planta entera (9-10% azúcar)	2'25
Alfalfa	Planta entera	2'30-2'65
Tabaco	Hoja	3'00-6'00
Espinaca	Planta entera	5'80-7'10

Es el principal catión presente en los jugos vegetales, pudiendo encontrarse bajo la forma de sales orgánicas (oxalatos, tartratos), sales minerales (fosfatos, nitratos) y de combinaciones complejas inestables con los coloides celulares. No hay evidencia de que forme parte de la estructura molecular de las células. Se admite que se encuentra en estado ionizado en todos los órganos de la planta, y ello justifica la facilidad de su paso de una parte a otra. En las hojas de las plantas superiores, un 30 % se encuentra en los coloides del citoplasma y un 70 % en sus vacuolas.

Los tejidos jóvenes y sanos lo retienen bastante enérgicamente, y en estas condiciones se difunde lentamente en agua fría; pero en los tejidos viejos o alterados, puede haber pérdidas por lavado de los órganos aéreos bajo la acción de las lluvias. El agua hirviendo puede extraerlo casi en su totalidad cuando se trata de plantas verdes. Esta característica ratifica que la mayor parte del potasio se encuentra en la planta bajo la forma de combinaciones solubles en agua o fácilmente disociables, asegurando así su movilidad.

14.2. FUNCIONES.

El papel del potasio en la planta es variado, pero todavía no se conocen bien ciertos aspectos del mismo. Si se sabe que no desempeña una función específica, y que a diferencia de otros elementos, como nitrógeno, fósforo o azufre, no entra en la constitución de los principios esenciales (prótidos, lípidos y glúcidos). Debido a su gran movilidad, actúa en la planta, básicamente, neutralizando los ácidos orgánicos resultantes del metabolismo, y asegura así la constancia de la concentración en H⁺ de los jugos celulares.

También desempeña una importante función en la fotosíntesis, en la economía hídrica de la planta y muy especialmente como activador enzimático.

14.2.1. FOTOSINTESIS.

La acción del K^+ en la fotosíntesis ha sido fundamentalmente puesta de manifiesto en algas. Aumenta la actividad fotosintética asegurando una mejor utilización de la energía luminosa.

Para explicar este papel se considera que el potasio acumulado en la superficie de los cloroplastos penetra en su interior durante la fotosíntesis, donde neutraliza los ácidos orgánicos que se van formando. Con ello se mantiene el pH estable y óptimo para el desarrollo del metabolismo.

Parece ser también que existe una cierta compensación entre los efectos de la luz y los del potasio. En la práctica se ha observado que la fertilización potásica es más eficaz en los años de insolación pobre: y que en las regiones de luminosidad intensa, la planta absorbe menos potasio que en las de luminosidad menor.

14.2.2. ECONOMIA HIDRICA.

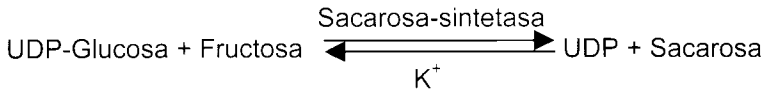
En la planta, el potasio actúa como un regulador de la presión osmótica celular, hace disminuir la transpiración y contribuye a mantener la turgescencia celular. Cuando hay una deficiencia de potasio, la turgescencia disminuye, aunque la planta tenga exceso de agua a su disposición. Esta influencia o efecto útil del potasio se manifiesta particularmente en años secos, en el curso de los cuales se observa, sobre todo en suelos arenosos, que el aporte de fertilizantes potásicos confiere a la planta una notable resistencia al marchitamiento y a la desecación.

14.2.3. ACTIVACION ENZIMATICA.

Gran número de enzimas que intervienen en pasos importantes en los procesos que se realizan en las plantas requieren potasio para desarrollar su máxima actividad catalizadora. Los casos que se exponen a continuación son, entre otros, ejemplos de la acción activadora del potasio.

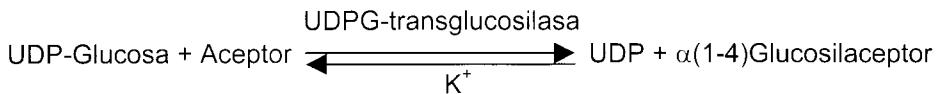
Síntesis de glúcidos.

El potasio favorece no sólo la síntesis de glúcidos a partir de monosacáridos, sino también sus movimientos en la planta. El enzima sacarosa-sintetasa, que cataliza la síntesis de sacarosa, es activado por K^+ :



La sacarosa puede actuar como donante de UDP-Glucosa en la síntesis del almidón, como resultado de la reacción reversible en su síntesis.

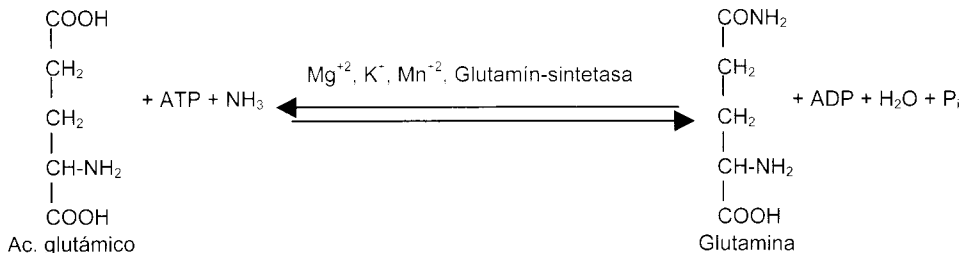
Se cree que el enzima UDPG-Transglucosilasa, capaz de catalizar uniones $\alpha(1-4)$ por adición de unidades glucosa a una primera molécula aceptara (maltosa, por ejemplo), es también activado por K^+ :



Estas actuaciones del potasio se hallan confirmadas en aquellas plantas que se cultivan por sus reservas de glúcidos, tales como el almidón de las patatas y el azúcar de la remolacha y de la viña, las cuales responden bien al suministro de fertilizantes potásicos.

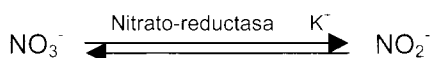
Metabolismo del nitrógeno.

Numerosas observaciones han sugerido que el potasio es esencial como activador de enzimas que intervienen en la síntesis proteica. Se admite que el enzima glutamin-sintetasa, que cataliza la formación de glutamina, requiere K^+ para su normal funcionamiento:



La insuficiencia de potasio se hace sentir sobre todo cuando la planta es alimentada con nitrato amónico. Cuando hay falta de potasio está comprobado que la aportación de fuertes dosis de nitrato amónico lleva consigo la acumulación en la planta de una gran cantidad de amoniaco no transformado. Gracias a los fertilizantes potásicos, el nitrógeno amoniacal es más rápidamente utilizado para la síntesis de ácidos aminados, desapareciendo dicha acumulación.

Estos hechos también parecen estar relacionados con la influencia del K^+ en la actuación del enzima nitrato-reductasa, que cataliza la reducción de los nitratos a nitritos:



Diversos investigadores consideran que la actuación del enzima es más rápida cuando la planta contiene suficiente potasio. En este caso, sin embargo, parece ser que la influencia del elemento es más efectiva en la formación del enzima que en su actuación catalítica.

De todas formas, en el momento actual no se está completamente seguro de que se trate de un efecto específico del K^+ sobre la síntesis de proteínas a partir de compuestos nitrogenados más simples. Es posible que en los casos de deficiencia pueda haber una ruptura del equilibrio entre la síntesis y dislocación de las proteínas. Los compuestos nitrogenados solubles se pueden acumular por una hidrólisis intensa de las proteínas, no compensada por una polimerización equivalente, como sería el caso para la célula normalmente provista de potasio.

Glucolisis y metabolismo de los ácidos orgánicos.

Diversos enzimas que intervienen en estos procesos, englobados dentro de la respiración vegetal, son activados por el potasio. Esta influencia se ha puesto de manifiesto en los casos expuestos en la figura 14.1.

14.3. ALTERACIONES POR DEFICIENCIA Y EXCESO.

Ya se ha indicado el carácter móvil del potasio en la planta. Por esta razón, cuando empieza a manifestarse en ella la deficiencia, el elemento que

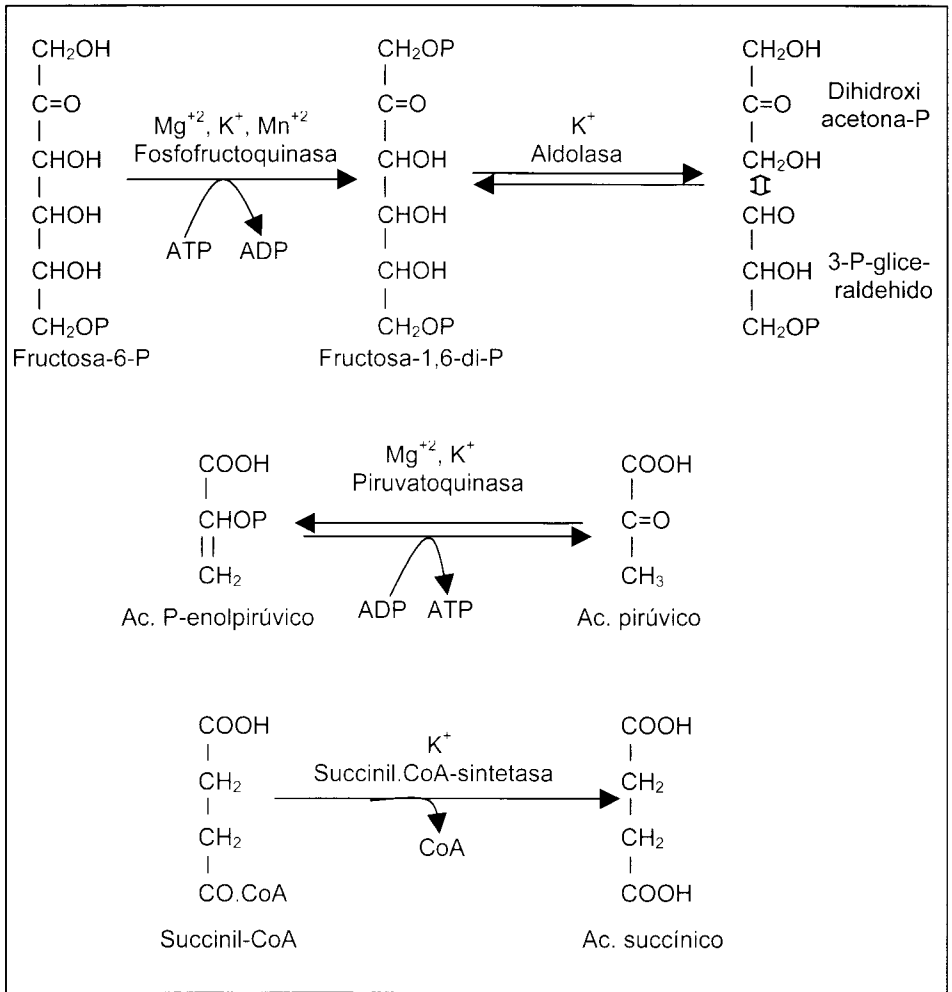


Figura 14.1. Algunas reacciones del metabolismo vegetal catalizadas por el potasio

está almacenado en las hojas tiende a desplazarse a las más jóvenes para cubrir sus necesidades. Son, pues, las viejas las que presentan los primeros signos visibles de la deficiencia.

Inicialmente, la falta de potasio origina un retraso general del crecimiento, que se hace sentir especialmente sobre los órganos de reserva: semillas, frutos o tubérculos, órganos que deben formarse con el concurso de

los glúcidos. Estos signos de deficiencia se observan netamente cuando su contenido en potasio es de 3 a 5 veces inferior al normal. Los tallos son más delgados, ya que todo el elemento es utilizado en el ápice vegetativo. Esta particularidad puede ocasionar en los cereales un debilitamiento y rotura del tallo, con las consiguientes pérdidas en grano.

Si el estado deficitario se agudiza, es en las hojas donde pueden apreciarse los síntomas más claros. Se inicia un moteado de manchas cloróticas, y prosigue por el desarrollo de amplias necrosis en la punta y en los bordes. En muchos casos, las hojas tienden a curvarse hacia arriba, en forma de teja, enrollándose cada vez más a modo de cigarrillos, adquiriendo el árbol, o la planta en su conjunto, un aspecto como si se hubiera quemado. Esta sintomatología aparece en árboles frutales, y con mucha frecuencia en manzanos.

Bajo el punto de vista agrícola, en cuanto a desarrollo, conservación y producción de cosecha, la deficiencia potásica origina, junto a una notable reducción de los órganos de reserva, como ya se ha indicado antes, falta de resistencia a las enfermedades criptogámicas: una prolongación del periodo vegetativo y retraso de la maduración de semillas; frutos notablemente ácidos, sin aroma y con fuerte coloración; menor resistencia al frío; tendencia al marchitamiento; retraso en el crecimiento radicular; y descenso general de los rendimientos.

Debe señalarse, sin embargo, que los casos agudos de esta deficiencia no suelen presentarse normalmente en los países de agricultura intensiva, donde los fertilizantes se emplean regularmente. En general, aplicaciones adecuadas de potasio bajo la forma de cloruro o sulfato potásico son suficientes para corregir y controlar la deficiencia en las plantas. El estiércol es también una buena fuente de potasio. Actualmente también se obtienen resultados satisfactorios con la pulverización directa de la planta, utilizando disoluciones no excesivamente concentradas, lo cual resulta siempre más económico.

Las alteraciones por exceso de potasio en la planta se presentan con menos frecuencia, y están basadas en los antagonismos: K/Mg, K/Ca, K/Fe y K/B. La absorción excesiva y su enriquecimiento hace disminuir la de otros. Por ello, el exceso origina comunmente situaciones a deficiencias de magnesio, hierro y cinc.

15

EL POTASIO EN EL SUELO.

15.1. ORIGEN, CONTENIDO Y FORMAS.

Con independencia del que se añade como componente de diversos fertilizantes, el potasio presente en los suelos aparece por desintegración y descomposición de las rocas que contienen minerales potásicos. Los minerales que se consideran generalmente como fuentes originales de potasio son los feldespatos potásicos: $\text{Si}_3\text{O}_8\text{AlK}$, la moscovita: $(\text{SiO}_4)_3\text{H}_2\text{Al}_3\text{K}$, y la biotita: $(\text{SiO}_4)_3\text{Al}_2(\text{MgFe})_2(\text{HK})_2$. La disponibilidad del potasio en estos minerales, aunque baja, es del orden de biotita > moscovita > feldespatos potásicos.

El potasio se halla también en el suelo bajo la forma de otros minerales como silvina: ClK , silvinita: ClK.CINa , carnalita: $\text{ClK.Cl}_2\text{Mg.6H}_2\text{O}$, o kainita: $\text{ClK.SO}_4\text{Mg.3H}_2\text{O}$, y en las ilitas, vermiculitas, cloritas y otros minerales interstratificados, en los que dos o más de los tipos precedentes pueden hallarse en la misma partícula.

Junto a este potasio mineral hay que incluir también el procedente de la descomposición de restos vegetales y animales.

A diferencia del fósforo, el potasio se halla en la mayoría de los suelos en cantidades relativamente grandes. Su contenido (como K_2O) varía de 0'5 a 3 %, y depende de su textura. La fracción arcillosa es la que presenta un contenido mayor, por lo que los suelos arcillosos y limo-arcillosos son más ricos que los limo-arenosos y arenosos. Hay que significar, no obstante, que esta variación en el contenido de potasio está también influenciada por la intensidad de las pérdidas: extracción por cultivos, lixiviación y erosión. En los suelos cultivados dependerá de los aportes que se realicen, principalmente bajo la forma de fertilizantes.

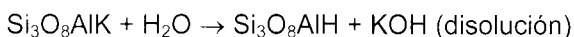
15.2. DINAMICA.

En función de su aprovechamiento por las plantas, el potasio del suelo puede ser clasificado en tres categorías: 1º) Potasio no asimilable; 2º) Potasio lentamente asimilable; y 3º) Potasio rápidamente asimilable.

Se considera que estas formas que constituyen cada uno de los grupos están en equilibrio, y una variación en el sistema tiende a ser compensada por cambios apropiados en el mismo.

15.2.1. POTASIO NO ASIMILABLE.

La mayor parte del potasio total del suelo (entre el 90 y 98 %) está casi siempre en formas no aprovechables, es decir, no disponible para la planta. En este caso se encuentra por lo general formando parte de las estructuras y redes cristalinas de minerales primarios, como los feldspatos y las micas. También en ciertos minerales secundarios que fijan potasio en su estructura, como la illita. En estas formas cristalinas, el potasio es solo ligeramente soluble, ya que al tratarse de compuestos muy resistentes proporcionan cantidades insignificantes de potasio durante una estación dada de crecimiento vegetal. Sin embargo, con el tiempo y debido a la acción de diversos procesos (hidrólisis, acidificación, disolución, etc.), pueden sufrir gradualmente una degradación para dar lugar a otras más aprovechables. Una descomposición de este tipo puede ser la siguiente:



en la que los K^+ liberados pueden ya ser utilizados por los organismos vivos, perdidos por lixiviación, retenidos por los coloides del suelo, o convertidos a una de las formas lentamente asimilables del potasio del suelo.

15.2.2. POTASIO RÁPIDAMENTE ASIMILABLE.

Se puede considerar que aproximadamente el 1-2 % de la cantidad total de este elemento en un suelo mineral medio es asimilable. En esta situación se encuentra en la disolución del suelo o como intercambiable adsorbido a los coloides. La mayor parte (un 90 %) está en forma intercambiable, y sólo un 10% en la disolución.

Estas dos formas de potasio rápidamente asimilables mantienen un equilibrio relativamente estable. Cuando las raíces absorben este elemento el

equilibrio se rompe, y para su restablecimiento, parte del potasio intercambiable se desplaza a la disolución, y el equilibrio se restablece de nuevo. También puede ocurrir que al agregar fertilizantes potásicos solubles se incremente el contenido del elemento en la disolución, produciéndose en este caso el efecto inverso, es decir, aumento de la retención coloidal. Se puede establecer por tanto:

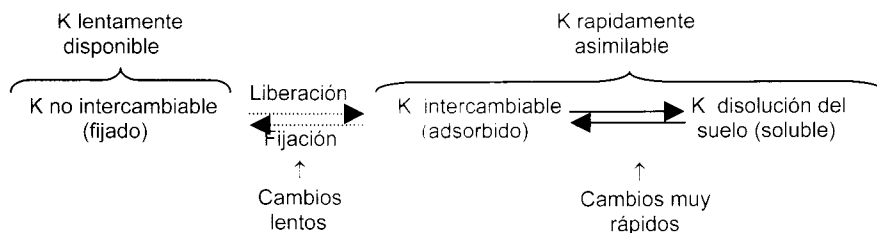
- K intercambiable \rightarrow K disolución (Absorción por la planta)
- K intercambiable \leftarrow K disolución (Aporte fertilizantes potásicos)
- K intercambiable \leftrightarrow K disolución (Equilibrio restablecido)

Sin embargo, no debe deducirse de lo dicho que sea preciso que el potasio esté en la disolución del suelo para que tenga lugar su absorción por las plantas. Una absorción directa desde las superficies coloidales se supone también que ocurre (absorción por intercambio), e indudablemente esto juega un papel vital en la nutrición de muchas plantas.

15.2.3. POTASIO LENTAMENTE ASIMILABLE.

Bajo determinadas circunstancias, como por ejemplo la adición de fertilizantes solubles, o condiciones del suelo basadas principalmente en su contenido coloidal, el potasio de la disolución no sólo es adsorbido como antes se ha indicado, sino que también puede ser retenido temporalmente por determinadas arcillas.

Esta fijación es debida al hecho de que los K^+ pueden quedar atrapados entre las láminas cristalinas de estos minerales de tal forma que no pueda ser utilizado por la planta. En esta otra situación, el potasio no puede ser reemplazado por un proceso ordinario de cambio y, en consecuencia, se considera como potasio no cambiante. Como tal queda como un importante depósito de potasio lentamente aprovechable, ya que con el tiempo, o por la acción de determinadas condiciones, puede liberarse situándose en posición de intercambiable. Considerando por tanto los distintos estados, el equilibrio completo puede representarse así:



Estos equilibrios tienen una importancia en la agricultura práctica. Cuando los fertilizantes que contienen potasio son aportados al suelo, gran parte de potasio es adsorbido por los coloides del suelo. Como resultado, el equilibrio anterior se desplaza a la izquierda y algunos iones intercambiables pasan a la forma no intercambiable.

La repercusión que puede tener en el desarrollo de la planta esta reducción del potasio rápidamente disponible al pasar a la forma no intercambiable se refleja en la figura 15.1. en una experiencia con cebada.

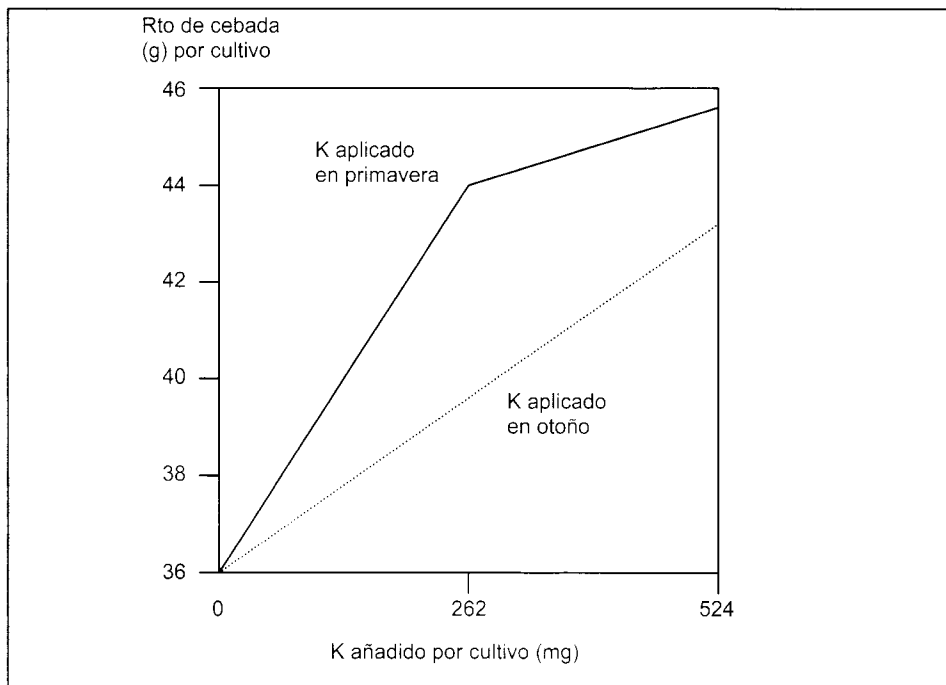


Figura 15.1. Rendimiento de cebada en función del potasio añadido al suelo inmediatamente antes de la siembra o en el otoño precedente (R. Chaminade. 1957).

Como puede observarse, el potasio aplicado en otoño estuvo en contacto con el suelo durante un periodo de tiempo mayor, por lo que más potasio pasó a la forma no disponible. En cambio, el aplicado poco antes de la siembra pudo ser más ampliamente utilizado por la planta. De aquí el mejor rendimiento de la cebada en este último caso.

Hay que indicar, no obstante, que el potasio bajo la forma no intercambiable no está sujeto a lixiviación y se mantiene conservado. Y puesto que este potasio retenido es reconvertido lentamente a formas asimilables, de ningún modo queda totalmente perdido para las plantas.

15.2.4. EQUILIBRIO DEL POTASIO EN EL SUELO. FACTORES INFLUYENTES.

Diversos factores regulan el equilibrio anteriormente expuesto. Entre ellos están: 1°) La composición coloidal del suelo; 2°) La humedad y sequedad; 3°) La temperatura; y 4°) El pH del suelo.

Composición coloidal y humedad del suelo.

La facilidad de ciertos coloides del suelo de fijar potasio varía ampliamente. Los suelos en los que la caolinita predomina fijan poco potasio, mientras que los montmorilloníticos e ilíticos lo fijan con mucha avidez y en grandes cantidades.

Estos hechos han sido explicados admitiendo que en los suelos ricos en arcillas tipo de red 2x1 hay K^+ entre las unidades estructurales, que se contraen a medida que el suelo se seca. Algunos de estos iones aprisionados son liberados cuando de nuevo se humedece el suelo, aunque a una velocidad más baja. El proceso puede comprenderse mejor en la representación esquemática que se expone en la figura 15.2.

En el caso de la caolinita y otros tipos de arcillas de su grupo, cada unidad está compuesta de láminas alternativas de alúmina y sílice (cristales del tipo 1x1) unidas entre sí, rígidamente, por puentes hidroxilados. En consecuencia la red queda rígida y no permite ninguna dilatación, aunque esté húmeda. La superficie efectiva de la caolinita queda así restringida a sus caras externas, y los K^+ pueden adsorberse a ellas, pero no introducirse entre sus unidades cristalinas.

La illita tiene igual organización general que la montmorillonita, excepto respecto a las redes situadas entre las unidades cristalinas. Aquí, los átomos de potasio proveen de uniones adicionales entre las unidades cristalinas, sustituyendo así los puentes de oxígeno. Estas uniones de potasio reducen mucho la expansión que los cristales de illita pueden exhibir. Como resultado, la capacidad de fijación interlaminar de la illita es menor que la montmorillonita.

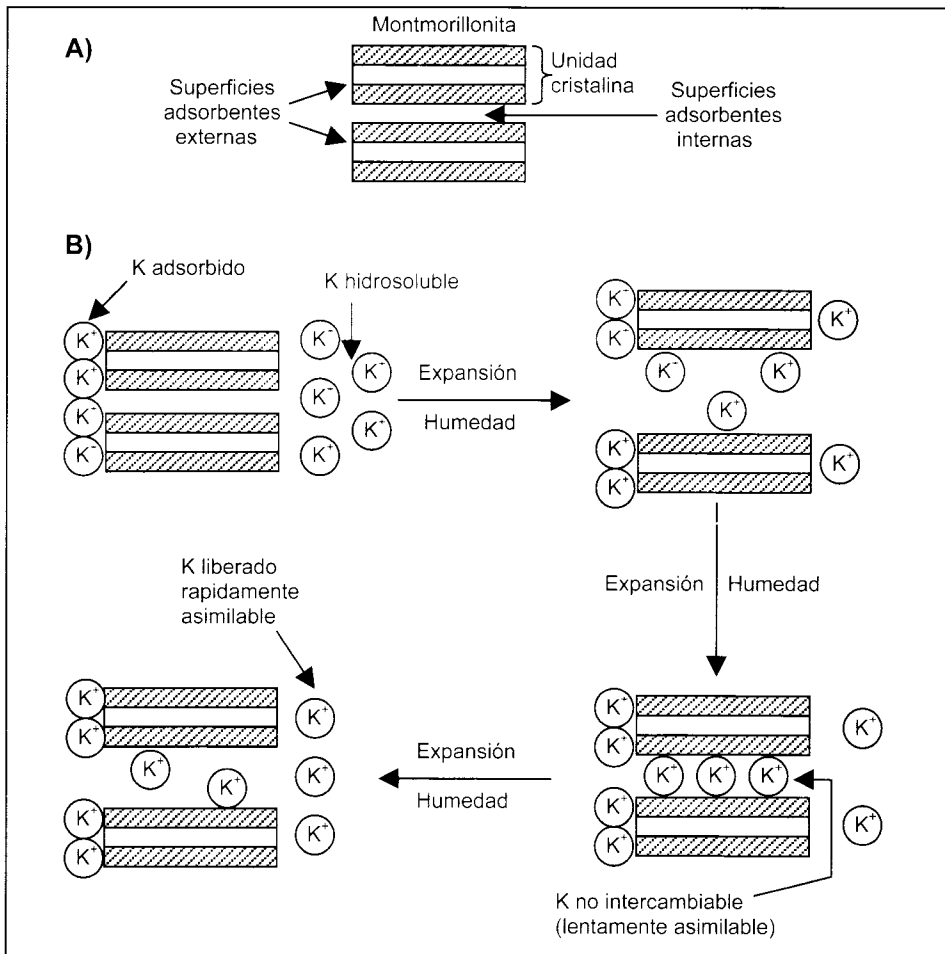


Figura 15.2. (A) Esquema de la estructura laminar típica de los cristales de montmorillonita. Vista de dos de las innumerables unidades que forman un cristal. (B) Proceso sugerido en la fijación de K⁺ por arcillas tipo de red 2x1.

Como antes se ha indicado, en las arcillas 2x1 los iones pueden quedar aprisionados entre las unidades estructurales al unirse las unidades cristalinas por efecto de la sequedad.

Puede admitirse, por tanto, que estos K⁺ serán liberados fácilmente cuando se verifique la rehidratación de la arcilla. Sin embargo, la energía de enlace entre los K⁺ y las láminas de sílice es lo suficientemente grande para

evitar la reexpansión inmediata de todo el existente entre las unidades cristalinas. Además, la hidratación puede dar lugar a la reexpansión tan solo de algunas de las capas, pero no de todas. De esta forma, y a través de sucesivos cambios de la humedad del suelo, se produce una liberación lenta del potasio fijado.

Hay que señalar que el Humus que puede estar presente en el suelo, aunque posee una gran capacidad para retener el K^+ en forma intercambiable, no presenta en cambio capacidad para fijarlo como no intercambiable.

De lo expuesto se deduce que cuando haya que fertilizar con potasio es conveniente conocer la naturaleza del coloide del suelo. Si predominan las illitas o montmorillonitas, que fijan bien el potasio entre sus láminas, requerirán amplias cantidades de fertilizante para saturarlas antes de que se ponga el nutriente a disposición de la planta. En los suelos cuyo contenido en arcillas sea muy bajo (arenosos), las aplicaciones deben realizarse en varias veces y con incorporación simultánea de materia orgánica para incrementar su fijación y evitar pérdidas por lixiviación.

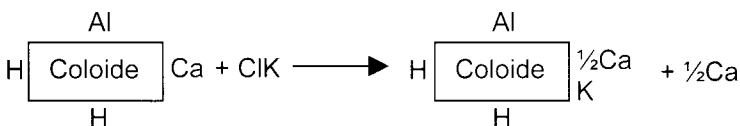
Temperatura.

Las variaciones térmicas en la mayor parte de los suelos pueden ser también importantes en la liberación del potasio fijado no cambiabile. Aunque el mecanismo mediante el cual se realiza esta liberación no está totalmente comprendido, se considera que la acción de heladas y deshielos alternativos pueden romper en muchos casos la estructura de los minerales, permitiendo el paso del potasio a formas más asimilables.

pH del suelo.

El efecto del pH sobre la fijación, adsorción y liberación del potasio del suelo es, en cierto modo, contradictorio.

Bajo las condiciones normales de encalado pudiera ser más beneficioso que perjudicial, debido a la conservación del potasio que queda afectado, puesto que no queda tan propenso a la lixiviación como en los suelos ácidos. Este hecho puede comprenderse mejor admitiendo la situación siguiente:



Como el calcio es más fácilmente reemplazado que el hidrógeno, al añadir un fertilizante potásico soluble los K^+ sustituirán parte de los Ca^{+2} en el coloide. Por tanto, cuanto mayor sea el grado de saturación de calcio, mayor será la adsorción al coloide del potasio de la disolución del suelo.

Experimentalmente, este hecho está suficientemente demostrado. Los suelos con un alto porcentaje de saturación de bases pierden menos potasio intercambiable por lixiviación que los suelos con un bajo porcentaje. En La figura 15.3. se observa claramente esta diferencia.

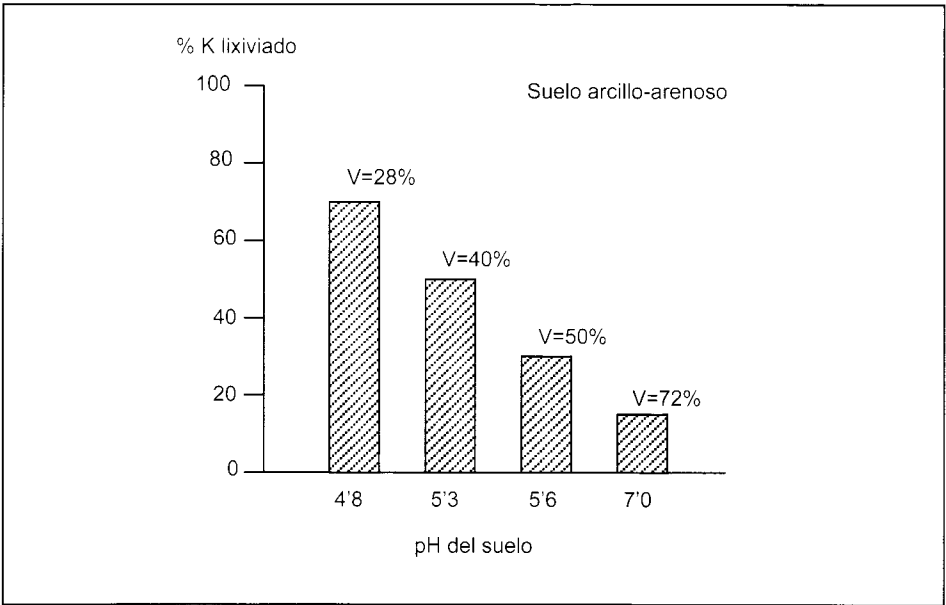


Figura 15.3. Relación entre el pH del suelo y pérdidas de potasio intercambiable por lixiviación.

De esto se deduce que la adición de calizas a los suelos ácidos, o los suelos de por sí calizos, disminuyen las pérdidas de potasio intercambiable por lixiviación. El que este potasio pueda a su vez pasar a formas menos disponibles dependerá del tipo, cantidad y porcentaje de saturación de bases de las arcillas que integran el suelo.

Un aumento del pH del suelo también puede influir en la liberación del potasio no intercambiable, y en consecuencia también lo hace en el equilibrio: K intercambiable \leftrightarrow K no intercambiable. Se sabe que una elevación del pH y la presencia de Ca^{+2} en la disolución del suelo favorece la liberación del

potasio atrapado entre las unidades cristalinas de las arcillas, ya que el Ca^{+2} , al tener un volumen mayor que el K^+ , cuando se introduce dentro de los espacios interlaminares separa éstos, permitiendo la salida de este último (Figura 15.4.).

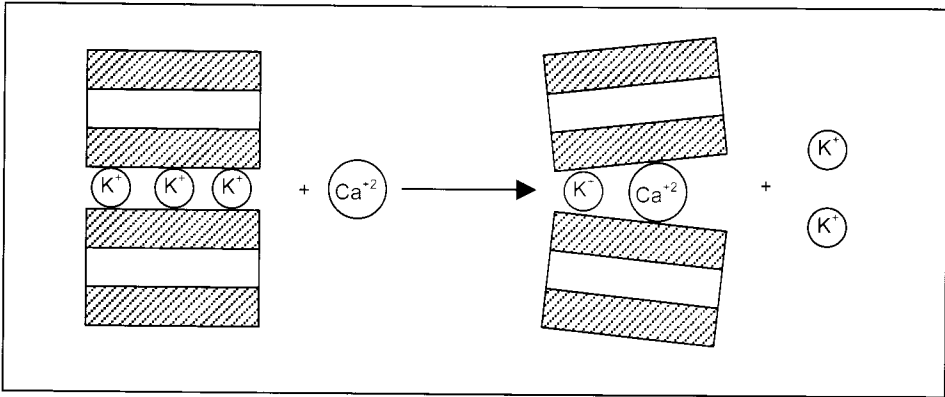


Figura 15.4. Influencia del encalado en la disponibilidad del potasio.

15.3. PERDIDAS.

Las pérdidas que el potasio puede presentar en el suelo son: lixiviación, extracción por los cultivos y erosión.

15.3.1. LIXIVIACION.

En determinadas situaciones del suelo, gran cantidad de potasio puede perderse por lixiviación. Corrientemente, cuando se aplican altas cantidades de fertilizantes a suelos de textura gruesa (arenosos), siempre se pone en evidencia en las aguas de drenaje considerables cantidades de potasio; y en este caso, la magnitud de esta pérdida puede llegar a igualar a la del potasio adsorbido por el cultivo. En los suelos arcillosos, las pérdidas de potasio son en general pequeñas. Estas amplias diferencias, que pueden aparecer pues en el suelo, se explican al considerar las capacidades totales de cambio catiónico y de sus grados relativos de saturación de potasio en ambos tipos de suelo. El suelo arcilloso tiene una capacidad de cambio mucho mayor que el suelo arenoso, y por lo tanto es capaz de retener una cantidad mucho mayor

de potasio. Al adicionar fertilizante potásico, es lógico que haya una mayor adsorción en el caso del suelo arcilloso. La parte no adsorbida puede ser fácilmente eliminada por drenaje, y ello explica por qué grandes cantidades pueden ser pérdidas del suelo arenoso.

Debido a la diferente composición de los suelos, pluviometría y cultivos que en ellos pueden desarrollarse, es muy difícil predecir las pérdidas de potasio por lixiviación, pero pérdidas comprendidas entre 20 y 25 Kg K_2O /Ha pueden considerarse corrientes en suelos de regiones húmedas moderadamente fertilizados.

15.3.2. EXTRACCION POR EL CULTIVO.

Una segunda pérdida de potasio en el suelo es su absorción por la planta. En suelos con una reserva en potasio adecuada, la extracción por el cultivo suele ser tres o cuatro veces la del fósforo y similar a la del nitrógeno. Cifras concretas no pueden darse, pero valores comprendidos entre 75 y 110 Kg/Ha como K_2O son normales.

En algunos casos, estas pérdidas pueden incrementarse notablemente por otra causa. En aquellos suelos donde ha habido un aporte grande de fertilizantes potásicos, puede haber lo que corrientemente se conoce como "consumo de lujo". Este término significa que muchas plantas pueden continuar absorbiendo un elemento en cantidades que exceden de lo que se requiere para su crecimiento óptimo. El resultado es una acumulación del elemento en la planta, sin que ello suponga un aumento de la cosecha en ningún caso. Esto ocurre frecuentemente con el potasio. Una representación esquemática de esta posibilidad se presenta en la finura 15.5.

La cantidad de este elemento requerido para que el rendimiento sea óptimo se denomina "potasio requerido". Todo el potasio consumido por encima de este nivel crítico es considerado como "de lujo", pues su absorción es totalmente inútil.

El hecho expuesto debe tenerse muy en cuenta al realizar una fertilización potásica. Por ejemplo, si para ahorrar jornales se suministra potasio sólo una vez en rotación de 3-4 años o durante el primer año de un cultivo continuo de varios años, gran parte de potasio añadido será utilizado por la primera cosecha. Muy poca cantidad del potasio añadido quedará para cosechas ulteriores.

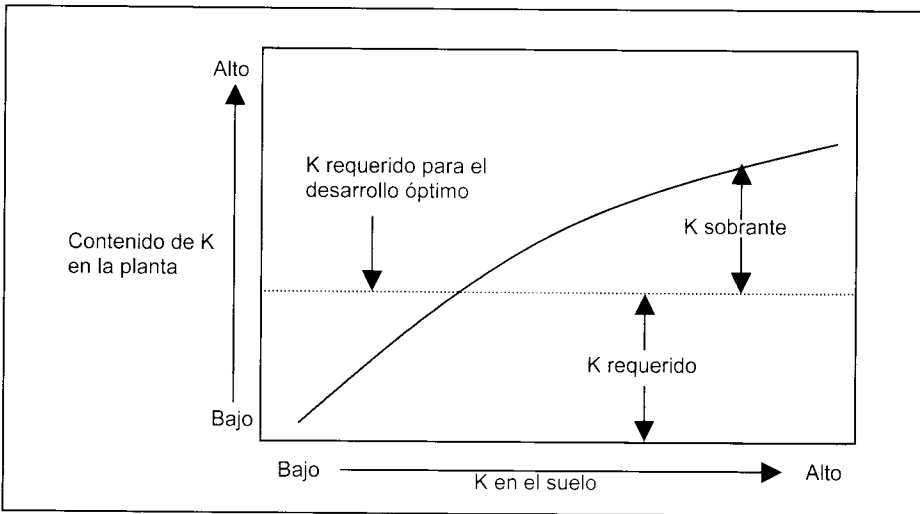


Figura 15.5. Relación general entre el potasio contenido por las plantas y la cantidad de potasio asimilable que se encuentra en el suelo.

15.3.3. EROSION.

Altas cantidades de potasio pueden perderse de los suelos por efecto de la erosión. En algunos suelos de EE.UU. se han alcanzado pérdidas anuales de hasta 158 Kg/Ha. La separación selectiva de finas partículas durante la erosión reduce selectivamente la porción de suelo superficial que es la más importante para suministrar potasio a la planta.

15.4. CICLO DEL POTASIO EN LA NATURALEZA. PROBLEMÁTICA BAJO EL PUNTO DE VISTA AGRÍCOLA.

Las conexiones de las distintas formas del potasio en el suelo con los procesos que se verifican en la Naturaleza, y en los que el elemento participa, se esquematizan en la figura 15.6.

Del examen del ciclo, y teniendo en cuenta todo lo expuesto, el problema del potasio en el suelo puede concretarse, bajo el punto de vista agrícola, en los siguientes hechos:

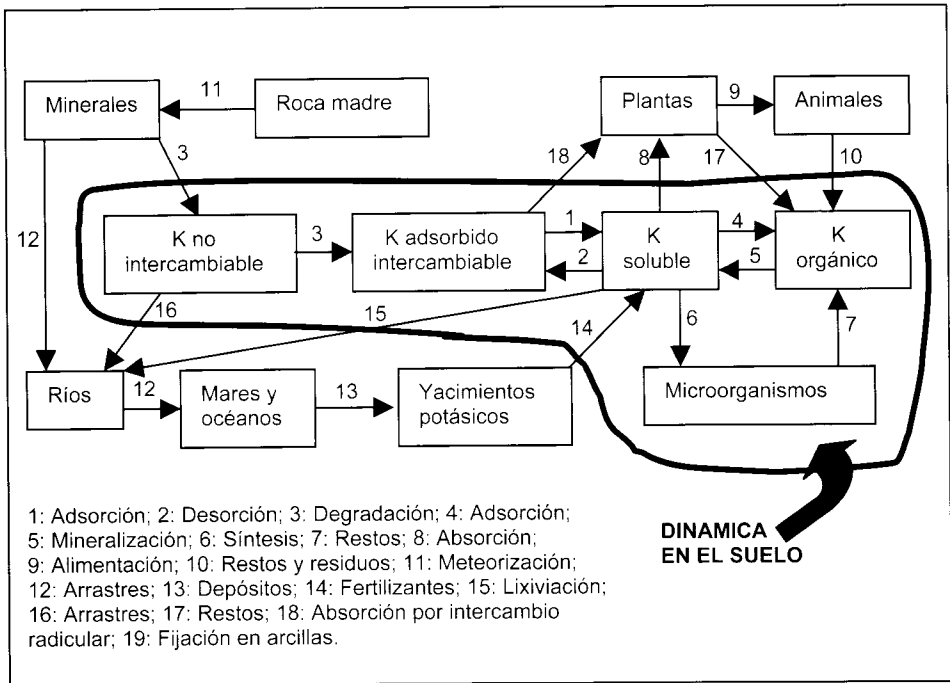


Figura 15.6. Ciclo del potasio en la Naturaleza.

1º) Una cantidad alta se encuentra normalmente presente en los suelos. Sólo los arenosos son excepción.

2º) Falta de aprovechamiento del potasio natural, ya que en su mayor parte es escasamente utilizable por la planta.

3º) Notables pérdidas por lixiviación cuando se añaden al suelo fertilizantes solubles.

4º) Absorción grande por la planta, especialmente cuando se aporta al suelo en cantidades excesivas.

5º) Pérdidas económicas derivadas de las circunstancias 2ª y 3ª.

Aceptando por tanto que el potasio natural constituye un depósito potencial utilizable por la planta. aunque sea a largo plazo, las soluciones deben orientarse a utilizar el potasio con prudencia, es decir, las aplicaciones pequeñas y preferibles a las aportaciones grandes y poco frecuentes. Asimismo, un encalado adecuado en aquellos suelos que lo precisen puede contribuir notoriamente a su conservación.

16

EL AZUFRE EN LA PLANTA Y EN EL SUELO.

El azufre fue sugerido como elemento necesario para las plantas desde el trabajo de De Saussure, en 1804. Su definitivo reconocimiento como elemento esencial debe situarse a partir de 1860, como consecuencia de los resultados experimentales obtenidos por W.Salm-Horstmar y por J. Sachs y W.Knop, utilizando disoluciones nutritivas. Sin embargo, y hasta bien entrado el siglo actual, se concedió poca importancia a este elemento, posiblemente debido a la amplia utilización del superfosfato de cal, fertilizante éste con un alto contenido de sulfato cálcico.

En los últimos 30 años, la problemática del azufre ha cobrado un nuevo interés. El incremento de los cultivos, el menor uso de plaguicidas con base de azufre, la utilización cada vez más amplia del superfosfato triple en sustitución del cálcico, y, posiblemente, la menor concentración de dióxido de azufre en la atmósfera por un menor consumo de aceites de alto contenido en azufre, ha llevado a que su deficiencia en el suelo empiece a manifestarse con más frecuencia, y ello repercuta en el rendimiento de los cultivos.

16.1. CONTENIDO, FORMAS Y COMPUESTOS IMPORTANTES DE AZUFRE EN LA PLANTA,

El azufre es absorbido por la planta casi exclusivamente en forma de SO_4^{-2} , a través de su sistema radicular. En pequeñas cantidades también puede ser absorbido del suelo como SO_3^{-2} y de la atmósfera como dióxido de azufre, por las hojas, a través de los estomas.

Como en el caso del nitrógeno, la mayor parte del SO_4^{-2} absorbido se reduce en la planta a compuestos sulfhídricos (-SH), y así, en este estado, se integra en los compuestos orgánicos. Sólo una pequeña parte se incorpora sin ningún cambio redox, y como tal ión inorgánico contribuye a la regulación osmótica celular.

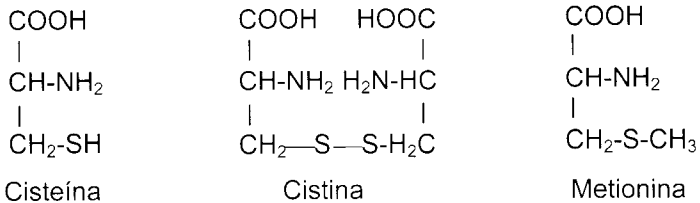
Pero a diferencia del nitrógeno, que una vez reducido en la planta no vuelve a ser oxidado a NO_3^- , el azufre reducido puede ser reoxidado a SO_4^{-2} y

permanecer en la planta como reserva. Bajo esta forma se halla distribuido con bastante regularidad en todas las partes vitales: raíces, tallos, hojas, etc.

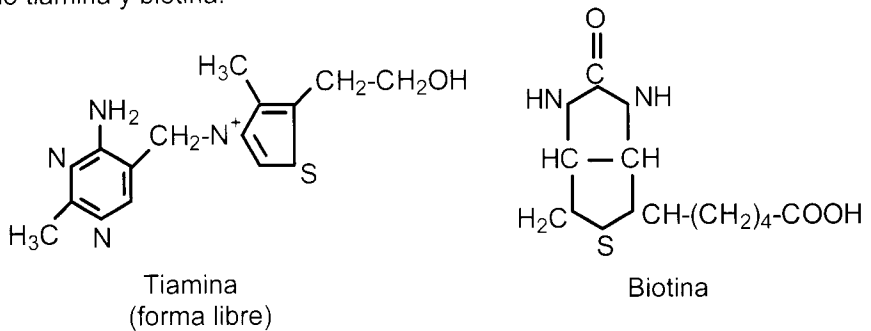
También hay que señalar otra clara diferencia con el nitrógeno. Así, el SO_4^{-2} es menos móvil que el NO_3^- , por lo que está disponible en los órganos de crecimiento más tardíamente. Esto explica por qué una deficiencia de azufre se manifiesta primeramente en las hojas jóvenes.

La cantidad de azufre existente en la planta varía dentro de límites relativamente amplios, y pueden situarse entre 0'1 y 1 % de S en peso seco. Estos valores dependen no sólo del contenido en el suelo, sino también de las necesidades fisiológicas propias de cada especie. Las menores cantidades se suelen encontrar en las gramíneas, y las más altas en leguminosas y crucíferas.

El azufre es un constituyente de un gran número de compuestos orgánicos de la planta. Las proteínas vegetales contienen de 0'03 a 7'2 % de azufre en la forma aminoácidos: cisteína, cistina y metionina:



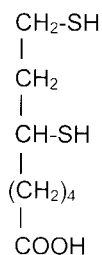
Se le encuentra, así mismo, como componente de ciertas vitaminas, como tiamina y biotina:



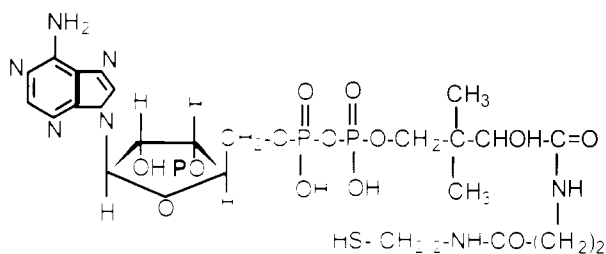
Estos compuestos desempeñan funciones importantes en el metabolismo vegetal. La tiamina actúa como coenzima en el proceso de descarboxilación de los α -cetoácidos, y la biotina como activadora en el

metabolismo del ácido aspártico. reacciones de descarboxilación de sustancias intermedias del ciclo de Krebs y en la síntesis del ácido oléico.

El azufre es también un constituyente del ácido lipoico y coenzima A, cofactores esenciales en la síntesis del acetilcoenzima A, necesario para la iniciación del ciclo de Krebs y formación de terpenos:

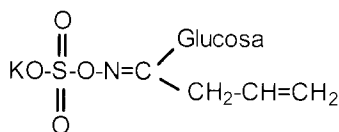


Ac. Lipoico
(forma reducida)

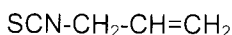


Coenzima A

y como componente de muchos compuestos volátiles, como ciertos glucósidos que por hidrólisis producen vinil-sulfuros, alil-sulfuros y mercapto-sulfuros. En este grupo de sustancias puede citarse la Sinogrosida:



la cual, por hidrólisis, origina isotiocianato de alilo:



principio activo de la esencia sulfurada volátil de muchas coníferas.

16.2. FUNCIONES EN LA PLANTA.

Son muchos e importantes los procesos bioquímicos en los que participan los compuestos orgánicos con azufre anteriormente reseñados. Esta participación, ya puesta de manifiesto en la biosíntesis de lípidos, clorofilas, carotenos y ácidos orgánicos (véase 12.2. Funciones del fósforo en la planta), puede complementarse incluyendo dos procesos también esenciales en el

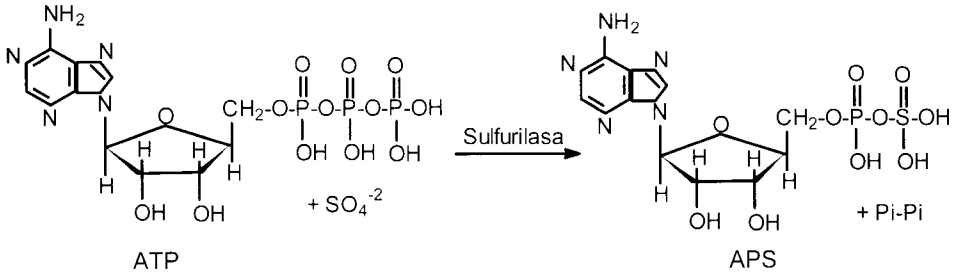
metabolismo vegetal: la biosíntesis de los aminoácidos sulfurados cisteína, cistina y metionina, y la formación del acetilcoenzima A, eslabón básico de conexión entre la glucólisis y el ciclo de Krebs.

16.2.1. INTEGRACION DEL AZUFRE EN LOS COMPUESTOS ORGANICOS Y BIOSINTESIS DE LOS AMINOACIDOS AZUFRADOS.

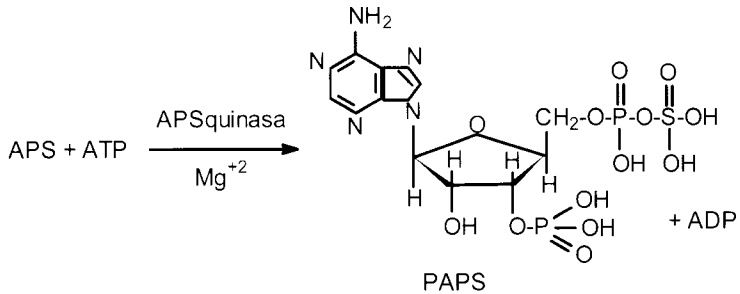
La integración del azufre a los compuestos orgánicos requiere previamente una activación biológica del sulfato absorbido por la raíz. Este sulfato "activo" es posteriormente reducido a sulfuro, y bajo esta forma se incorpora a los aminoácidos que actúan como receptores. Los distintos pasos en cada una de estas fases se tratan en forma resumida a continuación.

Fase primera: Fijación del SO_4^{-2} .

El sulfato reacciona con ATP para formar adenosin-5'-fosfosulfato ó APS. La reacción es catalizada por el enzima sulfurilasa:

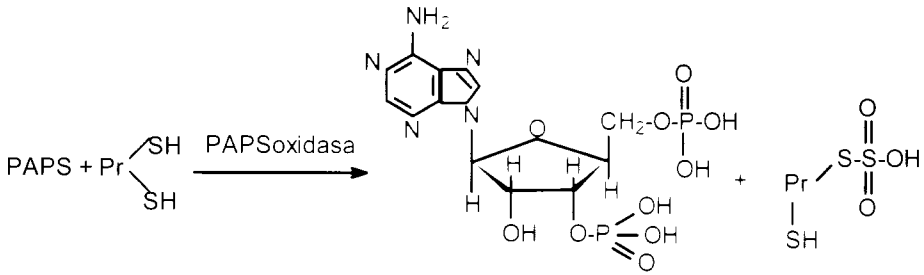


Posteriormente, el APS es activado por la enzima APSquinasa y Mg^{+2} , formándose así el sulfato 3'-fosfoadenosin-5'-fosfosulfato, ó PAPS:

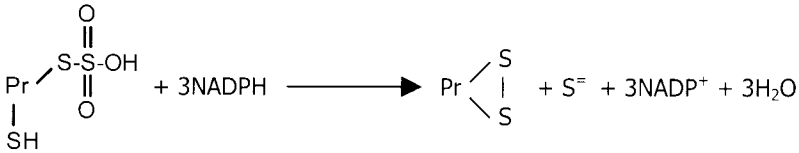


Fase segunda: Reducción del SO_4^{-2} a S^{-2} .

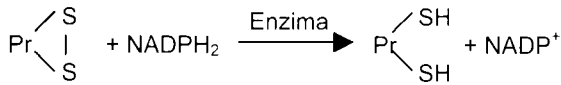
Esta reducción se efectúa en etapas, y en ello presenta una cierta similitud con la reducción de los nitratos. En primer lugar hay una transferencia del resto SO_3H^- a un compuesto proteico (Pr) que posee dos funciones tiol (-SH). El enzima que cataliza este paso es PAPSoxidasa:



A continuación, y mediante un conjunto de reacciones aún no totalmente dilucidadas, se reduce por tres moléculas de NADPH_2 a S^{-2} :

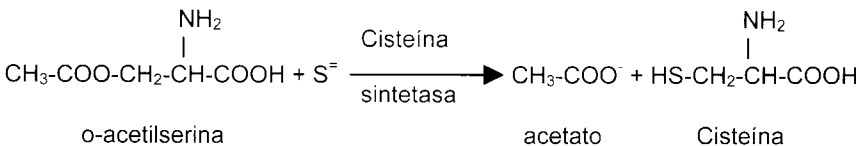


Una cuarta molécula de NADPH_2 rehidrogena el puente disulfuro del compuesto proteico. La reacción es catalizada por un enzima flavínico:

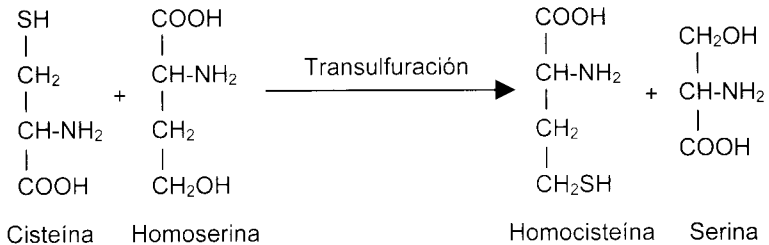


Fase tercera: Incorporación del S^{-2} a los aminoácidos.

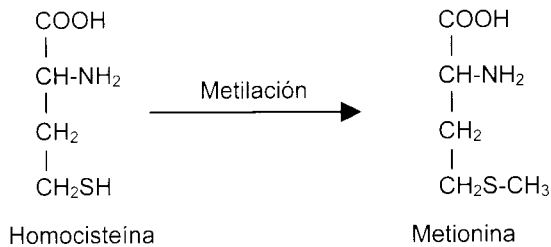
El aminoácido aceptor del S^{-2} es la o-acetilserina, el cual origina cisteína en una reacción catalizada por el enzima cisteína-sintetasa:



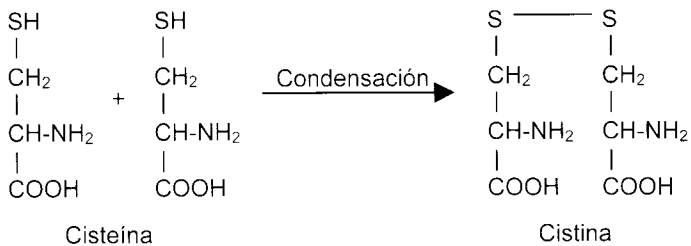
Una transulfuración (reacción comparable a la transaminación) realizada entre homoserina y cisteína, catalizada por una transulfurasa, conduce a la formación de homocisteína y a la regeneración de la serina:



La homocisteína, por metilación, origina metionina:



Finalmente, por condensación de la cisteína se forma cistina:



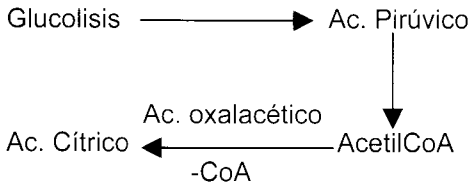
Una vez sintetizada la cisteína, las plantas pueden, a partir de ella, sintetizar los restantes compuestos azufrados: biotina, coenzima A, ácido lipoico, glucósidos, etc. Todas estas reacciones, y sobre todo la reducción del sulfato, tienen lugar principalmente en los cloroplastos, gracias al NADPH₂ producido en la fotosíntesis y a diversas sustancias entre las que merece destacar la ferredoxina.

El proceso expuesto tiene una gran importancia bajo el punto de vista nutritivo del hombre y de los animales no rumiantes, ya que el valor biológico de una proteína viene controlado por el contenido de aminoácidos con azufre. Los rumiantes son capaces de utilizar el sulfato, sulfuro y, en menor proporción, el azufre para sintetizar sus proteínas. En cambio, los no rumiantes no pueden, y debe haber metionina como aminoácido esencial en su dieta alimentaria.

16.2.2. FORMACION DEL ACETILCOENZIMA A.

El acetilcoenzima A se considera como el eslabón de conexión entre la glucólisis y el ciclo de Krebs (ciclo de los ácidos tricarbóxicos). Estos ácidos se producen a través de la condensación de los ácidos pirúvico y oxalacético, los cuales originan un ciclo, al final del cual se regenera una nueva molécula de ácido oxalacético, que vuelve a condensarse con una nueva molécula de ácido pirúvico.

Actualmente está suficientemente demostrado que para que esta condensación inicial se produzca, es preciso que el ácido pirúvico se transforme primeramente en acetilcoenzima A:



A partir del ácido cítrico se desarrollan una serie de reacciones que dan lugar en su fase final a la regeneración del ácido oxalacético. El papel que el azufre desempeña en este importante proceso no está sólo al considerarlo como constituyente del acetilcoenzima A, sino también en la participación de otros compuestos azufrados necesarios para su síntesis.

El acetilcoenzima A se origina por la unión del ácido acético al coenzima A:

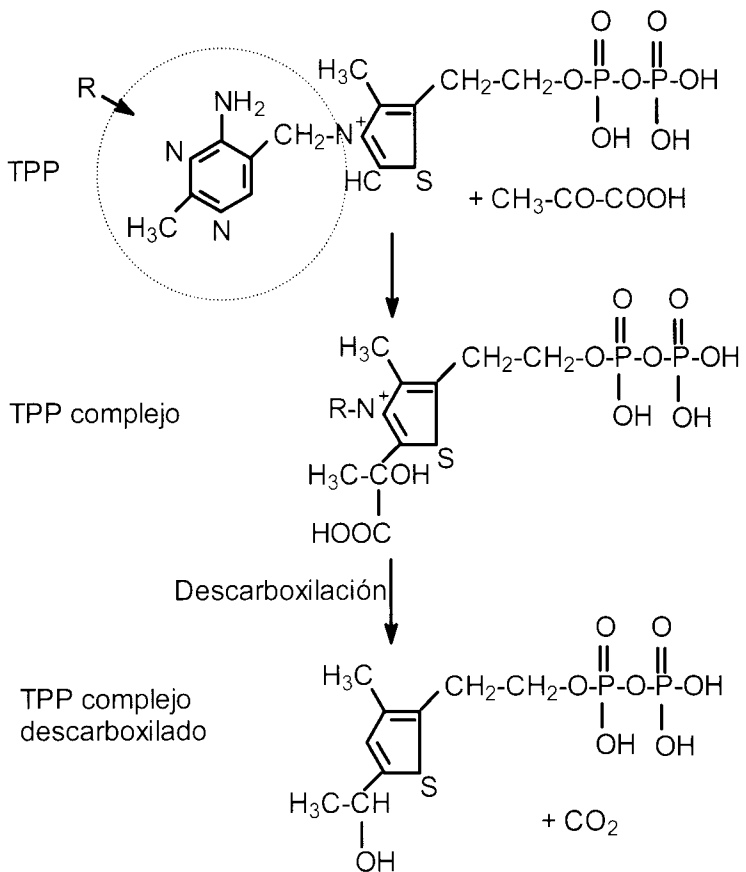


En realidad, esta reacción es muy compleja, ya que se efectúa en cuatro fases, y requiere la cooperación de cinco cofactores esenciales y un complejo de enzimas. Los cinco cofactores son:

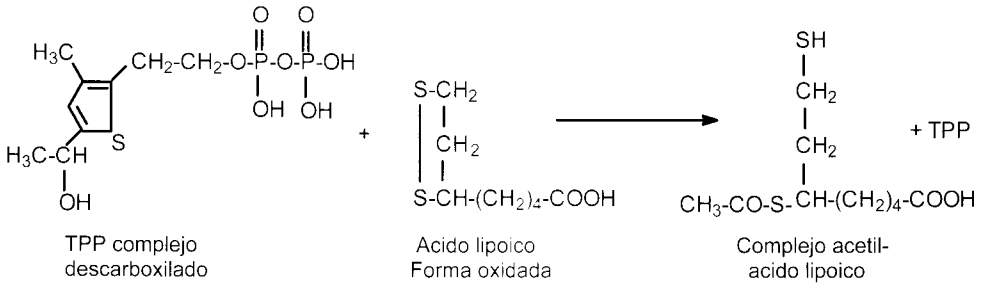
- 1°) Tiamina-pirofosfato (TPP).
- 2°) Mg^{+2} .
- 3°) Coenzima A (CoA).
- 4°) Nicotinamida-adenin-dinucleótido (NAD^{+}).
- 5°) Acido α -lipoico ó tióctico.

Las cuatro fases que se producen en la formación del acetilcoenzima A se esquematan a continuación:

Fase primera: Formación de un complejo TPP descarboxilado.

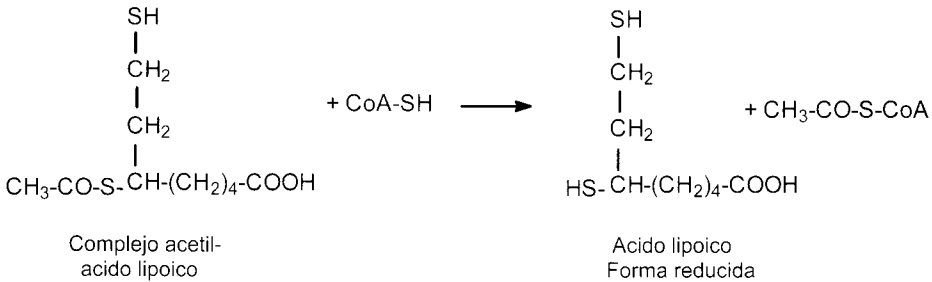


Fase segunda: Reacción del TPP complejo descarboxilado con el ácido lipoico.

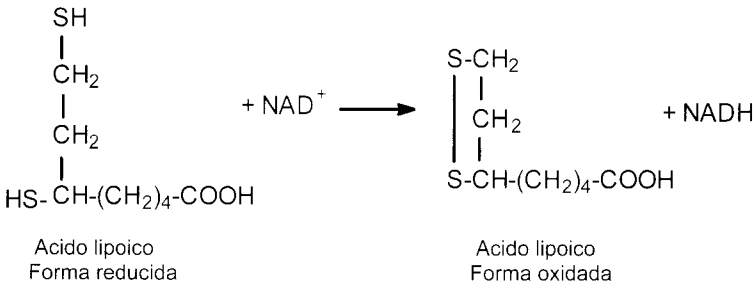


En esta reacción, el ácido lipoico se reduce formándose un tioéster, y el TPP se emplea de nuevo en la primera fase.

Fase tercera: Sustitución de la molécula del ácido lipoico por el coenzima A:

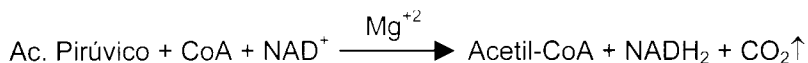


Fase cuarta: Regeneración del ácido lipoico en su forma oxidada por transferencia de electrones a NAD^+ :



Mediante esta reacción se proporciona el ácido lipoico oxidado necesario para la realización de la fase segunda.

La reacción global, por tanto, puede resumirse de la forma siguiente:



ya que el TPP y el ácido lipoico se utilizan y generan continuamente.

Hay que significar que el coenzima A no solamente actúa como transferidor del grupo acetilo, sino que es capaz de unirse a otros derivados carboxílicos. Estas combinaciones acilcoenzima A representan las formas activadas de ácidos que, libres, no podrían ser metabolizados. Así, el malonilcoenzima A participa en el metabolismo de los ácidos grasos; el succinilcoenzima A en el ciclo de Krebs y en la síntesis de porfirinas, etc.

16.3. ALTERACIONES EN LA PLANTA POR DEFICIENCIA Y EXCESO.

Las deficiencias de azufre en plantas han empezado a ponerse solo de manifiesto en las tres últimas décadas. La causa de ello quizá haya sido debida por una parte a que corrientemente se confunda con la de nitrógeno, y por otra a que las reservas del suelo han ido disminuyendo con el tiempo por la extracción continua de los cultivos, o por lixiviación, especialmente en suelos de regadío o en aquellos que soportan alta pluviometría. Estas pérdidas, antes eran suficientemente compensadas con las incorporaciones que de este elemento se hacían mediante fertilizantes simples que lo contenían, principalmente superfosfato de cal y sulfato amónico. Pero la tendencia actual, dirigida a obtener productos más concentrados en los tres nutrientes principales: nitrógeno, fósforo y potasio, ha hecho disminuir grandemente el aporte de azufre.

En líneas generales, la deficiencia de azufre en la planta presenta una notable similitud con la del nitrógeno: retraso en el crecimiento, clorosis uniforme de las hojas y tendencia a formar gradualmente coloración bronceada con necrosis en las puntas. A diferencia de la deficiencia de nitrógeno, las plantas deficientes en azufre presentan clorosis inicialmente en las hojas más jóvenes.

La deficiencia provoca asimismo, en la mayoría de los casos, una elevada acumulación de almidón, sacarosa y nitrógeno soluble; en cambio, los

azúcares reductores suelen encontrarse en cantidad inferior a la normal. Estas alteraciones son comprensibles si se tiene en cuenta la importante participación del azufre en los procesos metabólicos que anteriormente se han expuesto.

En los árboles de hoja perenne es fácil dilucidar una deficiencia de azufre de otra de nitrógeno. En el primer caso, los síntomas se dan en las brotaciones de primavera, mientras que en la segunda se presentan en otoño-invierno. Por otra parte, el análisis foliar puede aclarar una posible duda, ya que el contenido de azufre en los brotes correspondientes a la deficiencia de nitrógeno es superior al normal, y en el caso de la deficiencia de azufre, es la cantidad de nitrógeno superior también a lo normal. Es decir, que en la deficiencia de nitrógeno hay poco nitrógeno y excesivo azufre en las brotaciones cloróticas, mientras que en el caso de la deficiencia de azufre ocurre al contrario.

El azufre como plaguicida, fertilizante o enmienda de suelos se emplea extensamente en muchos países, pero sólo puede considerarse tóxico para el cultivo cuando sobrepasa las 1000 ppm de SO_4^{-2} , especialmente para naranjo. Por ello, las aportaciones de azufre, directa o indirectamente al suelo, no perjudican a la planta, aún utilizando grandes dosis. Además, hay que tener en cuenta que la forma bajo la que principalmente se absorbe el azufre es SO_4^{-2} , y que el azufre elemental y otras formas de azufre deben sufrir su previa transformación biológica antes de ser utilizada por la planta.

Las alteraciones, por tanto, que en la planta se pueden presentar están íntimamente ligadas a un exceso de sulfato y por salinidad en general. Pueden observarse cuando el valor en hoja supera el 0'4 %, expresado en azufre total. Se manifiesta principalmente por clorosis y amarilleamientos, seguidos de neurosis y quemaduras en las hojas y enanismo de la planta.

16.4. EL AZUFRE EN EL SUELO. ORIGEN, CONTENIDO Y FORMAS.

La mayor parte del azufre del suelo procede inicialmente de los sulfuros metálicos constituyentes de las rocas ígneas. A su degradación, estos minerales, en condiciones aeróbicas, se oxidan rápidamente a sulfatos, y representan la forma típica del azufre mineral. Pero en condiciones anaeróbicas permanecen en el suelo en su forma original, o bien pueden aparecer por una reducción de los sulfatos. Sulfuros y sulfatos son, por tanto, los dos modos de acumulación de azufre mineral en el suelo. Dentro de estas formas, pirita (S_2Fe), calcopirita (S_2CuFe), blenda (SZn), galena (SPb), etc., y

el sulfato cálcico son frecuentes en los suelos. Otros compuestos, tiosulfatos, politionatos, y el mismo azufre elemental, constituyen tan solo estados intermedios dentro del ciclo de transformaciones que los microorganismos realizan y no se acumulan en el suelo.

Bajo forma orgánica, el azufre se encuentra preferentemente en suelos de zonas húmedas, como consecuencia de una mayor presencia de restos vegetales. Este azufre orgánico es de naturaleza mal conocida, pero su origen biológico hace pensar que está formado por compuestos muy diversos. Bajo esta forma no puede ser utilizado por la planta, pero por la acción microbiana puede ser transformado al estado sulfato y en condiciones de poder ser asimilado.

La atmósfera, aunque en pequeña proporción, es otra fuente de azufre al suelo. En áreas próximas a centros de gran actividad industrial, en donde el carbón y otros productos que contienen azufre son quemados, o de lugares donde existen emanaciones volcánicas, una cantidad apreciable de dióxido de azufre puede depositarse por la acción de la lluvia. Esta aportación, como es lógico, depende del régimen pluviométrico que impere, de la dirección de los vientos dominantes, de la actividad industrial y del lugar de su ubicación. Los datos disponibles, por estas razones, varían entre límites muy amplios, y pueden situarse entre cantidades tan pequeñas como 0'5 Kg S/Ha año en zonas áridas y poco industrializadas, hasta más de 100 Kg S/Ha año en áreas próximas a zonas industrializadas y con alta pluviometría.

El contenido medio de azufre en los suelos se calcula situado entre 0'02 y 0'05 %, aunque los suelos de las regiones áridas pueden llegar hasta el 1 %, especialmente en las capas superficiales, y normalmente precipitado como sulfatos de calcio, magnesio, sodio y potasio. En la mayor parte de los suelos cultivados se halla preferentemente bajo la forma orgánica y como sulfatos solubles en la disolución, o adsorbido al complejo coloidal del suelo.

16.5. DINAMICA DEL AZUFRE EN EL SUELO.

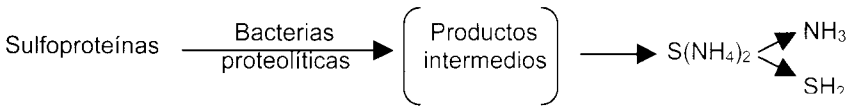
El azufre está sometido en el suelo a numerosas transformaciones, en donde están implicados en su mayor parte, junto a agentes puramente químicos, agentes biológicos: animales, vegetales superiores y microorganismos. Gran número de estos últimos presenta una gran capacidad de actuación sobre el azufre, formando el eslabón principal que, ligado a las plantas y a los animales, constituye la base principal del ciclo de transformaciones de este elemento.

Tres fases pueden concretarse en la dinámica del azufre en el suelo: 1°) Sulfhidración, o mineralización del azufre orgánico; 2°) Sulfooxidación, u oxidación del azufre mineral; y 3°) Desulfatación, o reducción del azufre mineral. Estas tres fases gobiernan las principales formas del azufre en los suelos en proporción variable, y en íntima relación con las condiciones climáticas y ecológicas.

16.5.1. MINERALIZACION DEL AZUFRE ORGANICO.

Es un hecho suficientemente comprobado que una gran proporción del azufre en los suelos, y muy especialmente en los de regiones húmedas, es de naturaleza orgánica. Su origen biológico, debido a una acumulación de residuos vegetales, y en menor proporción de restos de origen animal, hace presumir que se encuentra bajo formas muy diferentes: proteínas sulfuradas, aminoácidos, vitaminas, glucósidos y otros compuestos, como tiamina y tiourea, normalmente constituyentes de dichos restos. Sin embargo, la identidad concreta de estos compuestos no puede establecerse por el variado número de intermediarios que pueden aparecer en sus transformaciones.

Tampoco se conocen bien los procesos de descomposición de todo este azufre orgánico. La información que se posee sobre la aparición en el suelo de productos simples es aún muy confusa, aunque desde hace mucho tiempo se admite que el sulfuro de hidrógeno es el término final dominante, por no decir único, de estos productos de degradación. De una forma muy general, el proceso puede representarse de la siguiente forma:



La producción de SH_2 permite establecer un paralelismo entre la mineralización del azufre proteico y la del nitrógeno proteico, es decir, una sulfhidración comparable a la amonificación. Pero mientras que en el caso del nitrógeno se conocen diversos modos de desaminación, para el azufre los mecanismos de liberación quedan aún desconocidos, y deben considerarse hipotéticos. De hecho, a pesar de la imposibilidad de generalización derivada del número bastante limitado de estudios a este respecto, otros productos distintos al SH_2 pueden aparecer en esta degradación, sobre todo en condiciones de anaerobiosis.

Pero si bien los mecanismos que rigen la mineralización del azufre orgánico constituyen aún un problema sin resolver, sí ha sido bastante

precisada la naturaleza de los microorganismos que intervienen, merced a un conjunto de trabajos a escala de laboratorio realizados por una parte sobre cultivos puros bacterianos, y por otra sobre el mismo suelo.

Una gran variedad de bacterias aerobias y anaerobias, heterótrofas no especializadas, corrientemente llamadas "bacterias de la putrefacción", son capaces de descomponer las proteínas sulfuradas. Los aminoácidos cistina y metionina han sido los patrones testigo corrientemente empleados para el estudio de esta descomposición, que se traduce por la aparición de diversos derivados del azufre.

En condiciones de anaerobiosis se ha descrito la producción de SH_2 a partir de cistina, cisteína o glutatión, por acción de *Proteus vulgaris*, *Bacillus subtilis* y *Clostridium spirogenes* entre otras bacterias utilizadas. En condiciones aeróbicas, la descomposición bacteriana de la cistina ha confirmado la diversidad de compuestos de azufre originados: sulfatos, politionatos, azufre elemental, tiosulfatos y sulfitos. Para la metionina, el azufre orgánico origina principalmente metilmercaptanos y dimetilsulfuro. Estas transformaciones también han sido demostradas por la acción de ciertos hongos y actinomicetos.

Los estudios realizados en suelos por adición de cistina y metionina provocan, bajo condiciones adecuadas, la descomposición rápida de estos aminoácidos hasta el término final sulfato. El estudio del metabolismo de la metionina por la microflora total telúrica, practicada por incorporación de este sustrato a un suelo fértil, e incubación a 28°C , origina en aerobiosis fundamentalmente mercaptanos, en menor proporción sulfitos y un ligero aumento de los sulfatos sobre el valor inicial del suelo objeto de estudio; en anaerobiosis, producción sobre todo de SH_2 .

De estos dos grupos de estudios con cultivos puros bacterianos, o con la micropoblación del suelo, se llega a la conclusión de que en condiciones anaeróbicas el SH_2 es el término que en mayor proporción se produce en la mineralización del azufre orgánico, mientras que en anaerobiosis los mercaptanos y otros derivados del azufre más o menos oxidados pueden aparecer.

Hay que señalar finalmente, dentro del proceso de mineralización del azufre orgánico, algunos factores que se admiten como influyentes en la mayor o menor rapidez de su descomposición y posterior oxidación. En este aspecto, se admite actualmente que la desecación de los suelos y el crecimiento de las plantas acelera el proceso.

Diversas investigaciones han demostrado que cuando los suelos se secan antes de ser incubados, la mineralización del azufre se incrementa. Este hecho se pone de manifiesto en la experiencia representada en la figura 16.1.

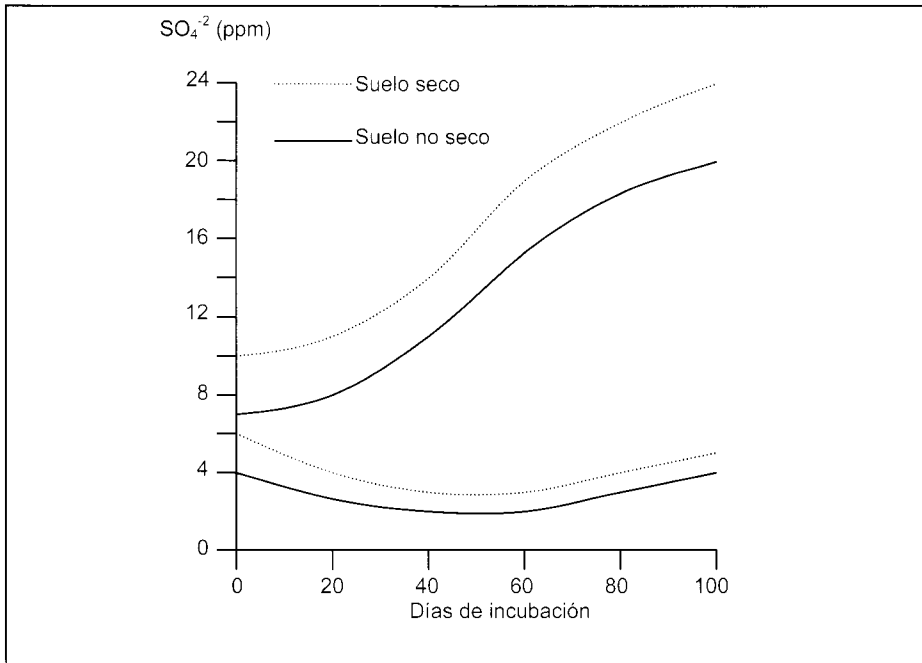


Figura 16.1. Influencia del secado de dos suelos sobre la mineralización del azufre (N.J. Barrow, 1961).

Se incubaron dos suelos diferentes en condiciones distintas de sequedad durante un periodo de tiempo de 100 días. Durante este intervalo de tiempo se determinó periódicamente el azufre bajo la forma de sulfato. En los dos casos ensayados, la mineralización fue más notable en el suelo seco que en el no seco.

Este efecto puede tener una cierta importancia en el crecimiento de las cosechas. En algunas zonas de Australia con suelos deficientes en azufre, se ha observado que períodos prolongados de sequedad son seguidos por un incremento notable en el crecimiento de las plantas. Se considera que ello es el resultado, al menos en parte, del aumento de la mineralización del azufre orgánico.

También ha sido comprobado en algunos suelos australianos que el crecimiento de las plantas aumenta la mineralización del azufre orgánico del suelo. Este hecho se supone debido al desarrollo radicular, ya que la concentración de microorganismos del suelo siempre es mayor en la zona que rodea las raíces de la planta que en el suelo restante. El efecto estimulador de estos organismos y de sus secreciones produce probablemente un aumento de la degradación de la materia orgánica del suelo y una liberación de azufre mineral.

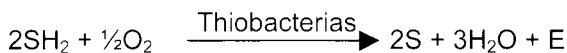
16.5.2. OXIDACION DEL AZUFRE MINERAL.

El azufre orgánico mineralizado por los microorganismos del suelo a la forma SH_2 es utilizado por un conjunto de bacterias, en su mayoría autótrofas específicas, que en diversas etapas lo transforman finalmente a la forma sulfato, asimilable por la planta.

Estas transformaciones son mejor conocidas y pueden ser algo diferentes, según que el proceso oxidante parta de la forma reducida SH_2 o de la parcialmente oxidada S.

En general, en el suelo no parece que el proceso de oxidación del SH_2 a azufre elemental sea de naturaleza biológica, sino más bien de naturaleza química, por acción del oxígeno atmosférico. Sin embargo, ciertas bacterias específicas, autótrofas, las Thiobacterias, pueden participar en cierta medida en este primer paso oxidativo. Por el contrario, el azufre elemental que se origina en esta primera oxidación, junto al que pueda existir en el suelo, y el que se adiciona al mismo en las diversas prácticas de cultivo, tratamientos fitosanitarios, o por acción de la lluvia, es utilizado por un grupo de bacterias del género *Thiobacillus*, en especial *T. thiooxidans*, que en diversas etapas lo transforman finalmente a la forma de sulfatos. Estos organismos son aerobios obligados, y son los representantes típicos del suelo que aseguran la oxidación del azufre elemental. De forma similar a las bacterias nitrificantes, obtienen su energía por la oxidación de un material inorgánico, y su carbono del dióxido de carbono. De su actuación se deduce también aquí una fase de sulfooxidación similar a la nitrificación en el ciclo del nitrógeno.

El mecanismo químico de todo el proceso de oxidación puede expresarse de forma resumida de la siguiente forma:



El *T. thiooxidans* es capaz de soportar valores altos de acidez. Su presencia se ha señalado en muchos suelos con pH entre 2'2 y 2'4.

Aunque en menor proporción, diversos heterótrofos no especializados, bacterias, actinomicetos y hongos del suelo, son también capaces de efectuar la oxidación del azufre.

Determinados factores pueden limitar la acción de estos organismos en el proceso de sulfooxidación en el suelo. En este aspecto deben considerarse la temperatura, humedad y el estado de finura del azufre presente o añadido.

Un aumento de la temperatura incrementa generalmente el porcentaje de oxidación. Se ha comprobado que cuando la temperatura del suelo supera los 25°C, la oxidación empieza a ser amplia, y alcanza su máximo entre 30 y 35°C. Esto es explicable si se tiene en cuenta que casi todas las reacciones biológicas se favorecen al aumentar la temperatura.

La oxidación del azufre disminuye notablemente en suelos excesivamente húmedos. En ellos, el oxígeno suele escasear, y los organismos oxidantes, al ser aeróbicos típicos, quedan altamente inhibidos. Los datos experimentales disponibles indican que el proceso es máximo cuando el nivel de humedad del suelo corresponde al de su capacidad de campo.

El tamaño de las partículas del azufre que puede aplicarse al suelo influye asimismo en la rapidez del proceso oxidativo. Cuanto mayor sea el estado de división, mayor superficie presentará al ataque de los microorganismos, y ello trae como consecuencia una más rápida transformación a la forma sulfato.

Estos sulfatos que aparecen en el suelo debido a la solubilidad que presentan la mayoría de sus sales, pueden perderse en parte por lixiviación, y ello depende de la cantidad de agua que el suelo reciba, de su composición coloidal, de la naturaleza de los iones adsorbidos y del pH.

Los suelos que presentan altos contenidos de arcilla y óxidos de hierro y aluminio muestran siempre unas pérdidas menores que cuando los suelos son ácidos. Los mecanismos que se sugieren para explicar este hecho están basados en admitir un intercambio aniónico en los hidróxidos citados y arcillas (sobre todo del tipo caolinita), al aparecer cargas positivas en sus superficies a bajos valores de pH; o bien una retención de los SO_4^{-2} en los hidróxidos mediante enlaces de coordinación. Esto se confirma cuando en estos mismos

suelos se eliminan esos componentes; las pérdidas entonces son amplias, ya que los sulfatos no quedan adsorbidos o ligados y su lixiviación es fácil.

También se considera que la retención de los SO_4^{-2} depende del contenido en materia orgánica del suelo. En este caso se admite, como resultado de una amplia labor experimental, que la adsorción se debe al carácter anfótero de la materia orgánica, que en determinadas condiciones de acidez puede presentar cargas positivas. Al igual que en el caso de los hidróxidos de hierro y aluminio, la eliminación de la materia orgánica del suelo facilita la eliminación de los sulfatos por lavado.

La influencia del tipo de coloide y del catión adsorbido ha sido también estudiada. A un nivel dado de pH se ha comprobado que el SO_4^{-2} se adsorbe para una misma arcilla en menor proporción cuando el K^+ es el catión adsorbido, algo mayor cuando lo es el Ca^+ , y mucho mayor cuando es el Al^{+3} . Para arcillas saturadas de H^+ , la retención de SO_4^{-2} se mantiene en el orden siguiente:

caolinita > illita > bentonita

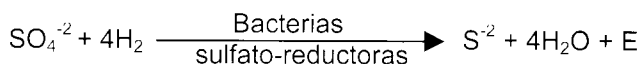
y para las saturadas con Al^{+3} es:

caolinita = illita > bentonita.

La adición de azufre a suelos salinos, sobre todo cuando abunda el carbonato sódico, es práctica corriente, ya que el azufre, después de su oxidación, no solo transforma el carbonato sódico en sulfato, sino que también tiende a reducir la alcalinidad del suelo.

16.5.3. REDUCCION DEL AZUFRE MINERAL.

La reducción de las formas parcial o completamente oxidadas del azufre mineral se efectúa en condiciones de anaerobiosis, sobre todo en suelos encharcados, y en menor grado en los arcillosos. Esta reducción, y muy especialmente la de sulfatos, es debida a la acción de un grupo muy concreto de bacterias especializadas, autótrofas facultativas, conocidas como bacterias sulfato-reductoras, aunque su capacidad de actuación se extiende también a los sulfitos, tiosulfatos, tetracionatos y azufre. El proceso de forma general es:



Debido a este proceso, cuando los sulfatos se añaden a suelos encharcados en los que el oxígeno está prácticamente excluido, sufren una reducción a sulfuro de hidrógeno, y si éste no es precipitado por el hierro u otros metales, escapa a la atmósfera. En algunos suelos pantanosos, grandes cantidades de compuestos sulfurados pueden acumularse, y el pH del suelo aumenta. Cuando en estos suelos se elimina el agua, estos compuestos sulfurados son oxidados a sulfatos, con lo que se provoca un notable descenso del pH.

16.6. PERDIDAS DE AZUFRE EN EL SUELO.

Cuando los suelos son puestos en cultivo, la mayor rapidez de descomposición de la materia orgánica, la erosión, el aumento del lavado y la extracción por cosechas, tienden a originar una disminución del contenido de azufre.

La eliminación que efectúan las cosechas no puede darse con exactitud, si bien se admite que por término medio puede oscilar entre 40 y 45 Kg/Ha año en aquellos cultivos que no dejen gran cantidad de residuos después de la recolección.

Las pérdidas por erosión y lavado son, en general, también importantes, ya que los sulfatos son tan móviles en el suelo como los nitratos. Sobre todo en climas húmedos y en suelos de textura gruesa, están sujetos a una lixiviación rápida. Se ha citado que las aguas de drenaje pueden arrastrar de 30 a 50 Kg/Ha año de azufre, sobre todo en invierno.

Las pérdidas totales, por tanto, pueden situarse entre 60 y 100 Kg de azufre, según los rendimientos, los cultivos y la intensidad de drenaje.

16.7. CICLO DEL AZUFRE EN LA NATURALEZA.

Como puede observarse en la figura 16.2., el ciclo del azufre en la Naturaleza presenta, en muchos aspectos, una notable similitud con el correspondiente al nitrógeno.

El azufre orgánico se acumula en el suelo a partir de residuos vegetales, y en menor proporción por restos de origen animal, constituyendo una fuente suministradora importante del elemento para las plantas. Este material queda sometido a la acción de numerosos microorganismos, que lo

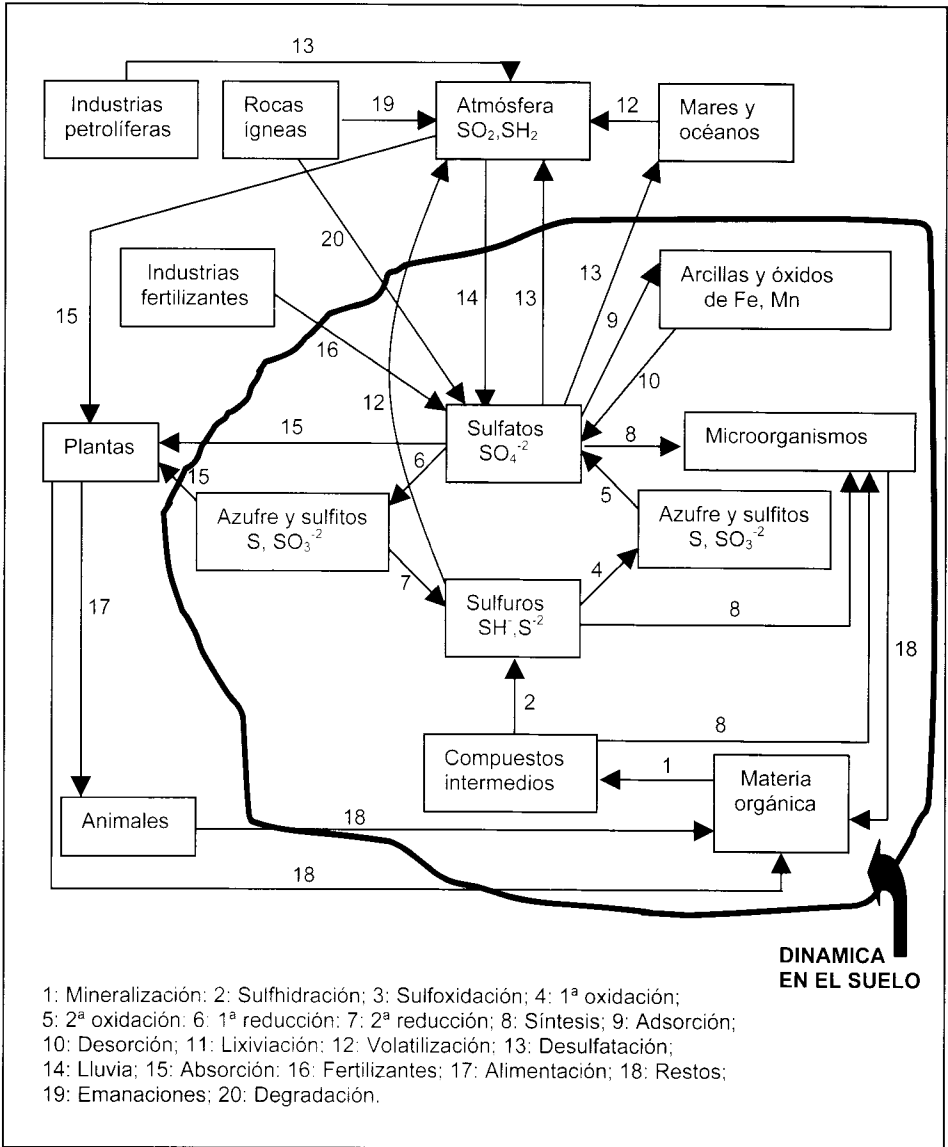


Figura 16.2. Ciclo del azufre en la Naturaleza.

mineralizan según diversas reacciones para llegar finalmente a la forma sulfato, estado asimilable por las plantas. El ciclo del azufre recuerda aquí al

ciclo del nitrógeno, no sólo en su término nitrato, sino también por sus estados de oxidación intermedios (señalados como primeras oxidaciones), semejante al proceso también intermedio de la nitritación, y en la actuación de microorganismos autótrofos y aeróbicos específicos.

Otro parecido reside en el desprendimiento de SH_2 consecutivo a la descomposición de las proteínas sulfuradas, desprendimiento paralelo al de NH_3 en la amonificación. E incluso dentro de este paralelismo, la reducción del azufre bajo la forma de sulfatos es bastante semejante a la desnitrificación. Sulfhidración, sulfooxidación y desulfatación son procesos, por tanto, en el caso del azufre, parecidos a los de amonificación, nitrificación y desnitrificación en el caso del nitrógeno.

En cierto modo hay que señalar también un paralelismo en la aportación de estos elementos al suelo a partir de la atmósfera por acción de las lluvias, si bien teniendo en cuenta su diverso origen.

Ahora bien, si en los aspectos citados la evolución del azufre en la Naturaleza, y particularmente en el suelo, es notablemente similar a la del nitrógeno, en lo que respecta a su balance hay una gran diferencia. En el caso del nitrógeno resulta siempre negativo, mientras que en el caso del azufre está más o menos nivelado, ya que con algunas excepciones, sus pérdidas están casi siempre compensadas por los aportes de residuos orgánicos, fertilizantes y lluvias. En definitiva, el problema del azufre en el suelo no puede considerarse, aún, preocupante.

17

EL CALCIO EN LA PLANTA Y EN EL SUELO.

La aceptación de que el calcio es un elemento esencial para el desarrollo vegetal se establece definitivamente a partir de las investigaciones realizadas por W. Salm-Horstmar, en 1856, y por J. Sachs y W Knop, en 1860, utilizando disoluciones nutritivas. Desde entonces se han realizado muchos trabajos para concretar sus funciones, muchas de las cuales se han establecido. Hoy se admiten como primordiales en la vida vegetal.

Pero aparte de su esencialidad, puede decirse que ningún otro elemento, aparte del hidrógeno y potasio, ha recibido tanta atención desde el punto de vista de la fertilidad del suelo. El estudio de éste ha mostrado categóricamente el papel fundamental del calcio, no sólo en la estructura del suelo en su conjunto, sino también en la mecánica química del complejo adsorbente, y su influencia sobre la asimilabilidad de otros elementos también esenciales para la planta.

17.1. EL CALCIO EN LA PLANTA. CONTENIDO Y FORMAS.

Absorbido fundamentalmente bajo la forma de Ca^{+2} es, después del potasio, el elemento básico más abundante que existe en las plantas. En proporciones mucho menores, también es absorbido mediante un intercambio directo entre los pelos radiculares y el complejo coloidal al que se encuentra adsorbido.

En las plantas jóvenes se encuentra preferentemente en el protoplasma y en las membranas celulares, mientras que en las adultas se halla en las vacuolas, principalmente bajo la forma de oxalato. En los granos, tubérculos y rizomas se encuentra como constituyente de la fitina, sal cálcico-magnésica del éster exafosfórico del inositol.

Este elemento se halla presente en mayor proporción en las hojas y tallos que en las semillas. Se ha comprobado que su contenido medio en cereales viene a ser de 0'09 % en el grano, frente al 0'59 % en la paja. Pero en

diferentes muestras de una misma especie vegetal su contenido es variable, ya que depende mucho de la cantidad de calcio asimilable presente en el suelo. Por ejemplo, se ha observado que en la col aumenta desde un 4'12 % al 7'40 % al incrementar las aplicaciones de cal.

Además del encalado, otros factores pueden influir sobre el contenido de calcio en las plantas. En la alfalfa aumenta cuando las condiciones de humedad son bajas, y disminuye al elevarse el contenido de humedad. Se sabe también que la concentración de otros cationes en la disolución del suelo influye sobre la cantidad de calcio absorbida por las plantas. Si la provisión de algún catión es excesiva, su contenido se reduce. Esta situación puede tener un efecto sobre la nutrición de los animales, incluido el hombre, cuando se consumen exclusivamente alimentos procedentes de suelos deficientes en calcio, a menos que contengan mucho calcio asimilable, como la leche en la dieta humana.

El calcio se encuentra en la planta tanto en forma mineral soluble: sulfato cálcico (SO_4Ca), como insoluble: fosfato ($(\text{PO}_4)_2\text{Ca}_3$) y carbonato (CO_3Ca) cálcicos. Asimismo, se le encuentra bajo forma orgánica especialmente en plantas como leguminosas, crucíferas y remolacha azucarera, como oxalatos y pectinatos cálcicos. El oxalato cálcico es el más abundante.

Aunque una parte considerable del calcio presente en las plantas está bajo forma soluble en el agua, este elemento no se desplaza fácilmente en el interior de las mismas, y de aquí que tienda a acumularse en los órganos viejos. Esto explica el por qué los síntomas deficitarios empiezan a manifestarse en los extremos de los tallos.

El calcio es un elemento fundamental en los agríos, formando parte de las hojas, frutos, tallos y raíces en proporciones importantes. Se estima que las hojas contienen un 14 % del calcio total de la planta, el tronco y las ramas sobre un 60 %, y un 26 % las raíces. Algunas investigaciones han demostrado que la cantidad de calcio extraída anualmente por los agríos por los conceptos de floración, brotación y fructificación es, por término medio, de unos 10 g por kilo de fruto producido.

17.2. FUNCIONES DEL CALCIO EN LA PLANTA.

Una de las principales funciones del calcio en la planta es la de actuar, formando parte de la estructura de la protopectina, como agente cementante para mantener las células unidas. La protopectina está localizada en la lámina

media y en la pared primaria celular. Cuando se degrada se originan productos más simples, principalmente pectatos cálcicos insolubles (Figura 17.1.).

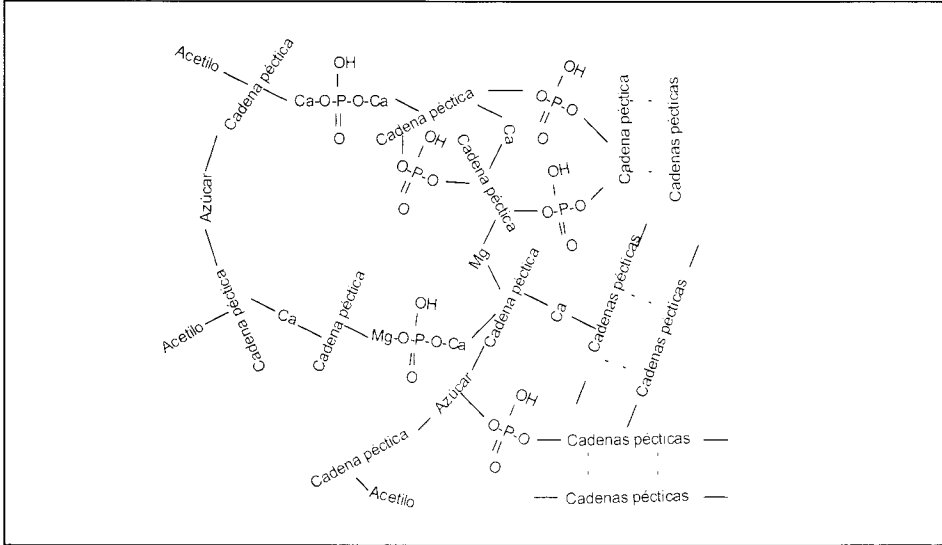


Figura 17.1. Estructura propuesta por Henglein (1958) para la protopectina.

Esta función parece tener particular importancia, puesto que si el calcio se reemplazase por otros elementos esenciales, tales como potasio o magnesio, entonces los compuestos orgánicos y las sales minerales no se retendrían por las membranas en la forma más conveniente.

El calcio es muy importante para el desarrollo de las raíces, en las cuales ejerce una triple función: multiplicación celular, crecimiento celular y neutralización de los hidrogeniones. Muchos investigadores consideran que la alteración del sistema radicular es un síntoma corriente de la deficiencia de este elemento.

Otras funciones atribuidas al calcio son: regula la absorción de nitrógeno; actúa sobre la traslocación de los hidratos de carbono y proteínas en el interior de la planta; neutraliza los ácidos orgánicos que se pueden originar en el metabolismo vegetal, tal cual ocurre con el ácido oxálico; y activa algunos enzimas como amilasa y fosfolipasa. También se ha visto que regula la absorción o contrarresta los efectos perjudiciales debidos al exceso o acumulación de otros elementos como el potasio, sodio o magnesio. Y está

demostrada la influencia favorable en la formación de nódulos en las leguminosas.

El calcio y el potasio se comportan de distinta forma en lo que concierne a la economía hídrica, puesto que el potasio aumenta la absorción del agua y el calcio tiende a disminuirla. Como consecuencia de esto, en los suelos pobres en cal las plantas acusarán más las consecuencias de los excesos de sequía o humedad.

17.3. ALTERACIONES EN LA PLANTA POR DEFICIENCIA Y EXCESO.

Aunque hay numerosas comunicaciones de rendimientos mayores de cosechas que resultan de las aplicaciones de calcio en forma de cal a los suelos ácidos, o en forma de yeso a los suelos sódicos, solamente unas pocas han demostrado la deficiencia de calcio en las plantas que se cultivan sobre suelos. La deficiencia de calcio es lógico que haya que buscarla preferentemente en los suelos ácidos y en los suelos salinos con elevada proporción de sodio. En los ácidos, las deficiencias pueden ser complejas, por producirse además la de magnesio, y por presentarse posiblemente una toxicidad de Mn o Fe por exceso de su solubilización en un medio con bajo pH. La deficiencia de calcio puede ser sólo importante en regiones con elevada pluviometría.

La deficiencia, en general, se manifiesta desde la germinación. Provoca clorosis y detiene el desarrollo radicular, originándose raíces cortas, gruesas y con una coloración parda. Las hojas se arrollan, a veces con necrosis en los bordes. Los síntomas aparecen casi siempre en las hojas jóvenes, y la planta en su conjunto disminuye su crecimiento.

No se considera fácil tampoco un exceso de calcio como tal, pero sí son bastante frecuentes otras consecuencias indirectas de un exceso de cal. Esto se suele dar en suelos calizos, con elevado pH, y en donde la falta de asimilabilidad de muchos elementos es bien conocida. El exceso de carbonato cálcico puede provocar deficiencia de potasio motivada por una insuficiente absorción de éste, debido al antagonismo Ca-K, inducir a la clorosis férrica e inmovilizar el cinc, cobre y fósforo, provocando la deficiencia de estos elementos.

El exceso de calcio puede presentarse también en las plantas por otras causas: empleo de aguas de riego ricas en calcio; excesiva aplicación al suelo de yeso; aplicaciones amplias de azufre a suelos calizos; empleo

abusivo del nitrato cálcico y de otros fertilizantes que contengan calcio; y por el encalado excesivo de suelos ácidos.

En los agrios se atribuye a exceso de calcio y deficiencia de potasio en el suelo el llamado "bufado" de los agrios. En realidad, este defecto está motivado por una relación Ca/K, y mejor aún Ca/K+Mg, baja.

17.4. ORIGEN, CONTENIDO, FORMAS Y DINAMICA DEL CALCIO EN EL SUELO.

El calcio presente en el suelo, aparte del añadido como fertilizantes diversos, o como enmiendas, procede de las rocas y de los minerales de los que el suelo está formado, y su contenido total puede variar ampliamente. En aquellos suelos considerados como no calizos varía entre el 0'1 y 0'2 %, mientras que en los calizos puede alcanzar hasta un 25 %.

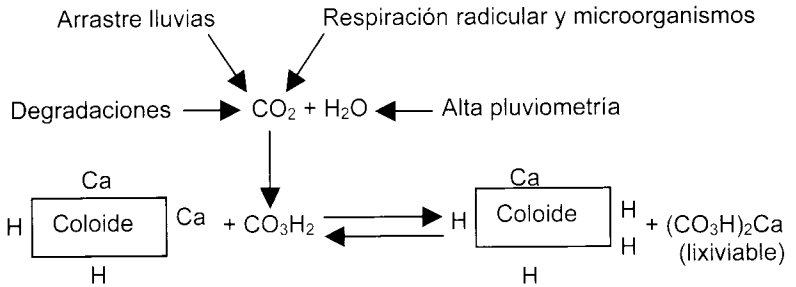
Los compuestos que pueden señalarse como más importantes son los carbonatos: calcita (CO_3Ca) y dolomita ($\text{CO}_3\text{Ca} \cdot \text{CO}_3\text{Mg}$). En segundo lugar los fosfatos: flúorapatito ($3(\text{PO}_4)_2\text{Ca}_3 \cdot \text{F}_2\text{Ca}$), hidroxapatito ($3(\text{PO}_4)_2\text{Ca}_3 \cdot \text{Ca}(\text{OH})_2$), oxiapatito ($3(\text{PO}_4)_2\text{Ca}_3 \cdot \text{CaO}$) y carbonatoapatito ($3(\text{PO}_4)_2\text{Ca}_3 \cdot \text{CO}_3\text{Ca}$). Y finalmente sulfato cálcico (SO_4Ca) y silicatos aluminicos diversos: feldespatos y anfíboles. Por efecto de la meteorización, estos minerales van liberando calcio, que al ser solubilizado puede tener diversos destinos: perdido por lixiviación, absorbido por los organismos del suelo, adsorbido por el complejo coloidal, o reprecipitado como compuestos cálcicos secundarios, sobre todo en suelos situados en zonas áridas. En estas regiones, su contenido es generalmente alto, como consecuencia de una pluviometría débil y poca lixiviación. En la mayoría de ellos, los Ca^{+2} se hallan presentes en cantidad máxima en el complejo de intercambio, y en sus distintos perfiles se aprecian depósitos importantes de carbonato o sulfato cálcico.

El calcio se encuentra también en el suelo formando parte de la materia orgánica o combinado con los ácidos húmicos y fosfórico en los humatos y fosfohumatos cálcicos.

En los suelos ácidos, normalmente situados en zonas sometidas a una alta pluviometría, el movimiento de este elemento es más amplio. Se encuentra fundamentalmente adsorbido a los coloides en forma intercambiable y como minerales secundarios no descompuestos. Su contenido, sobre todo en suelos de textura gruesa, es pequeño, ya que al estar sometidos a un continuo y amplio lavado, el agua disuelve las bases solubles que se pierden por lixiviación en gran proporción. Junto a ello hay que añadir el calcio que es

desplazado del complejo adsorbente por el hidrógeno y también el captado por las plantas; y aunque parte de estas pérdidas son compensadas por la meteorización de los minerales del suelo, el resultado en un plazo más o menos amplio es el empobrecimiento en el contenido del elemento. Incluso en aquellos suelos formados por rocas calizas, debido a las circunstancias expuestas, presentan normalmente en su capa superficial esta situación.

El proceso esquematizado puede representarse de la forma siguiente:

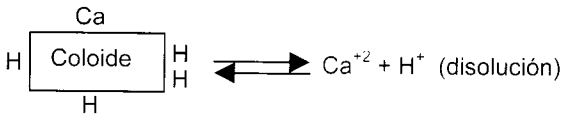


Por las razones expuestas, muchos suelos en regiones húmedas contienen este elemento en cantidades muy pequeñas, pudiendo aparecer en las plantas que en ellos vegetan alteraciones por deficiencia del mismo. Junto a ello hay que tener en cuenta que el aumento de la acidez del suelo que simultáneamente se va produciendo, puede incidir negativamente en el crecimiento de la planta, ya sea por aparecer un pH no conveniente, o por efectos tóxicos de otros elementos que ampliamente se solubilizan.

La aplicación periódica de las llamadas "cales agrícolas" (carbonatos, óxidos o hidróxidos de calcio y magnesio) a estos suelos es la vía más conveniente para corregir esta situación.

Este empobrecimiento en calcio, que como es lógico repercute en la captación del elemento por la planta, está notablemente influenciado por el tipo de coloide predominante en el suelo, y por el porcentaje de calcio intercambiable que contenga.

Del esquema anteriormente expuesto se deduce fácilmente que, en la mayor parte de los suelos, las pérdidas de Ca⁺² dependen grandemente de la mayor o menor facilidad de liberación del calcio adsorbido. Al igual que cualquier otro catión, en este caso las formas intercambiables y en disolución se hallan en equilibrio dinámico:



Por tanto, si disminuye el contenido de calcio en la disolución, como puede ocurrir por lixiviación o consumo por la planta, parte del calcio adsorbido tiende a pasar a la disolución para restablecer el equilibrio.

Para que este desplazamiento se produzca, las arcillas tipo de red 1x1 requieren un grado de saturación en calcio mucho menor que aquellas otras tipo de red 2x1. Las arcillas caoliníticas precisan tan solo una saturación del 40-50 % para que el elemento sea fácilmente liberado, mientras que las montmorilloníticas requieren una saturación del 70 % o más para el mismo fin. Por ello, los suelos que tengan por ejemplo, sólo 2000 Kg de calcio intercambiable por Ha, pero con una baja capacidad de cambio (caoliníticos), perderán más fácilmente el calcio adsorbido por efecto de un lavado continuo que otros suelos conteniendo una cantidad dos o tres veces superior, pero con alta capacidad de cambio (montmorilloníticos).

Estos hechos se explican fácilmente al comparar los esquemas simplificados de las estructuras laminares típicas de los cristales de caolinita y montmorillonita (Véase tema 3."Componentes inorgánicos del suelo. Arcillas.").

En la caolinita, cada unidad cristalina está compuesta de una lámina de sílice y otra de alúmina (tipo de red 1x1), unidas muy tenazmente. Las unidades cristalinas a su vez están ligadas fuertemente por una red oxígeno-hidroxilada, lo cual origina una red compacta y no desarrollada. Como resultado, tanto los cationes como las moléculas de agua penetran en los cristales con gran dificultad. La capacidad adsorbente de la caolinita está, por esto, ligada casi exclusivamente a las superficies externas de sus cristales.

En la montmorillonita, cada unidad cristalina está compuesta de dos láminas de sílice y una de alúmina (tipo de red 2x1), ambas también tenazmente unidas. Las respectivas unidades cristalinas están unidas, a su vez, por uniones débiles de oxígeno que permiten una expansión relativamente fácil y amplia de la red, en completo contraste con la caolinita.

Esta expansión en forma de fuelle asegura una adsorción interna de agua y cationes alta (entre éstos el calcio), mucho mayor que la adsorbida a las superficies externas. Por esta razón, aparte de la superficie exterior de la partícula están las superficies internas de una magnitud total muy grande. Por

lo tanto, este tipo de coloide 2x1 tiene una alta capacidad de adsorción de cationes.

17.5. PERDIDAS DE CALCIO EN EL SUELO.

El calcio en los suelos se pierde de tres maneras: lixiviación, absorción por la planta y erosión.

Tal como se ha indicado anteriormente, las rocas y minerales contienen cantidades considerables de calcio meteorizado que puede perderse rápidamente en climas húmedos. La gran variación de la composición de suelos y de los diferentes horizontes de los perfiles, y de las prácticas de cultivo y condiciones climáticas, hace sin embargo muy difícil cualquier generalización respecto de la cantidad de calcio perdido en las aguas de drenaje. Aunque es evidente que la pérdida es grande, como valor medio aproximado, estas pérdidas en suelos ácidos pueden situarse entre 150 y 200 Kg/Ha año, expresado en términos de CaO.

También durante un periodo de años, la cantidad de calcio exportado por cosechas es considerable. Como valores medios, las extracciones por Ha y año de calcio, expresadas en CaO, en rotación normal de cultivos, puede establecerse entre 50 y 80 Kg.

En lo que respecta a las pérdidas por erosión no puede hacerse una generalización. En algunos casos pueden exceder fácilmente a la extracción por el cultivo.

17.6. LA ADICION DE CAL A LOS SUELOS ACIDOS. REACCIONES Y REPERCUSIONES EN LA PLANTA.

La adición de cal al suelo con el fin de reducir su acidez es una práctica comúnmente empleada desde hace muchos años. Se debe considerar, por tanto, como una enmienda, aunque ello lleve consigo un aporte simultáneo de calcio y también en la mayoría de los casos de magnesio.

Concretamente, la palabra cal debería señalar al óxido cálcico, pero el término agrícola incluye otros materiales como hidróxido cálcico, carbonato cálcico, carbonato cálcicomagnésico y escorias básicas con base de silicatos cálcicos, que son también utilizados para tal fin. De todos, el carbonato cálcico es el más usado, aunque la elección de uno de ellos en particular viene

determinada por el coste con relación a su pureza, facilidad de manejo y rapidez de reacción en el suelo.

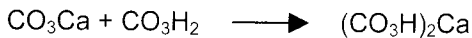
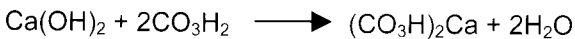
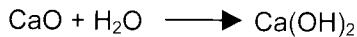
En el comercio, y según su constitución química, se encuentran frecuentemente diversas clases de sales. A este respecto, el conocimiento de su garantía es de la mayor importancia, y para ello las casas comerciales utilizan diversas expresiones.

En las formas cáusticas (óxido e hidróxido) se reseña el contenido convencional de óxidos, equivalente en óxido cálcico, poder neutralizante y porcentajes de calcio y magnesio.

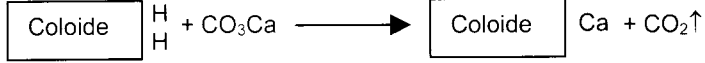
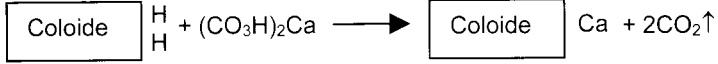
El contenido convencional de óxido expresa la suma de los porcentajes de óxido cálcico y magnésico existentes en el producto. El equivalente en óxido cálcico corresponde a la cifra que se obtiene al sumar el porcentaje de óxido magnésico, expresado en óxido cálcico, y el porcentaje de óxido de calcio presente. El poder neutralizante es su equivalente en carbonato cálcico.

Para las calizas (carbonatos), la garantía viene señalada por el porcentaje de carbonato cálcico y magnésico por separado y porcentaje total de carbonatos. Algunas veces se señalan también las expresiones expuestas anteriormente para las formas cáusticas.

Dos importantes procesos se verifican cuando se aplican a los suelos ácidos estas enmiendas cálcicas. Por una parte, tanto si se trata de óxido, hidróxido o carbonato, cierta proporción tiende a solubilizarse y cambiar a la forma bicarbonatada, debido al ácido carbónico del suelo:



Simultáneamente a este proceso disolutivo, los coloides del suelo comienzan a fijar los Ca^{+2} . Estos pueden ser adsorbidos directamente de la disolución del suelo o de los compuestos cálcicos aún no solubilizados:



En un suelo encalado, si la cal aportada posee una finura conveniente, existirán, al menos durante un tiempo, varias formas de calcio: como catión disociado en la disolución junto con iones bicarbonato; como base intercambiable adsorbida al coloide; y como calcio en forma de carbonato sólido. De esta forma, la reserva cálcica, tanto de carbonatos como de iones adsorbidos, proporciona gradualmente Ca^{+2} a la disolución del suelo por cambio catiónico.

Con el tiempo, las partículas de los carbonatos cálcicos añadidos desaparecen. En ese momento, el complejo coloidal empieza a perder parte del calcio adsorbido, al intercambiarse con los H^+ proporcionados por el ácido carbónico; los compuestos solubles de calcio son eliminados por lixiviación y el porcentaje de saturación de bases y el pH se reducen gradualmente. Al alcanzar éstos bajos valores será necesario entonces otra aplicación de cal.

Hay que significar que la adición de cal a los suelos no es sólo importante porque permite establecer un pH más apropiado para la mayoría de los cultivos, sino también por los efectos beneficiosos que indirectamente éstos reciben en lo que respecta a la absorción y asimilación de diversos elementos esenciales. En este sentido, los efectos sobre la disponibilidad del nitrógeno, fósforo, potasio y de ciertos oligoelementos son dignos de ser señalados.

En suelos con bajos valores de pH y ricos en aluminio y hierro, los fosfatos solubles a causa de su reacción con estos compuestos, son fijados como compuestos muy complejos e insolubles, y por tanto inservibles para el crecimiento de las plantas. Usando el ión Al^{+3} como ejemplo, el proceso se puede representar de la siguiente forma:



En la mayor parte de los suelos fuertemente ácidos, la concentración de los Fe^{+3} y Al^{+3} es muy superior a la de los iones PO_4H_2^- . En consecuencia, la reacción se desplaza hacia la formación de fosfato insoluble, quedando sólo en libertad cantidades mínimas de iones PO_4H_2^- aprovechables por las plantas que vegetan en tales condiciones (Véase tema 13. "El fósforo en el suelo").

La adición de cal hace asimismo más eficiente al potasio en la nutrición de la planta. Cuando el potasio se halla en exceso, las plantas absorben más del necesario. En estos casos, la cal reduce la toma excesiva, lo que es importante en la práctica desde el punto de vista nutricional y económico.

La disponibilidad para las plantas de los oligoelementos es usualmente más satisfactoria cuando se adiciona adecuadamente cal a los suelos ácidos. Con la excepción del molibdeno, la disponibilidad de los micronutrientes aumenta con una disminución del pH. Esto puede ser perjudicial debido a la toxicidad de la mayor parte de los oligoelementos cuando se hallan disponibles en alta proporción. Este es el caso, por ejemplo, del aluminio, hierro y manganeso, cuya solubilidad aumenta cuando aumenta la acidez. Además de los efectos tóxicos, su presencia puede interferir con la absorción de calcio, magnesio y otros cationes básicos. La adición de cal en cantidades adecuadas origina su inactivación, y el suelo a un pH de 6-6'5 es más satisfactorio desde el punto de vista de toxicidad mínima y disponibilidad conveniente de estos elementos.

La solubilidad del molibdeno aumenta en general con un aumento del pH. Aquellos suelos que por adición de cal alcanzan valores de pH próximos a 7, serán mejores suministradores del elemento a la planta.

La cal estimula el metabolismo general de los organismos heterótrofos del suelo, y con ello una mayor rapidez de mineralización de la materia orgánica. La mayoría de las bacterias del suelo responsables de la conversión del NH_4^+ a NO_3^- requieren grandes cantidades de calcio activo, y como consecuencia, el proceso de nitrificación queda favorecido. También el proceso de fijación del nitrógeno, tanto simbiótico como no simbiótico, se favorece con una correcta adición de cal. En ambos casos, los microorganismos fijadores requieren cantidades altas de calcio para el desarrollo de su actividad.

Es evidente, sin embargo, que la aplicación de cal no debe hacerse de forma anárquica o caprichosa. Para obtener resultados correctos es necesario una información previa de las condiciones en las que se encuentra el suelo,

del tipo y composición de la cal a utilizar y, finalmente, de los cultivos que en él se desarrollan o van a desarrollarse.

Si la aportación es pequeña, las modificaciones del suelo con respecto a su estado inicial serán mínimas y, por tanto, poco beneficiosas. Una aplicación excesiva, por el contrario, puede conducir no solo a un gasto innecesario, sino también a una situación de "sobrecalentado", la cual puede repercutir alta y negativamente en muchos cultivos, muy particularmente si éstos vegetan en suelos de textura gruesa. En estos casos se pueden presentar serias deficiencias de hierro, manganeso, cinc, cobre y fósforo, y graves daños al cultivo por el cambio brusco de pH del suelo.

Las características del suelo, fundamentalmente en lo que se refiere al pH, textura y contenido en materia orgánica, son quizás las más importantes a considerar a la hora de tomar una decisión, ya que están íntimamente relacionadas con el porcentaje de saturación de bases, capacidad de adsorción y poder de amortiguación (Véase tema 7. "La reacción del suelo").

En general, la cantidad de cal a aplicar (como caliza) a suelos medios de alta acidez, puede situarse como valor aceptable entre 3 y 4 Tm/Ha para los de textura gruesa, y entre 6 y 8 Tm/Ha para los de textura fina. Para aquellos otros de acidez moderada, estas cifras quedan reducidas entre 2-2'5 y 3-4 Tm/Ha respectivamente. Si se utiliza óxido o hidróxido cálcico en lugar de carbonato, deberán hacerse las debidas correcciones.

17.7. CICLO DEL CALCIO EN LA NATURALEZA.

La dinámica de las distintas formas del calcio en el suelo y su conexión con los procesos que se verifican en la Naturaleza se muestran de forma esquemática en la figura 17.2.

Del examen del ciclo, y como resumen de lo anteriormente expuesto, varios aspectos relacionados con la conducta de este nutriente deben ser resaltados:

1º) Los suelos localizados en regiones de alta pluviometría, al estar sometidos a un continuo y amplio lavado, sufren una ininterrumpida descalcificación por erosión y lixiviación.

2º) Estas pérdidas combinadas muy frecuentemente alcanzan valores superiores a los que se producen por extracción de los cultivos.

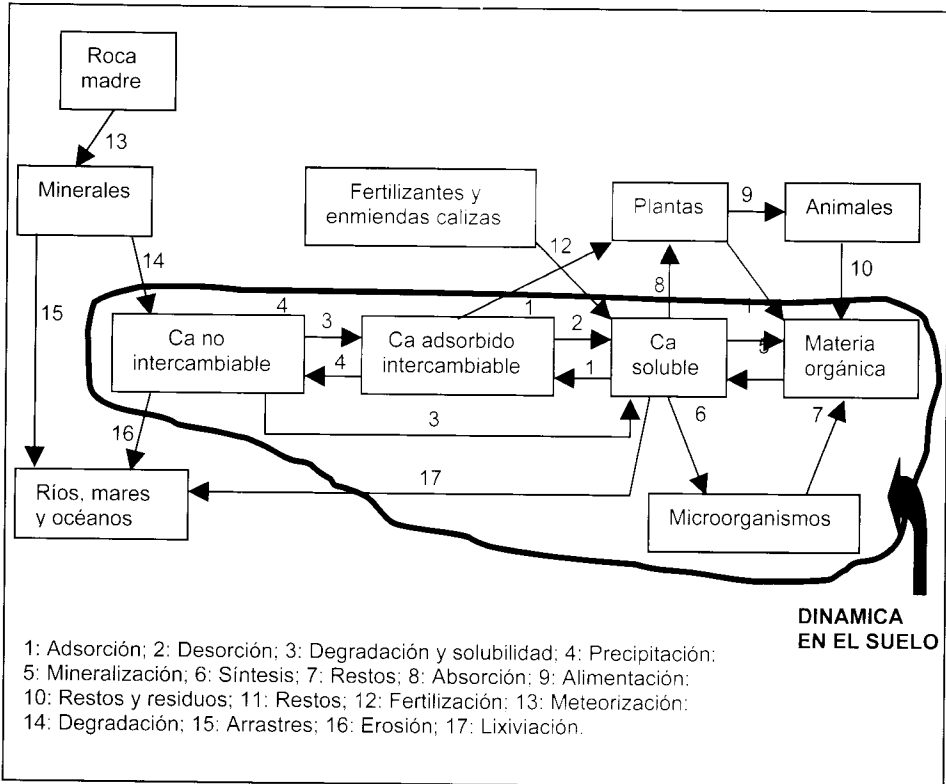


Figura 17.2. Ciclo del calcio en la naturaleza.

3º) Los efectos indirectos que tales pérdidas originan son altamente influyentes en las propiedades de los suelos en estas circunstancias. Si el contenido de calcio disminuye, la descomposición de la materia orgánica se realiza mal o incompletamente; los suelos se acidifican y el porcentaje de saturación de bases del complejo adsorbente se reduce; y la actividad biológica y el aprovechamiento de nutrientes se va anulando de forma progresiva.

4º) La normalización del estado de estos suelos, en parte conseguido por la aportación de fertilizantes que incluyen el calcio en su composición, requiere necesariamente restituir periódicamente las pérdidas mediante un encalado realizado con precaución para evitar efectos contraproducentes.

5º) Los suelos de regiones áridas y semiáridas no muestran las dificultades expuestas para su utilización agrícola, ya que al ser la pluviometría de ellos baja, las aguas de lavado no eliminan el calcio que va apareciendo durante la meteorización. En general, esta situación es favorable para los cultivos, y solo cuando el pH es excesivamente alto, o cuando el sodio es el elemento predominante, puede influir negativamente en el normal desarrollo de las plantas.

18

EL MAGNESIO EN LA PLANTA Y EN EL SUELO.

El magnesio fue uno de los diez elementos esenciales para las plantas que primeramente citaron los científicos. J. Von Liebig, en 1843, en su "Teoría mineral sobre la nutrición de la planta", lo incluyó ya como fundamental, y años más tarde, los trabajos de W. Salm-Horstmar, en 1851, y J. Raulin, en 1869, confirmaron su esencialidad.

Durante mucho tiempo, sin embargo, no se le ha dado al magnesio la importancia que merece, posiblemente por creer que las reservas del suelo en este elemento eran más que suficientes para cubrir las necesidades nutritivas de las plantas. Pero el uso de fertilizantes químicos cada vez más puros, y la menor utilización de abonos orgánicos, ha dado lugar a que el balance entre el magnesio natural y aportado y el extraído por cosechas, o perdido por diversas causas, se haga cada día más desfavorable.

La gran importancia que actualmente se concede a la productividad, y el mayor conocimiento que se tiene sobre los estados deficitarios, ha hecho que de nuevo se preste a este elemento una gran atención, sobre todo teniendo en cuenta las importantes funciones que desempeña en la vida vegetal.

18.1. CONTENIDO Y FORMAS EN LA PLANTA.

El magnesio es absorbido por la planta como Mg^{+2} , y en ella se halla normalmente un contenido total medio del orden del 0'5 % en peso seco.

En la planta, el magnesio es un constituyente metálico de excepción en la molécula de clorofila, pigmento este esencial para que las plantas verdes puedan llevar a cabo el proceso de la fotosíntesis. Cuantitativamente, sin embargo, el magnesio clorofílico sólo representa, aproximadamente, alrededor del 10-12 % del total contenido en la planta (Figura 18.1.).

También se encuentra asociado a diversos aniones orgánicos como son: malato, nitrato, pectato y oxalato, en semillas, ramas, hojas y troncos. Las

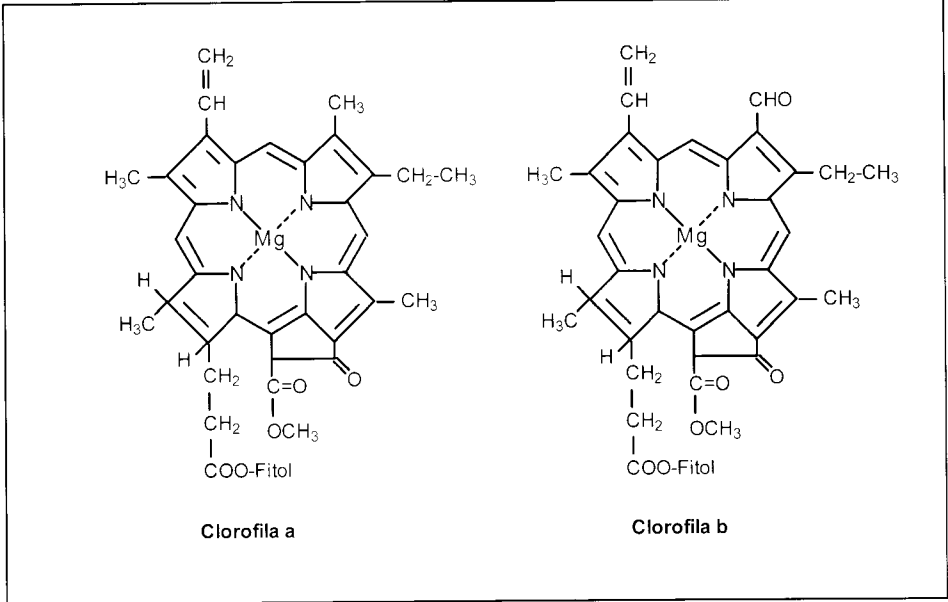


Figura 18.1. Fórmulas estructurales de las clorofilas a y b.

semillas son generalmente ricas en magnesio. La fitina, sal cálcico-magnésica del fosfato de inositol, ya citada al hablar del fósforo, constituye en estos órganos de la planta una sustancia de reserva importante. El magnesio, por tanto, no sólo está presente en las partes verdes de la planta, sino que además se encuentra en proporciones notables en plantas sin clorofila, como hongos, por ejemplo.

Hay que señalar que, a diferencia del calcio, el magnesio es muy móvil en el floema (un 70 % se considera como difusible), y puede trasladarse fácilmente de las hojas viejas a las jóvenes en caso de deficiencia. Por ello, cuando ésta se presenta, los primeros síntomas aparecen en primer lugar en las hojas adultas.

18.2. FUNCIONES DEL MAGNESIO EN LA PLANTA.

El magnesio desempeña funciones importantísimas y esenciales en la planta. Sin este elemento no sería posible la vida sobre la Tierra, ya que entra

en la composición de los pigmentos verdes, utilización de la energía solar y la síntesis de los constituyentes orgánicos indispensables para la vida vegetal y animal. También porque actúa como coenzima específico de numerosos enzimas básicamente necesarios para la vida en todas sus formas.

En este último aspecto, y prescindiendo de entrar en detalles acerca del proceso de la fotosíntesis, ya suficientemente resumido en un tema anterior (Véase tema 14. "El fósforo en la planta."), son numerosas las reacciones metabólicas que en el vegetal se realizan necesariamente con el concurso del magnesio. A continuación se exponen algunas dignas de ser mencionadas. En ellas se omiten las fórmulas de los compuestos que intervienen por considerarlas innecesarias, ya que sólo se trata de poner en evidencia el papel bioquímico del elemento .

18.2.1. TRANSFORMACIONES DE LAS HEXOSAS FOSFORILADAS.

La fosforilación de la glucosa constituye una de las reacciones más importantes del metabolismo glucídico. Mediante esta reacción se originan diversos ésteres fosfatados que pueden considerarse como punto de partida de muchas vías metabólicas de la célula viva. La actuación del magnesio como activador de los distintos enzimas que actúan en estas conversiones está plenamente probado (Figura 18.2.).

18.2.2. TRANSFORMACIONES EN LA GLUCOLISIS.

En la glucolisis, conjunto de reacciones englobadas en el proceso general de la respiración vegetal, el magnesio interviene asimismo en diversas fases de ella, activando los enzimas participantes. Las reacciones parten de un azúcar-hexosa y finalizan con la formación de ácido pirúvico (Figura 18.3.).

18.2.3. CICLO DE LOS ACIDOS TRICARBOXILICOS.

La formación del acetilcoenzima A, compuesto puente entre la glucolisis y el ciclo de Krebs, y la síntesis en éste de los diversos ácidos orgánicos, están altamente influenciados por el magnesio, que actúa como activador de diversos enzimas que en estos procesos intervienen (Figura 18.4.).

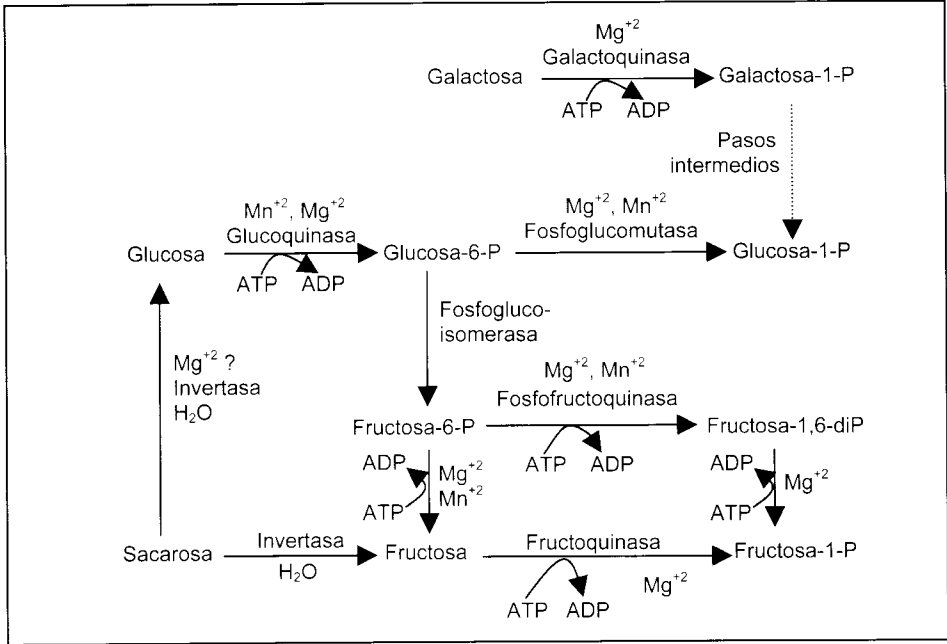


Figura 18.2. Participación del magnesio en la fosforilación de la glucosa.

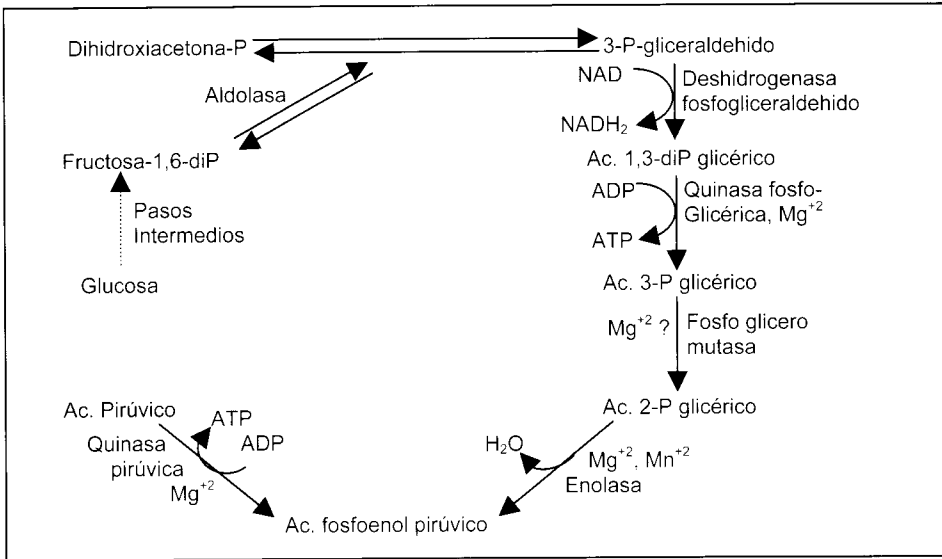


Figura 18.3. Participación del magnesio en la glucólisis.

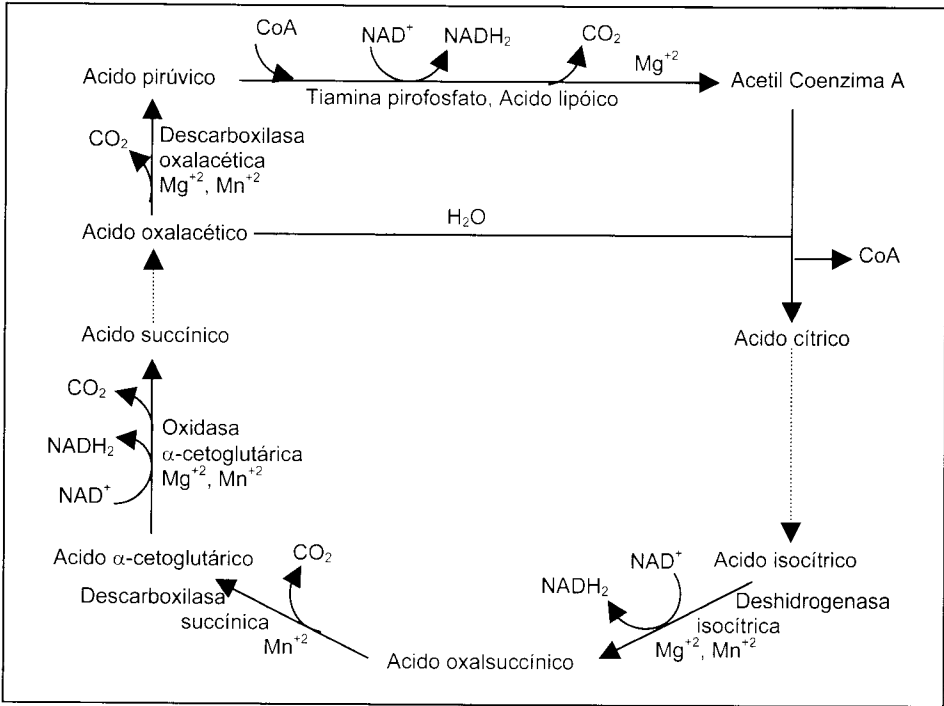
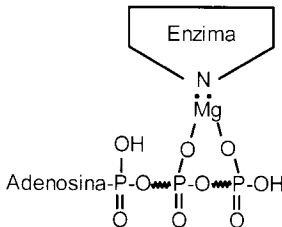


Figura 18.4. Actuación del magnesio en el ciclo de Krebs.

18.2.4. SINTESIS DE LOS ACIDOS NUCLEICOS.

En la síntesis del ADN y del ARN, el magnesio actúa igualmente como activador de los enzimas que intervienen, a partir de los nucleótidos polifosfatados. En estas reacciones, y en todas aquellas otras citadas anteriormente, en las que participa el ATP o ADP, se considera que el magnesio actúa como puente de unión entre el grupo pirofosfato de estos compuestos y la molécula del enzima, formando un complejo quelado con la siguiente estructura:



Esta estructura puede proporcionar una explicación satisfactoria sobre el concepto que se maneja actualmente de que el magnesio es un transportador de fósforo.

Se sugiere también la posibilidad de que el magnesio actúe como un importante agente quelante para mantener unidos los microsomas, lugar donde se realiza la síntesis proteica.

18.3. ALTERACIONES EN LA PLANTA POR DEFICIENCIA Y EXCESO.

La deficiencia de magnesio ha sido puesta de manifiesto en muchos cultivos, si bien hay que señalar que casi siempre el estado alcanzado no llega a ser crítico. Generalmente son deficiencias débiles, más bien provocadas involuntariamente por el agricultor, que por falta de elemento en el suelo. Un excesivo aporte de fertilizantes potásicos, falta de un suministro adecuado de nitrógeno y acumulación de fósforo como resultado de un empleo amplio de superfosfatos o fosfatos varios, se consideran causas que pueden contribuir en gran medida a la deficiencia de magnesio, debida a las interacciones nitrógeno-potasio.

Entre las plantas cultivadas hay algunas que son particularmente sensibles a la falta más o menos grande de magnesio. En este aspecto, los árboles frutales son los más afectados, y muy concretamente el manzano. Con menor intensidad también suele aparecer en viña, maíz, remolacha azucarera, diversas leguminosas y en plantas de tomate y patata.

Los síntomas más típicos aparecen en primer lugar en las hojas, corrientemente en verano, y presentan tres características generales que permiten una identificación relativamente fácil:

1°) Clorosis en algunas zonas del limbo, dispuestas con bastante simetría respecto al nervio principal, o a lo largo de los bordes. Los tejidos cloróticos se necrosan con rapidez, y ello puede suponer la primera manifestación visible.

2°) Los síntomas se observan en primer lugar en las hojas más viejas, transmitiéndose después a las más jóvenes. En ambos casos pueden aparecer en ellas coloraciones púrpuras y brillantes. El hecho se debe a la gran movilidad que el magnesio tiene en la planta, lo que le permite trasladarse desde los órganos adultos a los más jóvenes cuando éstos lo requieren.

3°) Las hojas alteradas suelen desprenderse prematuramente, quedando solo con hojas las partes terminales de las ramas. Por esta razón, los alemanes llaman a esta deficiencia "enfermedad del pincel".

Todos los síntomas señalados son bastante característicos. No obstante, pueden prestarse a confusión cuando empiezan, sobre todo con las deficiencias de manganeso, hierro, cobre y cinc. Sólo la evolución posterior de las alteraciones producidas puede permitir entonces su caracterización definitiva.

En los frutales, que como ya se ha indicado son los más sensibles, estas alteraciones sólo aparecen de forma notoria cuando la deficiencia es intensa. Hay entonces un descenso en el rendimiento del fruto, muy especialmente en su peso. La calidad, y en particular su aptitud para la conserva, es peor.

Otro hecho interesante a destacar es que los árboles que padecen falta de magnesio son extremadamente sensibles a las bajas temperaturas y heladas, y que su recuperación es más larga.

En los agrios se presenta comúnmente una sintomatología específica. La clorosis de las hojas se manifiesta por un amarilleamiento entre los nervios a lo largo del principal, el cual va progresando de tal forma que al final sólo la punta y la base quedan verdes. Aparece así una zona no clorótica en forma de V invertida o de un triángulo con base en el peciolo. No obstante, en los casos graves la hoja amarillea de forma uniforme.

Debido a que los síntomas de la deficiencia no se hacen verdaderamente visibles hasta que ya es crítica, es conveniente estar atentos a su iniciación mediante análisis del suelo y preferentemente de las hojas, con el fin de corregirla con la mayor rapidez y oportunidad. De no ser así, puede darse el caso de pérdidas durante años, que pueden atribuirse a otras causas.

Los tratamientos a realizar para corregir la deficiencia de magnesio varían en función de la especie vegetal. Si se trata de árboles frutales, puede ser de interés practicar la inoculación de sulfato magnésico en tronco. Para otros vegetales el tratamiento varía, y depende fundamentalmente del pH del suelo. En los suelos ácidos se puede utilizar una mezcla de carbonato y sulfato, y en los poco ácidos o alcalinos acetato magnésico. Las cantidades a utilizar deben supeditarse a los datos obtenidos en un análisis foliar previo y al régimen pluviométrico que exista.

Alteraciones por exceso de magnesio son poco conocidas. Sólo cuando el magnesio se aplica abundantemente en suelos pobres en calcio

podría producirse. Ensayos con disoluciones nutritivas muestran como síntomas concretos necrosis, deformaciones en las hojas jóvenes y síntomas claros de daños a las raíces.

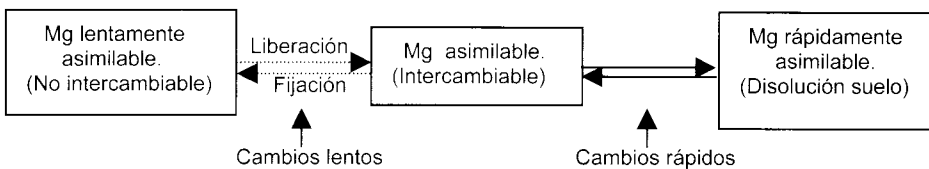
18.4. ORIGEN, CONTENIDO, FORMAS Y DINAMICA DEL MAGNESIO EN EL SUELO.

El magnesio es un elemento muy abundante en la corteza terrestre. Según diversas estimaciones, su contenido medio puede situarse en un 2'3 %.

En los suelos se encuentra como constituyente de numerosos minerales, mayoritariamente silicatos. Entre ellos, y como más frecuentes, merecen señalarse: biotina ($\text{Si}_3\text{O}_{10}\text{AlK}(\text{MgFe})_3(\text{OH})_2$), serpentina ($\text{Si}_2\text{O}_9\text{Mg}_3\text{H}_4$) y olivino (SiO_4FeMg). También se encuentra formando parte de otros silicatos como clorita, vermiculita, illita y montmorillonita. Algunos suelos contienen magnesio como magnesita (CO_3Mg) y dolomita ($\text{CO}_3\text{Ca}.\text{CO}_3\text{Mg}$). En los suelos de regiones áridas o semiáridas pueden encontrarse notables cantidades bajo la forma sulfato (SO_4Mg).

En la descomposición de estos minerales, y también en la degradación de la materia orgánica que se incorpora al suelo como residuos diversos de animales y vegetales, el magnesio pasa en parte al estado de sales solubles: cloruros, sulfatos, etc.; y en este estado, al igual que ocurre con el calcio, puede tener distintos destinos: perderse por lixiviación, absorbido por los organismos del suelo, adsorbido o fijado por los coloides, o reprecipitado como compuestos magnésicos secundarios, principalmente en regiones áridas.

Teniendo en cuenta, por tanto, el origen en el suelo del magnesio, se deduce fácilmente que la mayor parte del mismo se encuentra bajo formas inutilizables por las plantas. En consecuencia, y bajo el punto de vista de su aprovechamiento por la planta, el magnesio presenta una notable similitud con el potasio, ya que se encuentra distribuido en el suelo como magnesio lentamente asimilable, asimilable y rápidamente asimilable. Estas tres formas se hallan en equilibrio dinámico:



La fracción no intercambiable incluye todo el magnesio contenido en los minerales primarios y gran parte de los secundarios. Generalmente, esta fracción se considera de poca utilidad para la planta, y puede incrementarse particularmente en suelos ácidos que contengan una alta proporción de arcillas tipo de red 2x1. En estos casos puede haber un atrapamiento de Mg^{+2} entre las unidades cristalinas del mineral durante los procesos de expansión y contracción que puede tener.

En el conjunto del magnesio asimilable, el intercambiable suele ser aproximadamente el 5 % del total, y es, junto con el presente en la disolución del suelo, de gran importancia como nutriente útil para la planta. En esta última fracción, el magnesio se encuentra en concentración muy débil, dentro de unos límites comprendidos entre 0'7 y 100 mM. La utilización por la planta de este magnesio asimilable (intercambiable e hidrosoluble) depende, como en el caso del calcio, de la composición coloidal del suelo y grado de saturación del complejo de cambio.

En los suelos de textura gruesa situados en regiones de alta pluviometría es donde el magnesio puede perderse en proporción elevada, ya que en ellos hay un continuo lavado de bases solubles y un continuo desplazamiento del magnesio del complejo adsorbente por el hidrógeno. Este empobrecimiento en magnesio puede agravarse al adicionar fertilizantes que no lo contengan, ya que facilita su desplazamiento del coloide por intercambio de otros iones.

En este último aspecto, la aplicación de altas proporciones de fertilizantes potásicos puede provocar una relación potasio cambiable/magnesio cambiable muy alta, debido al desplazamiento del poco magnesio adsorbido en el complejo coloidal por el potasio. Las plantas que vegeten en estos suelos tendrán una fuerte tendencia fisiológica a absorber más potasio que magnesio (antagonismo K/Mg), y en ellos suelen aparecer síntomas claros de deficiencia de magnesio. El proceso para el calcio es similar, aunque menos acentuado. Un ejemplo de estos antagonismos K/Mg y K/Ca puede observarse en la figura 8.5. (Véase tema 8."Los elementos químicos y la vida vegetal"). Las cantidades de magnesio y calcio disminuyen en la planta al aumentar en el medio la concentración de potasio, y ello requiere la aplicación de fertilizantes magnésicos, o bien disminuir la adición de los potásicos.

Otra razón que también se sugiere es que el potasio aumenta los rendimientos, y por tanto se incrementan paralelamente las necesidades de magnesio. El sodio y el calcio, al igual que el potasio, dificultan también en gran proporción la absorción del magnesio, existiendo unos antagonismos similares Na/Mg y Na/Ca.

Normalmente, los citados antagonismos no suelen presentarse cuando los cationes fijados al coloide guardan una debida proporción (70-75 me Ca^{+2} , 8-15 me Mg^{+2} y 2'2-5 me K^{+}). Cuando las relaciones K/Mg y K/Ca, expresadas en miliequivalentes, son superiores a la unidad, y la Ca/Mg es superior a diez, es frecuente que aparezcan.

En los suelos de textura fina, y en los ubicados en regiones áridas, los procesos anteriormente expuestos no llegan a provocar deficiencias de magnesio. Aquí se encuentra normalmente precipitado en el perfil del suelo, incluso a veces en gran proporción.

18.5. PERDIDAS DE MAGNESIO EN LOS SUELOS.

En general, las pérdidas de magnesio en el suelo son las mismas que las del calcio. En orden de mayor a menor importancia: lixiviación, erosión y extracción por cultivos.

Las pérdidas por lixiviación son importantes. Admitiendo que el agua de lluvia puede disolver 40 mg/l de óxido magnésico, para una pluviometría de 500-1000 mm/año las pérdidas de magnesio pueden alcanzar 50-100 Kg/Ha año, como óxido magnésico. Para el calcio en las mismas condiciones pluviométricas, las pérdidas son dos o tres veces superiores.

La menor lixiviación de magnesio comparada con la del calcio debe asociarse, indudablemente, con la menor cantidad de magnesio en el suelo. Sin embargo, en lo que respecta a la extracción por cultivos el caso es inverso, ya que debido a la acumulación de magnesio en las semillas de las cosechas se extrae de éstas mayores cantidades que de calcio. La exportación media se acepta alrededor de 20-30 Kg/Ha año, expresada como óxido magnésico.

Las pérdidas por erosión pueden, en algunos casos, exceder a las extracciones por cultivos, pero es difícil dar datos concretos. En determinadas regiones pueden sobrepasar los 100 Kg/Ha año de óxido magnésico.

18.6. CICLO DEL MAGNESIO EN LA NATURALEZA.

En la figura 18.5. se expone un esquema representativo del ciclo del magnesio en la Naturaleza.

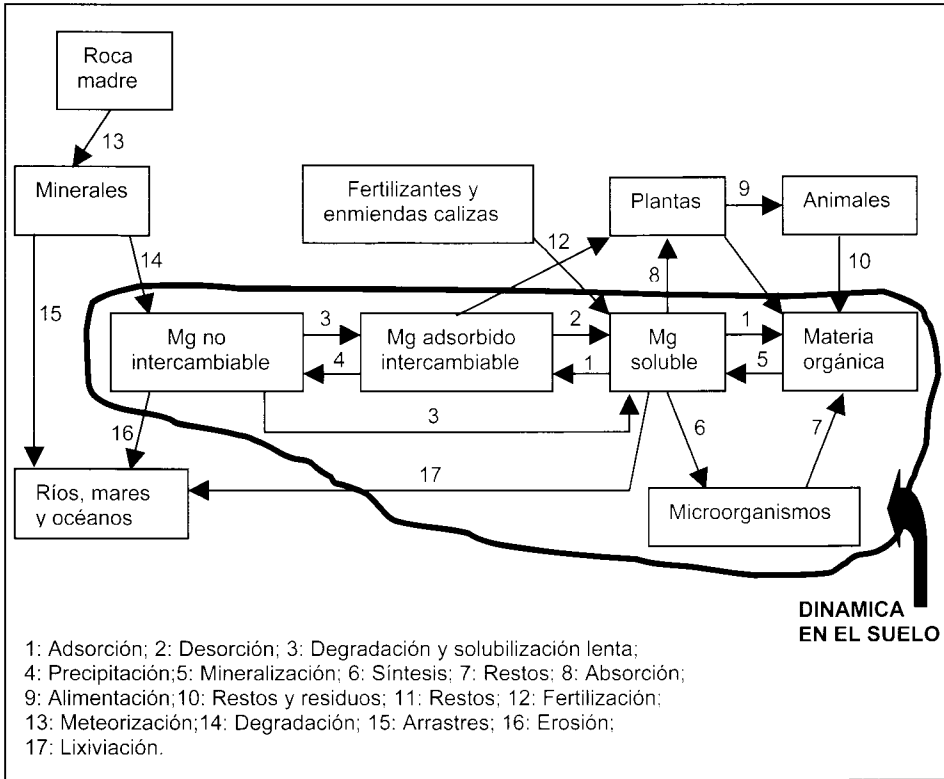


Figura 18.5. Ciclo del magnesio en la Naturaleza.

Como puede observarse, el ciclo del magnesio presenta una gran similitud con el del calcio, especialmente en lo que se refiere a su dinámica en el suelo.

Las pocas diferencias que pueden precisarse cuando se efectúa un examen comparativo se deben situar en el plano de las pérdidas, por lixiviación y por extracción del cultivo. En este sentido es necesario señalar:

1º) Las pérdidas por lixiviación, en las mismas condiciones pluviométricas, son casi siempre mayores para el calcio. El hecho debe atribuirse al menor contenido de magnesio que normalmente existe en el suelo.

2º) Al valorar las pérdidas por cultivos, la situación que se mantiene es al contrario, ya que debido a la acumulación del magnesio en las semillas de la cosecha, éste es eliminado del suelo en mayor proporción.

3º) Los antagonismos K/Mg, K/Ca, Na/Mg y Na/Ca son también determinantes en la absorción por la planta del magnesio y del calcio. Altas aplicaciones de fertilizantes potásicos, o cuando se trata de suelos salinos, pueden conducir a que aparezcan en la planta deficiencias de magnesio. Lo mismo ocurre con el calcio, aunque en este caso con menor frecuencia.

4º) El antagonismo Ca/Mg suele ser el más frecuente. Cuando la relación es superior a 10, la deficiencia de magnesio en la planta puede ser ya visible.

19

EL HIERRO EN LA PLANTA Y EN EL SUELO.

La esencialidad del hierro fue establecida por vez primera en el año 1865 por el fisiólogo J. Sachs, aunque ya E. Gris, en 1843, había descrito diversas alteraciones que se presentaban en los vegetales privados de un suministro adecuado de este nutriente. Por aquel entonces se generalizó la opinión de que el hierro formaba parte de la molécula clorofilica, al estimar que en las plantas existía, como en el caso de los animales, una relación hierro-pigmento.

Este error fue aclarado suficientemente por los brillantes trabajos de R. Willstater y A. Stoll, en 1913, que culminaron con la demostración científica de que este oligoelemento no era un componente de la clorofila.

En el periodo 1920-1930, extraordinariamente fructífero para la Bioquímica, se aclaran muchos procesos que ponen de manifiesto la enorme trascendencia de la función del hierro en la vida vegetal. Este impulso investigador ha conducido al descubrimiento de numerosas estructuras y sistemas enzimáticos conteniendo hierro de importancia vital; y se han dilucidado muchas cuestiones relacionadas con los mecanismos de absorción, transporte y almacenamiento del elemento en la planta. Pero es evidente que la historia completa de su total actuación está aún incompleta, y que en el momento actual aún queda mucho por conocer.

19.1. CONTENIDO Y FORMAS EN LA PLANTA.

El hierro puede ser absorbido por la planta mediante su sistema radicular como Fe^{+2} , o como quelatos de hierro. La forma Fe^{+3} es de menor importancia, debido a la pequeña solubilidad de los compuestos férricos en la mayor parte de los suelos.

Comparado con su presencia abundante en los suelos, el contenido en las plantas es escaso, aunque en la mayoría de las veces más elevado que el de otros oligoelementos. En los tejidos normales varía desde 25 a más de 250 ppm en peso seco, dependiendo de la parte de la planta que se considere y de la especie. En las regiones meristemáticas, donde la multiplicación y

crecimiento celular son rápidos, el elemento es requerido por los enzimas mitocondriales; y es en las hojas, concretamente en los cloroplastos, en donde se encuentra la mayor parte del hierro.

Algunas especies de hortalizas, como espinaca, lechuga y col verde, contienen entre 100 y 800 ppm en materia seca. En las hojas de árboles frutales oscila entre 20 y 420 ppm, variando en Citrus entre 70 y 130 ppm. Los cereales presentan valores parecidos, entre 60 y 130 ppm. En general, se admite que contenidos inferiores a las 50 ppm en peso seco pueden originar estados de deficiencia.

Puede hacerse una distinción entre el hierro total en las plantas y el hierro soluble o activo. Esta diferenciación fue puesta de manifiesto hace ya muchos años. D. Bousingault, en 1874, diferenciaba dos clases de hierro, según fuera objeto o no de extracción con alcohol, y cuya primera fracción podía variar entre la cuarta parte y mitad del hierro total. Posteriormente, otros autores, siguiendo estas ideas, establecen otros conceptos.

Los principales esfuerzos en esta línea se deben a J. Oserkowsky (1932), que en su clásico trabajo no puede establecer una correcta relación entre contenidos de hierro y clorofila en hojas de árboles cloróticos. Este hecho le indujo a adjudicar a una sola fracción de hierro la facultad de intervenir en la formación del pigmento, fracción que designó como hierro activo.

Su primer paso fue intentar aislar e identificar este hierro. Para ello sometió a extracción con diversos disolventes hojas de distintas plantas verdes y cloróticas de la misma edad, y realizó estudios comparativos entre cantidad de hierro de éstas y contenido de clorofila. De todos estos ensayos sólo encontró una cierta relación positiva cuando utilizó como extractante CIH 1 N.

Posteriores investigaciones parecen confirmar que la fracción activa de hierro está localizada en los cloroplastos, y que el hierro no cloroplástico se acumula. Otros trabajos ponen de manifiesto que los contenidos de hierro activo aumentan rápidamente en el primer estado de crecimiento de la hoja, mientras que el residual permanece en muy bajos niveles, acumulándose gradualmente en el desarrollo. El hierro activo puede transformarse en residual, y de esta forma no es utilizable en la síntesis de la clorofila.

Más recientemente otros autores, al estudiar la clorosis férrica, sugieren la posibilidad de tres tipos de hierro, cada uno de los cuales realiza una distinta acción metabólica: a) Hierro constituyente de citocromos y otros enzimas; b) Hierro integrado en la biosíntesis de las clorofilas en las fases del desarrollo foliar; y c) Hierro en estado libre, formando un sistema regulador encargado de

la síntesis clorofílica a partir de sus primitivas etapas, así como de los citocromos y enzimas, de cara al desarrollo adicional de la planta.

19.2. FUNCIONES DEL HIERRO EN LA PLANTA.

La tendencia del hierro a formar quelatos complejos y su aptitud para cambiar su valencia: $Fe^{+2} \leftrightarrow Fe^{+3} + e^{-}$, son las dos características más importantes en las que se basan sus numerosos efectos fisiológicos.

El hierro interviene en muchos procesos vitales para la planta, formando parte de diversos sistemas enzimáticos, bien como un componente metálico específico de los enzimas, bien como uno de los varios metales igualmente necesarios para la actividad de los enzimas correspondientes.

En este punto hay que recordar que los enzimas pueden estar formados solamente por una proteína, como sucede por ejemplo con ciertos enzimas proteolíticos, que atacan y degradan las proteínas; o como las amilasas, que hacen lo propio con el almidón. Otros muchos, en cambio, constan de dos porciones: un grupo proteínico y otro no proteínico llamado grupo prostético o coenzima, en el que en muchos casos intervienen átomos metálicos. Si estos átomos se separan, el enzima queda inerte como tal; pero si de nuevo se le incorpora, el enzima queda restituido con toda su actividad. El cinc, manganeso, cobre y hierro entran frecuentemente como parte constituyente de estos enzimas, que se conocen como metalo-enzimas. Otros enzimas poseen grupos prostéticos integrados por sustancias orgánicas relativamente complejas. Muchas vitaminas, como por ejemplo: tiamina (B_1), riboflavina (B_2), piridoxina (B_6), etc., constituyen grupos prostéticos de diferentes enzimas, o bien forman parte de dichos grupos.

19.2.1. LOS ENZIMAS CON ESTRUCTURA HIERRO-PORFIRINA Y LA RESPIRACION VEGETAL.

Una clasificación útil de los enzimas que contienen hierro es la que considera la naturaleza de su grupo prostético. Y así, los llamados enzimas hemínicos son los que se caracterizan por tener en común la estructura porfirínica. En este núcleo se inserta el átomo de hierro para dar la hierro-porfirina, que constituye un verdadero quelato, en donde el metal se une a los átomos de nitrógeno por enlaces covalentes y coordinados (Figura 19.1.).

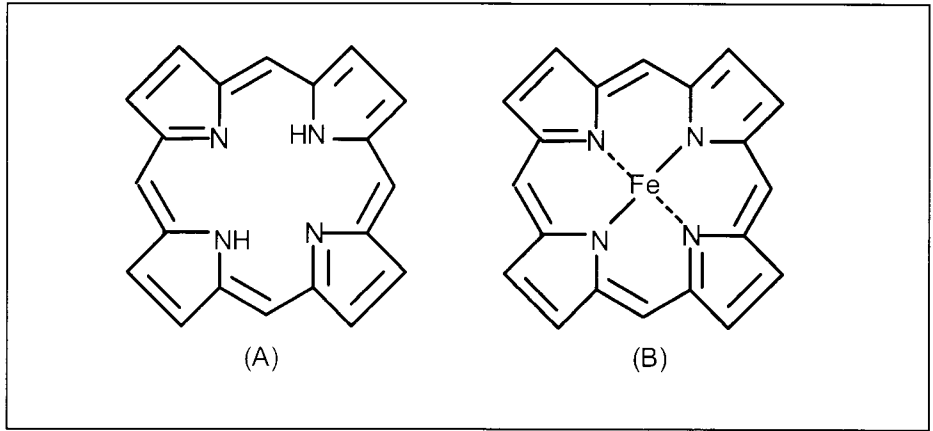


Figura 19.1. (A) Estructura porfirínica. (B) Estructura hierro-porfirina.

El hierro está presente en las células vegetales en forma de estas estructuras porfirínicas. Y el estado en que se encuentra el metal y la naturaleza de las uniones con los diferentes componentes proteicos, contribuyen de modo especial a determinar sus propiedades e incluso su papel en la propia función a desarrollar.

En la actualidad, está plenamente demostrado que los procesos en determinadas etapas de la respiración vegetal, cuya cadena terminal envuelve la transferencia de electrones desde distintos sustratos al oxígeno, se realizan casi exclusivamente por medio de estructuras enzimáticas hierro-porfirínicas, como son los citocromos.

Los citocromos, en general, pueden definirse como hemoproteínas que transfieren electrones a las cadenas redox. Mediante su estructura química y la situación de las bandas de sus espectros de absorción, se identificaron en un principio tres grupos de citocromos, a los que se designó como a, b y c. Investigaciones posteriores indicaron la existencia, dentro de cada grupo, de variados representantes que se diferenciaron mediante subíndices. Al variar los sustituyentes de los cuatro anillos pirrólicos derivan las diversas porfirinas. El centro de la actividad enzimática reside en el hierro, que es oxidado y reducido reversiblemente durante el proceso de transporte electrónico.

El grupo prostético de todos los citocromos no ha sido caracterizado. Sin embargo, hay suficiente evidencia de que en los del tipo b es la hierro-protoporfirina IX (Figura 19.2.).

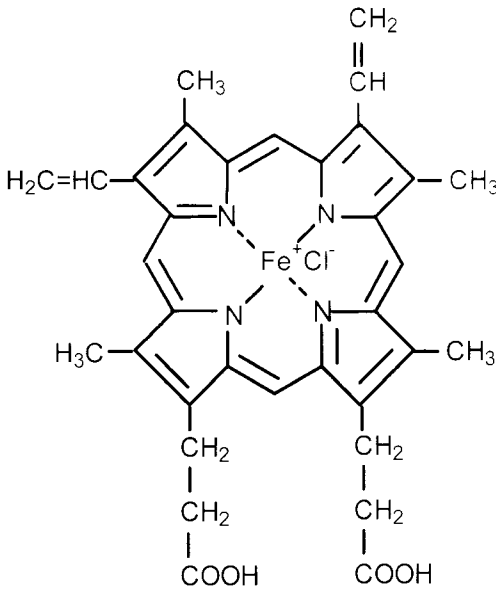


Figura 19.2. Estructura hierro-protoporfirina IX.

Dentro de este grupo, el citocromo b_6 se encuentra de forma general en los plastidios foliares, lo que sugiere una vinculación específica en los procesos fotosintéticos.

El citocromo c, quizá el más estudiado de todos, se considera como un hemoprotéido, cuyo grupo prostético es una porfirina de hierro, y sus radicales vinilos saturados y combinados con la proteína mediante enlaces tioéter. Este enlace comunica a la agrupación una estructura muy estable, de forma helicoidal, con dos restos de cisteína unidos al grupo porfirínico (Figura 19.3.).

Al citocromo c se le atribuye la responsabilidad del transporte de electrones en el proceso anterior al paso a citocromo-oxidasa en la cadena respiratoria. Correspondiente a este grupo se considera como componente de la citocromo c-oxidasa y presente en todos los organismos vivos.

Las partes verdes de las plantas contienen un citocromo denominado citocromo f. Su presencia casi exclusivamente en cloroplastos hace pensar en un activo papel en el proceso fotosintético.

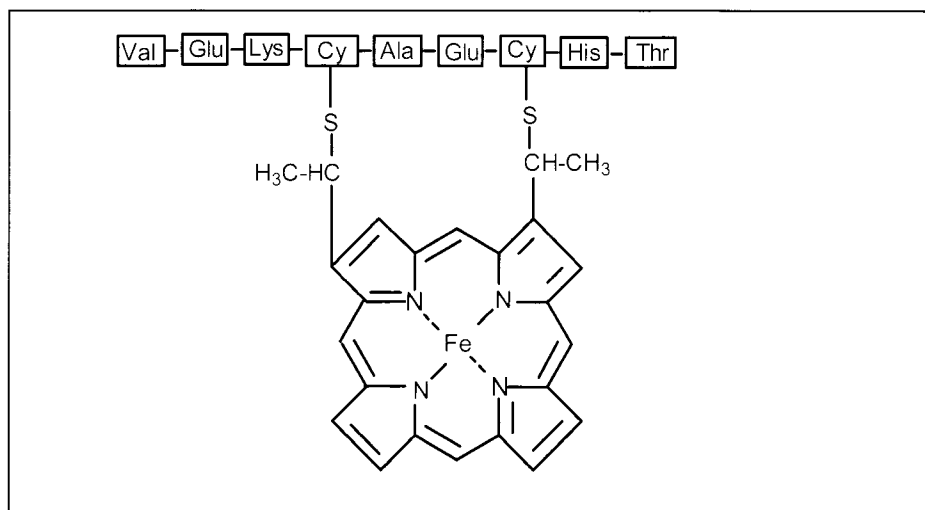
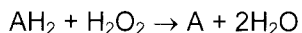
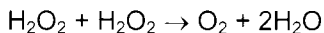


Figura 19.3. Estructura del citocromo c.

El hierro participa también en las estructuras de otros sistemas enzimáticos con núcleos porfirínicos, los cuales actúan sobre el peróxido de hidrógeno, ya sea transportando el oxígeno a un sustrato oxidable, caso de la peroxidasa:



o bien al propio peróxido que es deshidrogenado a oxígeno, por efecto de la catalasa, con destrucción final del agua oxigenada:



Ambas tienen como grupo prostético la protoporfirina IX.

Concretamente, las deficiencias de hierro y manganeso estudiadas en plántulas de naranjo amargo, en disoluciones nutritivas, provocan notables cambios en las citadas actividades, tal como puede observarse en la figura 19.4.

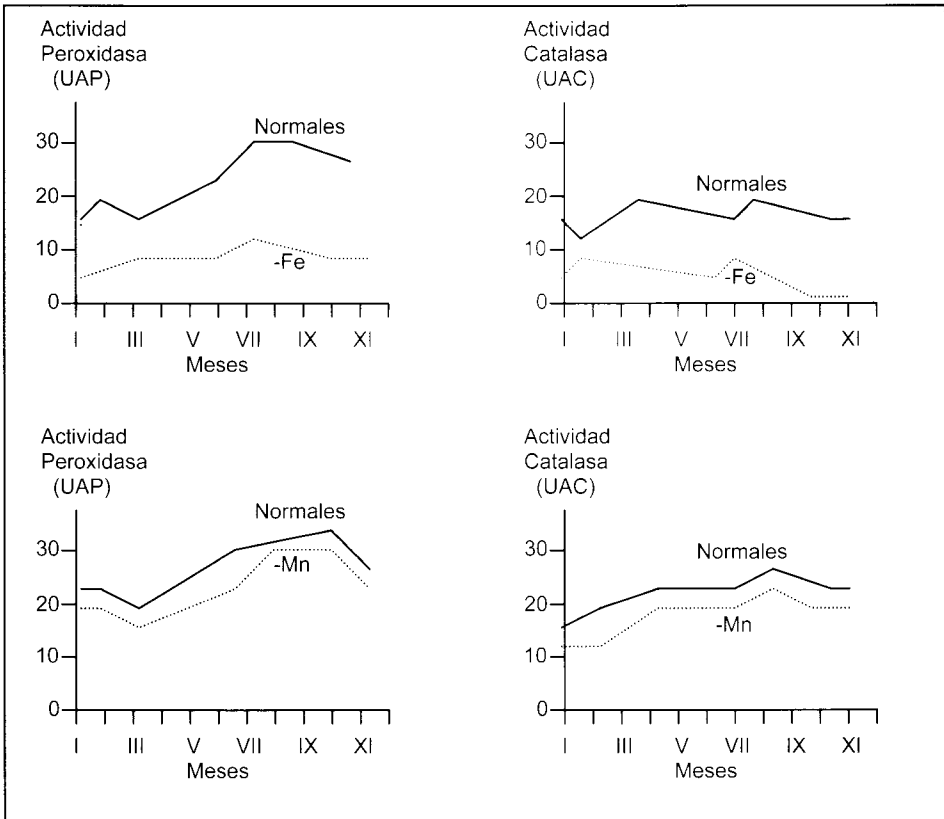


Figura 19.4. Fluctuaciones estacionales de las actividades peroxidasa y catalasa en hojas de plántulas de naranjo amargo, en disoluciones nutritivas, en casos de deficiencia de hierro y manganeso (O. Carpena y cols., 1975).

19.2.2. ENZIMAS SIN ESTRUCTURA HIERRO-PORFIRINA. PROCESOS IMPORTANTES EN LOS QUE PARTICIPAN.

El hierro interviene, asimismo, en otros sistemas enzimáticos no porfirínicos, pero en los que el oligoelemento, como componente del enzima, tiene decisiva influencia en numerosos procesos esenciales para la vida vegetal.

Entre estos sistemas enzimáticos merece resaltarse en primer lugar el NADH-citocromo c-reductasa, una flavoproteína que contiene 0'27 % de hierro

en peso, y facilita la unión entre flavina y la proteína por quelación. En los tipos de reacción que catalizan estos sistemas enzimáticos, los electrones se transfieren a una molécula aceptora según el siguiente esquema:



Otro enzima hierro-flavínico que resulta de notable interés es la deshidrogenasa-succínica, que regula las transformaciones succínico-fumárico.

La ferredoxina es otro enzima conteniendo hierro, aunque no porfirínico ni flavínico. Se trata de una proteína en la que dos átomos de hierro están coordinados a átomos de azufre inorgánico. En la forma oxidada, los dos átomos de hierro se presentan como Fe^{+3} , mientras que en la forma reducida un átomo se encuentra como Fe^{+2} (Figura 19.5.).

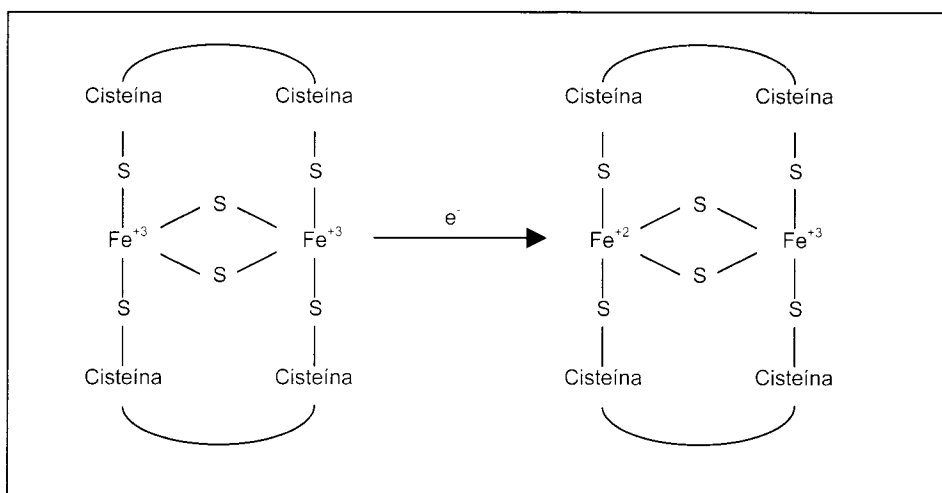


Figura 19.5. Esquema propuesto para señalar la unión Fe-S en las formas oxidada y reducida de la ferredoxina.

La ferredoxina es el primer compuesto redox estable del transporte electrónico en cadena. Su alto potencial redox le permite reducir sustancias como NADP^+ , nitrito, oxígeno, sulfato, etc.

La figura 19.6. muestra, de forma esquemática, el importante papel de este enzima en la reducción fotosintética del nitrato a nitrito.

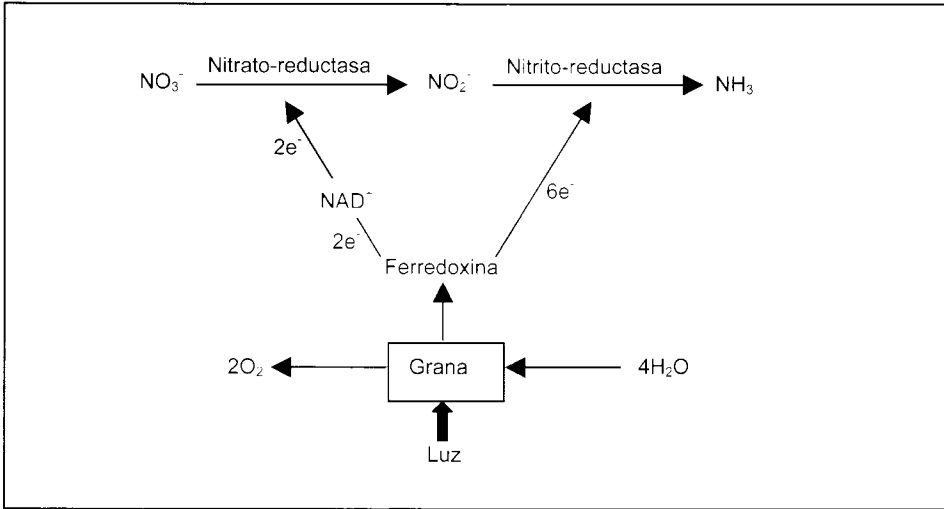


Figura 19.6. Esquema de la reducción fotosintética del nitrato a amoníaco en un sistema reconstituido de cloroplastos (A. Paneque y cols., 1969).

Los ocho electrones fotoactivados por la clorofila son aceptados por la ferredoxina oxidada, que transfiere dos al NAD^+ . Los enzimas nitrato-reductasa y nitrito-reductasa catalizan entonces, gradualmente, la reducción del nitrato a nitrito por el NADH_2 ($2e^-$), y del nitrito a amoníaco por la ferredoxina reducida ($6e^-$)

También se ha puesto de manifiesto la existencia en los cloroplastos de una proteína de gran peso molecular: la fitoferritina, con estructura no hemínica, y cuyo papel es el de actuar de reserva del oligoelemento en la formación de sistemas fotosintéticos en plantas.

Dentro de esta relación de enzimas con hierro, hay que destacar por último el enzima nitrogenasa, que contiene también molibdeno, y es responsable directo del proceso de fijación del nitrógeno atmosférico. En la bioquímica de esta fijación, ya tratada en el tema del "Nitrógeno en el suelo" (Véase tema 9), participa también como transportador electrónico la ferredoxina.

19.2.3. EL HIERRO EN LA SINTESIS CLOROFILICA.

Numerosos hechos experimentales demuestran de modo convincente la influencia que el hierro ejerce en la síntesis clorofilica. Sin embargo, en el

momento actual no existe unanimidad por parte de los científicos para concretar definitivamente cuál es la verdadera misión del hierro en este proceso, y la etapa del mismo en la que pueda intervenir.

Para algunos, y dentro del conjunto de reacciones que se sabe integran la síntesis de la clorofila (Figura 19.7.), el hierro forma parte activa en la condensación del succinilcoenzima A y glicina para formar el ácido δ -aminolevulínico.

Otros interpretan que es la reacción de descarboxilación oxidativa del coproporfirinógeno a protoporfirina donde el hierro entra a formar parte de las moléculas estructurales de la reacción. También hay quien considera que la esencialidad del hierro puede estar en el estado de unión del fitol a la clorofilida a. Otros, por último, postulan que el elemento interviene de algún modo en la incorporación del magnesio a la molécula porfirínica.

Estas distintas orientaciones respecto a la relación entre el hierro y la clorofila ponen de manifiesto la complejidad del tema.

Pero es evidente que hay un hecho importante a considerar y susceptible de ser admitido: el cloroplasto es la sede del pigmento, y estos orgánulos están formados por otros componentes como son proteínas, lípidos, hierro y enzimas. Entonces, una hipótesis que puede tener fundamento serio consiste en admitir que, si bien el hierro no es constituyente de la molécula de clorofila, sí puede estar inserto en el complejo clorofilolipoprotéico. Cuando falla el oligoelemento no hay tal complejo, con lo que el cloroplasto carece de las condiciones ideales para que se verifique el proceso fotosintético. Es admisible también la paralización de los enzimas que intervienen o regulan la síntesis de algunos precursores de la clorofila. E incluso, como también se ha apuntado, una menor síntesis de los ARN.

19.3. ALTERACIONES EN LA PLANTA POR DEFICIENCIA Y EXCESO.

Todos los vegetales deficientes en hierro muestran una sintomatología común, y es sin duda la más fácil de reconocer entre las deficiencias de oligoelementos. Comienza con un ligero amarilleamiento de las zonas foliares intervenales, en contraste con el color verde oscuro de sus nerviaciones. Cuando la enfermedad progresa, las hojas van siendo cada vez más amarillas, y en los casos muy graves se llega a la ausencia total de clorofila.

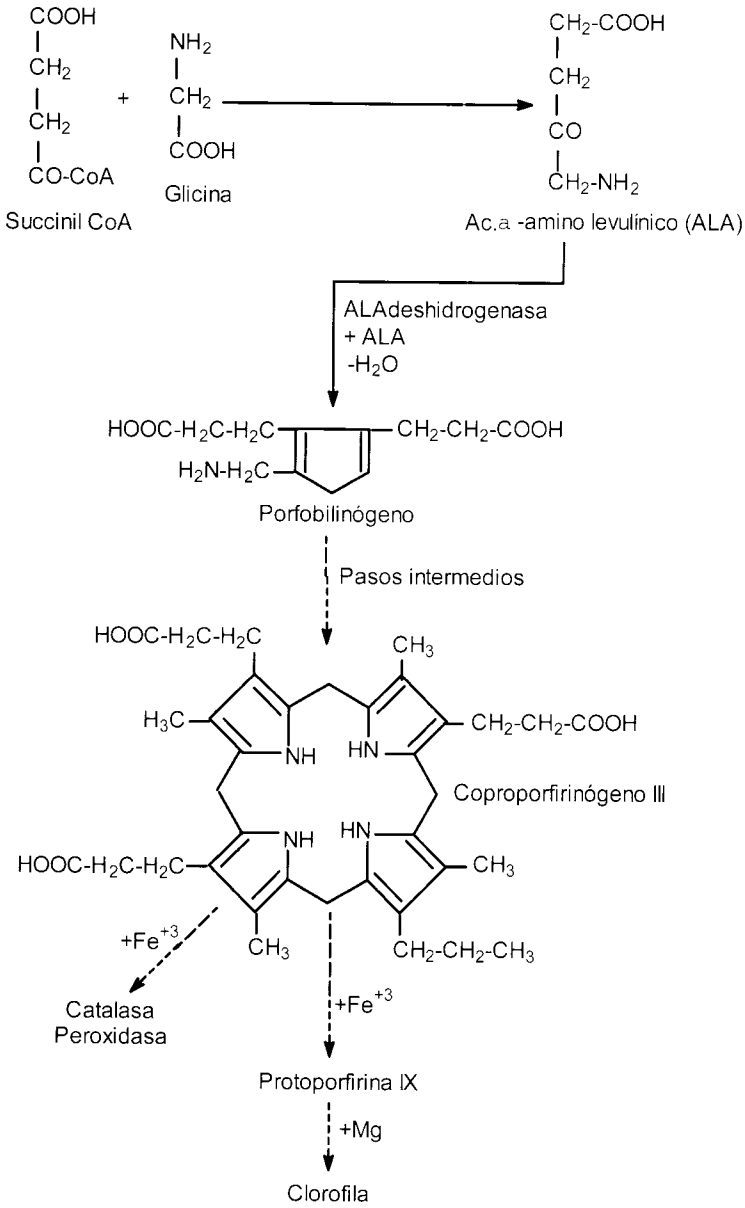


Figura 19.7. Algunas etapas de la biosíntesis de la clorofila.

Hay que significar que los primeros síntomas aparecen, en primer lugar, en las hojas jóvenes, ya que el elemento es poco móvil en la planta.

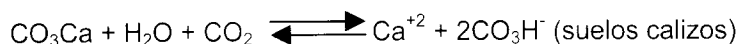
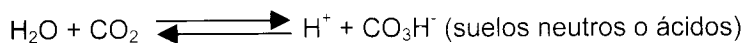
La deficiencia, cuando aparece en plantas anuales, muestra una disminución en su crecimiento, un aspecto raquítico y su producción desciende notablemente. Los árboles se defolian y comienzan a secarse por la periferia; sus frutos son pequeños, maduran precozmente y, en algunos casos, tienen apariencia cérea.

El análisis químico foliar, cuando la deficiencia se produce, muestra acumulaciones de ácido cítrico, nitratos y aminoácidos libres; entre estos últimos, la arginina, asparragina y glutamina sufren notables incrementos. La relación clorofila a/clorofila b es algo mayor que en los casos normales, y las actividades peroxidasa, catalasa y aconitasa resultan muy disminuidas.

Las causas que pueden motivar esta deficiencia pueden ser muy variadas. Descontada la falta del oligoelemento en su forma asimilable en el suelo, aspecto este tratado más adelante al considerar su dinámica en el suelo, las principales son: altos niveles de caliza, fosfatos y metales pesados en el suelo; exceso de ión bicarbonato en el suelo o en el agua de riego; condiciones climáticas y agentes microbianos adversos; y especificidad en la planta.

Aunque la deficiencia puede tener lugar tanto en suelos ácidos como alcalinos, es quizás mucho más común en los calizos, como consecuencia de una clorosis inducida por la cal. Además de que un elevado pH disminuye la disponibilidad del hierro, fuertes concentraciones de calcio en la disolución del suelo pueden no solo disminuir la absorción de hierro en estos suelos, sino que existen pruebas también de la falta de actividad del hierro en el interior de la planta debido a la abundancia de calcio, o de calcio y fósforo.

Un escaso contenido de oxígeno, debido muy a menudo a un exceso de agua o mala estructura del suelo, también se relaciona con la deficiencia de hierro. Se supone que esto se debe al mayor contenido en él de dióxido de carbono, el cual con el agua puede formar CO_3H^- :



Estos iones bicarbonato pueden disminuir indirectamente la disponibilidad del hierro al aumentar la solubilidad de los fosfatos de calcio, y en consecuencia las concentraciones de iones calcio y fosfato, llevando a la

disponibilidad decreciente del hierro en el suelo, o a su falta de actividad dentro de la planta. La aparición de síntomas de deficiencia de hierro en frutales regados con aguas de elevados contenidos en CO_3H^- parece confirmar este supuesto. Se sugiere que los CO_3H^- ejercen, entre otras acciones, una acción depresora en la respiración radicular, en la absorción y transporte de nutrientes minerales y en la velocidad de actuación de diversas reacciones enzimáticas.

Puede facilitarse, asimismo, la deficiencia de hierro en virtud de un mecanismo de antagonismo iónico. Diversos investigadores han señalado un antagonismo bien definido entre el hierro y el manganeso, el cual puede influir en la composición mineral de la planta en forma muy considerable. En plantas normales, la relación Fe/Mn suele mantenerse entre 1'5 y 2'6; pero cuando esta relación presenta valores inferiores a 1'5 es corriente encontrar síntomas de deficiencia de hierro o exceso de manganeso. La figura 19.8. pone en evidencia esta situación.

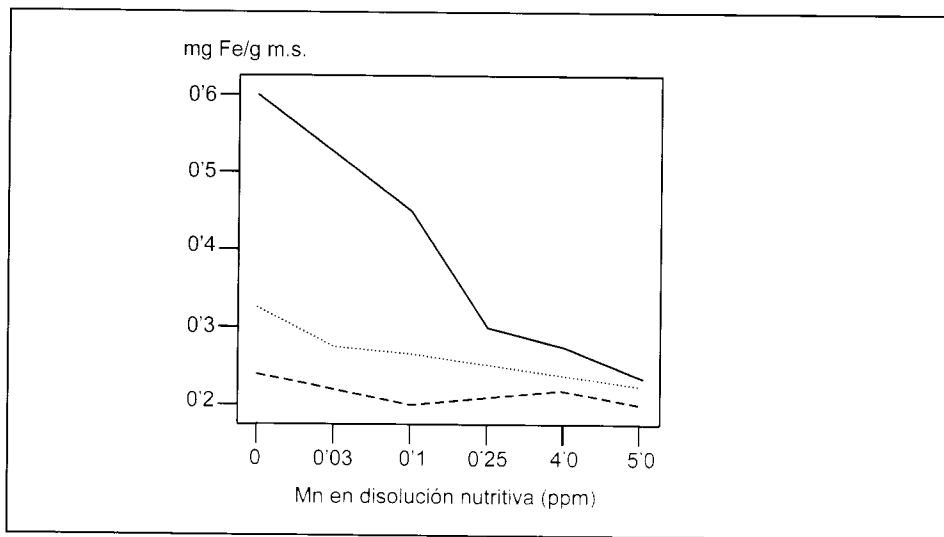


Figura 19.8. Efecto del incremento de la concentración de Mn en el contenido de Fe en plantas de soja. Experiencia con tres niveles de hierro en disoluciones nutritivas (J.J.Somers y SW.J.Shive, 1942).

También se han puesto de manifiesto deficiencias de hierro inducidas por el cobre. El uso continuado de productos fungicidas con base de cobre en cultivos de viñedos ha mostrado repetidas veces la aparición de síntomas de deficiencia de hierro. Otros cationes, como por ejemplo el cinc, aplicado al

suelo por encima de sus concentraciones normales, ejerce una influencia parecida. En este último caso se supone que el cinc interfiere el transporte del hierro de las raíces a las partes aéreas.

Las condiciones climáticas, luz, temperatura y humedad del suelo, deben ser consideradas como factores influyentes en la aparición de la deficiencia. Un elevado nivel de humedad, junto a las bajas temperaturas del suelo, puede ser una condición muy favorable para ello, al influir en el estado del elemento, sobre todo en suelos calizos. Igualmente, el hecho de que la clorosis férrica se manifieste más intensamente en invierno que en verano se debe, aparte de la mayor humedad, a la diferencia de temperatura, ya que la respiración de la raíz disminuye con ésta, absorbiendo menos hierro que en las épocas climáticas favorables

Los microorganismos del suelo son igualmente agentes que en determinadas situaciones pueden ayudar a provocar la deficiencia de hierro, bien inmovilizándolo en el suelo mediante reacciones oxidativas, o bien por un consumo amplio del mismo.

Finalmente, se ha de tener en cuenta la especificidad de la planta. Está reconocido que en condiciones análogas de suelos, clima y fertilización, unas especies son más sensibles que otras. Se ha pretendido explicar este hecho afirmando que la uniformidad del suelo es solamente aparente. En realidad puede haber, de acuerdo con esta hipótesis, zonas en la misma parcela con características distintas, por lo que cabe la posibilidad de que existan plantas deficientes muy próximas a otras sanas. Pero este argumento no debe aceptarse como correcto, ya que hay una evidencia clara de que la diversa sensibilidad alcanza no solo a especies distintas, caso de limonero y naranjo, sino también incluso a variedades de una misma especie, como ocurre entre limonero Verna y Primofiori, o entre naranjo Verna y Nável.

La deficiencia de hierro en los cultivos puede corregirse orientando el problema a hacer más asimilable el que se encuentra en el suelo, o añadir el elemento al suelo o a las plantas en formas asimilables. Actualmente, el método más eficaz para evitar la deficiencia es la utilización de quelatos de hierro, ya sea en aplicaciones al suelo o por pulverización foliar.

La rapidez de conversión del hierro soluble en compuestos insolubles no disponibles para la planta lleva consigo el que los problemas de toxicidad no se presenten, salvo muy raras excepciones, como puede ser el caso de los arrozales sumergidos, donde el elevado nivel de hierro ferroso es a menudo importante. Suelos con contenidos incluso superiores al 5 % de hierro total no provocan efectos tóxicos en los cultivos que en ellos se desarrollan.

19.4. ORIGEN, CONTENIDO Y FORMAS DEL HIERRO EN EL SUELO.

El hierro puede considerarse como uno de los elementos principales, tanto en la corteza terrestre como en los suelos. Su potencial en la corteza terrestre es verdaderamente importante, alrededor del 5 %, y es, por tanto, después del silicio y aluminio, el elemento más abundante.

Su contenido en los suelos templados suele variar entre el 1 y 5 %. Valores inferiores al 1 % suelen encontrarse normalmente en suelos ácidos de textura gruesa, o en suelos turbosos. En casos aislados, latosoles y lateritas, pueden hallarse valores cercanos al 10 %.

La cantidad total de hierro en los suelos no es, sin embargo, indicadora de su disponibilidad para las plantas. Las deficiencias de este elemento, cuya razón aparente es su insuficiente cantidad en el suelo, es en realidad debida, como más adelante se verá, a su tendencia a formar compuestos insolubles.

El hierro existente en los suelos procede del proceso general de edafización, que determina la demolición de los minerales constituyentes de varios tipos de rocas ígneas, sedimentarias o metamórficas. Entre estos minerales, los más importantes son los óxidos: hematita (Fe_2O_3) y magnetita (Fe_3O_4); el carbonato: siderita (CO_3Fe); y el sulfuro: pirita (S_2Fe). También se encuentra normalmente como hidróxidos, fosfatos y silicatos. Como integrante de diversas rocas ígneas: anfíboles, piroxenos, micas, etc., que han resistido la meteorización, constituye una reserva del mismo en el suelo.

Los óxidos libres, en cualquiera de sus estados de hidratación, son muchas veces responsables de la coloración del suelo. Aquellos con color amarillo-pardo, propios de las zonas templadas y frías, contienen óxidos de los tipos más hidratados, mientras que los de coloración roja, típicos de regiones áridas, contienen óxidos no hidratados. Coloraciones intermedias corresponden a sucesivos estados de hidratación.

Todos los compuestos citados presentan en el suelo una reactividad distinta; desde formas endurecidas por cristalización, difícilmente solubles, hasta los óxidos férricos recientemente precipitados, en gran estado de división capaz de alcanzar caracteres coloidales, y que si las características son favorables pueden, en gran parte, pasar a la disolución del suelo como Fe^{+2} ó Fe^{+3} .

19.5. DINAMICA DEL HIERRO EN EL SUELO. FACTORES INFLUYENTES EN SU DISPONIBILIDAD PARA LA PLANTA.

El hierro desempeña un papel importante en la química del suelo, participando en numerosas reacciones que afectan a sus propiedades físicas y químicas, y en consecuencia a la nutrición de la planta. Por una parte, y debido a su interacción con otros elementos, puede influir considerablemente en la disponibilidad de otros micronutrientes y macronutrientes; por otra, a su propia disponibilidad, la cual se ve afectada por diversas propiedades del suelo.

Considerando este último aspecto, los posibles estados del hierro en relación con su utilización por la planta pueden agruparse en:

A) Hierro soluble:

- a) Presente en condiciones reductoras como Fe^{+2} en la disolución del suelo.
- b) Como Fe^{+3} , cuando la acidez y el potencial de oxidación alto.
- c) En combinaciones orgánicas formando complejos, tanto en forma divalente como trivalente.

B) Hierro insoluble:

- a) Como Fe_2O_3 en distintos estados de hidratación.
- b) Bajo la forma FeO y $\text{Fe}(\text{OH})_2$. Su presencia está condicionada a situaciones muy reductoras y ácidas.

C) Complejos coloidales.

Sin embargo, en los suelos agrícolas, las posibilidades que la planta tiene para utilizar este hierro son pocas. Dependen fundamentalmente del pH del suelo y también, en gran medida, de su composición mineral y orgánica.

19.5.1. INFLUENCIA DEL pH.

La influencia del pH del suelo sobre las solubilidades de Fe^{+2} , Fe^{+3} y hierro total soluble, en equilibrio con los óxidos de hierro, se pone de manifiesto en la figura 19.9.

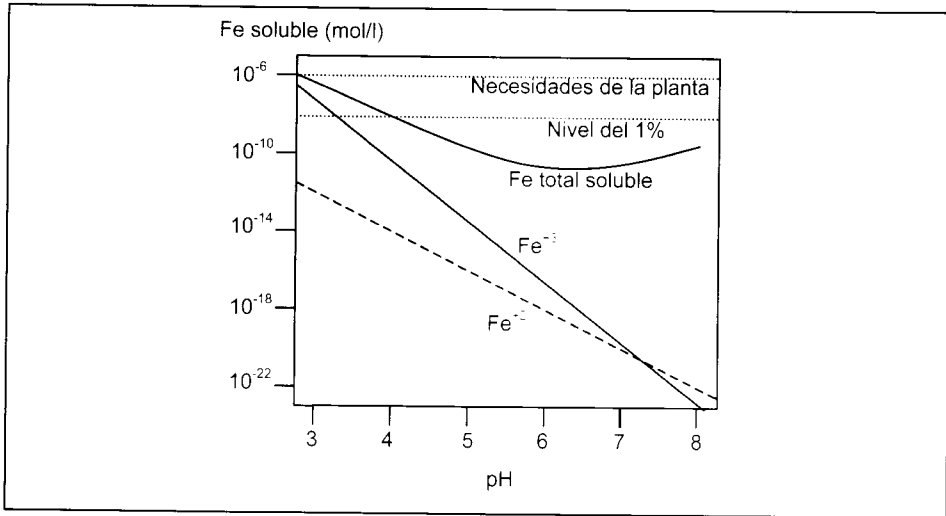


Figura 19.9 Influencia del pH del suelo sobre la solubilidad del hierro (W.L. Lindsay, 1974).

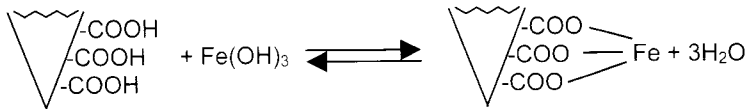
Para un suministro adecuado a la planta se precisa, como mínimo, una solubilidad total de 10^{-6} M/l. Este valor sólo se alcanza a $\text{pH}=3$. A $\text{pH}=4$, la planta sólo obtiene ya el 1% de la cantidad necesaria, la cual va descendiendo unas mil veces por cada unidad que el pH aumente. Si se tiene en cuenta que el intervalo normal de pH de los suelos agrícolas está comprendido entre 5 y 7,5, es fácil deducir, desde el punto de vista estrictamente químico, que no hay posibilidades prácticas de que la planta pueda obtener el hierro que necesita. Habrá, eso sí, una cantidad muy alta de hierro total, pero sólo una porción pequeñísima podrá ser asimilable. La situación será más grave en los suelos neutros y alcalinos que en los ácidos.

A pesar de lo expuesto, la existencia de plantas con una nutrición correcta indica que en el suelo se dan circunstancias igualmente de índole química, que contrarrestan las anteriormente expuestas, o bien que justifiquen la existencia de sustancias que puedan mantener en estado soluble cierta cantidad de hierro.

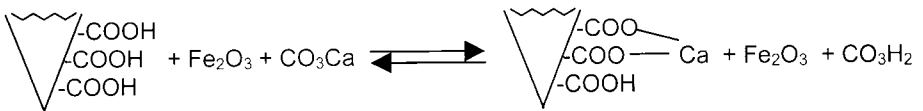
Casi todos los investigadores están de acuerdo en señalar que las zonas de máxima absorción de iones y agua por las plantas corresponde a los extremos de su aparato radicular, y muy especialmente en las raíces laterales jóvenes.

Sobre la base de este conocimiento se argumenta que, si bien en la disolución del suelo hay escasas posibilidades de Fe^{+2} y Fe^{+3} , el entorno radicular ofrece un potencial ácido suficientemente fuerte para solubilizar una cierta proporción de los compuestos insolubles que normalmente se encuentran en el suelo. No obstante, aunque las necesidades del elemento sean muy pequeñas, no parece probable que se satisfagan por esa vía, sobre todo en suelos de pH alto.

Otros autores consideran que las plantas pueden captar el hierro por interacción directa de la superficie radicular con las partículas del suelo. De acuerdo con ello, los grupos carboxilos de las paredes celulares se apropian del hierro por contacto, teniendo lugar en fase sólida el intercambio de H^+ por Fe^{+3} :



Cuando se aplica esta teoría a suelos calizos, sus autores explican la baja absorción del oligoelemento por la mayor aptitud del calcio a ser intercambiado:



Investigaciones recientes apoyan la idea de que sustancias con estructura quelante son excretadas por las raíces. Estas sustancias, en contacto con las partículas del suelo pueden originar quelatos de hierro, los cuales son absorbidos íntegramente por las raíces. Se cree, no obstante, que esta capacidad está limitada a determinadas zonas de la raíz, y no a todas las especies vegetales, lo cual puede explicar, en parte, el hecho de que haya plantas más sensibles que otras a la falta o escasez de hierro asimilable en el suelo.

19.5.2. INFLUENCIA DE LA COMPOSICION DEL SUELO.

Los contenidos en arcilla y en materia orgánica son factores a considerar en la inasimilabilidad y movimiento del hierro en el suelo.

Los suelos arcillosos suelen mostrar una marcada tendencia a retener el hierro mediante un simple proceso de adsorción. De esta forma, las plantas pueden disponer de un hierro fácilmente intercambiable en el medio ácido característico del entorno radicular.

Un contenido apropiado de materia orgánica en el suelo actúa favorablemente en el aprovechamiento del hierro, no sólo por sus características reductoras y acidificantes, sino también por la capacidad que determinadas sustancias húmicas presentan para formar quelatos con el hierro en condiciones adversas de pH. Se ha comprobado que los ácidos húmicos pueden originar, con relativa facilidad, hidrosoles férrico-húmicos con el óxido férrico, y con ellos favorecer su conservación en forma más asimilable.

20

EL MANGANESO EN LA PLANTA Y EN EL SUELO.

Los primeros estudios que sugieren la esencialidad del manganeso para las plantas se remontan al año 1775. Por esta época, K.W. Scheele comprobó que este elemento era un componente común de las rocas, suelos y vegetales. Analizó numerosas plantas y detectó en las cenizas de todas ellas su presencia, aunque sin llegar a ninguna conclusión en lo referente a si era o no esencial para su crecimiento.

Muchos años después empiezan a aparecer los primeros trabajos que sirvieron de base para establecer definitivamente su esencialidad. Entre ellos destacan los realizados por G. Bertrand, quien fue, según parece, el primero en indicar, en 1897, que el manganeso estaba asociado en la planta al enzima laccasa. Posteriormente, en 1905, llega a la conclusión de que debía considerarse un elemento esencial para el desarrollo normal de las plantas. Y en 1911, junto a M. Javillier, demuestra su necesidad para la especulación de *Aspergillus niger*.

En 1912, J.S. McHarge inicia una larga serie de trabajos para demostrar la importante función que este elemento ejerce en la vida vegetal. En 1922, una vez finalizados, se acepta definitivamente su esencialidad.

20.1. CONTENIDO Y FORMAS EN LA PLANTA.

El manganeso es absorbido por la planta bajo la forma de Mn^{+2} y como quelato, tanto por su sistema radicular como por las hojas directamente. Por esta vía es aplicado frecuentemente en pulverizaciones para corregir deficiencias.

Las necesidades cuantitativas de las plantas en manganeso son relativamente pequeñas, pero varían más que en cualquier otro micronutriente. Los contenidos fluctúan según la especie vegetal, siendo los tejidos verdes los que contienen la mayor concentración. En las hojas normales pueden oscilar entre 30 y 500 ppm/peso seco. Los tallos y raíces son los más pobres.

Similarmente al hierro, el manganeso es un elemento poco móvil en la planta, y por ello los síntomas de deficiencia suelen aparecer primero en las hojas jóvenes.

20.2. FUNCIONES DEL MANGANESO EN LA PLANTA.

Aunque muchas de las funciones del manganeso son aún desconocidas, sí se sabe que interviene en numerosos procesos metabólicos que se realizan en las plantas. En ellos, su comportamiento químico se asemeja en ciertos aspectos al calcio y magnesio, y en otros a los oligoelementos hierro y cinc. A continuación se resumen algunas de sus importantes funciones.

20.2.1. FOTOSÍNTESIS.

Los primeros estudios que se hicieron en relación con la posible influencia del manganeso en el proceso fotosintético se inician en 1924, al observarse que la enfermedad conocida como "moteado gris de la avena" podía presentar una cierta dependencia de la fotosíntesis, puesto que en condiciones análogas de iluminación, las plantas enfermas fotosintetizaban mucho menos que las sanas. Posteriormente se comprobó que la causa de alteración era la deficiencia de manganeso.

En 1955, L. Bergmann realiza un amplio trabajo en el alga *Chlorella vulgaris*, y demuestra de forma concluyente el importante papel del manganeso en la fotosíntesis. Desarrolló el alga en tres medios distintos, cada uno de ellos con o sin manganeso. Tal como puede apreciarse en la figura 20.1., en condiciones autotróficas, obtenidas con una disolución nutritiva exclusivamente inorgánica y con iluminación, el alga presentó un escaso desarrollo en ambos casos, manifestándose la deficiencia muy débilmente.

En el medio heterotrófico, obtenido al añadir glucosa a la misma disolución y en absoluta oscuridad, se observó que el manganeso no ejercía ninguna influencia, ya que el desarrollo es análogo, tanto en el medio con manganeso como en el carente de él. Se dedujo, por tanto, que el manganeso solamente intervenía en el proceso fotosintético, es decir, en presencia de luz. Esto se ratifica cuando se repite el ensayo heterotrófico y se ilumina el cultivo a los 4 días de permanecer en la oscuridad (condiciones mixotróficas). A partir de este momento, el crecimiento es mucho mayor cuando el manganeso está presente. Si al cabo de los 9 días se incorpora al

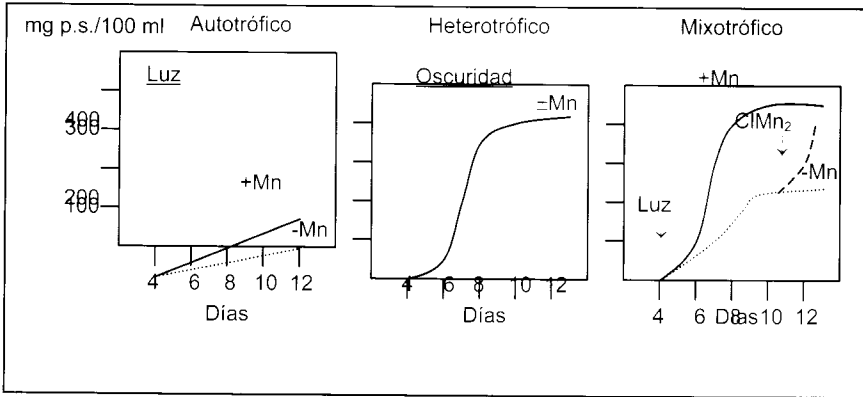


Figura 20.1. Crecimiento de *Chlorella vulgaris* en cultivos autotrófico, heterotrófico y mixotrófico, con o sin manganeso.

cultivo falto de manganeso una cantidad apropiada de cloruro manganeso, el desarrollo del alga tiende a incrementarse, alcanzando a los 11 días valores cercanos a los obtenidos en el cultivo con cantidad inicial suficiente del elemento.

La experiencia expuesta muestra, por tanto, que en un medio heterotrófico en la oscuridad, la deficiencia de manganeso no perturba el desarrollo, ya que el alga se desarrolla sin fotosíntesis. Pero si el cultivo se ilumina, sólo transcurre normalmente si se restablece el nivel adecuado de manganeso.

Otras experiencias que ponen de manifiesto la participación del manganeso en la fotosíntesis se contemplan en las figuras 20.2. y 20.3.

El desarrollo celular utilizando el alga *Scenedesmus obliquus* fue seguido en medio con manganeso y sin manganeso. Las mismas células fueron expuestas sucesivamente a altas y bajas intensidades luminosas. Se observa claramente que el efecto de la deficiencia es el de inhibir la fotosíntesis y es independiente de la intensidad luminosa.

La adición de Mn a las células deficientes se realiza a los 30 minutos (Figura 20.3.), tanto a las mantenidas con luz (A), como a las mantenidas en la oscuridad (B). Las células en estas últimas condiciones fueron posteriormente, a los 60 minutos, expuestas a la luz.

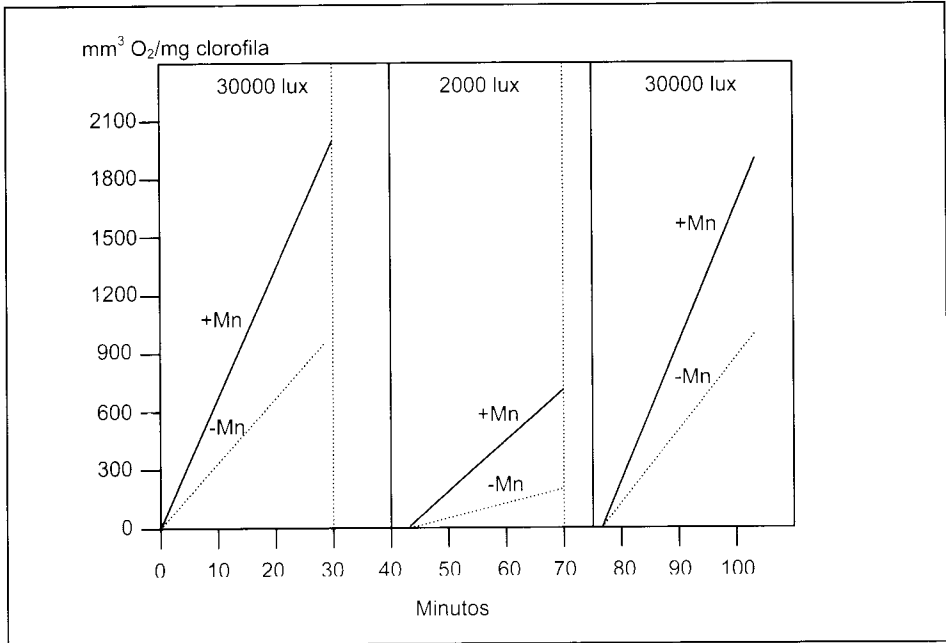


Figura 20.2. Efecto del manganeso en la fotosíntesis del alga *Scenedesmus obliquus*, a alta y baja intensidad de luz.

Los estudios realizados para dilucidar en qué parte del proceso fotosintético interviene el manganeso han mostrado que es en la etapa correspondiente a la fotólisis del agua, donde el elemento participa.

Esta parte del proceso fotosintético corresponde a la conversión de la energía luminosa absorbida por los sistemas clorofílicos, los cuales inducen un flujo electrónico que es convertido en energía química. Las últimas formas de esta energía química originadas son ATP y NADPH.

En las plantas superiores, dos fotosistemas son responsables de esta conversión energética: los fotosistemas I y II. Estas unidades fotosintéticas están formadas por moléculas de clorofila y pigmentos adicionales, como son carotenos y xantofilas, y su función consiste en absorber la energía luminosa y transferirla mediante una resonancia inducida a una clorofila a especial, la cual sólo tiene una función en el fotosistema. En el fotosistema I, esta particular clorofila es una molécula conocida como pigmento 700 (P-700), por su máxima absorción a 700 nm. La energía luminosa absorbida por los carotenos, xantofilas, clorofila b y también por las moléculas de clorofila a

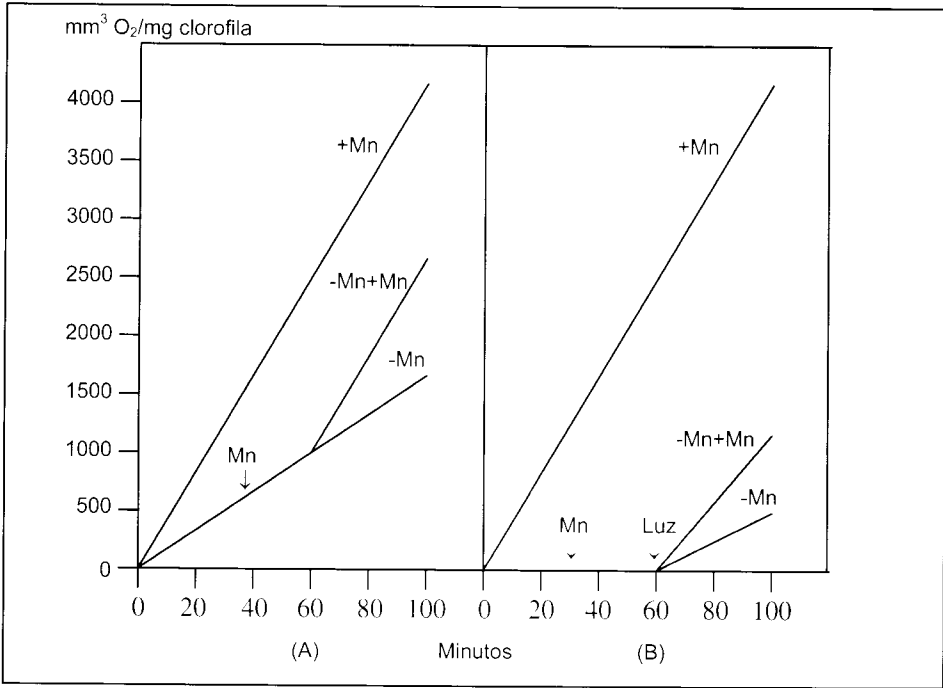
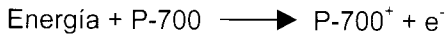
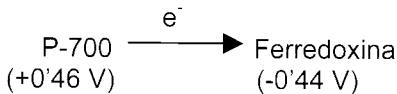


Figura 20.3. Restauración del proceso fotosintético por adición de manganeso a células de *Scenedesmus obliquus* deficientes.

normales en este fotosistema, es transferida a P-700, induciéndose la emisión de un electrón:

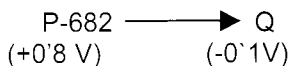


Este es el proceso básico inicial del flujo electrónico. El aceptor de electrones es la ferredoxina (enzima con hierro). Su potencial redox es bajo (-0'44 V), en comparación con el de P-700 (+0'46 V). El electrón emitido por P-700 se traslada debido a la diferencia de gradiente eléctrico:



El fotosistema II funciona de forma análoga. En él, el emisor electrónico es también una molécula de clorofila a, pero en este caso su absorción máxima es a 682 nm. Se la conoce como P-682. El aceptor

electrónico se supone que es una plastoquinona designada por Q. El electrón emitido se traslada de P-682 a Q por su diferente potencial, igual que anteriormente:



En las plantas superiores, estos dos fotosistemas funcionan en serie y son componentes en la reacción de transferencia de electrones del agua a NADP^+ . Por medio de ellos, el agua es donador de electrones y NADP^+ el aceptor. El esquema representado en la figura 20.4. permite ver, de forma resumida, todo el proceso fotosintético del transporte electrónico.

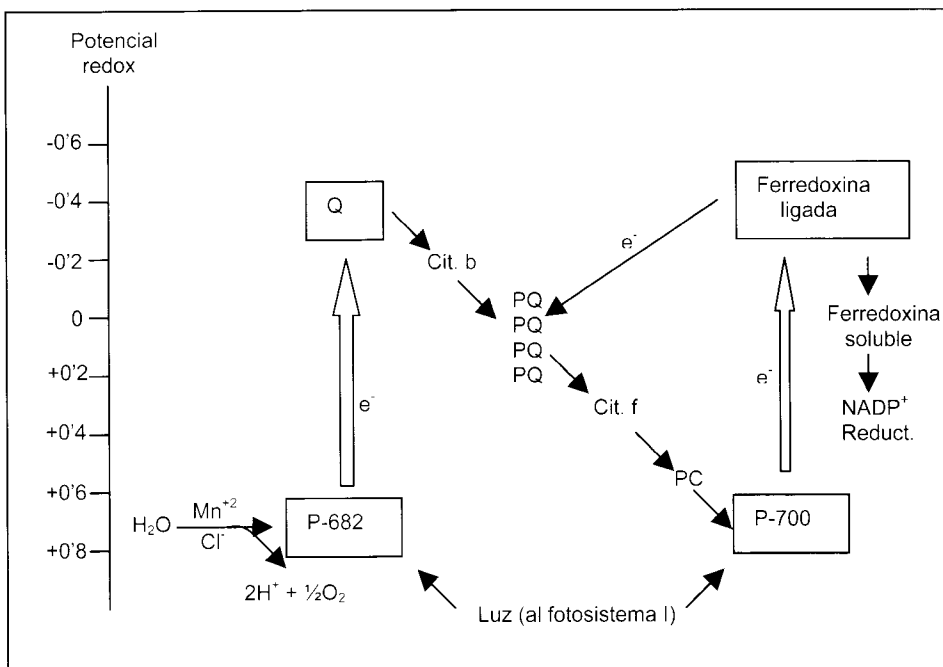
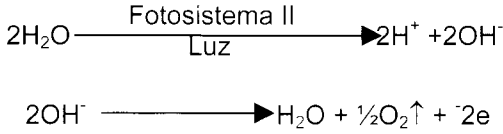


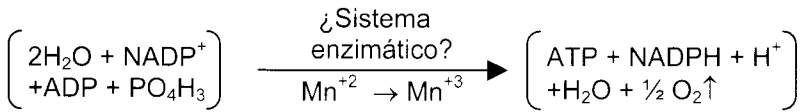
Figura 20.4. Esquema resumido del proceso fotosintético del transporte electrónico.

La luz que incide sobre el fotosistema II ioniza los pigmentos fotorreceptores, transformándolos en iones clorofila⁺ muy ávidos de electrones. Estos potentes aceptores de electrones son verdaderamente capaces de arrancar los electrones al agua. Este es el fenómeno de la fotooxidación (o fotólisis) del agua:



P-682 no reacciona directamente con el agua. El proceso está regulado por sistemas redox aún no conocidos, pero en ellos el manganeso y el Cl^- participan. Una forma de manganeso unida en los cloroplastos sufre una fotooxidación, pasando de Mn^{+2} a Mn^{+3} . En este punto del proceso es donde el elemento ejerce una acción importante.

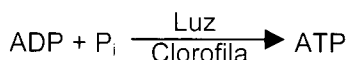
Como consecuencia de esta fotodescomposición del agua, el fotosistema II se reduce por captura de los electrones liberados. El electrón inicial procedente de la ionización del fotosistema II desciende por una cadena de transportadores electrónicos, puesta en evidencia en los cloroplastos (citocromo b \rightarrow citocromo f). El electrón se traslada así recorriendo una serie de potenciales redox cada vez más positivos. Una segunda reacción luminosa, que activa el fotosistema I, debe ser asociada a la anterior. Las radiaciones pueden ionizar al fotosistema I, expulsando un e de las clorofilas; así, este fotosistema I ionizado puede ser el aceptor terminal electrónico para la cadena de citocromos. El electrón liberado por ionización es captado "in situ" por la ferredoxina, con un potencial redox muy bajo. Esta ferredoxina reducida transmite, finalmente, sus electrones mediante flavoproteínas a un aceptor terminal que es el NADP^+ . La ecuación global y resumida de estas transferencias y de las reacciones sucesivas es:



Esta ecuación representa la fotofosforilación no cíclica en el cloroplasto, en la que participan dos reacciones fotoquímicas simultáneas, y durante las cuales los electrones pasan del fotosistema II al fotosistema I, y después al NADP^+ , sin efectuar ningún trayecto cíclico.

Pero además de los ciclos precedentes, se sabe que existe fotofosforilación de apoyo, en la que no solo participa el fotosistema I. Los electrones liberados por las clorofilas por absorción de la luz pasan a la

ferredoxina, volviendo después a las clorofilas nuevamente, por mediación de flavoproteínas y de la cadena de citocromos. Aquí se suministra al medio suficiente energía como para que se produzcan las fosforilaciones acopladas del ADP. Este ciclo se caracteriza, por tanto, por la intervención de una sola reacción luminosa, por la ausencia de desprendimiento de oxígeno, y por la falta de producción de NADPH. Su ecuación es:



20.2.2. TRANSFORMACIONES DE LAS HEXOSAS FOSFORILADAS. GLUCOLISIS Y METABOLISMO DE LOS ACIDOS ORGANICOS.

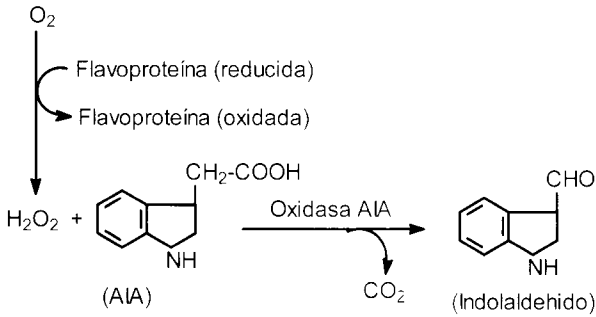
En estos procesos, ya esquematizados en las figuras 18.2, 18.3 y 18.4. (Véase tema 18."El magnesio en la planta."), el manganeso participa en muchas de sus etapas. Como puede observarse, muchos enzimas involucrados en ellas son activados por él. Se comprueba aquí lo apuntado anteriormente respecto al comportamiento semejante que este elemento presenta frente al magnesio en determinadas ocasiones.

20.2.3. METABOLISMO AUXINICO.

La producción auxínica ejerce una profunda influencia sobre el desarrollo de la planta. Por esta razón, han sido muchos los trabajos realizados para conocer los mecanismos que en determinadas circunstancias provocan la inactivación del ácido indolacético (AIA), y con ella el envejecimiento de los tejidos vegetales.

Actualmente se sabe que esta inactivación se produce por un incremento de la actividad de un enzima, denominado oxidasa del AIA, habiéndose comprobado una relación inversa entre la actividad del enzima y el contenido de AIA. Es decir, cuando el contenido de AIA es alto, la actividad de la oxidasa es baja, y viceversa.

Parece ser que en este proceso de inactivación participa una flavoproteína, que origina peróxido de hidrógeno. La oxidación del AIA por el peróxido de hidrógeno es catalizada por el enzima, con lo que se produce algún producto inactivo, probablemente indolaldehído:

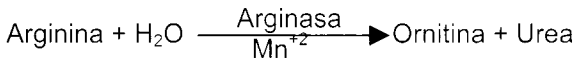


Diversos investigadores consideran que el manganeso está involucrado en esta inactivación del AIA, ya que han observado una anormal alta actividad del enzima en plantas de algodón con exceso de manganeso, y una reducción del nivel de AIA. Y aunque el mecanismo de esta reacción oxidativa no está aún aclarado, se piensa que pueda transcurrir mediante una destrucción de los inhibidores de la oxidasa del AIA. Es muy probable que el cambio de valencia Mn^{+2} a Mn^{+3} esté envuelto en este proceso oxidativo, ya que los Mn^{+2} se producen la destrucción de los inhibidores de la oxidasa AIA, mientras que los Mn^{+3} sí lo hacen. Un contenido apropiado de Mn^{+2} en la planta es admisible que actúe como factor favorable para evitar la oxidación.

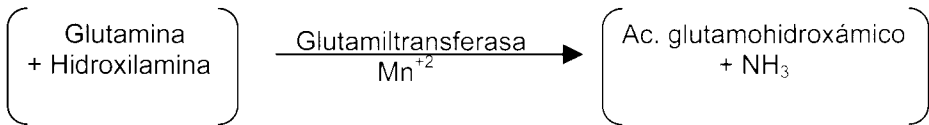
20.2.4. METABOLISMO DEL NITROGENO.

Diversos enzimas relacionados con el manganeso participan en el metabolismo nitrogenado de las plantas. Entre ellos se pueden citar:

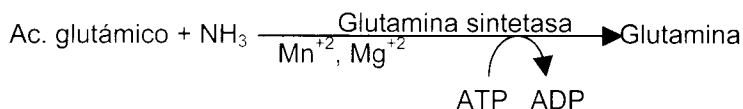
1º) Arginasa, que actúa en el desdoblamiento hidrolítico de la arginina:



2º) Glutamiltransferasa, que cataliza la reacción:



3º) Glutamina sintetasa, que actúa en la formación de la glutamina:



Desde hace ya algún tiempo se sabe también que el manganeso desempeña un papel importante en la reducción de nitratos, y se acepta su participación en la activación para la reductasa de los nitritos y reductasa de la hidroxilamina. La preferencia de la planta deficiente en manganeso por los compuestos amónicos sobre los nitratos, como fuentes de nitrógeno, son pruebas en favor de esta actuación.

20.2.5. OTROS PROCESOS SIGNIFICATIVOS EN LOS QUE EL MANGANESO PARTICIPA.

Muchas experiencias realizadas en campo y laboratorio han puesto en evidencia una estrecha dependencia entre el contenido de manganeso del medio nutritivo y la síntesis del ácido ascórbico. Se ha observado que en muchas plantas, la deficiencia de manganeso conduce a una reducción de vitamina C. Cuando la deficiencia se corrige, el nivel de vitamina C se restablece. Un exceso, sin embargo, ejerce una acción inhibitoria (Tabla 20.1.).

Tabla 20.1. Influencia de diversos niveles de manganeso sobre el contenido de vitamina C en diversos vegetales (K. Scharrer y W. Werner, 1957).

Aplicaciones de Mn por maceta (mg)	Coles verdes	Remolacha	Mostaza
0	670	329	893
10	730	359	1077
50	720	397	694
100	716	321	779

Resultados en mg de vitamina C por 100 g.

Análogos resultados se han obtenido también respecto de pigmentos básicos como carotenos y xantofilas. En la figura 20.5. se pone de manifiesto los resultados obtenidos en experiencias de campo con cultivos de soja.

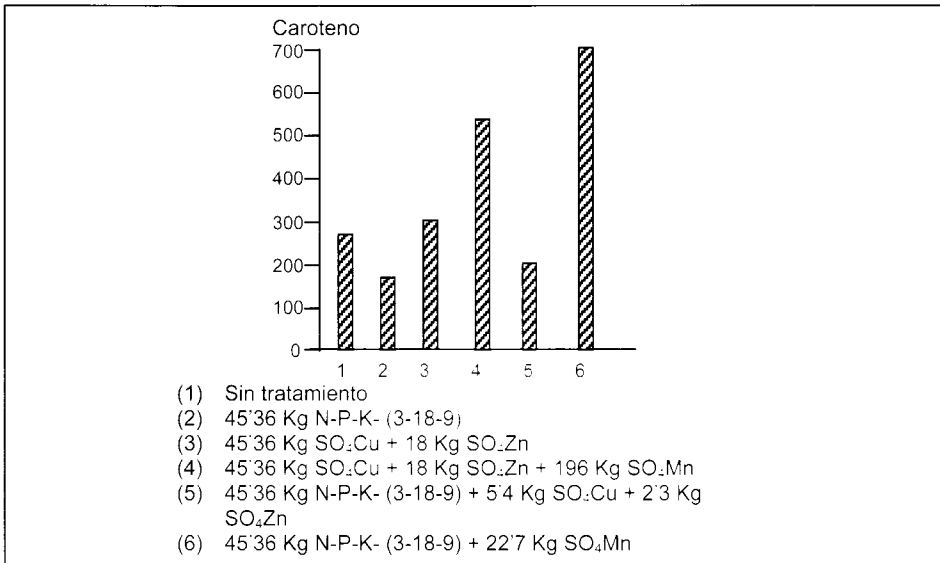


Figura 20.5. Efecto del manganeso frente a otros nutrientes sobre el contenido de carotenos en hojas de soja (K.H. Shutte, 1964).

Como puede observarse, el nitrógeno, fósforo y potasio son los factores limitantes. El cobre y el cinc solo poseen una ligera influencia sobre dicha cifra. El manganeso con cobre y cinc, o con nitrógeno, fósforo y potasio, aumenta notablemente el contenido de caroteno.

Esta positiva influencia que el manganeso ejerce en la biosíntesis de estas sustancias es digna de tener en cuenta, y de gran interés en agricultura, ya que no solo es necesario un aumento de la producción, sino también mejorar la calidad de las cosechas. En este sentido, el contenido de vitamina C se estima en muchos frutos como índice de calidad, con lo cual el manganeso puede inducir aquella. Lo mismo ocurre al considerar la estrecha relación entre el manganeso y el índice de color de frutos como el tomate o el pimiento. Resulta, pues, que estos hechos aportan pruebas indudables de la acción biológica del manganeso, aunque no son tan espectaculares como las que se obtienen de la demostración rigurosa de su actuación en un determinado proceso vital.

20.3. ALTERACIONES EN LA PLANTA POR DEFICIENCIA Y EXCESO.

Aunque no se puede considerar como regla general, los primeros síntomas de la deficiencia de manganeso suelen observarse en las hojas

jóvenes. Aparecen bajo la forma de decoloraciones, que van de verde pálido a amarillo, o manchas cloróticas entre las nerviaciones. Las hojas, en cuanto a tamaño y forma, no difieren de las normales.

El nivel crítico de la deficiencia puede situarse entre 15 y 25 ppm en materia seca, y son muchos los cultivos afectados: avena, trigo, centeno, guisantes, tomates, citrus, etc. La avena es, entre los cereales, la más sensible a la deficiencia, la cual se conoce como "mancha gris" o "moteado gris". Los frutales de hueso, principalmente melocotonero y cerezo, son especies afectadas muy a menudo por la deficiencia.

En los agrios, los síntomas se aprecian como una fina red de nervios verdes sobre un fondo más claro. En estos cultivos, bastante sensibles a la deficiencia, ésta presenta algunas analogías con las de hierro y cinc, pero también conviene señalar que entre ellas existen claras diferencias. El denominador común en las tres es una disminución en el contenido de clorofila, y el que son elementos poco móviles en la planta. Pero la deficiencia de manganeso sólo se manifiesta entre las zonas internerviales, quedando siempre a lo largo de los nervios una franja de color verde. En el caso del hierro son exclusivamente los nervios los que se mantienen verdes, mientras que la totalidad del limbo toma color amarillo intenso. La deficiencia de cinc puede confundirse a primera vista con la de manganeso, pero presenta en cambio una disminución en el tamaño de la hada, y una forma más estrecha y puntiaguda.

El análisis bioquímico y citológico también permite diferenciar las deficiencias de manganeso y hierro. En citrus concretamente, las actividades peroxidasa, catalasa y aconitasa sufren notables descensos en la de hierro y ligeros aumentos en la de manganeso. El análisis citológico muestra también que el número y volumen de los cloroplastos desciende mucho más en la correspondiente al hierro.

La intensificación del cultivo y su repetición en los mismos suelos, son causas que han dado lugar a la frecuente aparición de la deficiencia. Ello está obligando a que cada vez se tenga que prestar más atención a este problema, cuya solución se debe buscar en unas alternativas racionales y en un tratamiento correcto del suelo, especialmente en lo que se refiere a una fertilización equilibrada, en función de las necesidades del suelo y planta, para no crear antagonismos u otras condiciones desfavorables.

Las alteraciones por exceso de manganeso pueden presentarse en suelos ácidos, donde la disponibilidad de este elemento está al máximo. Se conocen casos de toxicidad, por ejemplo, en cebada, alfalfa, tabaco, soja y algodón. Los síntomas, que son siempre más visibles en las plantas jóvenes,

aunque difieren entre especies, se manifiestan frecuentemente como manchas marrones en las hojas. Debido al antagonismo Fe/Mn, a veces el exceso del primero puede inducir simultáneamente a una deficiencia del segundo. El general, puede sospecharse una toxicidad de manganeso cuando en la materia seca de la planta se encuentran valores superiores a las 1000 ppm.

En manzanos y perales, frutales en los que se ha observado asimismo esta toxicidad, la corteza se necrosa interiormente y aparecen protuberancias y grietas sobre las ramas. Estos síntomas son difíciles de diferenciar con los correspondientes a una deficiencia de boro.

Algunos investigadores consideran que la toxicidad puede ser una expresión de una deficiencia auxínica, causada por una alta actividad del enzima oxidasa del AIA, la cual paraliza la expansión celular.

En todos los casos, el examen de los factores ambientales, los análisis de suelo y hojas, es lo más apropiado para concretar esta toxicidad que, por otra parte, no es muy frecuente.

Ya que en la mayoría de los casos las situaciones anormales del manganeso están asociadas con valores extremos de pH, la corrección de estas alteraciones incluye con frecuencia el tratamiento con cal o acidificación del suelo. El encalado reduce la solubilidad del manganeso, y por ello los suelos deben encalarse hasta un pH=5-6 para corregir la toxicidad. La adición de fosfatos puede ser apropiada en estos casos, debido a que se forman fosfatos de manganeso menos solubles.

20.4. ORIGEN, CONTENIDO Y FORMAS DEL MANGANESO EN EL SUELO.

El manganeso de los suelos es originado principalmente por la descomposición de las rocas ferromagnéticas. En la litosfera su contenido medio es de 1000 ppm, pero en los suelos las cantidades totales varían entre 200 y 300 ppm. Sin embargo, y al igual que en el caso del hierro, estos contenidos totales no pueden considerarse como una indicación de su disponibilidad para las plantas, ya que existen muchos factores que afectan a su absorción.

Los principales minerales en los que el manganeso participa como constituyente son: pirolusita (MnO_2), braunita (Mn_2O_3), hausmanita (Mn_3O_4) y manganita ($MnO.OH$). En menor proporción, también entra a formar parte de minerales primarios como olivino, biotina y hornblenda.

Como regla general, puede decirse que este manganeso se encuentra bajo formas insolubles a pH y potenciales altos, que favorecen los estados superiores de valencia. Por el contrario, los pH bajos y las tensiones de oxígeno bajas facilitan las formas solubles, principalmente divalentes.

20.5. DINAMICA DEL MANGANESO EN EL SUELO. FACTORES INFLUYENTES.

A efectos agronómicos, es decir, bajo el punto de vista de su utilización por la planta, el manganeso del suelo puede clasificarse en:

1º) Manganeso soluble o activo.

a) En la disolución del suelo, como Mn^{+2} , estado idóneo para su utilización por la planta. En los suelos neutros y ácidos su nivel está en el rango 10^{-6} a 10^{-4} .

b) Adsorbido a la fracción coloidal como Mn^{+2} , fácilmente intercambiable, y en equilibrio con el presente en la disolución del suelo.

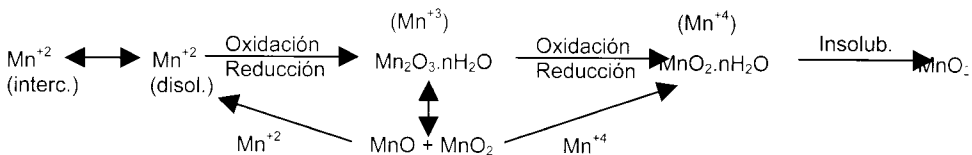
c) Inicialmente como Mn^{+3} , bajo la forma de óxidos de fórmula general $Mn_2O_3 \cdot nH_2O$, pero muy activos y fácilmente reducibles a pH=7.

2º) Manganeso insoluble.

a) Como Mn^{+2} - Mn^{+3} en óxidos de fórmula Mn_3O_4 , poco activo y no reducible a pH=7, aunque sí a pH=2.

b) Bajo la forma de MnO_2 , como Mn^{+4} , prácticamente inerte a efectos de su absorción por la planta, pero que constituye la reserva edáfica del manganeso.

Se considera que entre estos distintos estados de valencia que el elemento presenta en el suelo existe un equilibrio dinámico, que puede establecerse así:



y se desplazará en uno u otro sentido según las características o condiciones del suelo. Como el nivel de Mn^{+2} en éste depende de las reacciones redox que se puedan producir, todos los factores que influyan en este proceso tendrán una gran incidencia sobre la asimilación del elemento por la planta. Estos factores son: pH del suelo, contenido en materia orgánica y actividad microbiana.

20.5.1. pH DEL SUELO.

De acuerdo con el equilibrio anterior, y debido a la alta solubilidad que los compuestos de manganeso presentan bajo condiciones de pH bajos, la disponibilidad para la planta del elemento será elevada en suelos ácidos y en suelos encharcados. En estos últimos, donde dominan los procesos reductores, puede incluso proporcionar niveles de toxicidad. Pero a medida que el pH del suelo se incrementa se favorece la aparición de la forma Mn^{+4} , de tal manera que si alcanza un valor de 8, el MnO_2 altamente estable es el compuesto que más probablemente se encuentre. Este paso de Mn^{+2} a Mn^{+4} puede transcurrir por vías distintas: por oxidación bacteriana, o por el oxígeno atmosférico a pH mayor de 5.5. Inversamente, en condiciones reductoras apropiadas, en especial un nivel alto de materia orgánica, pueden dirigir la reacción hacia la forma Mn^{+2} .

Hay pruebas experimentales, sin embargo, de que el cambio de Mn^{+2} a Mn^{+4} transcurre a través de la forma Mn^{+3} . Particularmente entre pH=6-7, ésta última tiende a estabilizarse, permitiendo mayores posibilidades a las plantas, ya que puede dismutarse o degradarse a MnO u MnO_2 . Pero si el pH es superior a 8, el estado intermedio desaparece por el paso brusco del Mn^{+2} a Mn^{+4} . En este aspecto, es evidente que determinadas prácticas de cultivo pueden tener una notable influencia sobre la asimilabilidad del elemento por sus efectos sobre el pH del suelo. Un encalado excesivo puede ser motivo de aparición de la deficiencia. Por el contrario, las aplicaciones de fertilizantes acidificantes, como los nitrogenados, en particular el sulfato amónico, tenderán a incrementar la solubilidad.

20.5.2. MATERIA ORGANICA Y ACTIVIDAD MICROBIANA.

El pH elevado y la adición de materia orgánica en elevadas proporciones son factores en conjunto importantes en la inmovilización del manganeso en el suelo.

Normalmente, una aportación grande de materiales orgánicos al suelo lleva consigo un incremento de la actividad microbiana, con abundante formación de dióxido de carbono. Por tanto, podría pensarse que altas

cantidades de materia orgánica pueden favorecer el mantenimiento en el suelo de manganeso utilizable.

Sin embargo, en la mayoría de los casos ocurre lo contrario, y con frecuencia estos suelos presentan contenidos menores de manganeso asimilable para valores de pH inferiores a los de otros, con un menor contenido en Humus. Esto ha llegado a suponer que el manganeso se insolubiliza tanto por la formación de complejos húmicos estables, como por el efecto de competencia que pueden provocar los microorganismos del suelo al contener este una considerable población microbiana, que precisa también de bioelementos esenciales, en este caso el manganeso. A este último aspecto hay que sumar también el posible incremento de la oxidación bacteriana del manganeso a estos pH. Es comprensible que altos contenidos en carbonato cálcico disminuyan la disponibilidad del manganeso.

La interacción Fe/Mn puede ser un factor influyente de importancia en la aparición de deficiencias de manganeso en las plantas. En suelos orgánicos ricos en hierro, la adición de quelatos de manganeso para corregir la deficiencia es contraproducente, ya que los síntomas de deficiencia se acentúan al aumentar la relación Fe/Mn. Su explicación de este hecho es, sin duda, la sustitución del Mn por el Fe en el quelato utilizado. El manganeso que se libera es fijado rápidamente al suelo y el nivel de manganeso soluble aumenta.

La deficiencia de manganeso que se encuentra en los suelos orgánicos se considera debida a una escasez del manganeso total, más que a la formación de compuestos húmicos estables. Estos suelos, además, presentan unas condiciones altamente reductoras que favorecen la solubilización del manganeso, el cual puede perderse por lixiviación.

El descenso, por tanto, del manganeso asimilable en el suelo puede ser producido por su escasez total, porque esté inmovilizado o porque se haya agotado a causa de la lixiviación, circunstancia esta que puede darse en suelos de pH bajos y con buen drenaje.

La práctica normalmente aplicada en campo para corregir la deficiencia de manganeso es posiblemente la adición al suelo de sales solubles de este elemento. El sulfato manganeso, SO_4Mn , constituye el compuesto más conocido y utilizado, el cual se aporta a unas dosis que oscilan entre 30 y 100 Kg/Ha, dependiendo del pH que presente el suelo. Para retrasar su oxidación, se mezcla a veces con sulfato amónico en cantidades de 2-3 veces su peso, o con un peso igual de azufre.

Otros compuestos de manganeso también utilizados son el óxido manganeso, sulfato manganeso-amónico y quelatos. Las escorias Thomas es un material útil para ser aplicado a suelos ácidos.

Debe señalarse, no obstante, que cuando el cultivo en crecimiento presenta claros síntomas de la deficiencia, la aplicación de los compuestos citados no da resultados satisfactorios, debido a la lentitud de respuesta en la planta. Es posible, sin embargo, obtener resultados positivos y rápidos mediante una pulverización directa a ella. Se utiliza como más apropiada una disolución de sulfato manganeso al 0'5-0'6 %, elevando el pH de la misma con ayuda de carbonato sódico. Con ello se evita que la hidrólisis ácida del sulfato pueda ocasionar necrosis. La impregnación de la hoja se favorece con la incorporación de un agente activo que tenga gran poder de penetración. Las dosis a emplear para corregir la deficiencia en la mayoría de las plantas puede situarse entre 2 y 5 Kg Mn/Ha.

La incorporación del manganeso directamente a la planta también puede hacerse en forma de quelato Mn-EDTA. En ambos casos, los síntomas de la deficiencia comienzan normalmente a desaparecer en pocos días, después de aplicar 0'5 Kg Mn/Ha.

21

EL BORO EN LA PLANTA Y EN EL SUELO.

Aunque actualmente no hay una demostración absoluta de que el boro sea un elemento esencial para los animales, sí se acepta que lo sea para las plantas. En lo que va de siglo, se han publicado gran número de trabajos que demuestran claramente esta esencialidad.

El hecho de que el boro se encuentra como elemento integrante en algunas plantas fue puesto de manifiesto por primera vez por A. Wittstein y F. Apoiger en 1857. Años más tarde, en 1895, H. Jay señaló, después de gran número de experiencias, que este elemento estaba universalmente repartido en todas las plantas. Y G. Bertrand, en 1912, recomendó ya el empleo de sales de boro como complemento en los fertilizantes minerales N-P-K, para mejorar el rendimiento de los cultivos.

Sin embargo, el primer investigador que sugirió la posibilidad de su esencialidad fue el científico francés P. Mazé, en sus trabajos publicados en 1914 y en otros posteriores, trabajos que en 1923 fueron confirmados por K. Warrington.

La investigación decisiva que dio lugar a la aceptación del boro como un elemento esencial para la vida vegetal se debe a A.L. Sommer y C.B. Lipman, en 1926, y a A.L. Sommer en 1927.

En 1931, E. Brandenburg comprobó que la enfermedad de la remolacha azucarera conocida como "corazón podrido" era debida a una deficiencia de boro, y desde entonces se han ido descubriendo gran variedad de cultivos que pueden quedar gravemente afectados por un suministro insuficiente de este elemento.

21.1. CONTENIDO Y FORMAS EN LA PLANTA.

El boro es absorbido por la planta en distintas formas del ácido bórico: $B_4O_7^{-2}$, BO_3^{-3} , BO_3H^{-2} ó $BO_3H_2^{-}$, bien mediante su aparato radicular o por vía foliar.

Las cantidades requeridas son pequeñas, aunque varían dentro de ciertos límites. Así, en la cebada su contenido es bajo (2-4 ppm en peso seco), mientras que en la remolacha los valores pueden situarse entre 40 y 75 ppm. En general, en los tubérculos y leguminosas se encuentran los contenidos más altos, seguidos de frutales y hortalizas; los cereales son los más pobres. Estos valores, al igual que ocurre con otros oligoelementos, pueden variar considerablemente en plantas de la misma especie, incluso cuando crecen próximas entre sí, en el mismo suelo. Las hojas y los órganos reproductores presentan siempre los contenidos máximos.

El boro es un elemento que presenta una escasa movilidad en la planta. Esta característica se pone de manifiesto cuando se aplican disoluciones de sales de boro directamente por pulverización; el elemento queda fijado preferentemente en las hojas tratadas.

También está comprobado que las plantas jóvenes absorben el boro más intensamente que las adultas, y que la movilidad del elemento de los tejidos viejos a los jóvenes es pequeña. Incluso es frecuente que una hoja particular pueda contener suficiente boro, o exceso del mismo, mientras otra hoja del mismo tallo puede ser deficiente. Esto justifica la tendencia de la brotación a secarse cuando la planta no obtiene un suministro adecuado de este elemento.

Otra particularidad interesante, y también observada, es que por lavado la planta puede perder hasta un 80 % del boro de sus hojas. De esta forma, la planta se autodefende contra una toxicidad provocada por una absorción excesiva.

21.2. FUNCIONES DEL BORO EN LA PLANTA.

El exacto papel que el boro ejerce en el metabolismo vegetal no se conoce con claridad y certeza. La misión de auténticos biocatalizadores que se asigna a la mayoría de los oligoelementos no se puede aplicar a este. Hasta el momento no se ha demostrado plenamente que entre a formar parte de enzimas, o que intervenga en procesos enzimáticos. Sin embargo, existe una enorme experimentación que hace pensar, con justa razón, que el boro actúa

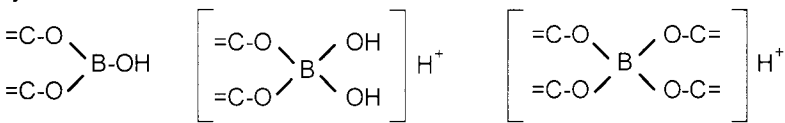
en muchas reacciones biológicas importantes. Y si actualmente se admite que no se puede realizar un proceso biológico sin el concurso de enzimas, se llega por razonamiento a admitir la evidencia, aunque experimentalmente no exista, de que debe intervenir en algunos sistemas enzimáticos, bien como constituyente o bien como componente activo y esencial del sustrato donde se verifica la reacción biológica.

Hay otro motivo que quizás haya dificultado el descubrimiento de algún sistema enzimático que contenga boro, y es que la mayoría de estos sistemas, en cuya estructura interviene un oligoelemento, son capaces de adoptar estados de valencia distintos. El boro actúa nada más que con valencia III, y por tanto no interviene en un proceso redox.

Ahora bien, esta propiedad particular del boro de no actuar más que con valencia III no quiere decir que no haya otras funciones biológicas, que no son procesos redox, en las que no pueda intervenir. Exponemos a continuación algunas de sus importantes funciones.

21.2.1. METABOLISMO Y TRANSPORTE DE CARBOHIDRATOS.

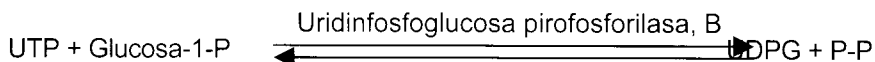
Se atribuye al boro un importante papel en la circulación de los azúcares en el interior de la planta. Está comprobado experimentalmente que la deficiencia de este elemento provoca una acumulación de azúcares en los tejidos. Este hecho se relaciona con la capacidad complejante que presenta el anión borato con los polialcoholes, y por ello se sugiere que cuando se halla en cantidad adecuada en la planta forma complejos boro-hidratos de carbono, que favorecen la movilidad del azúcar. Las estructuras propuestas para este tipo de complejos son:



Estos iones complejos que así pueden formarse, se disocian más ampliamente que los iones libres borato, y presentan, por tanto, una mayor movilidad al atravesar las membranas semipermeables. Esto explicaría que cuando aparece la deficiencia no se forma el complejo, y el azúcar se inmoviliza.

Otra sugerencia alternativa sobre este tema es la que supone que el boro inhibe la acción del enzima almidón-fosforilasa, que actúa en la síntesis del almidón, manteniéndose los azúcares en formas solubles fácilmente transportables. Se considera que esta inhibición se produce de la complejación del elemento con la parte activa del enzima.

Otros investigadores, por último, consideran que el boro promueve la formación o estabilización del uridín-difosfatoglucosa (UDPG), compuesto requerido para la síntesis de la sacarosa:



De esta forma, el boro favorecería la síntesis de sacarosa, que es el primer azúcar transportado en vegetales.

21.2.2. FORMACION DE LAS PAREDES CELULARES. LIGNIFICACION.

La influencia del boro en la formación de las paredes celulares es un aspecto altamente importante. Está comprobado que las células de las plantas deficientes presentan membranas muchísimo más delgadas que las plantas normales. Hoy se admite con cierta evidencia que ello es debido a la activa influencia del boro sobre los enzimas oxidantes.

Los polifenoles o materiales fenólicos existentes en las células requieren una oxidación por mediación del peróxido de hidrógeno en presencia del enzima polifenoloxidasas. Si la actividad catalásica es muy alta, que es lo que ocurre cuando hay deficiencia de boro, no existe peróxido en el sustrato, y por tanto no hay oxidación de fenoles. Esto lleva consigo la debilitación de las paredes celulares, al no sintetizarse la lignina, producto que resulta de la asociación de moléculas fenólicas oxidadas, apareciendo una acumulación de compuestos fenólicos. Estos compuestos, al ir incrementándose, producen la neurosis del tejido, y eventualmente la muerte de la planta. Es posible que al existir una gran relación entre el contenido de lignina y la producción de flavonoides, el elemento esté estrechamente asociado, también, en la biosíntesis de estos compuestos.

21.2.3. INFLUENCIA EN EL METABOLISMO DE ACIDOS NUCLEICOS Y EN LA SINTESIS PROTEICA.

El desarrollo celular tiene lugar normalmente en dos fases. Una es el fenómeno propio y típico de la división celular. La siguiente es el desarrollo y maduración de la célula. Pues bien, se ha demostrado de manera categórica que la división celular no se interrumpe por la deficiencia de boro, por lo que no interviene en este proceso. Sin embargo, sí se interrumpe el desarrollo y maduración de las células. Por otra parte, cuando las células adquieren su

madurez, es decir, cuando los tejidos son ya adultos, la deficiencia de boro no actúa sobre estos tejidos. De ahí que todo síntoma deficitario de boro se caracterice por un hecho común, cualquiera que sea la planta, y es la destrucción de los meristemos terminales, es decir, la paralización de las zonas de crecimiento.

Los hechos expuestos están íntimamente relacionados con el metabolismo de los ácidos nucleicos y con la síntesis protéica. Se sugiere que la muerte de los puntos de crecimiento en plantas deficientes de boro es debida a una disminución en el contenido de ARN y ADN en brotes y raíces. Experiencias realizadas en planta de girasol, utilizando disoluciones nutritivas en ausencia de boro, han mostrado estos efectos. Al aplicarse boro, el incremento de los ácidos nucleicos genera el normal crecimiento celular (Figura 21.1.).

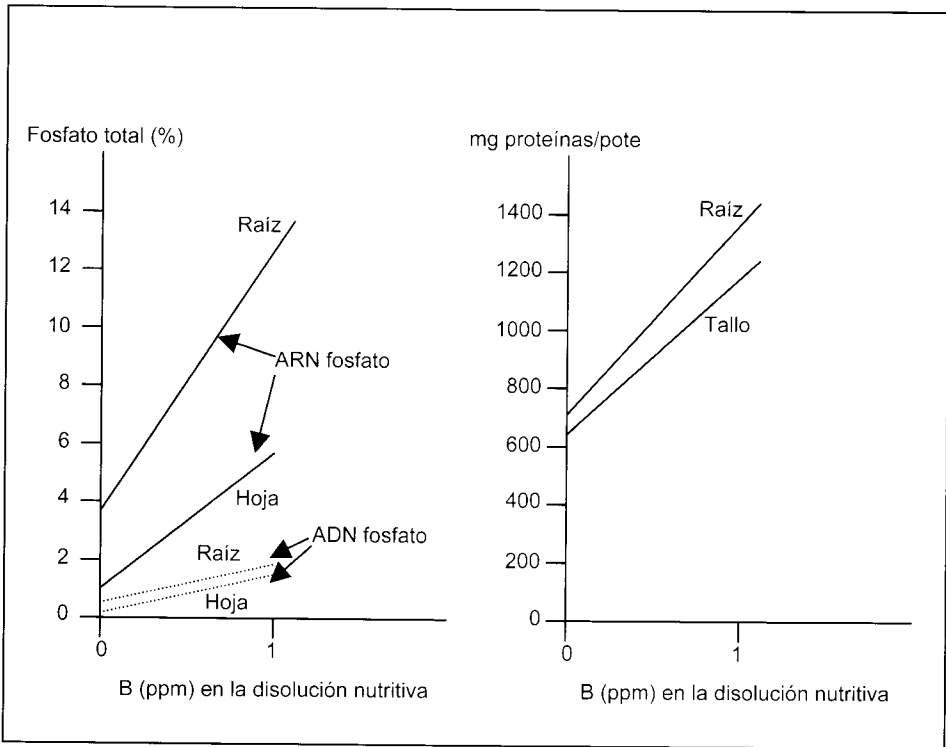


Figura 21.1. Influencia del boro en la síntesis de ARN, ADN y proteínas en plantas de girasol.

Los estados deficitarios de boro llevan consigo, además, acumulaciones en las partes de más edad de variados compuestos nitrogenados, ya sea en

forma inorgánica, como nitrógeno amoniacal, o como compuestos solubles, especialmente amidas. Provocan, asimismo, variaciones sensibles en el contenido aminoacídico, bastante específicas, según la planta de que se trate, aunque generalmente la mayor parte en sentido de incremento de sus contenidos con la deficiencia del oligoelemento. En plantas superiores se han encontrado incrementos de arginina, prolina, serina, ácido glutámico y ácido aspártico. En cambio, se suelen encontrar reducciones en los niveles de tirosina y fenilalanina, precisamente los compuestos precursores de la lignina, tan relacionada al boro.

Estas alteraciones aminoacídicas provocan un efecto de retardo en la síntesis proteica, obstaculizando la incorporación de aminoácidos, con los consiguientes incrementos de nivel.

21.2.4. EFECTOS EN LA SINTESIS DE SUSTANCIAS IMPORTANTES EN LA PLANTA.

El boro está implicado en el metabolismo del fósforo en la planta por su capacidad complejante en forma de boratos con los ésteres glucídicos. Estos compuestos de boro forman complejos con la glucosa-6-fosfato, ribosa-5-fosfato y otros ésteres, donde los carbonos en posición 5 ó 6 están esterificados, pero no forman complejos con ésteres en posición 1. Esta capacidad selectiva que presentan los boratos hace pensar que el oligoelemento puede estar involucrado en la regulación del metabolismo de los ésteres fosfatados, de la misma forma que está implicado en el metabolismo de los azúcares. Como consecuencia de esta actuación, la deficiencia provoca, según diversas experiencias, una acumulación de fosfatos inorgánicos y un descenso en el contenido de fósforo orgánico. Por otra parte, se sintetizan menos fosfolípidos, y siendo éstos constituyentes básicos de la membrana intercelular, ello explica los desórdenes que se observan en la organización de la estructura celular.

La síntesis de vitaminas del complejo B está influenciada igualmente por el contenido de boro. Tal como puede apreciarse en la figura 21.2., los niveles de tiamina, niacina y ácido ascórbico en nabos verdes evolucionan diferentemente, según el contenido en boro.

La síntesis de tiamina y niacina se favorece cuando aumenta el boro; en cambio, el ácido ascórbico disminuye. Las primeras tienen relación con el metabolismo del nitrógeno, el ácido ascórbico no, lo cual puede ser una explicación de estas diferencias.

También se ha comprobado que la concentración del alcaloide nicotina en la hoja de tabaco se encuentra estrechamente relacionada con los niveles de boro en el medio nutritivo. En la figura 21.3. se muestra esta influencia.

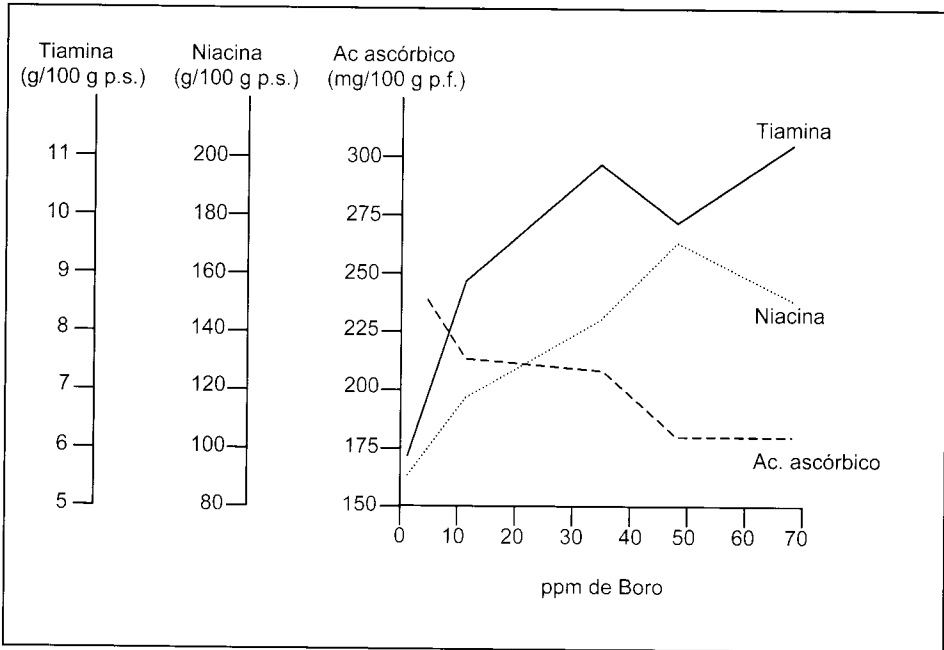


Figura 21.2. Influencia de la concentración de boro sobre el contenido vitamínico de nabos verdes (K.H. Schutte, 1964).

La deficiencia de boro origina un aumento de cinco veces el contenido de nicotina. Los otros elementos con los que se compara no parecen influir apreciablemente en la concentración del alcaloide. Como la deficiencia de boro es frecuente en las zonas productoras de tabaco, es posible que el nivel de nicotina en el tabaco comercial varíe notablemente.

21.3. ALTERACIONES EN LA PLANTA POR DEFICIENCIA Y EXCESO.

La deficiencia de boro se encuentra ampliamente repartida en todo el mundo, y afecta a gran número de cultivos. Los síntomas que se manifiestan

son, por lo general, diferentes, y dependen del cultivo y de la fase más o menos aguda que presente la deficiencia. En este aspecto hay que tener en cuenta que todas las plantas no tienen las mismas necesidades del elemento.

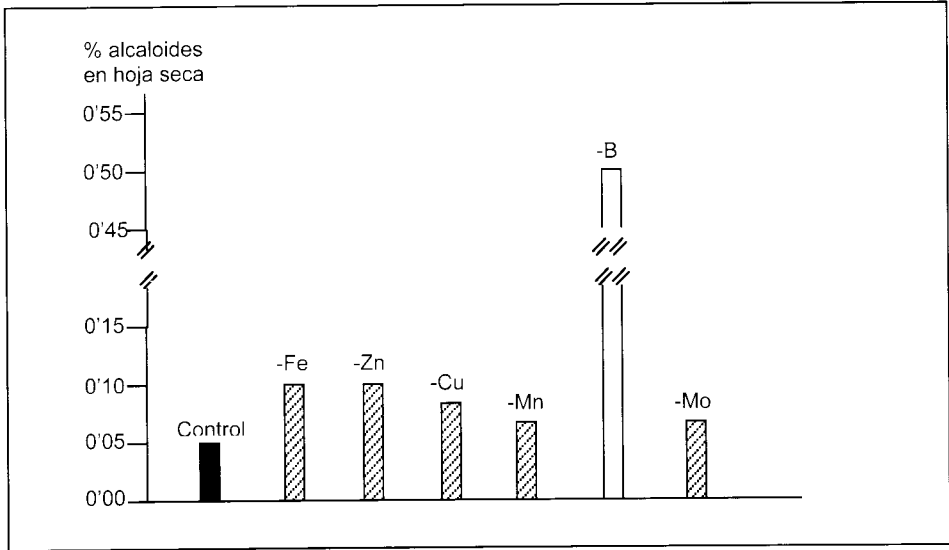


Figura 21.3. Efecto de la deficiencia de boro sobre el contenido en nicotina de hojas de tabaco (K.H. Schutte, 1964).

Las características, no obstante, que pueden considerarse más comunes se concretan a una disminución del crecimiento, superficie foliar, concentración de clorofila, resistencia a las infecciones y a la actividad de enzimas oxidantes, como catalasa, peroxidasa y polifenoloxidasas.

En estado benigno, el único síntoma que se observa es un retraso en el crecimiento. Las hojas jóvenes presentan color verde pálido, tienden a retorcerse y finalmente mueren, cesando el crecimiento terminal.

Entre las plantas de cultivo bajo, la remolacha, tal como se ha indicado en el apartado anterior, es muy sensible a esta deficiencia, y se la conoce vulgarmente con los nombres de "enfermedad del corazón", "corazón podrido" o "mal de piedra". Se manifiesta por una necrosis interna y acorchamiento de los tejidos; las hojas jóvenes se broncean y acaban por ennegrecerse. Únicamente las primeras hojas, que han acaparado todo el boro disponible, siguen desarrollándose, aunque anormalmente.

Los frutales presentan esta deficiencia frecuentemente, en especial peral y manzano. En ellos quedan afectadas primeramente las partes más jóvenes, mientras que los órganos más viejos conservan una apariencia sana; las hojas jóvenes se necrosan progresivamente y se desprenden prematuramente. La floración suele ser abundante, pero se marchita rápidamente. Los frutos presentan deformaciones, superficie irregular, piel rugosa y agrietada, tejido corchoso y de tamaño reducido. Las raíces presentan, en ocasiones, excrecencias análogas a las que producen los nemátodos.

Concretamente en los agrios, el síntoma más característico es la presencia de bolsas de goma en el albedo de los frutos jóvenes, lo que tiende a provocar su desprendimiento del árbol. A veces, este hecho se manifiesta también en los frutos maduros. En ambos casos se aprecian semillas oscuras y poco desarrolladas, corteza gruesa y poco zumo. El limonero es, entre los agrios, uno de los más sensibles.

El tratamiento de la deficiencia es afortunadamente fácil. Pero las características peculiares de este elemento en la planta, derivadas de sus efectos de absorción y transporte, no hacen posible una perfecta delimitación entre contenidos normales y exceso, con riesgo de provocar estados de toxicidad. Esto exige tener en consideración la exacta y rigurosa comprobación del diagnóstico.

En caso de urgencia pueden realizarse pulverizaciones foliares empleando disoluciones de solubor, bórax o ácido bórico, al 0'12 %. Estos tratamientos deben repetirse dos o tres veces cuando se trate de viñedos o árboles frutales en plena vegetación. Cuando la deficiencia no es grave puede corregirse perfectamente por vía edáfica, aplicando 1-2 Kg B/Ha, preferentemente incorporado a los fertilizantes macronutrientes que se utilicen.

Los síntomas visuales del exceso de boro se centran fundamentalmente en las hojas de la planta, apareciendo primero un amarilleamiento característico en las puntas. Esta clorosis tiende a extenderse a los bordes y entre los nervios, con una coloración amarillo naranja. Posteriormente, los bordes se necrosan, aparecen exudaciones resinosas y, finalmente, en los casos agudos, hay una defoliación intensa, e incluso puede dar lugar a la muerte del árbol.

Particularmente en Citrus, los síntomas pueden confundirse, hasta cierto punto, con la toxicidad por flúor, aunque aquí no aparecen exudaciones resinosas. También puede crear dudas con las deficiencias de manganeso o cinc, pero en estos casos hay que tener en cuenta que en la toxicidad de boro, el color entre los nervios es amarillo naranja, mientras que en la deficiencia de

manganeso es verde claro; en la de cinc, amarillo, y además hay una reducción del tamaño de las hojas, que adquieren forma lanceolada. En todos los estados descritos, el análisis foliar puede resolver la duda, por cuanto una concentración de boro superior a 200 ppm se debe considerar ya peligrosa.

La toxicidad por exceso de boro puede ser provocada por tres causas principalmente: aplicación excesiva del oligoelemento para su absorción por la planta (valores superiores a 3 Kg B/Ha), posible acumulación en el suelo de materiales originarios ricos en minerales de boro, y elevadas concentraciones en el agua de riego. Esta última causa puede perjudicar notablemente algunos cultivos. Se estima que un contenido en agua superior a 2 ppm la hace inutilizable para riego.

21.4. ORIGEN, CONTENIDO Y FORMAS DEL BORO EN EL SUELO.

La fuente principal de boro en el suelo es la turmalina, mineral completamente insoluble y muy resistente al humedecimiento. Desde el punto de vista químico, es un borosilicato que contiene aproximadamente un 3 % de boro y cantidades variables de hierro, aluminio, magnesio, calcio, litio y sodio. La liberación del boro de este material bajo la forma de boratos es lentísima, y ello explica el por qué la turmalina nativa del suelo no puede suministrar las cantidades que los cultivos requieren en régimen intensivo y prolongado.

También, y junto a la materia orgánica procedente de residuos vegetales y animales que puede quedar incorporada al suelo, el agua del mar es una fuente de boro digna de ser mencionada. En las zonas costeras suelen hallarse cantidades de este elemento hasta cincuenta veces superiores a las presentes en suelos interiores.

En la mayor parte de los suelos, el boro se encuentra en cantidades extremadamente pequeñas, oscilando generalmente entre 2 y 100 ppm. La mayor parte, sin embargo, no es utilizable por la planta. La forma asimilable (soluble en agua caliente) sólo alcanza un rango comprendido entre 0'4 y 5 ppm, y es suministrada principalmente por la fracción orgánica.

Los suelos con cantidades tóxicas para la vegetación son escasos en número, y suelen presentarse sólo en regiones áridas o en zonas regadas con aguas ricas en boro. Hay que tener en cuenta el hecho de la intensificación cada vez mayor de la agricultura, lo cual implica una continua extracción del elemento del suelo, y por tanto la posibilidad de un empobrecimiento de sus reservas y, consecuentemente, el aumento de estados deficitarios en los

cultivos. A esto hay que unir la circunstancia de que los fertilizantes actuales llevan cada vez menos impurezas, y el aporte, por tanto, de oligoelementos en general, y este es el caso del boro, deja de producirse. El límite de deficiencia se puede calcular en 0'5 ppm, aunque depende grandemente del pH y de su contenido en materia orgánica.

21.5. DINAMICA DEL BORO EN EL SUELO. FACTORES INFLUYENTES.

El movimiento del boro en el suelo está regulado por diversos factores que se hallan íntimamente relacionados entre sí. No se puede por ello efectuar una separación específica de cada uno y señalar su particular influencia. En su conjunto hay que destacar: la textura del suelo, pH, concentración presente, temperatura y naturaleza de los componentes del mismo.

21.5.1. TEXTURA DEL SUELO.

En general, los suelos de textura gruesa son pobres en boro hidrosoluble, ya que de ellos es fácilmente lixiviable y desplazable a las capas más profundas. Esta eliminación depende, como es lógico, del agua que reciban. En cambio, los suelos de textura fina tienden a retener el boro añadido durante períodos de tiempo más largos. Este hecho, sin embargo, no implica necesariamente que las plantas absorban el elemento fijado en las arcillas en cantidades mayores al presente en los arenosos, a iguales concentraciones de boro hidrosoluble. En realidad es al contrario. Se ha comprobado que cuando esto se cumple, las plantas toman mucha más cantidad de boro en suelos arenosos que en suelos de textura fina. La experiencia representada en la figura 21.4. lo pone claramente de manifiesto.

21.5.2. pH Y COMPONENTES DEL SUELO.

Han sido muy numerosas las investigaciones que han orientado sus trabajos al estudio de los mecanismos por los cuales este oligoelemento queda retenido en el suelo. Mayoritariamente se admite que este proceso depende fundamentalmente del pH del suelo y de la naturaleza de sus componentes.

La opinión más extendida es que los máximos responsables de la adsorción son los óxidos de aluminio y hierro que forman parte del suelo, y que al aumentar el pH se incrementa la adsorción, alcanzando un máximo en la zona alcalina.

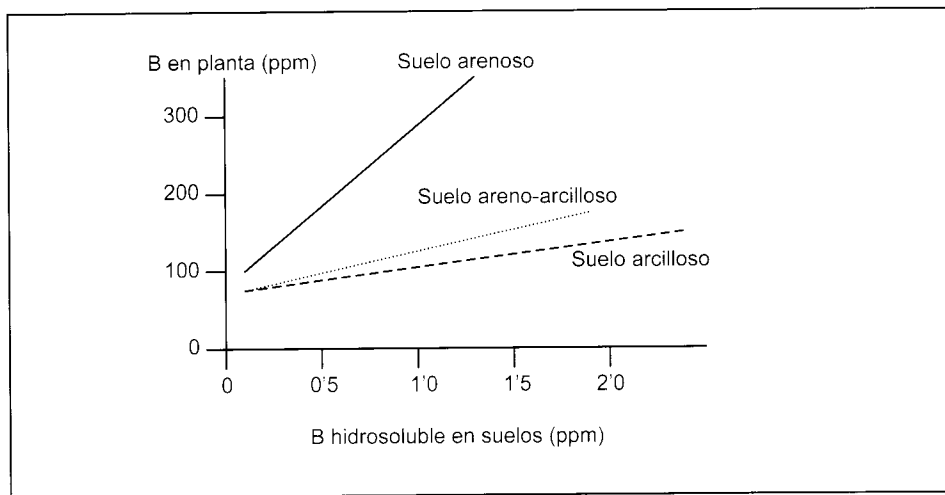
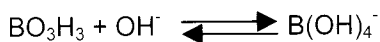


Figura 21.4. Absorción de boro por las plantas en suelos de distinta textura (J.J. Wear y R.M. Patterson, 1962).

En condiciones de pH bajas, el boro hidrosoluble se encuentra fundamentalmente en forma molecular BO_3H_3 en la disolución del suelo, es decir, está muy poco dissociado y, por tanto, prácticamente no queda adsorbido en los coloides. Esto puede ser la razón por la que este oligoelemento es lixiviado tan fácilmente en estas condiciones.

Pero al aumentar el pH, la adsorción tiende a manifestarse, y va aumentando hasta alcanzar un máximo entre 7 y 9, para disminuir rápidamente con mayores aumentos de alcalinidad, hasta el punto de que a $\text{pH}=10$ ya es mínima. El hecho ha sido puesto de manifiesto utilizando muestras de hidróxidos de hierro y aluminio recién obtenidos y otros más envejecidos. La figura 21.5. muestra gráficamente los resultados.

Este proceso puede explicarse si se tiene en cuenta que la forma BO_3H_3 , al aumentar el pH, tiende a ser aceptor de OH^- , apareciendo entonces la forma ionizada $\text{B}(\text{OH})_4^-$:



la cual, por un simple cambio aniónico de sus hidroxilos con los de los hidróxidos de hierro y aluminio, o bien por formación de un complejo borato-dial, pasa a formar parte de un polímero de estos. Las distintas posibilidades de esta fijación se exponen en la figura 21.6.

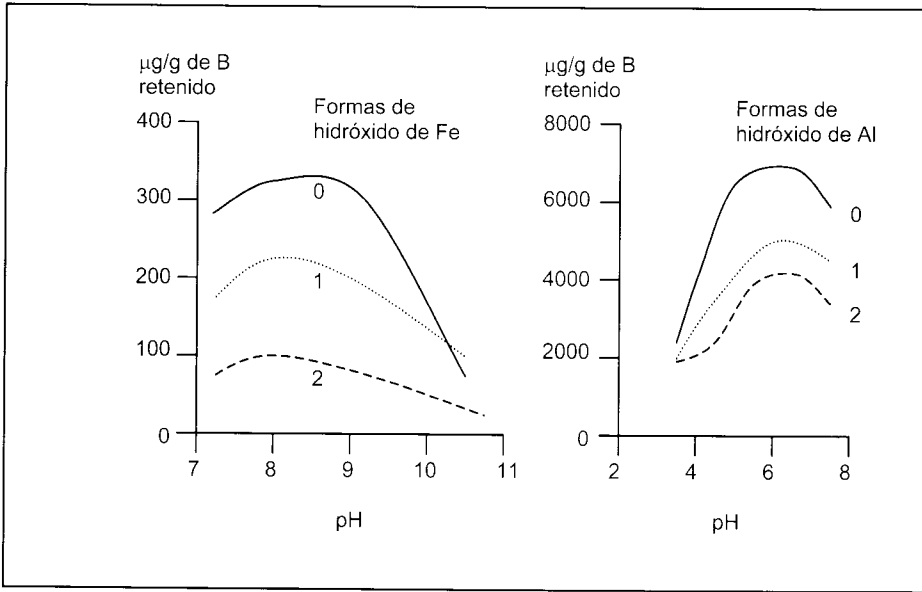
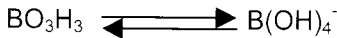


Figura 21.5. Retención del boro por hidróxidos de hierro y aluminio en función del pH. El número de cada curva indica los días de envejecimiento de las muestras en baño de vapor (J.R. Sims y F.T. Bingham, 1968).

Es evidente que al ir aumentando el pH del suelo aumentará la concentración de $B(OH)_4^-$, ya que el equilibrio:



se ve desplazado hacia la formación de la forma jónica, incrementándose así el poder de fijación. La inflexión que se produce a pH cercano a 9 (Figura 21.5.) quedaría explicada por el mayor aumento de OH^- , que desplazaría la reacción de polimerización hacia la izquierda, dando lugar a la desorción de $B(OH)_4^-$ de los hidróxidos donde estaban adsorbidos. Otra razón posible es la competencia que se origina entre los OH^- y $B(OH)_4^-$ por los lugares de adsorción, que a un pH suficientemente alcalino favorecería a los OH^- . Estos dos motivos justificarían que a un pH superior a 9 no se produzcan prácticamente adsorciones de boro en los suelos.

Es digno de señalar, asimismo, que la adsorción del boro por los hidróxidos de aluminio es notablemente superior a la ejercida por los correspondientes de hierro.

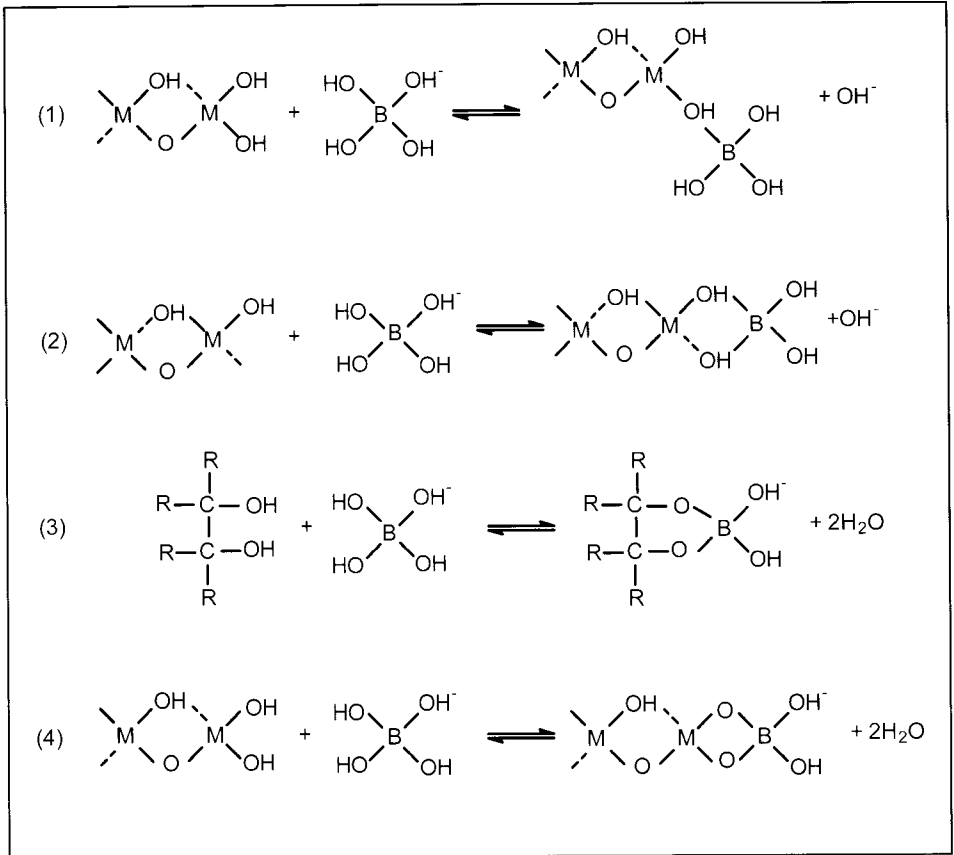


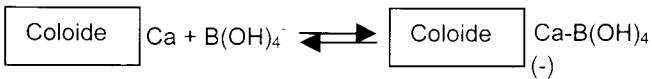
Figura 21.6. Retención de boro en el suelo. (1) y (2): posibilidades de intercambio por hidroxilos. (3) y (4): posibilidades de formación de complejos borato-diol (J.R. Sims y F.T. Bingham, 1968).

La adsorción de boro por las arcillas silíceas se considera que se verifica en una proporción mucho más baja que en los hidróxidos de hierro y aluminio, y concretada a las expansionables. Experiencias realizadas con montmorillonita lavada (libre de hidróxidos) y no lavada muestran una retención muy baja de boro en el primer caso, y un notable aumento en el segundo. Ello hace suponer que el poder de adsorción de las arcillas silíceas está supeditado a las distintas formas del hierro y aluminio que pueden estar presentes como impurezas entre las unidades cristalinas que las constituyen.

El boro puede también ser fijado por la materia orgánica, ya que los grupos hidroxilo de las sustancias húmicas pueden condensarse con el ácido bórico. Se cree que esta retención es más firme que la de los hidróxidos de hierro y aluminio, en condiciones neutras o ácidas. Debido a esta fijación se necesitan mayores cantidades de boro para producir toxicidad en las plantas que crecen en suelos con alto contenido.

La posible influencia del calcio y potasio del suelo en este proceso de adsorción del boro ha sido también objeto de estudio. La posibilidad de que tenga lugar una disminución del elemento asimilable en presencia de Ca^{+2} , por formarse metaboratos insolubles, es más bien escasa, ya que el $(\text{BO}_2)_2\text{Ca}$ sólo puede originarse en disoluciones concentradas de borato, situación difícil de encontrar en el suelo. Además, el metaborato cálcico se redisuelve.

La influencia que el calcio puede ejercer en la fijación del boro parece estar orientada en primer lugar por el aumento de pH, que se produce si la sal de calcio que existe o se añade es carbonato. En segundo lugar hay que considerar la posibilidad de que la adsorción del boro se lleve a cabo a través del calcio como intermediario, particularmente cuando éste se encuentra adsorbido en una proporción elevada al coloide del suelo:



Por otra parte, la adición de potasio debería aumentar la disponibilidad del boro en el suelo, debido a la formación de tetraborato potásico, de gran solubilidad. Sin embargo, se ha encontrado que para valores altos de pH, el potasio disminuye la solubilidad del boro. Por ello, los cultivos que reciben una fuerte fertilización potásica tienen una mayor necesidad de boro.

21.5.3. FACTORES CLIMATICOS.

La temperatura y la humedad del suelo son, por último, factores a considerar en la fijación del boro.

La influencia de la temperatura es de menor cuantía que la de los factores anteriormente expuestos. Algunos trabajos experimentales realizados con este fin, entre 10 y 45°C, parecen indicar una disminución en la fijación con los incrementos de temperatura. El hecho puede explicarse admitiendo en estos casos un aumento de la desorción.

Una mayor influencia la ejerce la humedad. La deficiencia de boro, en determinados cultivos, se acelera en condiciones de extrema sequedad. Este comportamiento, ampliamente observado en campo, aunque no está totalmente aclarado, parece estar relacionado con la proporción de materia orgánica descompuesta, ya que durante perlados de sequía la actividad microbiana es reducida y hay menos destrucción de materia orgánica. También puede ser debido, en parte, a una menor proliferación de las raíces en estos suelos. En general, la deficiencia de boro se manifiesta mayoritariamente en suelos secos y pobres en materia orgánica.

22

EL CINCO EN LA PLANTA Y EN EL SUELO.

J. Raulin, en 1869, fue el primer investigador que, después de señalar el efecto beneficioso del cinc para el desarrollo del *Aspergillus niger*, sugirió su necesidad para las plantas superiores. No obstante, el hecho de que en ese tiempo no estuviesen establecidos los criterios de esencialidad hizo que este importante resultado quedara expuesto, tan solo, como resultado de un hecho experimental.

A principios del siglo actual, el fisiólogo francés P. Macé trató de demostrar que el cinc era fundamental para el desarrollo del maíz. Casi simultáneamente, la escuela de este investigador, especialmente M. Javillier, recomendó por vez primera, en 1912, la conveniencia de la utilización de sales de este elemento como fertilizante.

Pero es en 1926 cuando A.L. Sommer y C.B. Lipman, en California, demuestran con criterios rigurosamente científicos la esencialidad del elemento para la vida vegetal. Como consecuencia de ello, durante el periodo comprendido entre 1927 y 1933 aparecen una serie de trabajos en los que se anotan respuestas al empleo de sales de cinc en cultivos de maíz, guisantes, caña de azúcar, etc., y se realizan los primeros intentos de corregir ciertas alteraciones de las plantas, que en aquel entonces se sospechaba eran debidas a la deficiencia de cinc. En 1932, también en California, se descubre la enfermedad conocida como "Little leaf" (hoja pequeña) en frutales, que era producida, o provocada, por el mismo motivo.

Durante el periodo 1933-1936 se establecen definitivamente estas deficiencias en otros cultivos, y se empieza a extender el uso de las sales de cinc como fertilizantes valiosos por pulverización foliar para su corrección.

22.1. ABSORCION Y CONTENIDO EN LA PLANTA.

El cinc es absorbido por la planta como Zn^{+2} , o como quelato por vía radicular o foliar. En ella, su movilidad no es grande, hallándose preferentemente acumulado en los tejidos de la raíz cuando encuentra un

suministro adecuado en el suelo. Los frutos presentan siempre las mínimas cantidades.

Los contenidos son bajos, y oscilan normalmente entre 20 y 100 ppm en peso seco. Estos valores son función de sus pequeños requerimientos, pero pueden variar dentro de los límites citados según la especie, variedad y condiciones de crecimiento. Las malas hierbas parecen ser mejor acumuladoras de cinc que las plantas cultivadas. La alfalfa es también un extractor potente de cinc, y puede constituir una valiosa especie protectora de huertos que padecen deficiencias de este oligoelemento. Digno de ser señalado es el hecho de que las plantas jóvenes presentan siempre contenidos más altos que las adultas. El maíz es una de las plantas más sensibles a la falta de cinc.

22.2. FUNCIONES DEL CINCO EN LA PLANTA.

Las funciones que el cinc realiza en la planta son variadas, pero no todas suficientemente conocidas. En su gran mayoría son consecuencia de su participación en la formación y funcionamiento de diversos sistemas enzimáticos que intervienen en procesos vitales para la planta. Algunos de éstos se resumen a continuación.

22.2.1. BIOSÍNTESIS AUXÍNICA.

Un buen número de investigaciones realizadas en plantas de tomate y maíz deficientes de cinc, han puesto de manifiesto que este oligoelemento es requerido para la síntesis del ácido β -indol acético, una de las hormonas de crecimiento en las plantas. El aumento o disminución de esta hormona varía de forma paralela con el contenido de triptófano, uno de sus precursores. Cuando en la planta aparece una deficiencia de cinc, la síntesis de la auxina queda reducida indirectamente, por no sintetizarse antes el triptófano, que requiere para ello la actuación del enzima triptófano sintetasa, activado por cinc (Figura 22.1.).

22.2.2. METABOLISMO NITROGENADO.

El cinc es reconocido como un componente esencial del enzima deshidrogenasa glutámica, que cataliza el paso de ácido α -iminocetoglutarico a ácido glutámico, en el proceso inicial de la aminación reductora de la síntesis aminoacídica:

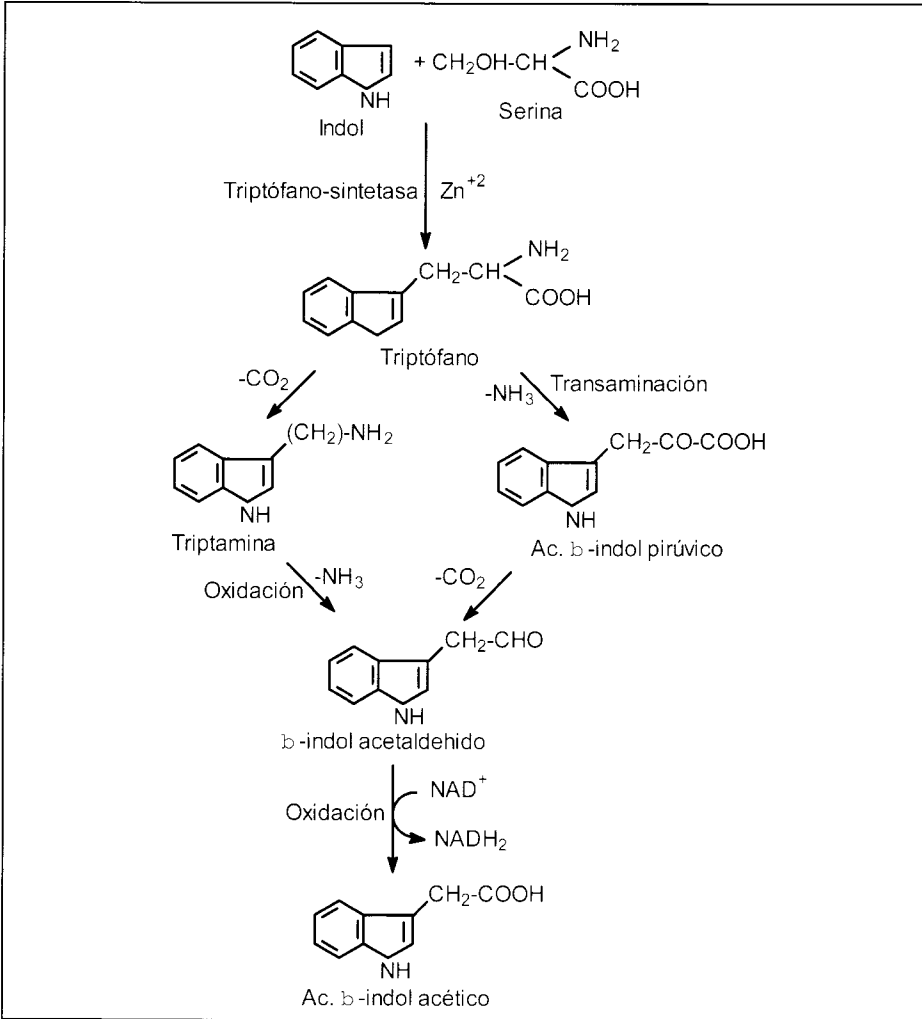
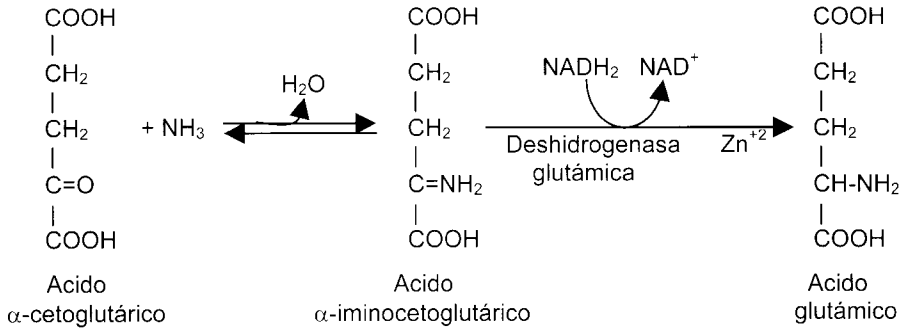


Figura 22.1. Posible ruta metabólica para la síntesis del ácido β -indol acético (S.A. Gordon, 1961).

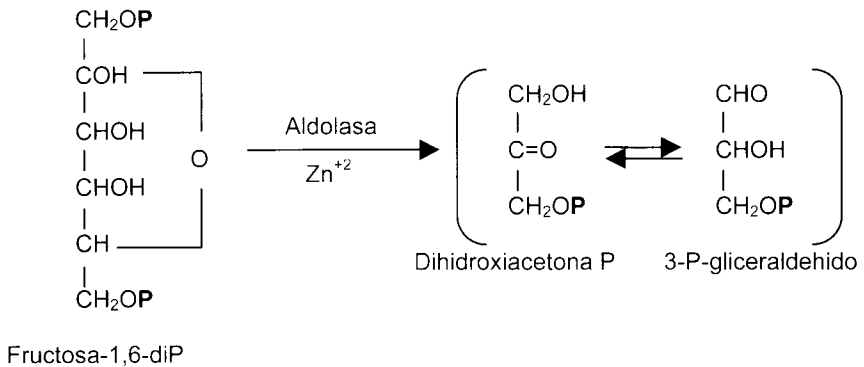


La reacción es de la máxima importancia, pues representa la principal forma mediante la cual el nitrógeno inorgánico se incorpora a los compuestos orgánicos.

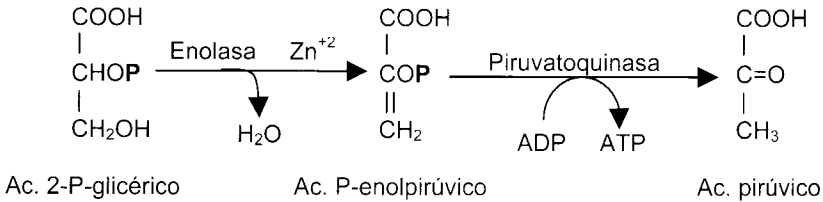
Existe también un buen número de referencias que señalan una gran reducción de los niveles de ARN y del contenido ribosómico en las células de plantas deficientes de cinc. Ello conduce a una paralización de la síntesis proteica y a una acumulación de glucosa, aminoácidos y ADN. Se sugiere que algún enzima que cataliza la síntesis del ARN puede disminuir su acción al faltar cinc.

22.2.3. GLUCOLISIS Y TRANSFORMACION DE LAS HEXOSAS FOSFORILADAS.

En el proceso general de la glucolisis, la escisión de fructosa-1,6-difosfato en 3-fosfogliceraldehido y dihidroxiacetona fosfato es catalizada por el enzima aldolasa, que contiene cinc:



También en una fase posterior del mismo proceso, el paso del ácido 2-fosfoglicérico a ácido fosfoenolpirúvico es activado por el enzima enolasa, que también requiere Zn^{+2} para su activación:

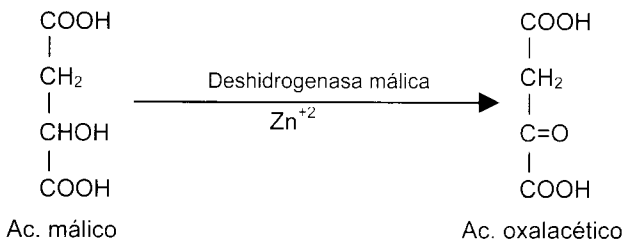


Aparte de los casos anteriormente expuestos, la acumulación de fósforo inorgánico observada en plantas deficientes de cinc hace suponer que puede actuar como activador de enzimas que participan en reacciones de transformación de las hexosas fosforiladas (Véase tema 18. "El magnesio en la planta."). En todas las actuaciones, el cinc presenta una notable semejanza con las del magnesio y manganeso.

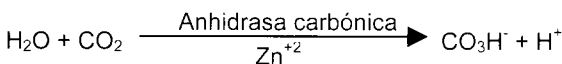
22.2.4. OTROS ENZIMAS ACTIVADOS POR CINCO.

Otros enzimas activados por cinc que merecen ser citados son:

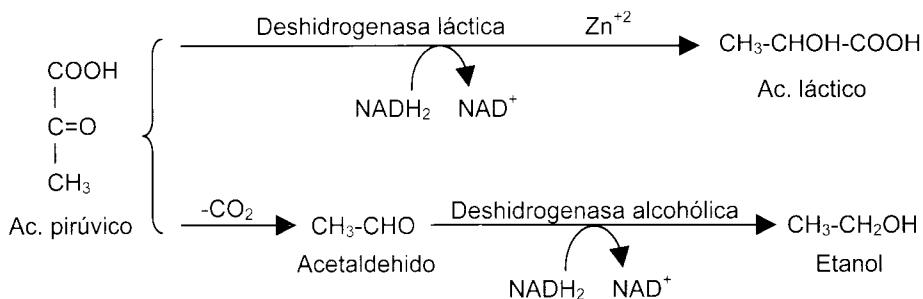
1°) Deshidrogenasa málica, que cataliza el cuarto paso oxidativo en el ciclo de Krebs, de ácido málico a ácido oxalacético:



2°) Anhidrasa carbónica, enzima localizado en los cloroplastos y que cataliza la reacción:



3°) Y las deshidrogenasa láctica y alcohólica, que catalizan la transformación del ácido pirúvico en ácido láctico y etanol, respectivamente, durante el proceso de la fermentación, procedimiento de que disponen gran variedad de microorganismos para obtener energía:



Ultimamente se ha señalado el posible papel del cinc en la síntesis del almidón. Experiencias con plantas creciendo en distintos grados deficitarios, han puesto de manifiesto un menor contenido de almidón y de la actividad del enzima almidón-sintetasa, a medida que la deficiencia se intensifica. Ello hace suponer que este enzima requiera cinc para catalizar convenientemente la síntesis del polisacárido.

22.3. ALTERACIONES EN LA PLANTA POR DEFICIENCIA Y EXCESO.

La deficiencia de cinc, conocida como "folioclrosis", ha sido observada en muchos cultivos: maíz, algodón, girasol, guisante, espinaca, tomate, etc., y muy especialmente en árboles frutales. Los agríos, en este aspecto, son altamente sensibles.

Los síntomas comienzan siempre en las hojas jóvenes, con amarilleamiento progresivo y disminución de tamaño. Los nervios permanecen verdes. En las hojas adultas, sólo en ocasiones se aprecian estas alteraciones.

En los Citrus, los primeros estados de la deficiencia pueden aparecer en las hojas sin afectar a su tamaño normal. Pero a medida que la deficiencia progresa, las nuevas hojas, aparte de ser menores en tamaño, son muy estrechas y puntiagudas, pareciéndose a las hojas de mandarina, es decir, en forma de punta de lanza. Estas últimas características son muy típicas en naranjos, y menos frecuentes en limoneros. En los casos extremos, las hojas más jóvenes tienden incluso a perder el color amarillo v se tornan albinas.

En estado avanzado, la deficiencia lleva consigo un debilitamiento del desarrollo del árbol, apreciándose en sus partes más externas pocas hojas, pequeñas y erectas, que le dan un aspecto de arbusto. Las ramas se secan a partir de sus puntas, se defolian y el desarrollo se paraliza. Los frutos, en estos casos, son pequeños, de poca calidad, insípidos y de poco color.

En general, la aparición de la deficiencia no es simultánea en todos los árboles de una plantación. Ni tan siquiera en todas las ramas de un mismo árbol. Pero el detectar en alguno de ellos ramas con los síntomas antes citados es importante, porque puede servir para suponer la iniciación de la deficiencia y para hacer los tratamientos oportunos para su corrección, antes de que se intensifique.

Bajo el punto de vista analítico, es interesante señalar que todas las plantas deficientes de cinc presentan en sus hojas altos contenidos de hierro, manganeso, nitratos y fosfatos, y bajos en almidón. Se observa también que las células contienen un número de cloroplastos siempre notablemente inferior a las normales. Estas alteraciones justifican el importante papel que el cinc ejerce en los procesos que en el apartado anterior se han expuesto.

Alteraciones por exceso de cinc no es fácil que se presenten en cultivos desarrollados en suelos alcalinos, puesto que a pH elevado el elemento tiende a inmovilizarse.

Sí es frecuente, sin embargo, que aparezcan cuando se trata de suelos ácidos, y también en plantas que vegetan en suelos cercanos a minas de cinc, y en otros cuyos materiales de origen han sido rocas ricas en minerales del mismo. En estos casos, las hojas muestran pigmentaciones rojas en el peciolo y nerviaciones, junto a una amplia clorosis, debido a un bajo contenido de hierro. Se cree que el cinc, al funcionar como agente catalítico de las reacciones oxidativas, impide la reducción del hierro y su transporte en el interior de la planta.

22.4. ORIGEN, CONTENIDO Y FORMAS DEL CINCO EN EL SUELO.

El contenido medio de cinc en la litosfera se estima alrededor de las 80 ppm, y procede de diversos minerales, principalmente silicatos, sulfuros, óxidos y carbonatos. Como compuestos principales pueden citarse los silicatos: willemita (SiO_4Zn_2) y hemimorfita ($\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2\text{Zn}_4\cdot\text{H}_2\text{O}$); sulfuros: esfalerita (SZnFe) y blenda (SZn); óxido: cincita (ZnO); y carbonato: smitsonita (CO_3Zn).

En los suelos agrícolas, el contenido total puede oscilar normalmente entre 10 y 300 ppm. Pero dentro de estos contenidos, las cifras de cinc extraíble por acetato amónico neutro, que es el reactivo aceptado como extractante de lo que se conoce como cinc asimilable, o cinc en condiciones de ser asimilado por las plantas, está por debajo de las 10 ppm.

Hay, no obstante, un aspecto importante que es necesario resaltar en relación con el contenido de cinc útil en los suelos. La parte superficial de muchos de ellos, es decir, los horizontes altos, contienen siempre más cinc que los horizontes bajos. Experiencias realizadas en las grandes planicies de los EE.UU. han puesto de manifiesto que el suelo superficial en la capa arable contiene, como promedio, unos 2/3 del total del cinc asimilable, sobre una profundidad de 80 cm. Se cree que este hecho se debe por una parte a que los residuos de las plantas, al quedar depositados en la superficie del suelo, proporcionan a su demolición, aunque en pequeña proporción, cierta cantidad del elemento; por otra, el cinc no presenta una emigración descendente en el perfil, como ocurre normalmente con otros elementos, ya que tiende a quedar adsorbido por las arcillas y materia orgánica. Es explicable, por las razones apuntadas, que la eliminación de la parte superficial del suelo, por ejemplo, por erosión o por nivelación del mismo, pueda ocasionar la deficiencia de cinc en los suelos con escaso contenido de este elemento.

Bajo el punto de vista de su utilización por la planta, el cinc se encuentra en el suelo bajo tres formas fundamentalmente: como cinc soluble, es decir, el presente en la disolución del suelo; como cinc intercambiable, adsorbido a los coloides; y como cinc fijado.

Esta última forma presenta a veces valores importantes, ya que es un catión capaz de sustituir a algunos componentes de la estructura fija y típica de las arcillas, concretamente aluminio, magnesio y hierro. Se trata de una fijación a la red cristalina, lo cual conduce a que ese cinc quede inasequible para la planta, aunque evidentemente puede considerarse como una reserva y con posibilidades de ser utilizado si hay evoluciones favorables para efectuar nuevas sustituciones, es decir, el intercambio del cinc, a su vez, por otros elementos. El comportamiento del cinc en el suelo está, por consiguiente, básicamente condicionado a la fracción soluble y a la intercambiable.

22.5. DINAMICA DEL CINCO EN EL SUELO. FACTORES INFLUYENTES.

Los factores que deben considerarse como influyentes en la dinámica del cinc en el suelo son variados. Entre ellos, los de mayor incidencia y que merecen tratarse son: pH, textura y composición química del suelo.

22.5.1. pH DEL SUELO.

De forma similar a lo que ocurre con el cobre o hierro, por ejemplo, cuando el medio es excesivamente ácido (pH inferior a 5), el cinc se encuentra más disponible, pero también puede experimentar pérdidas por lixiviación al incrementarse su solubilidad. Cuando el pH aumenta tiende a insolubilizarse como hidróxido, correspondiendo la disponibilidad mínima a valores de pH entre 6 y 7. Experimentalmente se ha comprobado que la absorción de cinc por las plantas disminuye aproximadamente a la mitad cuando el pH del suelo aumenta de 5 a 7.

Si el pH aumenta excesivamente, su disponibilidad puede incrementarse o disminuir. Si la alcalinidad del suelo es debida al ión sodio (suelo alcalino sódico), aumentará por formación de cincato sódico soluble. Por tanto, en estos casos y en aquellos otros en los que el suelo sea acidificado para aumentar la disponibilidad de otros elementos, podría producirse toxicidad de cinc.

Por el contrario, cuando el suelo es alcalino calizo, como el cincato cálcico que se forma es insoluble, también se inmoviliza, y como consecuencia quedará menos disponible. Esto se produce cuando se encalan suelos ácidos con exceso, lo cual puede producir la deficiencia del elemento. Parece ser que un pH alrededor de 6 es el óptimo para la mejor movilidad del cinc. A pH=5 la concentración de Zn^{+2} en la disolución del suelo es, aproximadamente, de 6'5 ppm, pero a pH=8 desciende a 7 partes por trillón.

22.5.2. TEXTURA Y COMPOSICION DEL SUELO.

La deficiencia de cinc se ha demostrado que tiende a ser más pronunciada en suelos ligeros (arenosos) que en suelos pesados (arcillosos) y calizos. En lugares donde se ha apreciado la existencia de deficiencias de una forma importante, el análisis granulométrico del suelo suele presentar 70-80 % de arena, 10 % de limo y poca arcilla. Estos suelos son fundamentalmente pobres en materia orgánica, nitrógeno y cal, medianamente provistos de fósforo y potasio y con un pH entre 7 y 7'5. Debido a esta composición, los riegos y las lluvias penetran fácilmente en ellos realizando un intenso lavado.

Los suelos pueden adsorber el cinc sobre su complejo de cambio como Zn^{+2} , $Zn(OH)^+$ y $ClZn^+$. Algunos investigadores han señalado que la montmorillonita puede adsorberlo particularmente a pH cercanos a 7, o a valores más altos. Se sugiere que tal adsorción pueda ser, en cierto grado, debida a la formación de hidróxidos precipitados dentro de la estructura arcillosa.

El exceso en el suelo de fósforo total o soluble se correlaciona frecuentemente de forma positiva con la deficiencia de cinc. El hecho se atribuye por una parte a la formación de fosfatos de cinc insolubles en el suelo, y por otra a su inmovilización en la planta por el exceso de fósforo absorbido. Esta relación se pone de manifiesto en la figura 22.2.

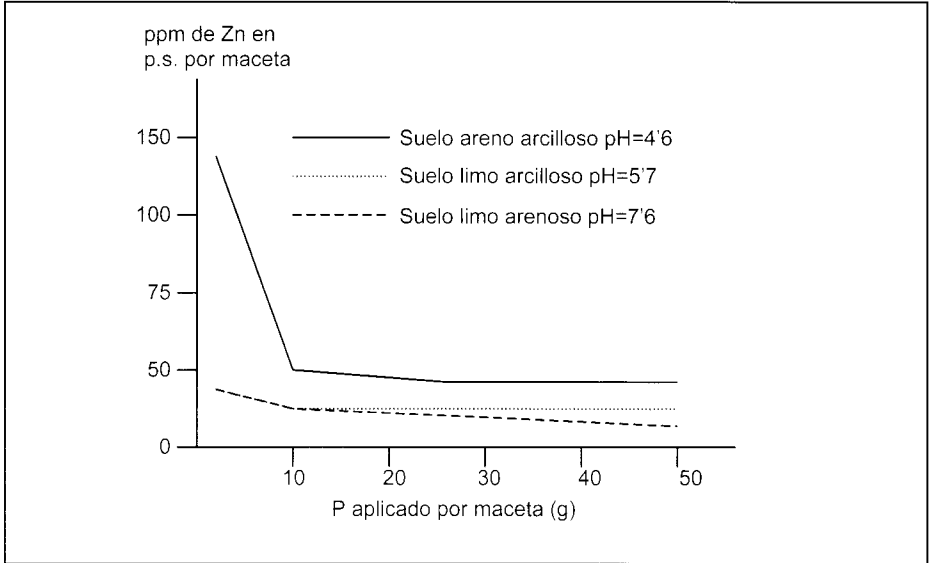


Figura 22.2. Influencia de la aplicación de fosfato sobre el contenido de cinc en hojas de plantas de tomate desarrolladas en macetas con suelos diferentes, de diferente textura y pH (G.H.Cannell, 1960).

Los mayores descensos se observan en el suelo areno arcilloso de pH=4'6, ya que en éste el contenido en cinc hidrosoluble debe ser siempre muy superior al presente en los otros, de pH más alto, en donde el elemento estará en su mayor parte insolubilizado como hidróxido.

La naturaleza de esta influencia no está, sin embargo, suficientemente aclarada, ya que no siempre, según otras experiencias, un exceso de fósforo provoca estos efectos.

La deficiencia de cinc está asociada muchas veces con la de cobre. Se supone que la deficiencia de este elemento restringe la absorción de cinc por las raíces, de forma que en los casos de deficiencia aguda de cobre pueden aparecer síntomas de la de cinc, incluso habiendo suficiente cantidad de cinc

asimilable en el suelo. En estos casos, la corrección de la deficiencia de cobre corrige la de cinc; pero si no lo está, se impone además el tratamiento del cultivo con sales de cinc.

Cantidades elevadas de compuestos nitrogenados en el suelo, como consecuencia de una amplia aplicación de fertilizantes, se ha señalado como factor influyente en el movimiento del cinc. Posiblemente, esta influencia tenga una íntima relación con el pH, ya que el nitrato sódico tiende a disminuir su absorción, mientras que el nitrato y sulfato amónicos la aumentan. Por otra parte, hay que tener en cuenta también que grandes aportaciones de nitrógeno pueden provocar la deficiencia de cinc a causa del diferente ritmo de absorción por la planta de los dos elementos.

Hay que señalar, finalmente, dentro de este apartado, las interacciones del cinc con la materia orgánica del suelo. Los estudios realizados en este campo indican que pueden formarse complejos orgánicos, tanto solubles como insolubles. Los primeros parecen estar asociados con grupos amino, mientras que los insolubles derivan de la reacción del cinc con los ácidos húmicos.

Deficiencias de cinc se han observado algunas veces en suelos con altos porcentajes de materia orgánica, y muy significativamente después de aportes de estiércol de granja. En otros casos, la esterilización de suelos deficientes en cinc ha conducido a una corrección de la deficiencia. Si estos efectos son reales, ello supondría que los microorganismos del suelo pueden estar implicados en la inmovilización del cinc, al menos temporalmente.

La opinión que se mantiene de todo ello es que la materia orgánica no tiene una gran significación en la inmovilización del cinc.

23

EL COBRE EN LA PLANTA Y EN EL SUELO.

La presencia del cobre en las plantas es un hecho reconocido desde hace más de 150 años. Sin embargo, la evidencia decisiva de su esencialidad no se establece hasta el primer tercio del siglo actual.

La deficiencia del cobre en las plantas fue primero descrita alrededor de 1864, como una enfermedad aparecida sobre cultivos que habían crecido y desarrollado en suelos regenerados de tipo turboso en Holanda, así como en otros de naturaleza arenosa y ácida en Florida y Australia. En 1897 se vió que podía ser corregido por el caldo bordelés, aunque no se le dió importancia al tratamiento. Años después se pudo comprobar que podía ser evitada durante un periodo de años por adición al suelo de sulfato de cobre. En 1931, A.L. Sommer, después de un amplio trabajo experimental, establece de manera definitiva la esencialidad del cobre para las plantas. Y en 1933, E. Brenderburg concreta la identidad de los síntomas de la deficiencia. Ya en 1949, R. Hill expone algunas de las importantes funciones que este elemento ejerce en la vida vegetal.

23.1. CONTENIDO Y FORMAS EN LA PLANTA.

El cobre es requerido por las plantas en muy pequeña cantidad. Su contenido medio oscila generalmente entre 2 y 30 ppm en peso seco. Entre estos límites puede variar notablemente, dependiendo no sólo de las características que presenta el suelo: composición, contenido en caliza, pH, etc., sino también de la planta: especie, grado de madurez, parte considerada, etc.

En este último aspecto, suelen observarse corrientemente amplias fluctuaciones. Ello se ha observado en distintas variedades de trigo, desarrolladas sobre el mismo suelo, en donde la diferencia de contenido de cobre, y consecuentemente de las necesidades del oligoelemento, llegan casi a ser triple de una a otra variedad. Las diferencias son todavía mucho más acentuadas en algunos casos, cuando se trata de especies distintas.

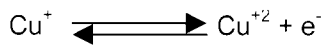
Estas variaciones, que se han puesto repetidamente de manifiesto entre algunas especies, y que son consecuencia de los requerimientos superiores de unas sobre otras, hace que en ciertas plantas se desarrollen síntomas deficitarios antes que en cualquier otro vegetal, pudiéndose utilizar estas plantas como indicadoras del estado de adsorción del oligoelemento en el suelo. En el caso del cobre puede servir como planta indicadora el apio, que por sus grandes necesidades en este oligoelemento puede suponer que se encuentra en el suelo en estado de fácil absorción, si no presenta síntomas de deficiencia.

El cobre es absorbido por la planta como Cu^{+2} , o como complejo orgánico (Cu-EDTA, por ejemplo), por vía radicular o foliar. No es muy móvil, aunque puede desplazarse en cierta proporción de las hojas viejas a las jóvenes. Este traslado depende del estado en que se encuentra, y del grado de deficiencia que la planta presente. En los casos agudos queda prácticamente inmóvil.

Aunque el cobre se puede detectar en los distintos órganos del vegetal, es en las hojas verdes donde se halla en mayor concentración. Se admite que es en el aparato mitocondrial donde está básicamente localizado (70 %). También las semillas son órganos con alta concentración.

23.2. FUNCIONES DEL COBRE EN LA PLANTA.

Las funciones del cobre en la planta están asociadas con un buen número de enzimas, ya sea como activador, o formando parte de ellos como grupo prostético. Al igual que el hierro, su capacidad de experimentar reducción reversible:

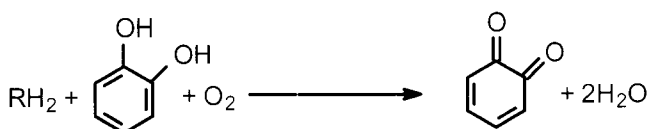


le permite intervenir en una gran variedad de procesos redox. Esta característica del cobre representa, posiblemente, su función más importante, pero no es la única. Su participación en otros procesos es también relevante.

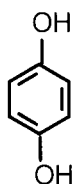
23.2.1. ENZIMAS CON COBRE Y PROCESOS EN LOS QUE INTERVIENEN.

En el momento actual se conoce un buen número de enzimas conteniendo cobre. Entre ellos, los más conocidos son fenolasa, laccasa y ácido aspártico oxidasa. Otros son: diamina oxidasa, citocromo oxidasa, superóxido dismutasa y plastocianina.

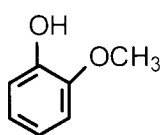
Fenolasa, llamado también tirosinasa y polifenol oxidasa, cataliza dos importantes reacciones: hidroxilación de ciertos monofenoles a o-difenoles, Y la oxidación de éstos a o-quinonas:



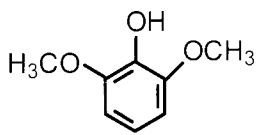
Laccasa, también conocida como p-difenol oxidasa, cataliza la oxidación a quinonas de varios polifenoles y compuestos relacionados, como:



Hidroquinona



Guayacol



Pirogalol

pero no tiene acción en la oxidación de monofenoles.

Tanto fenolasa como laccasa contienen dos distintas formas de cobre. Una en forma oxidada, como Cu^{+2} , pero que puede ser reducida a Cu^+ por el sustrato y reoxidada por oxígeno. Y otra, en la que está presente como Ca^{+2} , tanto en ausencia de sustrato como de oxígeno.

Los distintos compuestos que se originan en estas oxidaciones fenólicas están ampliamente involucrados en el importante proceso de la lignificación.

La lignina se forma a partir de carbohidratos originados en el proceso fotosintético. El primer paso parece ser la formación de los aminoácidos fenilalanina y tirosina, que pueden convertirse en diversos derivados del ácido cinámico. Estos, por reducción, dan lugar a los alcoholes cumarílico, coniferílico y sinapílico, a partir de los cuales se sintetiza la lignina (Figura 23.1.).

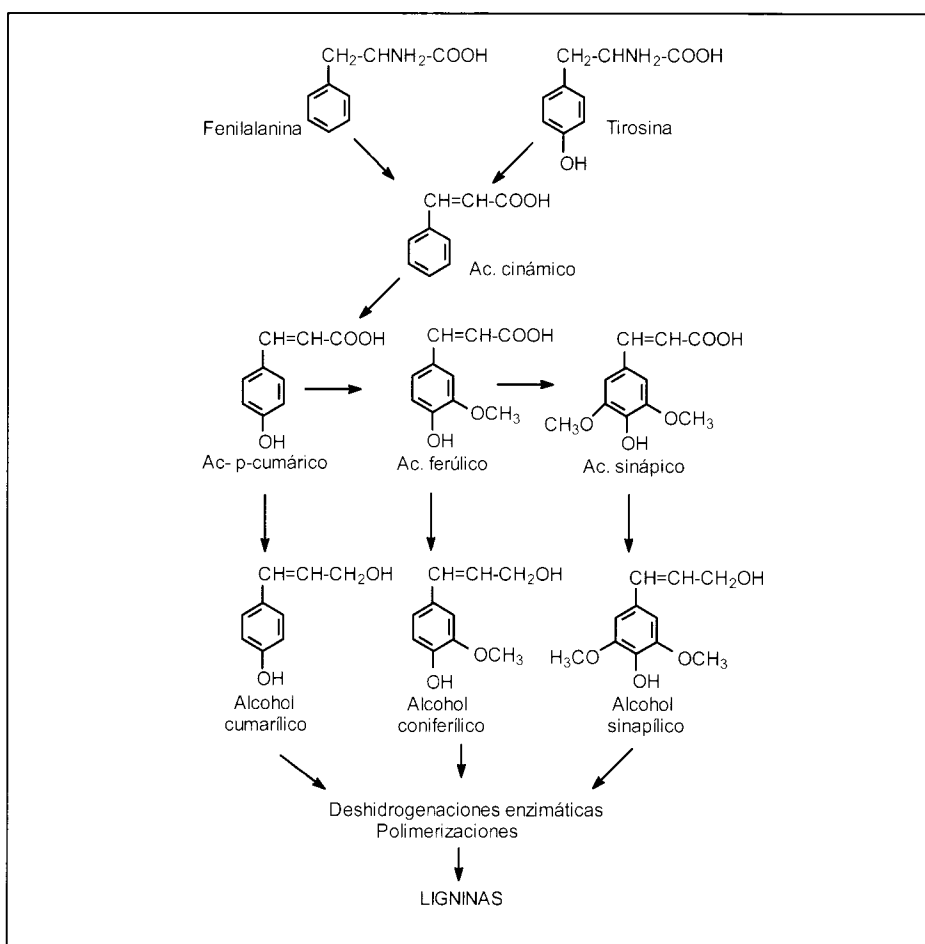
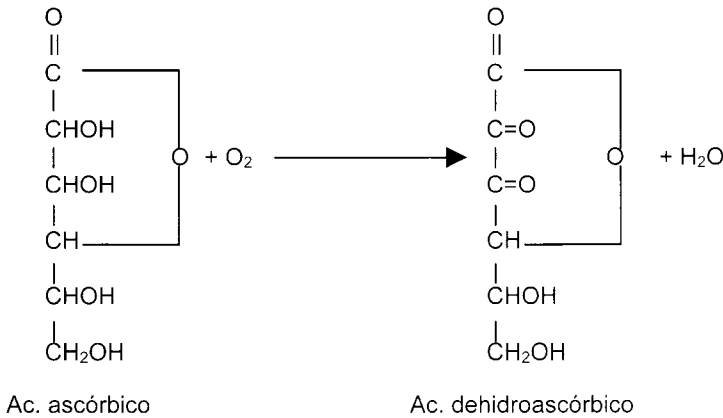


Figura 23.1. Algunos pasos resumidos en la biosíntesis de la lignina.

En el caso de una deficiencia de cobre, los enzimas fenoloxidasas no presentan actividad, se sintetiza menos lignina, los tejidos quedan debilitados y los órganos de la planta tienden a encorvarse por esta pérdida de rigidez. Como se verá más adelante, estos efectos repercuten grandemente en el transporte de nutrientes desde la raíz a la hoja.

La biosíntesis de alcaloides, la formación de quinonas intermediarias de la cadena de transporte electrónico de la fotosíntesis y respiración, y la producción de manchas melanóticas que se observan en plantas dañadas, son procesos también en los que estos enzimas participan. Al deprimirse la fotosíntesis es lógico que haya un descenso de los contenidos de clorofilas y pigmentos carotenoides y aparición de clorosis.

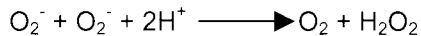
Acido ascórbico oxidasa cataliza la oxidación del ácido ascórbico a ácido dehidroascórbico:



La presencia de este enzima se ha observado en las paredes celulares y en el citoplasma. Su función fisiológica no está aún aclarada, aunque se supone que está relacionada con el proceso de respiración mitocondrial.

Diamina oxidasa cataliza la oxidación de aminas por diferentes mecanismos, e interviene en el metabolismo de poliaminas precursoras de alcaloides y probablemente auxina. Se considera integrante de los núcleos celulares.

Superóxido dismutasa es un enzima que contiene dos átomos de cobre y dos de cinc. Cataliza la dismutación de radicales superóxido generados por fotorrespiración:



La presencia de este enzima habilita así a los organismos a sobrevivir en presencia de oxígeno molecular.

Citocromo oxidasa es el enzima terminal en la cadena de transporte electrónico mitocondrial. Contiene hierro y cobre. Se considera que el transporte de aniones debe tener lugar a través de este enzima.

Plastocianina, aislada por primera vez del alga *Chlorella*, se considera que interviene en la cadena de transporte electrónico entre dos de los centros de absorción de la luz en la fotosíntesis, como dador inmediato del P-700 (Figura 20.4.).

23.2.2. OTROS PROCESOS EN LOS QUE EL COBRE PARTICIPA.

Gran número de investigaciones han puesto de manifiesto que el cobre participa de manera importante en el metabolismo nitrogenado y glucídico.

En plantas deficientes de cobre se ha observado un notable incremento de aminoácidos y paralización de la síntesis proteica. Se cree que esta acción es debida a la función activadora que el cobre pueda ejercer sobre los enzimas que intervienen en la síntesis de los ácidos nucleicos.

Se ha demostrado también la influencia favorable que ejerce sobre las leguminosas en lo que se refiere a la fijación del nitrógeno atmosférico. Cuando el suelo está bien provisto de cobre hay una fijación normal, mientras que en los suelos deficientes la fijación queda atenuada. Se considera que el cobre participa en la síntesis de la leghemoglobina de los nódulos. También se sugiere que la deficiencia hace disminuir la actividad del enzima citocromo oxidasa en los nódulos, lo que puede producir en sus células un incremento de la tensión de oxígeno que dificulta el proceso de la fijación del nitrógeno.

Se debe indicar, finalmente, que el cobre es un micronutriente esencial en el balance de bioelementos que en la planta regulan un proceso tan trascendental como es la transpiración. El flujo es originado por la absorción de agua que, procedente del suelo, asciende a través de las raíces y tallos hasta la hoja, donde se evapora casi en su totalidad, difundándose en el aire por sus estomas. Esta diferencia entre los gradientes de presión existentes en la raíz, y determinados por la evaporación, es la que provoca la corriente ascendente necesaria para el transporte de nutrientes a la hoja.

Este proceso, de vital importancia para la vida vegetal, está regulado, entre otros factores, por un balance equilibrado de oligoelementos, entre ellos principalmente cobre, cinc y boro, de tal manera que la marchitez de una planta, es decir, el momento en que la cantidad de agua en todo su organismo no es la normal para la realización de sus funciones fisiológicas, está muy ligada al contenido de los citados oligoelementos. La experiencia representada en la figura 23.2. pone este hecho de manifiesto.

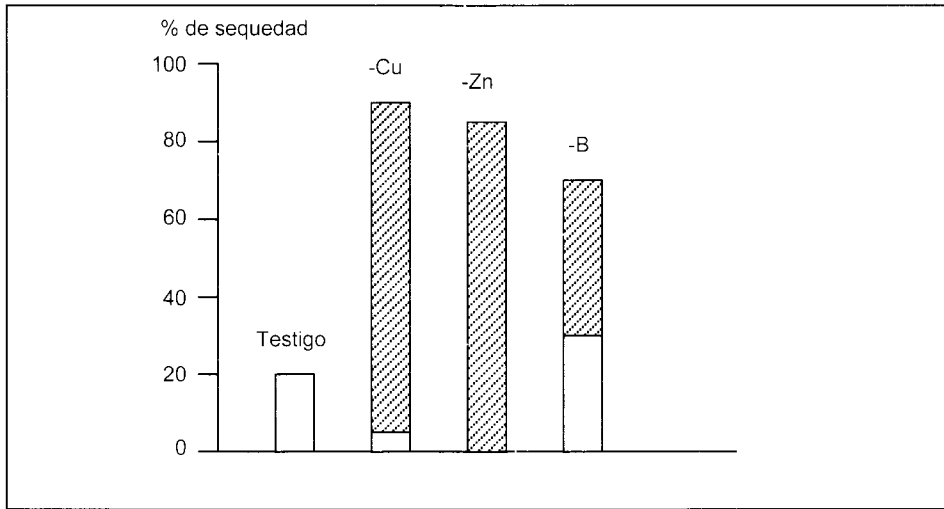


Figura 23.2. Influencia del cobre, cinc y boro en la marchitez de rábanos (K.H. Schütte, 1964).

Como puede observarse, las plantas que reciben una nutrición mineral equilibrada fueron menos propensas a la sequedad. Las plantas con deficiencias de cinc y cobre tienden a marchitarse, mientras que las deficientes en boro no son tan susceptibles en la primera época del desarrollo, lo que no ocurre al madurar.

La función que a este respecto desempeña el cobre se considera en gran manera relacionada con la actividad de los enzimas fenolasa y laccasa. En plantas deficientes de cobre, el decrecimiento de la lignificación puede provocar un colapso de los vasos del xilema y, como consecuencia, el bloqueo del transporte del agua.

23.3. ALTERACIONES EN LA PLANTA POR DEFICIENCIA Y EXCESO.

La deficiencia de cobre se ha observado en muchas zonas y se puede presentar en casi todos los cultivos. Los cereales, leguminosas, árboles frutales Y cítricos, son bastante sensibles.

Aunque los síntomas varían con los cultivos, las alteraciones en general se observan, en primer lugar, en los órganos más jóvenes. En ellos, el efecto más característico es la deformación y muerte de las hojas jóvenes, después de aparecer clorosis, manchas pardas y necrosis en los bordes y ápice. El manzano y peral, muy sensibles a esta deficiencia, aparte de las alteraciones citadas, adquieren en los casos más graves un aspecto arbustivo.

En Citrus, la deficiencia de cobre, conocida con el nombre de "exantema", no presenta síntomas claros y distintivos en las hojas. Las alteraciones aparecen en los frutos antes que en las ramas, y en éstas antes que en las hojas. Algunas veces, y en los casos leves, los síntomas quedan reducidos a los frutos exclusivamente. Otras veces, ya iniciada la deficiencia, el follaje del árbol presenta un aspecto normal, con lo que puede pasar desapercibida hasta que aparecen las alteraciones graves deladoras de una deficiencia muy avanzada. En estos casos, puede haber algunas ramas con las puntas secas; si ello se observa, es conveniente la realización del análisis foliar para remediarla a tiempo y evitar perjuicios económicos.

Las alteraciones que se observan en los frutos al presentarse la deficiencia se caracterizan en unos casos por la aparición de puntos y manchas más o menos amplios, con un color variable entre marrón-gris y negro. En otros casos, estas manchas presentan aspecto de costras, ásperas al tacto, de color rojo oscuro y muchas veces agrietadas. Algunas veces se observan, aparte de las grietas, bolsas de goma en la superficie.

En las ramas también suelen aparecer impregnaciones gomosas, y en las hojas coloraciones rojizas.

La deficiencia aguda va siempre acompañada de una intensa floración en primavera y de gran cuaje de frutos. Sin embargo, la mayor parte se desprende luego, en verano. Los frutos que quedan tienen corteza gruesa, son de forma irregular, de menor tamaño del normal y con muy poco zumo. Los naranjos son los que más frecuentemente sufren la deficiencia.

La deficiencia de cobre puede ser corregida mediante la adición de compuestos de cobre a los fertilizantes NPK.

El exceso de cobre también puede presentarse. En estos casos (valores de cobre en el suelo superiores a 300 ppm), las principales alteraciones se manifiestan en las raíces, que tienden a perder vigor, adquirir color oscuro y a engrosarse, sin desarrollo. Concretamente en Citrus, el crecimiento del árbol y su producción quedan muy limitados, y las hojas toman un color bronceado.

Junto a estas alteraciones suelen presentarse frecuentemente síntomas claros de una deficiencia de hierro. Se considera que el cobre en exceso actúa en reacciones que afectan al estado de oxidación del hierro, limitando su absorción y traslocación en la planta. También se ha observado que altos niveles de cobre reducen notablemente la captación de fósforo.

La toxicidad por cobre se incrementa en suelos ácidos. Una enmienda caliza adecuada para elevar el pH aproximadamente a 6 puede evitarla.

23.4. ORIGEN, CONTENIDO Y FORMAS DEL COBRE EN EL SUELO.

En la corteza terrestre, el contenido medio de cobre puede situarse alrededor de 70 ppm, siendo los sulfuros los minerales más abundantes y la principal fuente suministradora del elemento al suelo. Los más comunes son: sulfuro cuproso, o calcosita (SCu_2), sulfuro férrico-cuproso o calcopirita (S_2FeCu) y sulfuro cúprico, o covelita (SCu).

Otras formas menos estables, pero también dignas de ser citadas son: óxido cuproso, o cuprita, (Cu_2O); óxido cúprico, o tenorita, (CuO); los carbonatos básicos, malaquita ($\text{CO}_3\text{Cu.Cu(OH)}_2$) y azurita ($(\text{CO}_3)_2\text{Cu}_3(\text{OH})_2$); y en mucha menor proporción, algunos sulfatos, silicatos, fosfatos y cloruros.

En los suelos, la cantidad de cobre es variable, pudiendo oscilar por lo general entre 5 y 50 ppm. Normalmente se halla como Cu^{+2} , en su mayor parte como constituyente de las estructuras cristalinas de los minerales primarios que todavía no han sufrido el proceso de edafización, y de los minerales secundarios. En cantidad menor, se encuentra también integrado en la materia orgánica, adsorbido como catión intercambiable al complejo coloidal arcilloso, y en la disolución del suelo.

23.5. DINAMICA DEL COBRE EN EL SUELO. FACTORES INFLUYENTES.

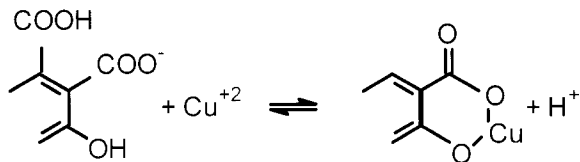
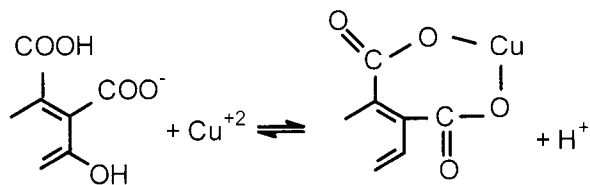
Si se tiene en cuenta las mínimas necesidades de cobre que las plantas requieren, se comprende que el problema de su normal nutrición no puede plantearse en función de los mayores o menores contenidos en el suelo, sino a una situación edáfica particular que permita o no su absorción, ya que el contenido potencial del oligoelemento en los suelos es más que suficiente para una nutrición correcta.

En este sentido, la cantidad de materia orgánica presente en el suelo, el pH y los contenidos de otros elementos como fósforo, nitrógeno, hierro, aluminio, cinc y molibdeno, pueden considerarse los factores influyentes de mayor significación.

23.5.1. MATERIA ORGANICA.

Está suficientemente demostrado que el cobre puede combinarse fácilmente con la materia orgánica del suelo, originando complejos húmico-cúpricos. La formación de estos complejos se atribuye a la unión del Cu^{+2} a los grupos funcionales carboxílicos, carbonílicos y fenólicos, o estructuras porfirínicas, ampliamente presentes en las sustancias húmicas del suelo. Los grupos amino e imino también pueden participar.

Las reacciones que se sugieren entre los grupos funcionales de los ácidos fúlvicos y el Cu^{+2} son:



Esta fijación del cobre por la materia orgánica se ha considerado por muchos investigadores como la causa principal de la aparición de la deficiencia en plantas creciendo en suelos con alto contenido orgánico. Sin embargo, esta opinión no está totalmente aceptada, ya que otras investigaciones han puesto de manifiesto un resultado contrario, es decir, que el cobre se encuentra más disponible en suelos ricos en materia orgánica que en los suelos minerales.

Estas diferencias pueden tener explicación si se tiene en cuenta que los complejos húmico-cúpricos que pueden formarse no presentan todos la misma estabilidad. En algunos casos, el cobre es tan fuertemente retenido que queda en una situación inasimilable por la planta; en otros, por el contrario, lo está muy débilmente, y ello puede proporcionar una fácil asimilación. Es razonable, por tanto, que suelos con contenidos similares en materia orgánica presenten distinta capacidad para fijar el cobre.

La opinión mayoritaria en el momento actual es admitir que, a pesar de la retención relativamente fuerte del cobre por la materia orgánica, la razón principal en la mayoría de los casos de la aparición de la deficiencia en los suelos orgánicos se debe, más que a su fijación, al bajo contenido del oligoelemento en estos suelos.

23.5.2. pH DEL SUELO.

No está totalmente aclarada la influencia que el pH del suelo ejerce en la disponibilidad del cobre para las plantas. También en este caso hay discrepancias al examinar las investigaciones realizadas, aunque la mayoría de los resultados indican que la solubilidad del cobre en el suelo disminuye ligeramente al incrementarse el pH.

Bajo el punto de vista químico, este hecho debe ser aceptado, ya que el elemento estará normalmente más asequible en medios ácidos. Los alcalinos tienden a insolubilizarlo y, por tanto, a dificultar su absorción.

No obstante, hay que pensar que una fuerte acidez suelo solubiliza excesivamente al cobre con las posibles pérdidas del mismo por lixiviación, pérdidas que pueden llegar a provocar una deficiencia, no por inasimilabilidad química en el medio, sino por excesivo dinamismo con relación al lavado que sufre el suelo. Queda claro que los rangos ideales deben ser los correspondientes a un suelo ligeramente ácido, condición favorable para que el cobre esté como Cu^{+2} , ya en la disolución del suelo, o en el complejo de cambio.

Pero es evidente que la capacidad que el cobre presenta para formar complejos con la materia orgánica es factor a tener en cuenta. Cuando el pH aumenta, la cantidad de cobre fijado a ella tiende a disminuir, ya que al aumentar la concentración de OH^- , la disminución de los grupos hidroxilos fenólicos como lugares de adsorción del cobre en la materia orgánica es menos probable. Por consiguiente, menos lugares cargados negativamente pueden existir, y el ión dominante CuOH^+ (a pH alrededor de 7.3) no es fácilmente fijado. Por ello, el contenido en materia orgánica del suelo es factor simultáneamente influyente.

Estas consideraciones pueden explicar quizás las discrepancias existentes.

23.5.3. INTERACCIONES CON OTROS ELEMENTOS.

La disponibilidad del cobre en el suelo puede verse afectada por la presencia en él de otros elementos en cantidades elevadas.

El fósforo es altamente influyente. Multitud de experiencias han demostrado que la aplicación de grandes y continuas cantidades de fosfatos a suelos en los que el contenido de cobre es bajo, provocan deficiencias agudas de este elemento en las plantas en ellos cultivadas. La figura 23.3., en la que se representan los resultados obtenidos con plántulas de naranjo en tres suelos diferentes, pone de manifiesto esta evidencia.

Una amplia fertilización con fosfato disminuye grandemente el contenido de cobre en las hojas en los tres suelos. El mecanismo de esta interacción no está del todo entendido, aunque parece que es similar a lo que ocurre con el hierro y cinc, es decir, un problema fisiológico o nutricional, más que una precipitación en el suelo. Se sugiere que pueda ser debido a una reducción del sistema radicular de la planta, y concretamente una disminución en su absorción y transporte.

Las interacciones del cobre con el nitrógeno también han sido observadas. Las figuras 23.4. y 23.5. muestran la acción limitante que la deficiencia de cobre ejerce sobre el efecto provechoso de la fertilización nitrogenada.

En un suelo con bajo contenido de cobre, la adición de fertilizantes nitrogenados en cantidades crecientes produce aumento de la producción de grano hasta cierto límite. Una adición mayor de 80 Kg/Ha de nitrógeno origina una gran disminución de la producción (A). Cuando se suministra al suelo una

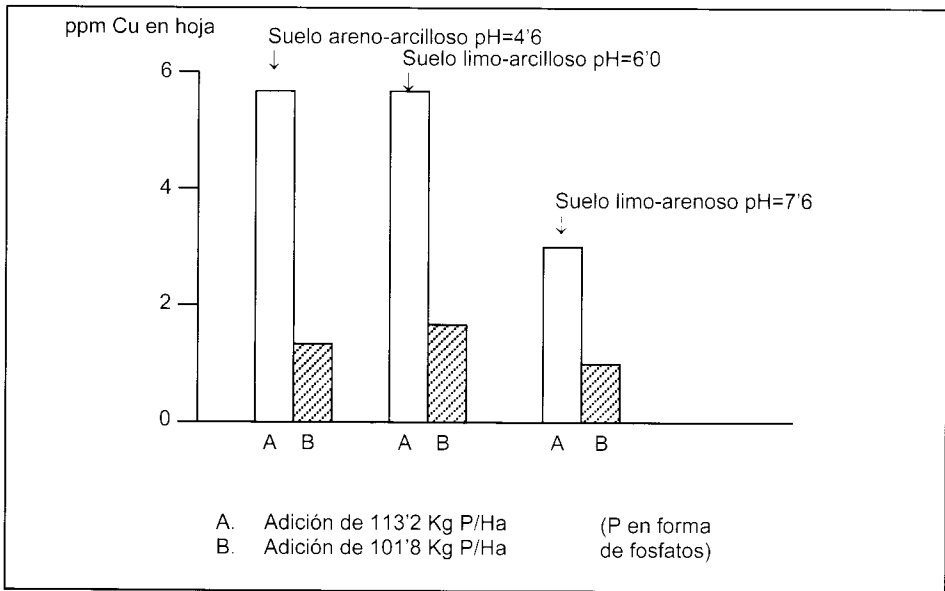


Figura 23.3. Efecto de la aplicación de fosfatos sobre el contenido de cobre en hojas de naranjo cultivadas en macetas de tres suelos diferentes (F.T. Bingham y J.M. Garber, 1960).

cantidad de 10 Kg/Ha de SO_4Cu (B), la respuesta del nitrógeno mejora, y la inhibición de la producción de grano se inicia con 100 Kg/Ha de nitrógeno. Y cuando el suelo recibe un aporte de 20 Kg/Ha de SO_4Cu (C), la producción es notablemente superior, prácticamente el doble (Figura 23.4.).

En el caso representado en la figura 23.5., la planta creció en macetas cuyo suelo era deficiente en cobre. Al aumentar el nivel del fertilizante nitrogenado, se induce a una disminución en la concentración de cobre (A). La adición de este elemento al suelo, incluso en presencia del fertilizante nitrogenado, aumenta el nivel de cobre en la planta (B).

Esta interacción nitrógeno-cobre tiene una gran importancia para la producción animal, puesto que altos niveles de nitrógeno, frecuentemente utilizados por el agricultor, pueden originar grandes descensos del cobre en la vegetación. Los animales que se alimentan de pastos en estas condiciones pueden sufrir serios trastornos al reducirse el valor mínimo de cobre en sangre (0.65 mg/1 de suero sanguíneo).

Las interacciones del cobre con otros iones metálicos y el efecto de sus contenidos sobre el crecimiento de las plantas, también han sido investigadas en los casos de aluminio, hierro, cinc y molibdeno.

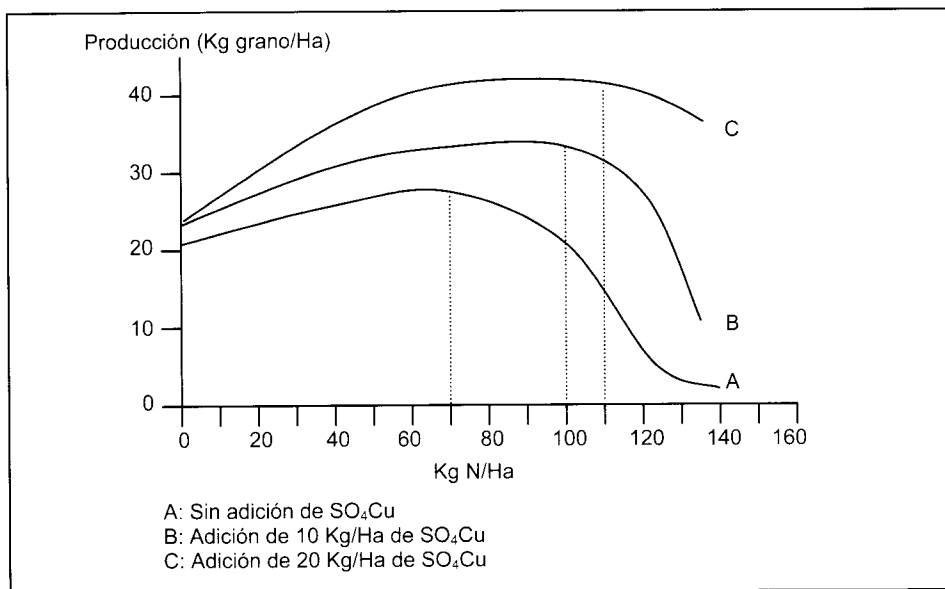


Figura 23.4. Influencia de la fertilización sobre la respuesta de la producción de trigo a la adición de cobre (E.G. Mulder, 1954).

La asimilación relativa del cobre por plantas de trigo desarrolladas en disoluciones nutritivas con 0'02 ppm de cobre y diferentes concentraciones de aluminio (entre 0 y 1 ppm), señala que el consumo de cobre disminuye cuando la concentración de aluminio en la disolución supera 0'1 ppm.

Del mismo modo, experiencias hidropónicas con lechuga creciendo con proporciones variables de cobre y hierro, producen distintos valores de rendimiento en la cosecha.

Estos resultados y otros similares obtenidos a través de experiencias con cinc y molibdeno, ponen de manifiesto que el nivel de un oligoelemento en el suelo, y este es el caso del cobre, no es el factor limitante más importante en relación con el crecimiento de la planta, sino la cantidad de los elementos en relación uno con respecto al otro.

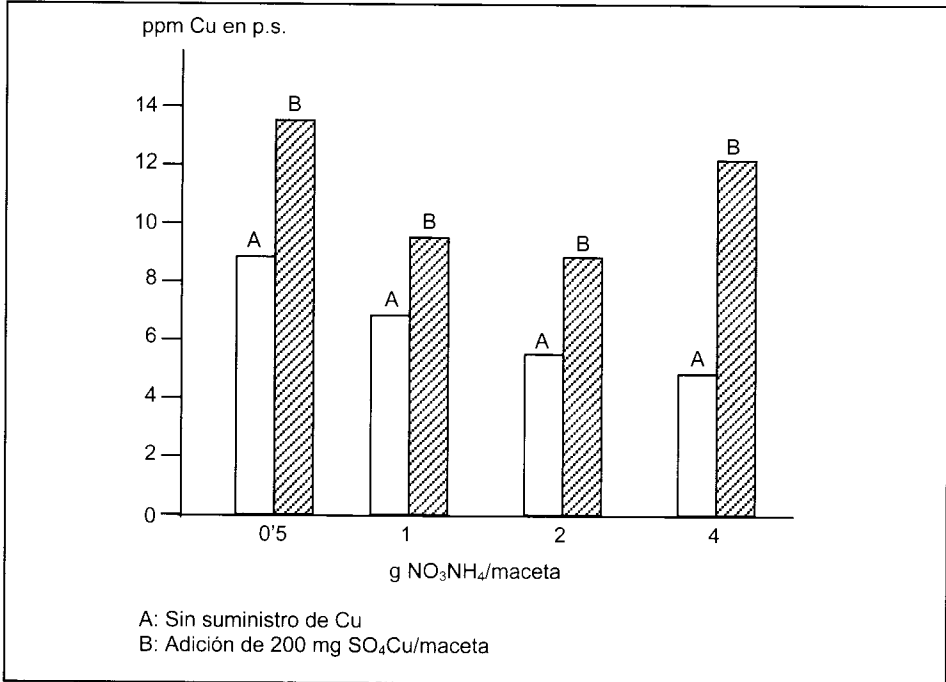


Figura 23.5. Influencia de la fertilización nitrogenada sobre el contenido de cobre en pastos (*Folium perenne*).

24

EL MOLIBDENO EN LA PLANTA Y EN EL SUELO.

El reconocimiento del molibdeno como elemento esencial en los seres vivos es relativamente reciente. En el año 1930 hay un primer trabajo en Alemania, debido a H. Bortels, en el que se pone de manifiesto que el molibdeno es necesario para el desarrollo de la bacteria fijadora de nitrógeno *Azotobacter chroococcum*, y que en ausencia del mismo este microorganismo no fijaba nitrógeno. En 1934, R.A. Steimberg demuestra la necesidad para la asimilación de nitrógeno por el *Aspergillus niger*, utilizando como fuente de nitrógeno el ión nitrato. Y, en 1939, está toda la magnífica experimentación de D.I. Arnon y P.R. Stout, científicos de la Universidad de California, demostrativa de la esencialidad del molibdeno en las plantas superiores. C.S. Piper, en 1940, confirma también la importancia de este microelemento.

A partir de esta fecha, en que toma estado definitivo la esencialidad del molibdeno para las plantas, aparecen numerosos trabajos y comunicaciones en los que se demuestra la existencia de suelos deficitarios en este oligoelemento y de tipos de enfermedades en plantas corregibles con cierta rapidez por adición de pequeñísimas cantidades de molibdeno al suelo, bajo la forma de molibdato sódico. También empiezan a describirse enfermedades en animales, atribuidas a efectos tóxicos provocados por una alimentación vegetal con cifras altas de molibdeno, y otras motivadas por el efecto contrario.

24.1. ABSORCIÓN, NECESIDADES Y CONTENIDOS EN LA PLANTA.

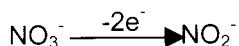
El molibdeno es absorbido por la planta bajo la forma de MoO_4^{-2} . Las cantidades requeridas para un normal desarrollo son pequeñas, aunque variables dentro de ciertos límites. Sus contenidos se sitúan entre menos de 0'1 y 300 ppm en peso seco. Estas variaciones dependen de la especie vegetal, de la parte de la planta que se considere, estado de madurez, condiciones climáticas y del mayor o menor contenido que pueda haber en el suelo. En la mayor parte de los casos, sin embargo, el valor medio oscila entre 1 y 10 ppm. Las raíces, normalmente, contienen siempre una mayor cantidad que las hojas, tallos y semillas. Las leguminosas, ciertas crucíferas (coliflor y rábano) y la remolacha azucarera, son las plantas más sensibles a una falta de molibdeno.

24.2. FUNCIONES. ENZIMAS IMPORTANTES CONTENIENDO MOLIBDENO.

El principal papel fisiológico del molibdeno se fundamenta en el hecho de que es componente de dos enzimas que catalizan procesos importantes en la planta: nitrogenasa y nitrato reductasa.

El enzima nitrogenasa constituye la molécula base en la fijación biológica del nitrógeno (Véase tema 11."El nitrógeno en el suelo."). Todos los organismos que fijan el nitrógeno contienen este enzima, y aquellos que no lo poseen son incapaces de hacerlo. Ello pone claramente de manifiesto la importancia del molibdeno en este relevante proceso.

El segundo de los enzimas citados, nitrato reductasa (Véase tema 10."El nitrógeno en la planta."), también es fundamental para asegurar la reducción del nitrógeno nítrico absorbido por la planta en la forma amónica. A partir de ésta, el nitrógeno puede incorporarse como constituyente de los diversos compuestos nitrogenados que integran su organismo. El enzima, en el que el molibdeno actúa como cofactor, regula la reducción:



En este proceso, el molibdeno es el donante directo de electrones. Cuando se presenta una deficiencia clara de este oligoelemento, hay un decrecimiento notorio en la actividad del enzima, y los nitratos, al no poder reducirse, se acumulan. Como consecuencia, la síntesis proteica disminuye. La figura 24.1. demuestra este incremento, como resultado de un experimento realizado en plantas de melón.

Las hojas deficientes muestran claramente niveles de nitrato muy superiores a las normales. Pero tratadas con una disolución de molibdato sódico al 0'1 %, permite a la planta obtener molibdeno para su nitrato reductasa y devolver el nivel de nitrato a su normalidad.

En muchas plantas, si los fertilizantes nítricos utilizados son sustituidos por fertilizantes amónicos, los requerimientos de molibdeno descienden, y la planta puede mantener la síntesis proteica con normalidad. En los organismos inferiores, como los hongos, las necesidades de molibdeno para la actuación de nitrato reductasa también se ha confirmado. En la figura 24.2. puede apreciarse esta influencia.

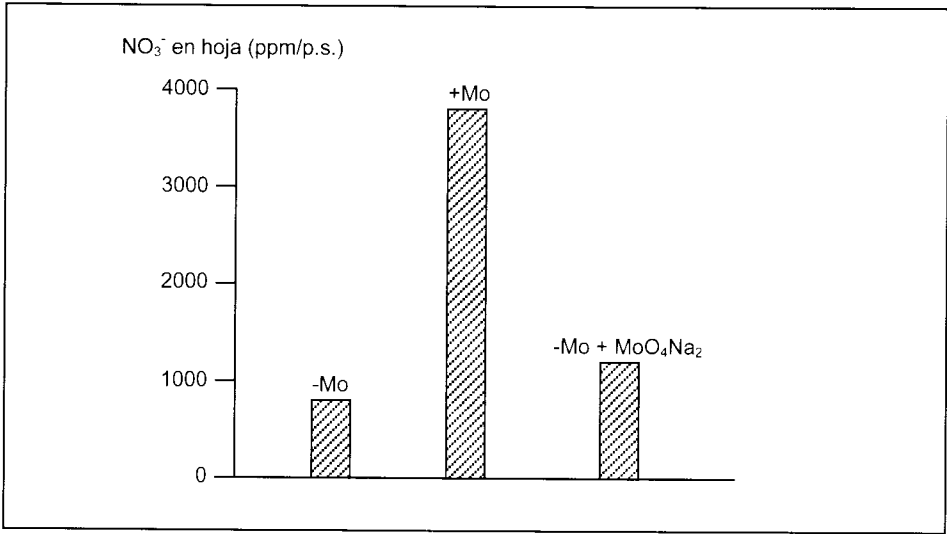


Figura 24.1. Contenido en nitrato en hojas de melón desarrollado en un suelo de textura arenosa (H.J. Evans, 1956).

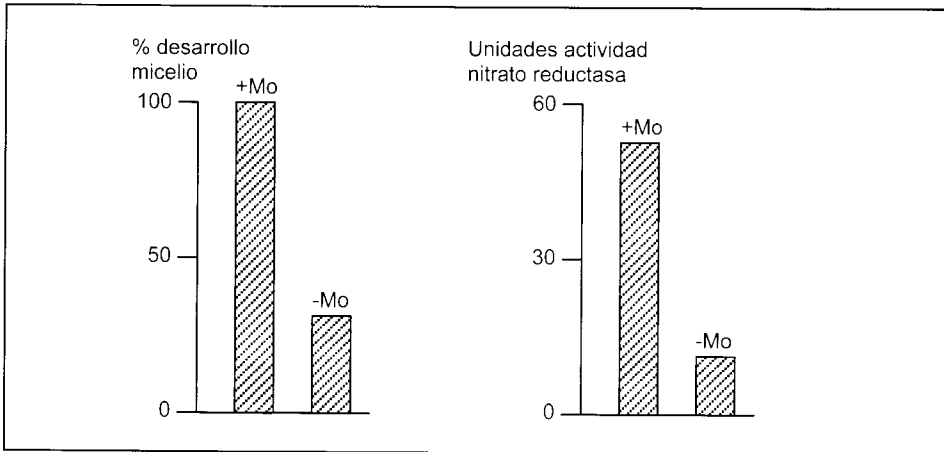


Figura 24.2. Influencia de la ausencia y presencia de molibdeno del sustrato sobre el desarrollo y actividad de nitrato reductasa en el hongo *Neurospora crassa* (D.J.D. Nicholas, 1957).

Otras investigaciones han puesto de manifiesto que el molibdeno es esencial en procesos biológicos distintos a los anteriormente expuestos. En plantas superiores, la deficiencia del oligoelemento va acompañada

comúnmente con un decrecimiento en el contenido de ácido ascórbico y clorofila.

En plantas deficientes de tomate se ha observado que hay una menor conversión del fósforo inorgánico a la forma orgánica, frente a plantas normales. Se sugiere que el hecho puede ser debido a que el molibdeno es un inhibidor de fosfatasa ácidas en esta planta.

24.3. ALTERACIONES EN LA PLANTA POR DEFICIENCIA Y EXCESO.

Los síntomas de la deficiencia de molibdeno están siempre relacionados con el metabolismo del nitrógeno. Es corriente la clorosis, ya sea parcialmente en forma de manchas marginales, o alcanzando la totalidad de la hoja. Varían de una especie a otra, pero por lo general aparecen primero en las hojas adultas, y luego, lentamente y con regularidad, en las jóvenes sobre el punto de crecimiento. Los rendimientos quedan reducidos. En leguminosas se observa frecuentemente, ya que el molibdeno es esencial para la fijación simbiótica del nitrógeno.

En los Citrus esta deficiencia se conoce con el nombre de "yellow spot", manifestándose como manchas amarillas de aspecto brillante, circulares o elípticas, entre los nervios. Estas típicas manchas, en los estados avanzados de la deficiencia se necrosan y acaban desprendiéndose, originando orificios en la hoja. Las manchas pueden aparecer en cualquier época del año, y su simple presencia es indicio seguro de la deficiencia. También es característico que estas manchas estén dispuestas en forma simétrica respecto al nervio central.

La deficiencia de molibdeno se presenta frecuentemente en suelos ácidos, pero raramente se observa en los alcalinos. Su corrección en los primeros puede lograrse mediante un encalado adecuado, o aplicando sales solubles de molibdeno, pero la respuesta en el cultivo es lenta. Preferentemente debe utilizarse la pulverización con disolución de molibdato sódico o amónico al 0'5 %.

Esta deficiencia está muy difundida en naranjales de Florida. A sus suelos se aplican notables cantidades de dolomita y otros materiales alcalinos. De esta forma se evita que la deficiencia se haga crítica.

No hay referencia de que esta deficiencia se haya presentado en las plantaciones de naranja españolas. La naturaleza prácticamente neutra o

alcalina de la mayoría de los suelos dedicados a este cultivo hace que raramente pueda observarse.

Los casos de toxicidad en plantas por exceso de molibdeno bajo condiciones de campo son, en general, muy raros. Las plantas pueden tolerar concentraciones relativamente altas de este elemento en sus tejidos. Sin embargo, el exceso de molibdeno en las plantas, particularmente en aquellas destinadas a piensos para animales, puede dar lugar, en éstos, a serios trastornos diarreicos. Hoy se sabe que esto es debido al alto nivel de molibdeno, el cual induce a una relativa deficiencia de cobre. El ganado tiene una gran necesidad de este elemento y el molibdeno, por antagonismo, evita la libre utilización del existente en el pasto. Dichos trastornos pueden evitarse mediante administraciones complementarias de cobre; y cuando sus necesidades en este elemento se cobren es, entonces, cuando podrán alimentarse de tales pastos.

La corrección del exceso de molibdeno en plantas que se desarrollan en suelos con elevadas concentraciones de este elemento es siempre más difícil que la corrección de la deficiencia. En parte puede reducirse utilizando fertilizantes sulfatados con el fin de disminuir su absorción por la planta.

24.4. ORIGEN, CONTENIDO Y FORMAS DEL MOLIBDENO EN EL SUELO.

El molibdeno del suelo procede de la descomposición de las rocas que inicialmente lo contienen durante el proceso de edafización. En ellas se encuentra en cantidades extremadamente reducidas, estimándose unos contenidos medios comprendidos entre 2 y 2'5 ppm. Excepcionalmente, determinados suelos pueden superar las 200 ppm, en especial algunos de origen volcánico, o aquellos otros situados cerca de yacimientos de molibdenita.

Hay un número bastante grande de minerales de molibdeno que son conocidos. Quizás el más importante es el sulfuro de molibdeno (S_2Mo), o molibdenita, ya que este elemento presenta gran tendencia a combinarse preferentemente con el azufre. También se le encuentra bajo la forma de molibdato de plomo o wulfenita (MoO_4Pb); molibdato cálcico o powellilita (MoO_4Ca); molibdato ferroso o ferromolibdita ($MoO_4Fe \cdot 7H_2O$); y diversos polimolibdatos complejos. Como óxidos: MoO_3 , MoO_2 y Mo_2O_5 . Como constituyente de la materia orgánica del suelo, suele encontrarse en menor proporción.

24.5. DINAMICA DEL MOLIBDENO EN EL SUELO. FACTORES INFLUYENTES.

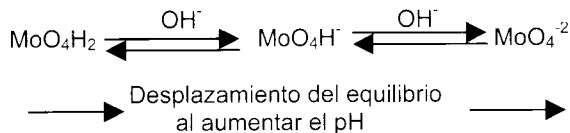
La dinámica del molibdeno en el suelo no está aún perfectamente establecida. Dentro de las características de los suelos y condiciones en que normalmente se hallan, la mayor parte del molibdeno se encuentra en un estado no disponible para la planta. Se ha comprobado que cuando se utilizan disoluciones extractoras corrientes, tales como acetato u oxalato amónico, sólo un 10 % se encuentra en forma asimilable. En la mayor parte de los suelos, por tanto, se suelen registrar valores inferiores a 0'2 ppm de molibdeno útil, el cual corresponde al presente en la disolución del suelo. El resto debe admitirse que se halla formando parte del retículo cristalino de los minerales primarios y secundarios, adsorbido al coloide, o como integrante de la materia orgánica del suelo.

Diversos factores, sin embargo, pueden influir en la mayor o menor disponibilidad del molibdeno por la planta. Entre ellos, el pH del suelo y sus contenidos en óxidos de hierro, aluminio y titanio, se admiten como predominantes. Otros, como el contenido en materia orgánica, o elevadas cantidades de fosfatos o sulfatos, se consideran de menor incidencia.

24.5.1. pH DEL SUELO.

Al contrario de lo que ocurre con otros oligoelementos (Fe, Mn, B, Cu o Zn), el molibdeno se hace cada vez más disponible al aumentar el pH. Este es un hecho conocido desde hace algún tiempo.

La concentración de MoO_4^{-2} , forma asimilable por la planta, se incrementa al aumentar el pH (unas 100 veces por unidad), ya que de las distintas formas en equilibrio que pueden coexistir, aquella tiende a predominar sobre las de MoO_4H^- y MoO_4H_2 cuando el cambio se va produciendo:



A un pH=5-6, la especie MoO_4H^- es la dominante, mientras que a un pH más bajo la forma no ionizada y el catión MoO^{+2} son las principales presentes. Estos cambios explican que en los suelos alcalinos, las deficiencias de este oligoelemento no se presenten, y que los suelos ácidos, al encalarse, elevan su contenido de molibdeno asimilable.

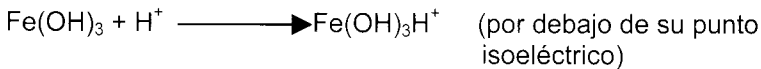
Se sugiere también que el pH puede influir mediante otro mecanismo. En el suelo existen las formas MoO_3 , Mo_2O_5 y MoO_2 . Las dos últimas no son utilizables por la planta, pero pueden transformarse lentamente en MoO_3 , y ésta, a su vez, pasar a la forma MoO_4^{2-} en una cierta proporción, al aumentar la alcalinidad del suelo.

24.5.2. CONTENIDO EN EL SUELO DE ÓXIDOS DE HIERRO Y ALUMINIO.

La presencia en el suelo de óxidos de hierro y aluminio tiene una gran influencia, puesto que la retención del molibdeno puede ser notablemente alta, principalmente en suelos ácidos y con contenidos elevados en los citados compuestos.

Esta adsorción es tanto mayor cuanto más alto sea el contenido de estos óxidos y bajo el pH. Experimentalmente se ha comprobado que la adsorción de molibdeno por Fe_2O_3 en una disolución conteniendo $100 \mu\text{g}$ de Mo decrece, de $98 \mu\text{g}$ a $\text{pH}=7$ a $22 \mu\text{g}$ a $\text{pH}=9$, después de agitar durante 15 horas con 100mg de Fe_2O_3 amorfo.

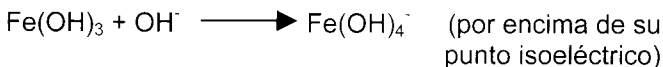
Este comportamiento debe admitirse que se debe a que los óxidos de hierro y aluminio (éstos últimos en menor proporción), son capaces de crear cargas positivas, y de adsorber aniones en las condiciones de pH que habitualmente se dan en los suelos agrícolas (Véase tema 6. "Adsorción e intercambio iónico en suelos."), según la reacción de ionización:



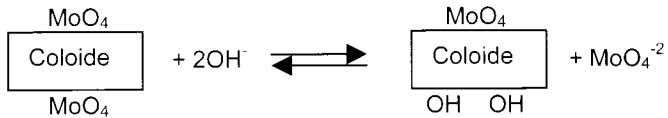
Se sugiere, por tanto, que el molibdeno en suelos ferruginosos es adsorbido sobre la superficie de los óxidos férricos coloidales como MoO_4^{2-} , mediante un reemplazamiento por OH^- :



Si el pH del suelo aumenta, la ionización de los óxidos de hierro es diferente:



y ello implica no sólo la disminución de la citada adsorción, sino también la liberación del MoO_4^{2-} retenido por una reacción de intercambio del tipo:



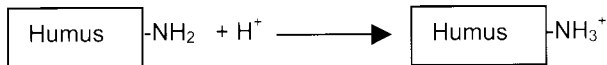
Se ha comprobado que en el caso concreto de la hematita, la adsorción máxima de MoO_4^{-2} puede ser reducida en un 80 % si el pH cambia de 4 a 7.5. El punto cero de la carga de la hematita aparece a pH=8.

24.5.3. MATERIA ORGANICA.

El contenido de materia orgánica del suelo ha sido relacionado con el movimiento del molibdeno. Sin embargo, los estudios realizados y los resultados obtenidos son, en cierto modo, contradictorios.

Se han expuesto casos en los que suelos con un contenido alto de materia orgánica han provocado deficiencias apreciables de este oligoelemento en los cultivos en ellos desarrollados. Y en algunos de estos se han obtenido respuestas positivas, es decir, se ha corregido la deficiencia, añadiendo sales solubles de molibdeno.

Resulta difícil admitir una adsorción de MoO_4^{-2} por la materia orgánica. Evidentemente, el humus en su conjunto tiene grupos funcionales capaces de ionizarse, adquiriendo cargas positivas que permitan esta adsorción:



Pero no obstante, hay que tener en cuenta que el punto isoeléctrico de estos coloides es muy bajo (pH=3-4), y en consecuencia esta ionización difícilmente se da en el suelo para estos coloides. Por consiguiente, la adsorción de MoO_4^{-2} por la materia orgánica del suelo aparece altamente limitada.

Por otra parte, otros estudios han puesto de manifiesto efectos contrarios, es decir, una mejora en su disponibilidad. Según sus autores, la presencia de materia orgánica puede promover la mejor asimilación de ciertos elementos, entre ellos el molibdeno, presumiblemente por el suministro de agentes complejantes que interfieren o dificultan su fijación o transformación a formas asimilables.

Quizás en toda esta problemática, en la que parece que predomina la idea de que la materia orgánica mejora más que dificulta la asimilación del molibdeno por la planta, haya que tener en cuenta que una fracción del molibdeno en el suelo está bajo forma orgánica; a su degradación, es frecuente la aparición de formas utilizables en determinadas condiciones del suelo.

24.5.4. EFECTO DEL CONTENIDO EN EL SUELO DE FOSFORO Y AZUFRE.

Repetidamente se ha demostrado que la adición de grandes cantidades de fertilizantes fosfatados a suelos ácidos incrementa la absorción del molibdeno por la planta. La figura 24.3. muestra el resultado de una experiencia realizada en macetas con plantas de tomate.

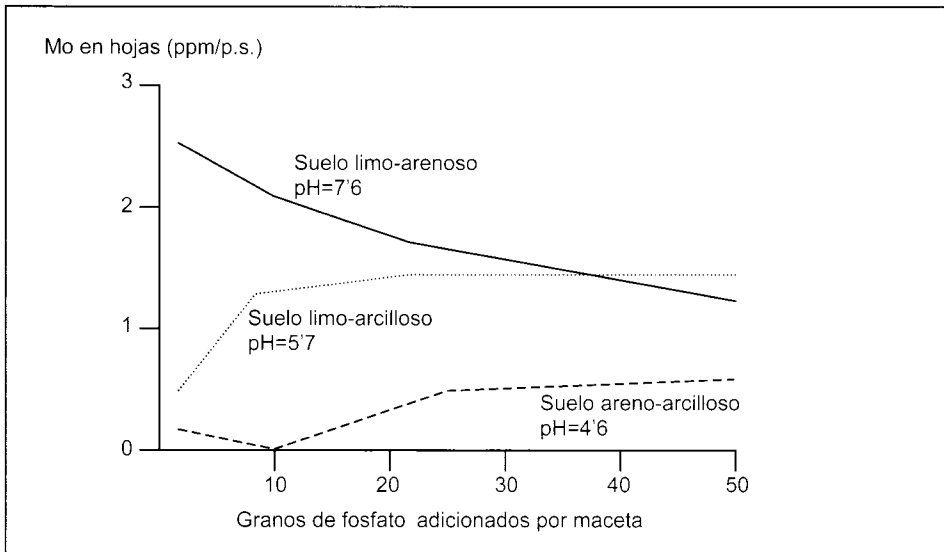


Figura 24.3. Influencia de la aplicación de fosfato sobre el nivel de molibdeno en plantas de tomate desarrolladas en macetas con suelos ácidos y alcalinos (G.H. Chanell y cols., 1960).

Una acción depresora en la absorción del molibdeno ha sido puesta también de manifiesto, al adicionar grandes cantidades de sulfatos. Este hecho parece que puede explicarse por un efecto inhibitorio antagónico durante el proceso de absorción radicular, es decir, en una competición jónica en la superficie de la raíz, debido a que los MoO_4^{-2} y SO_4^{-2} poseen tamaño y cargas similares. Se ha comprobado que en suelos que empiezan a mostrar deficiencia de molibdeno, la aportación a los mismos de dosis elevadas de sulfatos provoca, corrientemente, deficiencias claras en los cultivos que se desarrollan en ellos.

25

EL CLORO EN LA PLANTA Y EN EL SUELO.

El cloro ha sido el último elemento aceptado como esencial para la vida vegetal. Sin embargo, el interés por este elemento viene demostrándose desde hace muchos años. En 1862, F. Nobbe y T. Siebert ya señalaron que plantas de trigo cultivadas en disoluciones sin cloruros no maduraban perfectamente; y en 1915, P. Mazé ya incluyó el cloro en sus experiencias con disoluciones nutritivas. F.M. Eaton, en 1942, deduce como resultado de sus experiencias, que el cloro incrementaba el crecimiento del algodón y del tomate. Pero es el trabajo de T.C. Broyer y cols., en 1954, el que permitió establecer su esencialidad de manera definitiva, aplicando rigurosamente los criterios de Arnon.

Posteriormente, en 1957, este mismo equipo de investigadores puso de manifiesto deficiencias agudas de cloro en diversas especies vegetales: lechuga, col, cebada, alfalfa, habas, tomatas, remolacha azucarera, trigo, maíz, etc., y demostró, a través de sus experiencias, que de todas las plantas examinadas, la lechuga era la más sensible a esta deficiencia, y la planta de calabaza la menos sensible.

25.1. CONTENIDO, FORMAS Y FUNCION DEL CLORO EN LA PLANTA.

El cloro es absorbido por la planta bajo la forma Cl^- , no sólo por vía radicular, sino también por sus partes aéreas. Sus requerimientos fisiológicos son bajos, del orden de unas 5 ppm. Pero en muchas plantas se han encontrado valores muy altos, dentro del rango de 2 a 20 mg de cloruro por gramo de peso seco, e incluso superiores en halofitas.

Presenta una gran movilidad, y una vez absorbido emigra fácilmente hacia las partes en actividad fisiológica. Se encuentra principalmente bajo la forma cloruro, y sólo en muy pequeña proporción formando parte de compuestos orgánicos. El bromo, a unas concentraciones más elevadas que el cloro (unas diez veces superior), puede sustituirle en parte, pero no totalmente.

La función del cloro, en el momento actual, no es perfectamente conocida. Diversas investigaciones señalan que en cloroplastos aislados, el Cl⁻ es un cofactor esencial en la fotosíntesis, situando su lugar de actuación junto al Mn⁺² en la fotólisis del agua, a partir de la cual el fotosistema II se reduce por captura de los electrones liberados (Véase tema 20."El manganeso en la planta y en el suelo.").

Se admite también que el Cl⁻ tiende a favorecer la turgescencia de la planta y a actuar como neutralizador de cationes.

25.2. ALTERACIONES EN LA PLANTA POR DEFICIENCIA Y EXCESO.

Las alteraciones por deficiencia de cloro sólo han podido ser demostradas utilizando disoluciones nutritivas en condiciones de invernadero. Sus síntomas no son fáciles de identificar. Los más destacables son el marchitamiento de la planta y clorosis foliar, junto a un bronceado o necrosis de ciertas zonas, y disminución del tamaño. También se aprecia una reducción del crecimiento radicular y, en los casos agudos, no hay producción de frutos.

Estas alteraciones aparecen cuando el contenido de Cl en el medio es inferior a 2 ppm, y rara vez se presentan en campo.

Muy frecuentes y graves son, por el contrario, las alteraciones que sufren los cultivos cuando el cloro se encuentra en cantidades excesivas, aunque ello también está muy condicionado a la especie vegetal que se considere. Algunas plantas presentan una baja tolerancia, mientras que otras, por el contrario, son menos sensibles. En la figura 25.1. se muestran estas diferencias para varias plantas.

Como puede observarse, la remolacha azucarera presenta una alta tolerancia, y el limonero una gran sensibilidad.

Los síntomas de toxicidad se manifiestan por un adelgazamiento de las hojas, con tendencia a enrollarse. Posteriormente surgen amplias neurosis

que van extendiéndose, y finalmente se secan. La remolacha azucarera, y sobre todo la patata, produce menos almidón. El tabaco necesita pequeñas cantidades de cloro, y si contiene demasiado quema mal, y las cenizas son de color negruzco. Esto es debido a que el cloruro recubre las cenizas e impide su combustión completa.

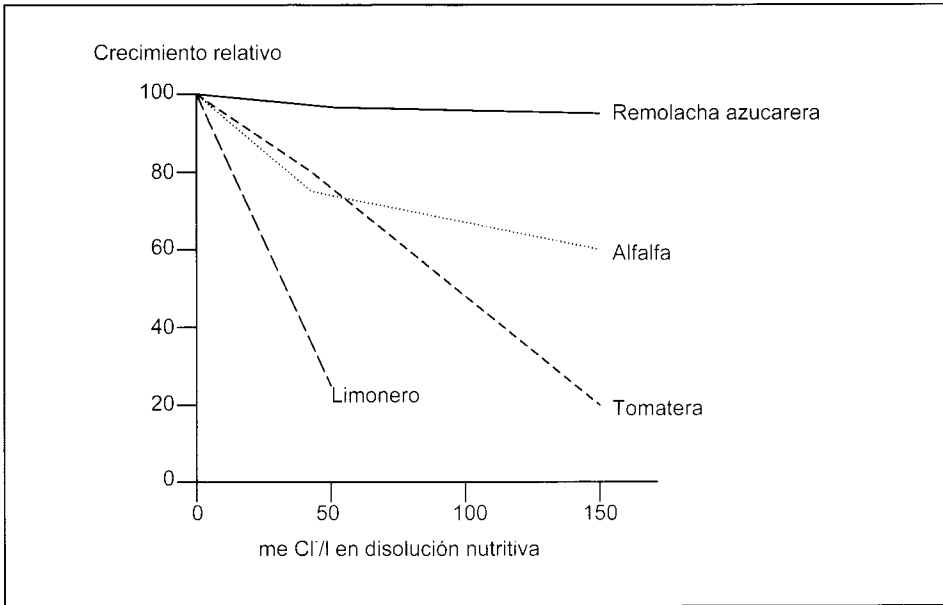


Figura 25.1. Influencia de la adición de cloruro al medio de cultivo sobre la depresión del crecimiento en algunas plantas (F.M. Eaton, 1966).

En algunos casos, el daño causado por el exceso de cloruros puede confundirse con la deficiencia de potasio, por lo que para confirmar el síntoma debe recurrirse al análisis químico de las hojas, que es la mejor manera de confirmar el diagnóstico.

25.3. ORIGEN, CONTENIDO Y DINAMICA DEL CLORO EN EL SUELO.

El cloro bajo la forma de cloruro se encuentra en los suelos en cantidades que pueden variar dentro de un amplio margen (entre 0 y 1000 Kg

Cl/Ha). Ello depende de las sales solubles presentes, particularmente cloruro sódico, y en menor proporción cloruro cálcico y cloruro magnésico. En algunas ocasiones pueden alcanzarse cifras superiores al límite indicado, tal como ocurre en suelos cercanos a los mares y océanos, con un nivel freático bajo; los situados cerca de yacimientos salinos; o aquellos otros tratados de forma continua con aguas de alto contenido en cloruro y poco drenaje, donde puede almacenarse fácilmente.

Su dinámica en el suelo no es complicada. Normalmente, todos los suelos contienen cantidades suficientes de cloruros para satisfacer las necesidades de las plantas. Procede de la descomposición de la roca madre (rocas ígneas principalmente), de la degradación de restos orgánicos y también de las aportaciones que las lluvias efectúan, ya que el viento eleva a la atmósfera el agua del mar cargada de cloruros. Se calcula que el contenido en cloruros del agua de lluvia que cae sobre las regiones continentales es de 3-4 g/Tm. Aportaciones más altas se dan, lógicamente, en las costas por las salpicaduras del agua del mar cuando el viento sopla hacia tierra; en este caso se han citado cifras superiores a los 200 g/Tm.

Debido a su gran solubilidad, y a que se fija muy débilmente al complejo coloidal, vuelve al mar arrastrado por el agua de los ríos. Una pequeña parte puede insolubilizarse como cloruros de plata, mercurio, cobre o plomo, cuando las disoluciones se ponen en contacto con las partes superficiales de los minerales que contienen estos elementos.

Por esta alta movilidad que presenta, su contenido en la mayor parte de los suelos agrícolas no suele ser alto. En algunos casos, sin embargo, como ya se ha apuntado, y en otros donde se han aplicado dosis elevadas de fertilizantes clorados, puede acumularse, y aquí surge el problema de su eliminación, con el fin de evitar efectos tóxicos en la vegetación. En esta situación, el agua como lluvia natural, artificial o riego, es el remedio ideal. En climas secos, no obstante, los riegos deben aplicarse juiciosamente, ya que si es insuficiente, de forma que la evaporación supere al drenaje, el cloruro se acumula en la superficie, y el riego, entonces, puede ser más perjudicial que beneficioso. Los suelos así tratados presentan manchas salinas, que originan graves daños en los cultivos. Además, los suelos con alto contenido en óxidos, particularmente de hierro, tienen una capacidad de adsorción aniónica elevada, y pueden adsorber una parte de los cloruros que no ha arrastrado el riego. Es evidente, sin embargo, que los cloruros serán eliminados con mayor rapidez por las aguas de lavado de los suelos de textura gruesa que de los de textura fina, sobre todo a causa de que estos últimos retienen cantidades mayores de agua y hay una menor filtración, con una cantidad igual de lluvia o riego.

En un suelo incluso rico en cloruros, pero con macroporosidad importante, la planta asimila poco cloro. Los suelos arcillosos, pobres en cloruros y con baja porosidad, proporcionan más cloro a la planta. No puede establecerse, por tanto, una correlación proporcional entre el contenido del elemento en el suelo y en la planta; es, posiblemente, una cuestión de lixiviación, junto a las necesidades específicas de cada planta.

Aspecto importante es el antagonismo que parece demostrado entre el Cl^- y el NO_3^- . En plantas de patata, una alta concentración en el medio de Cl^- hace decrecer el contenido en ella tanto de nitrógeno total, como de nitrógeno nítrico. Este antagonismo se ha puesto también de manifiesto con el SO_4^{2-} .

26

ELEMENTOS QUÍMICOS ESENCIALES PARA ALGUNAS PLANTAS.

26.1. SODIO.

Durante gran parte del siglo pasado, el sodio fue considerado como un elemento esencial para la vida vegetal. Pero ya en 1860, esta creencia fue desechada, aceptándose sólo como un simple estimulante o un parcial sustituto del potasio.

A partir de 1935, el interés por este elemento se ha intensificado, y han sido muchos los investigadores que han tratado de demostrar su esencialidad. En 1955, M.B. Allen y D.I. Arnon la establecen para el alga azul verdosa *Anabaena cylindrica*, y, en 1957, P.F. Brownell y J.G. Wood para la *Atriplex vesicaria*. Sin embargo, en el momento actual, la mayoría de los autores sólo lo aceptan en estos casos, y consideran que no puede generalizarse a todas las plantas.

26.1.1. CONTENIDO, FUNCION Y EFECTOS BENEFICIOSOS EN LA PLANTA.

El sodio es absorbido por la planta como Na^+ . Su contenido puede variar ampliamente, dependiendo del existente en el suelo, de la especie que se considere y del órgano que se analice. Como valor medio se acepta 1200 ppm en peso seco, siendo las hojas, normalmente, más ricas que las semillas, y las leguminosas más que los pastos.

La función específica que el sodio puede desempeñar en la planta no se conoce. Algunos investigadores han señalado recientemente su posible acción como activador del enzima carboxilasa fosfoenolpirúvica, primer enzima de carboxilación en la fotosíntesis de plantas C_4 (Figura 26.1.).

En las plantas en las que se considere esencial (*Anabaena cylindrica*, por ejemplo), se acepta que regula ciertos procesos respiratorios y glucolíticos. Algunos investigadores han señalado también un incremento de la actividad

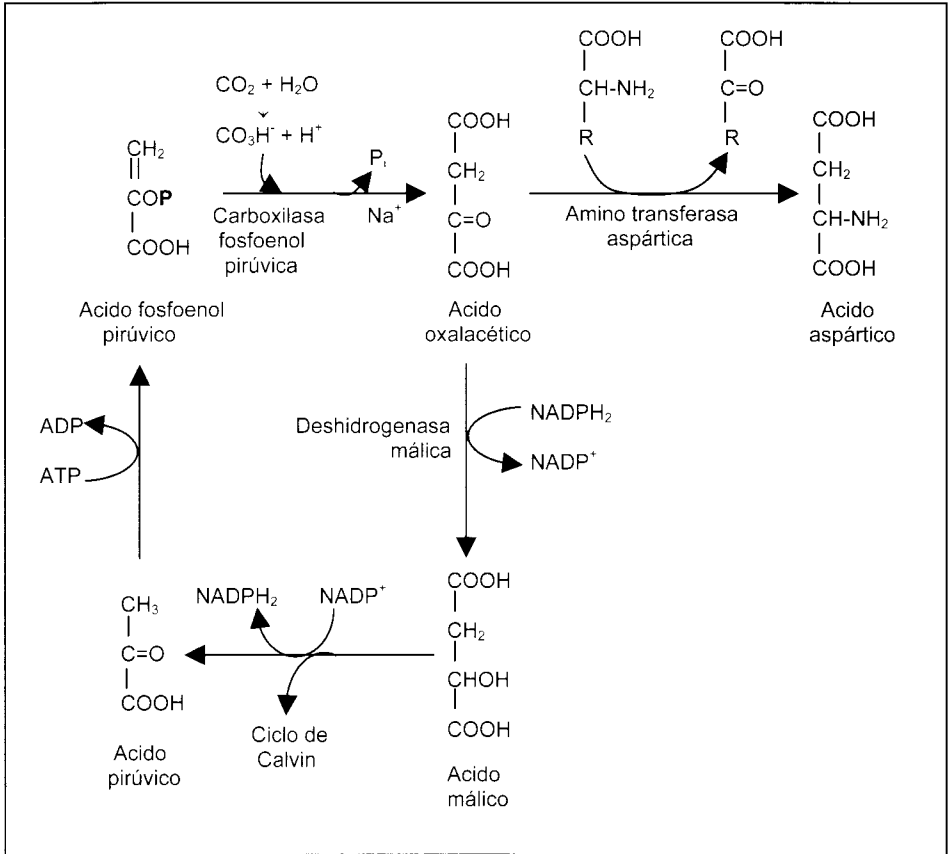


Figura 26.1. Secuencia de reacciones en la fotosíntesis de plantas C₄. Posible participación del sodio.

del enzima nitrato reductasa y acumulación de nitritos, lo cual origina efectos tóxicos y una poca asimilación del nitrógeno.

Determinados estudios sobre remolacha azucarera parecen indicar que el elemento es necesario para este cultivo, y que no debe considerarse sólo como un sustituto del potasio. Para otros, sin embargo, esta afirmación no debe ser admitida, ya que consideran que el hecho debe atribuirse a que el sodio añadido, o el existente en el suelo, puede intercambiarse con el potasio adsorbido al complejo coloidal, y una vez liberado éste, es utilizado por la planta. Esto explicaría la preferencia del nitrato sódico por la remolacha.

Estas y otras discrepancias, puestas de manifiesto en lo que respecta a considerar el sodio como elemento esencial para otras plantas, no excluye que sea criterio general el aceptar los efectos beneficiosos que el elemento puede proporcionar. En este sentido, existe un buen número de investigadores que demuestran que el sodio puede reemplazar, en parte, al potasio en muchos cultivos, como por ejemplo: remolacha azucarera, zanahoria, cereales y algodón. En la remolacha, concretamente, se ha podido reemplazar hasta la mitad de los requerimientos de potasio sin que se observen pérdidas de rendimiento. Si se tiene en cuenta que los costes de los componentes sódicos son menores que los de los potásicos, ello puede suponer un aspecto muy interesante bajo el punto de vista económico.

Para otros cultivos también se ha observado que puede incrementar los rendimientos, particularmente en aquellos estados en los que el suministro de potasio no es suficiente. Este hecho queda reflejado en la figura 26.2., en la que se representan los resultados obtenidos utilizando disoluciones nutritivas en el desarrollo del arroz.

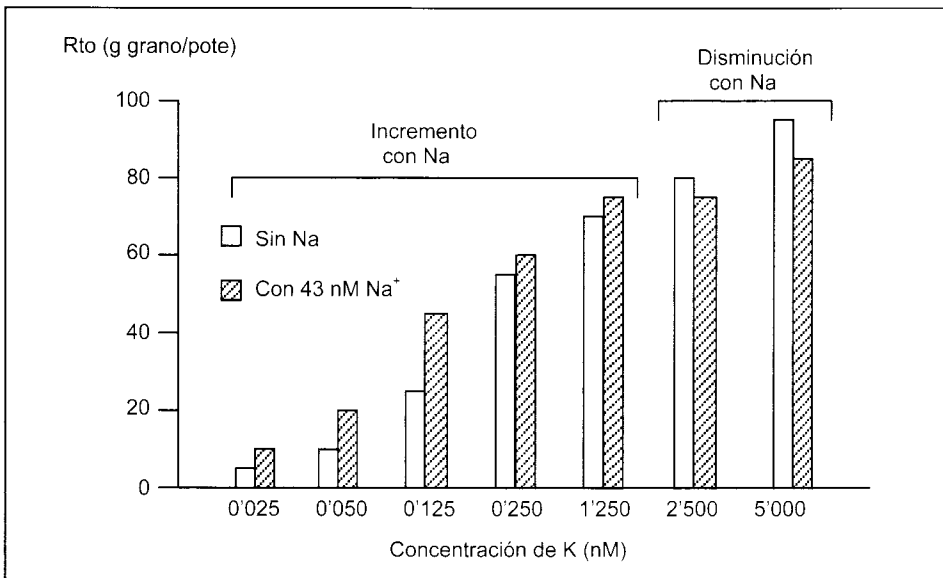


Figura 26.2. Influencia del sodio sobre el rendimiento del arroz a distintas concentraciones de potasio en la disolución nutritiva (S. Yoshida y L. Castañeda, 1969).

A bajas concentraciones de potasio, la adición de sodio a la disolución nutritiva incrementa el rendimiento del grano, pero a concentraciones altas de potasio el sodio provoca disminución.

Se han observado otros efectos favorables del sodio. Durante los períodos de sequedad retrasa el marchitamiento de la planta, manteniendo el potencial osmótico celular. En invierno y principio de primavera puede disminuir los posibles daños por heladas, ya que su presencia hace descender el punto de congelación de la savia. Proporciona mayor color y aroma a las hortalizas, como es el caso de la col. E incluso en pastos dedicados a la alimentación de ganado, parece que las aplicaciones de sodio mejoran la producción animal.

26.1.2. CONTENIDO Y DINAMICA EN EL SUELO.

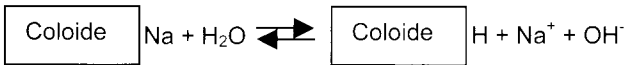
En el suelo, el sodio procede de los minerales silicatados, como hornblenda y moscovita. Los más ricos son los que durante mucho tiempo se han encontrado inundados por el agua del mar (marismas, por ejemplo), suelos abonados regularmente con fertilizantes sódicos, y aquellos originados bajo climas áridos.

El sodio es muy lixiviable, y es llevado al mar por el agua de los ríos. De allí puede retornar al suelo, principalmente de las zonas costeras, por acción del viento. Desaparece fácilmente de los suelos si sobrevienen lluvias abundantes, o si se dispone de una cantidad de agua de riego, siempre que el nivel freático sea bajo. Indudablemente, una parte del sodio queda adsorbido, pero el poder de retención es bajo, y ello hace que sea eliminado por las aguas de lavado en una gran extensión.

En las regiones áridas (zonas en donde la lluvia es menor de 500 mm/año), algunos suelos se desarrollan bajo condiciones de drenaje pobres, y se evapora más agua que la que capta por la lluvia. En estas condiciones, las sales solubles y el sodio adsorbido pueden acumularse en cantidades elevadas en el horizonte superficial, e impedir el crecimiento de las plantas. Estos suelos son designados como halomórficos, y han sido clasificados en tres clases: salinos, salino-sódicos y sódicos.

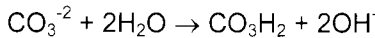
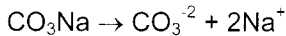
Los suelos salinos contienen una concentración relativamente alta, compuesta principalmente de cloruros, sulfatos y, en algunas ocasiones, nitratos. Los principales cationes presentes son: calcio, magnesio y sodio. Menos del 15 % de la capacidad catiónica intercambiable de estos suelos está ocupada por Na^+ , y el pH normal es siempre inferior a 8.5. Esto se debe a que las sales solubles son las predominantes, y sólo existe un pequeño porcentaje de sodio intercambiable presente. Frecuentemente se acumulan costras blancas sobre la superficie, y de ahí que se conozcan en las publicaciones más antiguas con el nombre de "álcalis blancos".

Los suelos salino-sódicos también se caracterizan por su alta concentración de sales solubles, pero se diferencian de los salinos en que el porcentaje de sodio intercambiable es mayor de 15. Mientras que la gran cantidad de sales solubles permanece en el suelo, el alto contenido de sodio adsorbido no produce problemas, y el pH rara vez es superior a 8.5, ya que aquellas actúan de freno. Sin embargo, si las sales solubles, en algunas ocasiones, son lixiviadas, el pH se incrementa al hidrolizarse el complejo sódico y aumentar notablemente la concentración de OH⁻:



Se desarrolla entonces una situación desfavorable, ya que los Na⁺, ahora activos, separan los coloides que estaban formando una estructura cerrada en el suelo, aumentando al mismo tiempo la toxicidad del sodio para las plantas. El manejo de estos suelos es un problema hasta que se elimina el exceso de sales solubles y el sodio intercambiable de la zona de crecimiento radicular.

Los suelos sódicos no contienen gran cantidad de sales solubles neutras, pero el porcentaje de sodio adsorbido es superior a 15. En este caso, no solo ocurre una hidrólisis del complejo sódico, sino también la correspondiente del carbonato sódico:

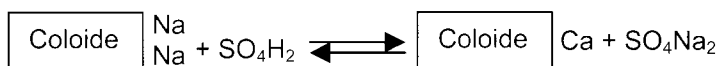


Por consiguiente, el pH es superior a 8.5, alcanzando a menudo el valor 10. Debido a esta alcalinidad que se origina, la materia orgánica presente en el suelo se dispersa fuertemente y se distribuye en la superficie de las partículas, dándoles un color oscuro. De aquí el nombre de "álcali negro", frecuentemente utilizado.

Los suelos sódicos ejercen un efecto desfavorable sobre las plantas. Su alta alcalinidad, inducida por el carbonato y bicarbonato sódico, la toxicidad del anión bicarbonato y otros aniones, y el exceso de Na activos, son las causas principales a destacar sobre el metabolismo vegetal.

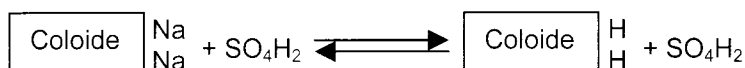
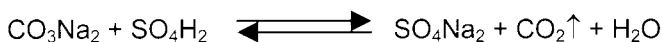
Para la recuperación de los suelos salinos es preciso disponer de un buen drenaje y aplicación de agua suficiente para lixiviar el exceso de sales a las partes más profundas. Si no existe una amplia capacidad de drenaje, la adición de mucha agua sólo servirá para elevar el nivel freático, con lo cual lo único que se conseguirá es aumentar la concentración salina en la superficie del suelo. En estos casos es necesario la utilización de tubos de drenaje para que las aguas de lavado sean desaguadas a través de ellos.

El proceso de recuperación de los suelos sódicos puede acelerarse mediante la aplicación de sulfato cálcico (yeso), con el fin de transformar parte de los carbonatos alcalinos en sulfatos. El suelo debe permanecer húmedo para facilitar la reacción, y colocando el yeso en la superficie. Las reacciones que se producen son:



Como resultado de estas dobles descomposiciones, el pH del suelo desciende, los coloides floculan, se desarrollan poros más amplios, y aumenta la permeabilidad del suelo.

El azufre puede lograr los mismos resultados que el yeso, aunque su acción es más lenta. Al oxidarse en el suelo origina ácido sulfúrico, el cual no solo actúa de acidificante, sino también como cambiador de sodio:



Otros sulfatos solubles, tales como el sulfato ferroso y el aluminico, también han dado resultados efectivos.

La aplicación de estiércol, o el cultivo de plantas resistentes a las sales, como trébol dulce o alfalfa, es una buena manera de iniciar el proceso de recuperación, se vaya o no a aplicar productos químicos. La acción radicular de estas plantas tolerantes mejora notablemente la condición física del suelo, acelerando el proceso de granulación.

La utilización de fertilizantes con base de sodio no es frecuente en suelos áridos o semiáridos. Pero en otros, en los que el elemento presenta valores muy bajos, suele utilizarse comúnmente el nitrato sódico. En muchos países de Europa, y en algunos estados americanos, el valor del sodio es muy apreciado, y se usa exclusivamente para mejorar o beneficiar aquellos cultivos que muestran mejoras en su rendimiento o en sus características generales.

26.2. SILICIO.

La esencialidad del silicio es una cuestión muy discutida. A este respecto, los resultados de gran número de investigaciones han hecho pensar en tal posibilidad, ya que el silicio se presenta en el vegetal como componente constante y en notable proporción.

Actualmente, diversos investigadores consideran que puede ser esencial para las plantas que presentan altos contenidos, como la cebada, girasol, remolacha y, sobre todo, según experimentos de A. Okuda y E. Takahashi, en 1965, para el arroz. Pero de forma similar a lo que ocurre con el sodio, no hay una confirmación científica suficiente que permita aceptar a este elemento como esencial para todas las plantas.

26.2.1. CONTENIDO, FUNCION Y EFECTOS BENEFICIOSOS EN LA PLANTA.

La planta absorbe el silicio bajo la forma soluble de ácido silícico, SiO_4H_4 , presente en la disolución del suelo, en un rango de pH entre 2 y 9, y en ella aparece como sílice hidratada, $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, o como ácido silícico polimerizada. En la planta de arroz, la mayor parte se encuentra en esta última forma.

Su contenido es variable, y depende fundamentalmente de la especie vegetal, pudiendo oscilar entre 0'25 y 2 % en peso seco, expresado como SiO_2 . En la planta de arroz, la mayor parte se encuentra inmovilizado en la parte aérea asociado a la celulosa.

Su función en la planta no está establecida. La similitud química que presenta con el fósforo y el boro ha hecho que algunos autores piensen en la posibilidad de que el silicio pueda reemplazar o interferir determinadas funciones de aquellos, como por ejemplo condensarse con azúcares-alcoholes o ácidos orgánicos. Estas interacciones Si-P y Si-B requieren aún, sin embargo, una mayor investigación.

Lo que sí parece claro es el efecto positivo que el silicio ejerce en el crecimiento y rendimiento de la planta de arroz.

Desde 1945, algunos científicos japoneses lo consideran un elemento esencial para este cultivo. Utilizando disoluciones nutritivas, han mostrado que incrementa el número de tallos, su altura y el peso de granos maduros. La experiencia representada gráficamente en la figura 26.3. lo pone claramente de manifiesto.

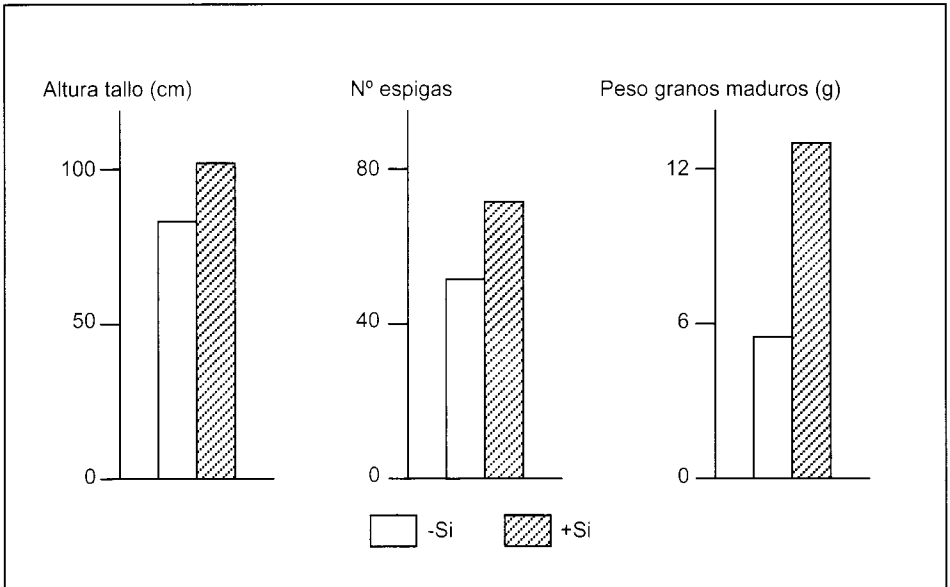


Figura 26.3. Influencia del silicio en el crecimiento y rendimiento del arroz (A. Okuda y E. Takahashi, 1965).

Algunos autores, incluso, han llegado a señalar deficiencias en cereales y pastos, que se manifiestan con marchitamiento de la planta, deformaciones, depósitos necróticos en las hojas y notable disminución de su resistencia a plagas y enfermedades. Estas alteraciones, sin embargo, se consideran por otros investigadores debidas más que a un estado deficitario de silicio, a los efectos tóxicos que se originan por acumulación de hierro, manganeso y otros nutrientes, cuando las concentraciones de silicio son extremadamente bajas.

26.2.2. CONTENIDO Y DINAMICA EN EL SUELO.

El silicio en el suelo procede fundamentalmente de la degradación de las rocas ígneas. En él se encuentra como sílice, SiO_2 , y como constituyente de muchos silicatos y minerales arcillosos. Su contenido es variable, ya que hay que tener en cuenta que es, después del oxígeno, el elemento más abundante en la litosfera. Expresado como SiO_2 , puede alcanzar en la capa arable rangos entre el 60 y 90 %.

La forma soluble asimilable por la planta, SiO_4H_4 , se encuentra en la disolución del suelo, y su concentración está regulada por el pH, el cual a su vez limita sus reacciones de adsorción con hidróxidos de hierro y aluminio. Los suelos ácidos contienen las mayores concentraciones.

Se ha demostrado, asimismo, una notable correlación Si-P. El aporte al suelo de fertilizantes silícicos solubles incrementa la asimilación de fósforo por la planta, posiblemente debido a un intercambio de los fosfatos adsorbidos a los hidróxidos por silicatos. Por esta razón, en suelos ácidos pobres en silicio, resulta muy apropiado adicionar escorias básicas de desfosforilación, las cuales, junto al aporte de cantidades variables de calcio, magnesio, manganeso y silicio, sirven para una mejora del pH del suelo y para favorecer la asimilación del fósforo.

26.3. COBALTO.

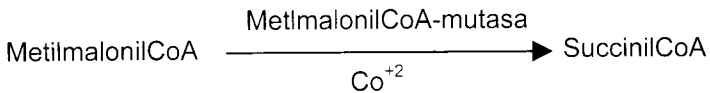
Una abundante investigación se ha realizado en las últimas décadas tratando de demostrar la esencialidad de este elemento para las plantas superiores. Los resultados obtenidos, si bien han puesto de manifiesto algunos efectos beneficiosos en plantas no leguminosas, como algodón y judías, no han sido lo suficientemente concluyentes para poder aceptar definitivamente en ellas esta posibilidad. Resulta extraño, sin embargo, que un elemento esencial para la vida animal, como es el cobalto, no lo sea también para las plantas que normalmente lo contienen y son sus portadores naturales.

En el momento actual, el elemento sólo se considera esencial para microorganismos que fijan el nitrógeno atmosférico. En 1954, O. Holme-Hansen y colaboradores pusieron de manifiesto la falta de crecimiento y clorosis en algunas algas azul-verdosas fijadoras de nitrógeno del género *Nostoc*. Posteriormente, H.M. Resenauer, en 1960, y S. Ahmed y H.F. Evans, en 1960 y 1961, demostraron también que el elemento es requerido por el *Rhizobium*, la bacteria simbiótica que fija el nitrógeno en los nódulos de las raíces de las leguminosas.

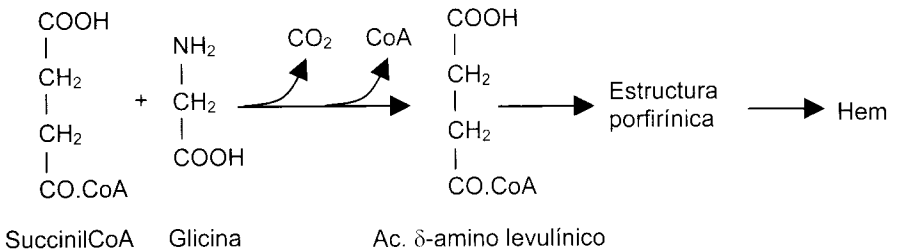
26.3.1. CONTENIDO Y FUNCION EN LA PLANTA.

El contenido en las plantas es bajo, aunque variable, y depende de la especie y de su contenido en el suelo. En plantas herbáceas, los valores hallados oscilan entre 0'02 y 0'24 ppm, y en las leguminosas entre 0'06 y 0'43. Los granos de cereales, y particularmente los del maíz, son muy pobres en cobalto (entre 0'01 y 0'06 ppm). Contenidos superiores a 1 ppm en peso seco son raros, aunque excepcionalmente se ha comprobado en algunas especies capacidad para almacenar cantidades muy superiores a las consideradas normales. En aquellas que vegetan en suelos con contenidos altos, el elemento puede ser absorbido en exceso, lo que puede inducir a deficiencias de manganeso y hierro, que en casos agudos se traducen en amplias clorosis y necrosis. Ello se debe a que el cobalto puede desplazar a estos elementos en procesos fisiológicos importantes de la planta, ocupando su lugar o centro de actuación

La importancia que actualmente se concede al cobalto deriva, en parte, del hecho de ser un componente de la vitamina B₁₂, la cual, a su vez, es necesaria para la formación de la leghemoglobina que se requiere para que la fijación se efectúe. Se sugiere que en los nódulos bacterianos el elemento es esencial en la transformación de propionato a succinilcoenzima A, al actuar como activador del enzima metilmalonilcoenzima A-mutasa, que cataliza este último paso:



El succinilcoenzima A producido, reacciona con glicina para formar ácido δ-aminolevulínico, el cual es finalmente convertido, a través de diversas etapas, a la estructura hem de la leghemoglobina:



La deficiencia de cobalto inhibe la formación de succinilCoA, por lo que la leghemoglobina no se sintetiza, y concretamente la fijación del nitrógeno se paraliza.

Sin una confirmación total, se ha señalado también que el cobalto puede ser uno de los metales activadores de diversos enzimas, como arginasa y lecitinasa.

La presencia de cobalto en las plantas tiene una gran importancia bajo el punto de vista de la nutrición animal. Tal como se ha indicado anteriormente, este elemento es un componente de la vitamina B₁₂, la cual es esencial en el metabolismo nitrogenado de los rumiantes. Niveles inferiores a los considerados como normales en pastos utilizados continuamente para la alimentación de rumiantes (menores de 0'08 ppm en peso seco), provocan en éstos graves alteraciones que se traducen en falta de apetito, disminución del crecimiento con adelgazamiento, anemia, temblores musculares y desarrollo sexual retrasado. Por lo general, los rebaños jóvenes resultan más afectados que los viejos, siendo las ovejas las más sensibles. La enfermedad en Australia, lugar donde se presenta frecuentemente, se la conoce como "enfermedad del agotamiento" y "enfermedad de la costa". También se ha observado en los EE.UU. y Nueva Zelanda. Para corregir estas alteraciones, los australianos suelen colocar en el estómago de los animales afectados, pequeñas píldoras de óxido de cobalto, con el fin de que puedan proporcionarle las cantidades complementarias necesarias.

El cobalto resulta tóxico cuando se ingiere en cantidades excesivas. Pero hay que señalar que esta posibilidad no suele presentarse en condiciones normales de pastoreo.

26.3.2. CONTENIDO Y DINAMICA EN EL SUELO.

En los suelos, el contenido medio observado oscila entre 1 y 40 ppm. Excepcionalmente, y en aquellos en los que abundan los minerales ferromagnesianos, pueden alcanzarse hasta 1000 ppm.

Diversos factores, tales como la textura, humedad, pH y contenido en óxidos de manganeso, se han demostrado influyentes en la disponibilidad del cobalto para la planta.

La textura gruesa puede provocar deficiencia, muy particularmente en suelos con pluviometría alta. En cambio, en suelos arcillosos aparece generalmente en una proporción seis o siete veces superior, debido a que el Co⁺², al liberarse de los minerales que lo contienen, es ampliamente retenido como forma intercambiable, o formando complejos organominerales.

La reacción del suelo puede influir, asimismo, en la mayor o menor solubilidad del cobalto. Al aumentar el pH hay una disminución de las formas solubles. Por esta razón, el encalado del suelo puede originar una disminución considerable en la absorción por la planta.

Los suelos con alto porcentaje en óxidos de manganeso suelen adsorber en su superficie una gran parte del cobalto presente en ellos. Esto se ha observado en suelos irlandeses y australianos, en los que la deficiencia en los pastos es corriente.

26.4. VANADIO.

Diversos trabajos realizados en los últimos años del pasado siglo ya pusieron de manifiesto el efecto de las sales de vanadio sobre el crecimiento de microorganismos y plantas superiores. En ellos se señalaba que concentraciones de 10-20-ppm o más eran generalmente tóxicas para las plantas, aunque en determinados casos concentraciones más bajas tenían un efecto estimulante, especialmente para ciertos microorganismos. En 1941, D. Bertrand establece que el vanadio es un elemento activador esencial para el crecimiento del hongo *Aspergillus niger* en concentraciones de 10 M. Y en 1954, D.I. Arnon y G. Nossell, tal como se verá más adelante, concretan su esencialidad para el crecimiento del alga verde *Scenedesmus obliquus*. Aparte de estos casos, en los que aparece demostrada la importancia de este elemento, no hay otros datos verdaderamente significativos que permitan ampliarla a otras plantas.

26.4.1. CONTENIDO, FUNCIONES Y EFECTOS BENEFICIOSOS EN LA PLANTA.

El vanadio ha sido detectado como constituyente de un gran número de plantas, y sobre todo en aquellas que vegetan en suelos donde el elemento se halla en proporción elevada. Las cantidades halladas oscilan alrededor de 1 ppm en peso seco, en sus distintos órganos. En los nódulos de las leguminosas se han hallado valores entre 3 y 4 ppm.

Un buen número de estudios ha implicado al vanadio en el proceso de fijación del nitrógeno atmosférico. Según los datos aportados, se sugiere que el vanadio puede reemplazar al molibdeno como elemento necesario para la fijación en distintas especies de *Azotobacter*, hasta un cierto límite, pero en ningún caso se ha podido demostrar que puede sustituirlo de una forma total. También se ha indicado por otros que esta participación puede tener lugar en

la fijación simbiótica del nitrógeno por *Rhizobium*. Sin embargo, en toda esta problemática, y en el momento actual, no se disponen de resultados concretos para aceptar de forma concluyente esta participación.

La más clara evidencia de la esencialidad del vanadio es, sin duda alguna, la investigación realizada en *Scenedesmus obliquus*. Utilizando disoluciones nutritivas pacificadas y conteniendo todos los elementos conocidos como esenciales, Arnon y Wessell demostraron que sólo el vanadio incrementaba su crecimiento (Figura 26.4.).

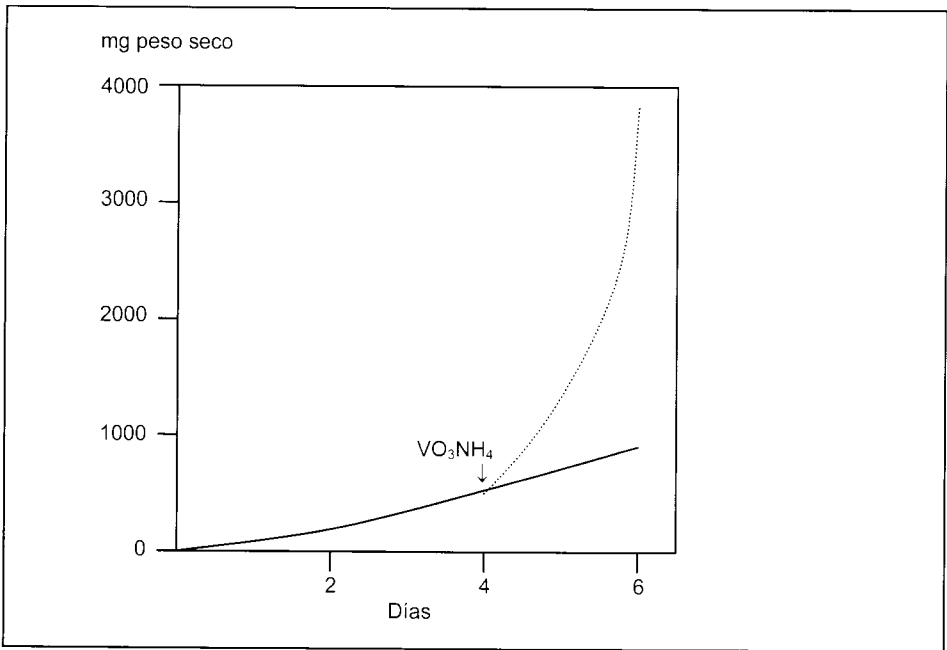


Figura 26.4. Efecto de la adición de vanadio en el crecimiento del alga verde *Scenedesmus obliquus* en disolución nutritiva conteniendo todos los elementos esenciales para las plantas (D.J. Arnon y G. Wesell, 1954).

El crecimiento del alga sin vanadio en la disolución no superó, a los 6 días los 100 mg de materia en peso seco. En otra experiencia similar, al añadir a los 4 días 20μ de vanadio, como metavanadato (VO_3NH_4), por litro de disolución nutritiva, comienza a incrementarse el crecimiento, hasta alcanzar, a los 6 días, un rendimiento cuatro veces superior.

Los efectos beneficiosos que el vanadio puede ejercer en las plantas superiores no están establecidos. Sólo unas pocas citas señalan para la lechuga y plantas de tomate desarrolladas en disoluciones nutritivas, ciertas mejoras en su desarrollo, a concentraciones más bajas que para el caso de *Scenedesmus*. La posibilidad de su necesidad parece que está supeditada, según algunos, a niveles del elemento en la planta menores de 2 ng en peso seco. Sólo, y bajo una base de especulación, se admite que su función es la de actuar como un activador enzimático en determinados procesos redox del metabolismo de la planta.

26.4.2. CONTENIDO Y SITUACION EN EL SUELO.

El contenido medio de vanadio en el suelo oscila alrededor de las 100 ppm, y procede principalmente de la degradación de las rocas ígneas. Los suelos húmicos lo adsorben en notable proporción, especialmente en suelos alcalinos.

No se tienen referencias de alteraciones por deficiencia o toxicidad en condiciones de campo.

A

- Absorción mineral factores influyentes, 155
 Acetaldehído, 380
 Acetil coenzima A, 228, 229, 230, 279, 282, 313
 Acido α -amino- β -cetoadípico, 228
 Acido α -aminolevulínico, 331
 Acido γ -aminolevulínico, 330, 428
 Acido α -cetoglutárico, 170, 172, 313, 378
 Acido α -iminocetoglutárico, 378
 Acido γ -iminoglutárico, 170
 Acido β -indolacético, 377
 Acido 1,3-difosfoglicérico, 312
 Acido 2-fosfoglicérico, 379
 Acido 3-fosfoglicérico, 227, 230
 Acido adenínico, 221
 Acido ascórbico, 391
 Acido aspártico, , 171, 174, 420
 Acido oxalsuccínico, 313
 Acido cianhídrico, 166
 Acido cinámico, 390
 Acido cítrico, 230, 279, 313
 Acido dehidroascórbico, 391
 Acido ferúlico, 64, 390
 Acido fosfoenol pirúvico, 171, 256, 312, 379, 420
 Acido fosfórico, 222
 Acido fúlvico, 68
 Acido fumárico, 171
 Acido glutámico, 170, 172, 173, 174, 254, 350, 378
 Acido hiponitroso, 211
 Acido húmico, 68
 Acido indolacético, 349
 Acido isocítrico, 313
 Acido láctico, 380
 Acido lipoico, 221, 275, 281, 313
 Acido málico, 379, 420
 Acido mevalónico, 229
 Acido nítrico, 211
 Acido nitroso, 211
 Acido oxalacético, 171, 174, 230, 279, 313, 379
 Acido p-cumárico, 390
 Acido pirúvico, 230, 256, 279, 282, 312, 313, 379, 380, 420
 Acido sinápico, 390
 Acido succínico, 256, 313
 Acido úrico, 166
 Acidoglutamohidroxámico, 349
 Acido aspártico oxidasa, 389
 Ácidos nucleicos, 176
 Ácidos orgánicos, 54
 Actinomicetos, 28, 59
 Adenina, 177, 222
 Adenosina, 221, 222
 Adsorción, 99
 Agua del suelo, 81
 - asimilable, 87
 - balance hídrico del suelo, 93
 - capacidad de campo, 81
 - capilar, 87
 - clasificación, 86
 - coeficiente de marchitez, 82
 - coeficiente higroscópico, 82
 - coeficiente higroscópico, 87
 - de adhesión, 82
 - de cohesión, 83
 - de constitución, 86
 - de drenaje, 86
 - estados en el suelo, 81
 - fuerza de retención, 82
 - gravitacional, 87
 - higroscópica, 87
 - humedad crítica, 82
 - infiltrada, 89
 - libre o gravitacional, 81
 - lixiviación, 89
 - máxima capacidad retentiva, 81
 - movimiento en el suelo, 88
 - no asimilable, 87
 - no infiltrada, 93
 - percolación, 89
 - potencial capilar, 90
 - potencial húmedo, 83
 - retenida, 93
 - succión, 83
 - superflua, 87
 - tensión, 83
 - transferencia a la planta, 91
 - utilizable, 87
 - utilización por las plantas, 90
 ALAdeshidrogenasa, 331
 Alanina, 171
 Alantoína, 166
 Alcohol coniferílico, 390
 Alcohol cumarílico, 390
 Alcohol sinapílico, 390
 Aldolasa, 256, 312, 378
 Algas, 28
 Almidón, 227
 Alúmina: octaedro, 36
 Aminificación, 200
 Aminoácidos amidados, 174
 Aminoácidos azufrados: biosíntesis, 276

Química Agrícola

Aminoácidos azufrados: integración en la planta, 276
Aminoácidos biosíntesis: aminación reductora, 170
Aminoácidos biosíntesis: transaminación, 173
Aminotransferasa aspártica, 420
Amoniaco: volatilización, 212
Amonificación, 200
Anabaena, 190
Anhídrido carbónico, 379
Antagonismos, 157
APSquinasa, 276
Arcilla del suelo, 23

- carga negativa, 35
- carga permanente, 38
- cargas variables, 39, 100
- definición, 34
- estructura, 39
- métodos estudio, 48
- principios estructurales, 35
- superficie externa, 36
- sustituciones isomórficas, 38
- tipos, 39

Arena, 33
Arginina, 332, 349
ARN de transferencia, 178
ARN mensajero, 178
Asparagina, 175, 332
Aspartasa, 171
Atmósfera del suelo, 94

- renovación, 96
- variaciones, 95

Azomonas, 189
Azotobacter, 189, 190
Azotococcus, 189
Azufre en el suelo, 283

- dinámica, 284
- mineralización, 285
- oxidación, 288
- pérdidas, 291
- reducción, 290

Azufre en la Naturaleza ciclo, 291
Azufre en la planta alteraciones por deficiencia y exceso, 282
Azufre en la planta, 275

- funciones, 275

Azufre en la planta y en el suelo, 273
Azurita, 395

B

Bacillus micoides, 244
Bacillus radicolica, 191

Bacillus subtilis, 244
Bacterias sulfatoreductoras, 290
Bacterias, 28, 168
Beijerinckia, 189
Biotina, 274, 316
Biotita, 259
Blenda, 381
Boro en la planta y en el suelo, 359
Boro en el suelo: dinámica, 369
Boro en la planta, 359

- funciones, 360
- alteraciones por deficiencia y exceso, 365

Braunita, 354

C

Calcio en el suelo, 299

- adición a suelos ácidos, 302
- dinámica, 299
- pérdidas, 302

Calcio en la Naturaleza ciclo, 306
Calcio en la planta, 295

- alteraciones por deficiencia y exceso, 298
- funciones, 296

Calcio en la planta y en el suelo, 295
Calcita, 299
Calcosita, 395
Cales agrícolas, 300
Caolinita, 40, 240, 301
Capacidad de cambio de cationes, 110

- determinación, 112

Carbonatación, 19
Carbonato apatito, 234, 241
Carboxilasa fosfoenolpirúvica, 420
Carnalita, 259
Carotenoides, 54
Catalasa, 331
Cationes de cambio, 37

- determinación, 112

Celulolisis, 59
Celulosa, 227
Cinc en el suelo, 381

- dinámica, 382

Cinc en la planta, 375

- alteraciones por deficiencia y exceso, 380
- funciones, 376

Cinc en la planta y en el suelo, 375
Cincita, 381
Cisteína sintetas, 277
Cisteína, 274, 277, 278, 328
Cistina, 274
Citocromo b, 325
Citocromo c, 325, 326, 328
Citocromo c-oxidasa, 325

Citocromo f, 325
 Citocromo oxidasa, 389, 392
 Citocromos, 324
 Citosina, 177
 Clorita, 45
 Cloro en el suelo: dinámica, 415
 Cloro en la planta y en el suelo, 413
 Cloro en la planta: alteraciones por deficiencia y exceso, 414
 Clorofila a, 310
 Clorofila b, 310
 Clorofila, 54, 223, 225, 226, 331, 348
 Clostridium pastorianum, 189
 Cobalto en el suelo: dinámica, 429
 Cobalto en la planta: funciones, 428
 Cobalto en la planta y en el suelo, 427
 Cobre en el suelo: dinámica, 396
 Cobre en la planta, 387
 - alteraciones por deficiencia y exceso, 394
 - funciones, 388
 Cobre en la planta y en el suelo, 387
 Coenzima A, 221, 275, 280
 Colina, 220
 Complejación, 19
 Complejo adsorbente: características, 110
 Coproporfobilinógeno III, 331
 Covelita, 395
 Cuarzo, 34
 Cuprita, 395
 Chlorobium, 190
 Chromatium, 190

D

Derxia, 189
 Descarboxilasa oxalacética, 313
 Descarboxilasa succínica, 313
 Deshidrogenasa alcohólica, 380
 Deshidrogenasa glutámica, 170
 Deshidrogenasa isocítrica, 313
 Deshidrogenasa láctica, 380
 Deshidrogenasa málica, 379, 420
 Denitrificación, 209
 - factores influyentes, 210
 Desoxirribosa, 177
 Desulfatomaaculum, 190
 Desulfomonas, 190
 Desulfovibrio, 190
 Diamina oxidasa, 389
 Dihidroxiacetona, 256
 Dihidroxiacetona-P, 227, 312, 378
 Disoluciones AZ, 138
 Disoluciones nutritivas, 136

Dolomita, 299, 316
 Dufrenita, 234

E

EDTA, 388
 Elementos esenciales, 151
 - absorción por contacto, 152
 - absorción por el ácido carbónico, 153
 - alteraciones por deficiencias, 144
 - efectos tóxicos, 148
 - origen y formas, 143
 - zona crítica, 147
 Enolasa, 312, 379
 Eritrosa-4-P, 227
 Esencialidad criterios, 140
 Esfalerita, 381
 Etanol, 380
 Eurobacterias, 245

F

FAD, 169, 221
 Feldespatos, 34
 Fenilalanina, 390
 Fenolasa, 388
 Ferredoxina, 172, 197, 328, 329, 345
 Ferromolibdita, 407
 Fitina, 221
 Fitoferritina, 329
 Fluor apatito, 234
 Fosfato de piridoxal, 173, 174
 Fosfato de piridoxamina, 173, 174
 Fosfofructoquinasa, 256, 312
 Fosfogliceromutasa, 312
 Fosfoglucoisomerasa, 312
 Fosfoglucomutasa, 312
 Fósforo en el suelo, 233
 - dinámica, 236
 - influencia del pH, 238
 - pérdidas, 246
 Fósforo en la Naturaleza ciclo, 248
 Fósforo en la planta, 219
 - alteraciones por deficiencia y exceso, 231
 - funciones, 223
 Fotosíntesis, 221, 253
 - reacciones en fase oscura, 223
 - reacciones fotoquímicas, 223
 Fructoquinasa, 312
 Fructosa, 254, 312
 Fructosa-1,6-di P, 227, 230, 256, 312, 378
 Fructosa-6-P, 227, 256, 312

G

Galactoquinasa, 312
Galactosa, 312
Galactosa-1-P, 312
Gleocapsa, 190
Glicéridos, 228
Glicerofosfato, 228
Glicina, 228, 330, 331, 428
Glomus, 245
Glucólisis, 229, 311
Glucosa, 230, 275, 312
Glucosa-1-P, 312, 362
Glucosa-6-P, 312
Glucósidos, 54
Glutámico sintetasa, 172, 173
Glutamilttransferasa, 349
Glutamina sintetasa, 350
Glutamina, 172, 175, 254, 332, 350
Guanina, 177

H

Haloisita, 240
Hausmanita, 354
Hematita, 325
Hemimorfita, 381
Hexosas fosforiladas, 311
Hidratación, 19
Hidratos de carbono, 54
Hidrólisis, 19
Hidroxi apatito, 234, 241
Hidroxilamina, 211
Hierro en el suelo, 335
- dinámica, 336
Hierro en la planta, 321
- alteraciones por deficiencia y exceso, 330
- enzimas con estructura hierro-porfirina, 323
- funciones, 323
Hierro en la planta y en el suelo, 321
Hierro-protoporfirina IX, 325
Homocisteína, 278
Homoserina, 278
Hongos, 28
Humus, 26, 58, 101,
- formación, 64
- acción sobre la planta, 77
- aislamiento componentes, 66
- características, 66
- componentes, 66
- constitución, 58
- estructuras, 72

- fraccionamiento, 68
- funciones en el suelo, 77
- naturaleza, 58
- origen y formación, 59
- propiedades generales, 76

I

Ilita, 38
Indol, 377
Indolaldehído, 349
Inositol, 220
Insaturación, 110
Interacciones iónicas, 157
Intercambio aniónico, 114
Intercambio catiónico: factores influyentes, 105
- poder de fijación de cationes, 107
Intercambio iónico en suelos, 99
- mecanismo, 102
Invertasa, 312
Isopentenilpirofosfato, 229
Isotermos de adsorción, 115

K

Kainita, 259
Klebsiella, 190

L

Laccasa, 388
Leghemoglobina, 428
Levaduras, 28
Lignina, 54, 60
- compuestos, 63
- fórmula, 62
Limo, 23
Lípidos, 54
- biosíntesis, 226
Lombrices, 28

M

Macronutrientes esenciales, 140
Magnesio en el suelo, 316
- dinámica, 316
- pérdidas, 318
Magnesio en la Naturaleza ciclo, 318
Magnesio en la planta alteraciones por deficiencia y exceso, 314

Magnesio en la planta, 309
 - funciones, 310
 Magnesio en la planta y en el suelo, 309
 Magnesita, 316
 Magnetita, 325
 Malaquita, 395
 Malonil coenzima A, 228
 Manganeso en el suelo, 354
 - dinámica, 354
 - formas, 353
 Manganeso en la planta, 341
 - alteraciones por deficiencia y exceso, 352
 - fotosíntesis, 342
 - funciones, 342
 - metabolismo auxínico, 348
 Manganeso en la planta y en el suelo, 341
 Manganita, 354
 Materia orgánica: componentes, 53
 Meteorización, 16, 18
 Metilmalonil coenzima A, 428
 Metilmalonil coenzima A mutasa, 428
 Metionina, 274
 Micas, 34
 - hidratadas, 43
 Micronutrientes esenciales, 140
 Minerales intermedios, 46
 Mohos, 28
 Molibdeno en el suelo dinámica, 408
 Molibdeno en la planta, 403
 - alteraciones por deficiencia y exceso, 406
 - funciones, 404
 Molibdeno en la planta y en el suelo, 403
 Montmorillonita, 41, 301
 Moscovita, 259

N

Nemátodos, 28
 Nitratación, 205
 Nitrato reductasa, 168, 255, 329, 404
 Nitratos: lixiviación, 213
 Nitrificación, 204
 - factores influyentes, 204
 Nitritación, 205
 Nitrito reductasa, 168, 329
 Nitritos: descomposición, 212
 Nitrogenasa, 196, 197, 329, 404
 Nitrógeno en el suelo, 183
 - dinámica, 186
 - fijación biológica, 188
 - fijación no simbiótica, 188
 - fijación simbiótica con leguminosas, 191
 - fijación simbiótica con no leguminosas, 195

- suelo ganancias, 186
 - otras aportaciones, 199
 - pérdidas, 187, 209
 - transformaciones, 187, 200
 Nitrógeno en la Naturaleza ciclo, 215
 Nitrógeno en la planta, 165
 - absorción, 167
 - alteraciones por deficiencia y exceso, 180
 - funciones, 180
 - origen, contenido y formas, 165
 - reducción del nitrato, 167
 Nostoc, 190
 Nutrientes no esenciales, 142

O

o-acetilserina, 277
 Olivino, 316
 Ornitina, 349
 Oúrinas, 166
 Oxidación, 19
 Óxido nítrico, 211
 Óxido nítrico, 211
 Óxidos hidratados, 47, 101

P

PAL, 221
 PAPS, 276
 PAPSoxidasa, 277
 Peroxidasa, 331
 Pigmentos, 54
 Piridoxina, 323
 Pírimidinas, 166
 Pirita, 325
 Pirolusita, 354
 Piruvatoquinasa, 256
 Plastocianina, 389, 392
 Porcentaje de saturación de bases, 110
 Porfobilinógeno, 228, 331
 Potasio en el suelo, 259
 - consumo de lujo, 268
 - dinámica, 260
 - equilibrio y factores influyentes, 263
 - pérdidas, 267
 Pótasio en la Naturaleza ciclo, 269
 Potasio en la planta, 251
 - alteraciones por deficiencia y exceso, 255
 - planta economía hídrica, 253
 - funciones, 252
 Powellilita, 407
 Proteínas, 61
 - biosíntesis, 176

- esquema y etapas, 178
- Proteus vulgaris*, 244, 286
- Protopectina, 296
- Protoporfirina IX, 326, 331
- Protoporfirina, 324
- Protozoos, 28
- Punto isoeléctrico, 102
- Punto isoeléctrico, 409

Q

- Quinasa fosfoglicérica, 312
- Quinasa pirúvica, 312

R

- Reacción del suelo, 119
 - complejo coloidal, 123
 - modificación, 131
 - origen y causas, 119
 - relación entre V, T y pH, 125
- Reducción, 19
- Relación C/N, 55
- Resinas, 54
- Rhizobium japonicum*, 193
- Rhizobium melitoli*, 193
- Rhizobium trefolii*, 193
- Rhizobium*, 188, 191, 192
- Ribosa, 177, 222
- Ribosa-5-P, 227
- Ribulosa 1,5-di P, 227
- Ribulosa-5-P, 227
- Rivoflavina, 323
- Rocas ígneas, 16
- Rocas sedimentarias, 16
- Rotíferos, 28

S

- Sacarosa sintetasa, 254
- Sacarosa, 227, 254, 312
- Scenedesmus obliquus*, 343
- Sedoheptulosa-1,7-di P, 227
- Sedoheptulosa-7-P, 227
- Serina, 278, 377
- Serpentina, 316
- Siderita, 325
- Silicatos, 34
 - fórmula, 35
 - propiedades coloidales, 35
- Silice: tetraedro, 36
- Silicio en el suelo, 426
 - dinámica, 426

- Silicio en la planta, 425
 - funciones, 425
- Silicio en la planta y en el suelo, 425
- Silvina, 259
- Silvinita, 259
- Sinergismos, 158
- Smitssonita, 381
- Sodio en el suelo dinámica, 422
- Sodio en la planta, 419
 - funciones, 419
- Sodio en la planta y en el suelo, 419
- Stremgita, 234
- Succinil coenzima A sintetasa, 256
- Succinil coenzima A, 228, 256, 330, 331, 428, 428
- Suelo, 15
 - acidez activa, 127
 - acidez de cambio, 127
 - acidez total, 127
 - acidez, 120
 - acidificación, 131
 - alcalinidad, 121
 - alcalinización, 132
 - análisis mecánico, 23
 - cargas, 100
 - coloides, 100
 - diagrama triangular, 25
 - fase gaseosa, 22
 - fase líquida, 22
 - fase sólida, 22
 - fracciones coloidales, 100
 - fracciones, 23
 - horizonte, 21
 - modalidades de acidez, 126
 - modificación de la reacción, 131
 - perfil, 20
 - poder amortiguador, 128
 - textura, 23
 - variaciones de pH, 122
- Sulfurilasa, 276
- Superóxido dismutasa, 389

T

- Tanino, 54
- Taranakita, 234
- Tenorita, 395
- Thiobacillus*, 288
- Thiobacterias, 288
- Tiamina pirofosfato, 313
- Tiamina, 274, 323
- Timina, 177
- Tirosina, 390
- TPP, 221, 280

Transaminación, 377
Transaminasa glutámico aspártica, 174
Transaminasas, 173
Transulfuración, 278
Triosa fosfato, 228
Triptamina, 377
Triptófano sintetasa, 377
Triptófano, 377

U

UDP, 221
UDP-glucosa, 254
UDP-transglucosilasa, 254
Uracilo, 177
Urea, 166, 349
Uridinfosfoglucosa pirofosforilasa, 362

V

Vanadio en el suelo, 432
- situación, 432
Vanadio en la planta, 430
- funciones, 430
Vanadio en la planta y en el suelo, 430
Variscita, 234
Vermiculita, 46
Vitamina C, 350
Vitaminas, 166
Vivianita, 234

W

Wavellita, 234
Willemita, 381
Wulfenita, 407

X

Xilulosa-5-P, 227