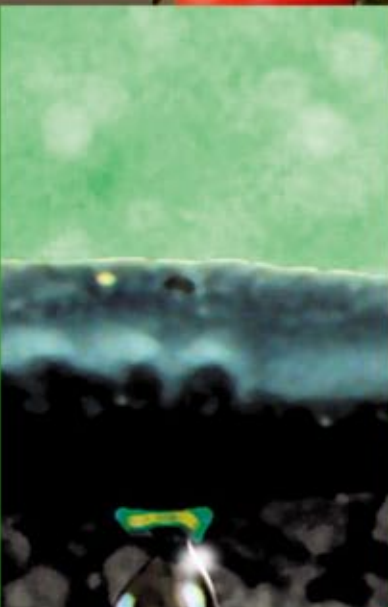




International
Fertilizer Industry
Association

INTERNATIONAL
POTASH INSTITUTE



Fertirrigación

*Una herramienta para
una eficiente fertilización
y manejo del agua*

U. Kafkafi and J. Tarchitzky

Fertirrigación

Una herramienta para una eficiente fertilización y manejo del agua

U. Kafkafi y J. Tarchitzky

Traducción al español: R. Melgar

La designación empleada y la presentación del material en este informe no implican la expresión de opinión alguna por parte de la Asociación Internacional de la Industria de Fertilizantes ni del Instituto Internacional de la Potasa. Esto incluye asuntos pertinentes al estatus legal de cualquier país, territorio, ciudad o área o sus autoridades, o concerniente a la delimitación de sus fronteras o límites.

Fertirrigación. Una herramienta para una eficiente fertilización y manejo del agua
Primera edición, IFA, París, Francia, e IIP, Horgen, Suiza, noviembre 2012
Copyright 2012 IFA e IIP. Todos los derechos reservados
ISBN 978-2-9523139-9-5

Esta publicación puede ser descargada del sitio web de la IFA y del IIP.
Para obtener una copia, contáctese con la IFA.



Asociación Internacional de la Industria de
Fertilizantes
28, rue Marbeuf
75008 París
Francia
Tel: +33 1 53 93 05 00
Fax: +33 1 53 93 05 45/ 47
publications@fertilizer.org
www.fertilizer.org



Instituto Internacional de la Potasa
Baumgärtlistrasse 17
P.O. Box 260
8810 Horgen
Suiza
Tel: +41 43 8104922
Fax: +41 43 8104925
ipi@ipipotash.org
www.ipipotash.org

Impreso en Francia
Fotos de tapa: Haifa (izquierda), Yara International ASA (centro y derecha)

Índice

Acerca de la obra	7
Agradecimientos	9
Lista de abreviaturas, acrónimos y símbolos	10
Resumen	13
1. Introducción	14
2. Fertirrigación	17
2.1. Definición	17
2.2. Equipamiento en la fertirrigación	17
2.2.1. Sistemas de riego por gravedad	17
2.2.2. Sistemas presurizados de riego	18
2.3. Dosificación de fertilizantes en la fertirrigación	19
2.4. Fertilizantes apropiados para la fertirrigación	19
3. Propiedades del suelo y condiciones de crecimiento de las plantas	23
3.1. Régimen hídrico y distribución del agua en el suelo	23
3.2. Régimen de aireación	24
3.3. Distribución de raíces	25
3.4. Distribución de sales y nutrientes	28
3.5. Suministro de nutrientes desde un emisor	29
3.6. Fertirrigación en suelos alcalinos vs. suelos ácidos	30
3.6.1. Suelos alcalinos	30
3.6.2. Suelos ácidos	30
4. Nitrógeno (N) en la fertirrigación	32
4.1. Formas del nitrógeno en los fertilizantes	32
4.2. Reacciones en el suelo	32
4.2.1. Urea	32
4.2.2. Amonio	33
4.2.3. Nitrato	33
4.3. Consideraciones sobre la aplicación de fertilizantes nitrogenados en la fertirrigación	34
4.3.1. Pérdidas potenciales de fertilizante nitrogenado desde el volumen ocupado por raíces viables	34
4.3.2. Programación del riego o velocidad de descarga para prevenir el encharcado bajo el emisor	34

4.4. Conveniencia de formas de fertilizante nitrogenado según el suelo y las condiciones de crecimiento	35
4.5. Movimientos de las formas de N en la fertirrigación y estrategias de aplicación	36
4.5.1. Nitrato de amonio	36
4.5.2. Urea	37
4.6. Consideraciones relativas a la fisiología	37
4.6.1. Sensibilidad de los cultivos al amonio	39
4.6.2. Temperatura de la zona radicular	40
4.6.3. El estadio fisiológico de la planta	41
4.7. Esquemas cuantitativos de fertirrigación con N de acuerdo con el crecimiento de las plantas	41
4.7.1. Cronograma de la demanda del cultivo	41
4.7.2. Oscilación de absorción de N con el desarrollo del cultivo	43
4.8. Absorción de N	43
5. Fósforo (P) en la fertirrigación	45
5.1. Interacciones de los fosfatos con las partículas del suelo: adsorción, desorción, precipitación y recuperación	45
5.1.1. Iones fosfato y pH de la solución de suelo	45
5.2. Excreciones de las raíces y absorción del P	46
5.3. El efecto de los fertilizantes de N en la absorción del P	46
5.4. Movimiento de los fosfatos en el suelo desde el punto del gotero	47
5.5. Fertilizantes fosfatados	49
5.5.1. Ácido fosfórico	49
5.5.2. Fertilizantes polifosfatos	50
5.5.3. Urea fosfato (UP) $(\text{CO}(\text{NH}_2)_2 \cdot \text{H}_3\text{PO}_4)$	51
5.5.4. Fosfato monopotásico (MKP) (KH_2PO_4)	51
5.5.5. Fosfato monopotásico (MKP) acidulado $(\text{KH}_2\text{PO}_4 + \text{H}_3\text{PO}_4)$	51
5.5.6. Fosfato monoamónico (MAP) $(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4)$	51
5.6. Absorción del P	52
6. Potasio (K) en la fertirrigación	54
6.1. Interacciones del potasio con las partículas del suelo: adsorción, desorción y fijación	54
6.2. Clases de fertilizantes potásicos usados en la fertirrigación	54
6.3. Ventajas de la fertirrigación con K	55
6.4. Evaluación de los aniones de los fertilizantes potásicos usados en la fertirrigación	56
6.5. Movimiento del potasio desde el punto del gotero	57
6.6. Absorción del potasio	57
7. Nutrientes secundarios en la fertirrigación	59
7.1. Calcio (Ca)	60
7.2. Magnesio (Mg)	60

7.3. Azufre (S)	61
7.4. Ca, Mg y S en las fuentes de agua de riego	61
8. Micronutrientes	62
8.1. Observaciones visuales	62
8.2. Micronutrientes en la fertirrigación	62
8.3. Formas de fertilizantes micronutrientes usados en la fertirrigación	62
8.3.1. Boro (B)	63
8.3.2. Cloro (Cl)	63
8.3.3. Cobre (Cu)	64
8.3.4. Hierro (Fe)	64
8.3.5. Manganeseo (Mn)	65
8.3.6. Molibdeno (Mo)	66
8.3.7. Zinc (Zn)	66
8.4. Disponibilidad de micronutrientes en función del pH del suelo	66
9. Calidad del agua y la fertirrigación	68
9.1. Efecto en la nutrición del cultivo	68
9.1.1. Fuentes de aguas salinas	68
9.1.2. Aguas servidas tratadas (AST)	70
9.2. Calidad del agua y el sistema de riego	75
9.2.1. Aguas que contienen hierro ferroso (Fe^{2+})	75
9.2.2. Aguas que contienen Ca y Mg	76
9.2.3. Interacciones entre P, Ca y Fe en el agua de riego para fertirrigación	77
10. Fertirrigación de cultivos de campo	78
10.1. Maíz	78
10.2. Algodón	81
10.2.1. Crecimiento del algodón y el riego	81
10.2.2. Nutrición del algodón	82
11. Fertirrigación de cultivos frutícolas	88
11.1. Banana (o plátano)	88
11.2. Viñedos	90
12. Fertirrigación de cultivos hortícolas	93
12.1. Papas (o patatas)	93
12.1.1. Demanda de agua	94
12.1.2. Demanda de nutrientes	94
12.1.3. Sistemas de riego por goteo en la producción de papas en varios países	97
12.1.4. Panorama de la fertirrigación en papas	99
12.2. Tomates	100
12.2.1. Tomates cultivados en invernáculos	100
12.2.2. Salinidad	103
12.2.3. Fertirrigación de tomates para procesado industrial	105
12.2.4. Calidad industrial del tomate	106

13. Fertirrigación en floricultura y plantas ornamentales cultivadas en el suelo	113
13.1. Alegría (<i>Impatiens</i>)	113
13.2. Rosas	114
13.3. Claveles	115
14. Fertirrigación de especies en medios de cultivo sin suelo y sustratos de crecimiento	116
14.1. Definición de medio de crecimiento	116
14.2. Medios de crecimiento usados en recipientes para el cultivo de plantas	117
14.2.1. Medios de crecimiento minerales	117
14.2.2. Medios de crecimiento orgánicos	117
14.3. Características de los medios de crecimiento	117
14.3.1. Características físicas	117
14.3.2. Características químicas	118
14.4. Características químicas y contenido de nutrientes	118
14.4.1. Relación C/N y concentración de N	118
14.4.2. Capacidad de intercambio catiónico (CIC)	118
14.4.3. pH	120
14.5. Aplicación de la fertirrigación	121
15. Monitoreo del agua, el suelo y la planta en la fertirrigación	123
15.1. Monitoreo de la calidad del agua de irrigación	123
15.2. Monitoreo del suelo y del medio de crecimiento	127
15.2.1. Suelo	127
15.2.2. Monitoreo de los medios de crecimiento y drenaje	128
15.3. Monitoreo del cultivo	129
16. Tendencias futuras en la fertirrigación	133
Bibliografía	134

Acerca de la obra

Este libro surge de un proyecto conjunto entre el Instituto Internacional de la Potasa (IIP) y la Asociación Internacional de la Industria de los Fertilizantes (IFA). Tiene como objetivo atender las necesidades de la industria, el mundo científico, los extensionistas y los responsables de políticas agrícolas, esperando que sea considerado una fuente de información de las interacciones entre el suelo, el agua y el fertilizante durante el proceso de la fertirrigación. Los autores intentaron reunir el amplio conocimiento y la información existente respecto de la fisiología vegetal, la nutrición de los cultivos y las técnicas de irrigación, que luego sintetizaron en una guía de información práctica sobre las operaciones de la fertirrigación de campo y de invernadero. A través de la fertirrigación se reafirman los principios de las 4 c (fuente correcta, dosis correcta, momento correcto y lugar de colocación correcto), a la vez que se dan al lector consejos sobre la selección de productos fertilizantes apropiados para la fertirrigación en distintos momentos y para muchos cultivos de campo y frutihortícolas. La conveniencia de algunos fertilizantes para la fertirrigación se explica desde la perspectiva de la demanda fisiológica de la planta a lo largo de varias etapas de su crecimiento, del tipo de suelo o medios de crecimiento, de las condiciones climáticas y de la calidad del agua para irrigación.

Acerca de los autores

Uzi Kafkafi

Nacido en 1934 en Tel Aviv (Israel), Uzi Kafkafi recibió en 1963 su PhD en ciencias del suelo de la Universidad Hebrea de Jerusalén, con la tesis “Colocación del fósforo”. Sus trabajos iniciales de investigación incluyen la evaluación de la disponibilidad de nutrientes en los suelos y la identificación de las formas de adsorción del fosfato a las partículas de arcilla.

En 1977 fue designado para dirigir el primer Centro de Investigación y Desarrollo en Israel, que reunió a científicos de institutos de investigación y a productores de cultivos para desarrollar cultivos protegidos en dunas arenosas. La fertirrigación de tomates en dunas de arena fue su primer trabajo en la materia en 1968. Desde 1966, su principal interés ha sido el efecto de las formas de nitrógeno en el suelo y en las soluciones de nutrientes, y la competencia de las plantas por la absorción del nitrato y el cloruro. En 1986 se incorporó a la Facultad de Agricultura en Rehovot de la Universidad Hebrea de Jerusalén, como profesor de nutrición de cultivos y agricultura de tierras áridas.

Uzi Kafkafi fue miembro del directorio científico del Instituto Internacional de la Potasa (IIP), y se desempeñó como consultor de industrias israelíes de fertilizantes. En 1996 le concedieron el Premio IFA Internacional de Nutrición de Cultivos por su investigación y contribución al desarrollo de la fertirrigación.

A lo largo de toda su carrera académica, Uzi Kafkafi ha estudiado varios aspectos de las actividades de las raíces en cultivos de campo y en hidroponía, usando un innovador método radiactivo de colocación en el campo para mapear la actividad de la zona radicular. Además, introdujo el curso de actividad radicular al plan de estudios de la Universidad Hebrea. También se conectó con otros colegas como editor del libro *Las raíces. La mitad oculta*, en el que varios expertos mundiales en estudios de raíces contribuyeron con sus trabajos. Esta colaboración altamente exitosa ha dado lugar a tres ediciones sucesivas de esa obra internacionalmente reconocida. Aunque se retiró oficialmente de la enseñanza activa en 1999, Uzi Kafkafi todavía está vinculado con la asistencia a estudiantes que buscan alcanzar el doctorado. Es consultor en Israel y en China, y publica artículos científicos.

Jorge Tarchitzky

Nacido en 1951 en Bahía Blanca (Argentina), Jorge Tarchitzky se graduó como ingeniero agrónomo en la Argentina en 1974. Terminó en 1980 sus estudios de maestría en Ciencias del Suelo y de Aguas, en la Facultad de Agricultura, en Rehovot. En 1994 obtuvo el doctorado por la Universidad Hebrea de Jerusalén; su tesis de PhD fue “Interacciones entre sustancias húmicas, polisacáridos y minerales de arcilla y su efecto sobre la estructura del suelo”. En el año 1980 fue designado consejero regional en el Servicio de Campo para Suelo y Aguas del Servicio de Extensión del Ministerio de Agricultura de Israel, asesorando a productores agrícolas en el manejo de la irrigación y de la fertilización de cultivos y de sistemas de fertirrigación. En 1992 fue designado consejero nacional para la Salinidad y la Irrigación de Agua de Efluentes, cargo en el que estuvo a cargo del entrenamiento de agentes y consultores regionales de extensión en lo referente a la calidad de aguas, suelos y salinidad del agua, el uso de aguas residuales para la irrigación de cultivos, la utilización de desechos sólidos agrícolas y municipales para la nutrición de cultivos y enmiendas del suelo.

Desde 1998 sirvió como consejero en Calidad Ambiental en Agricultura para el Consejo de Administración del Ministerio de Agricultura y de Desarrollo Rural. En 2006 fue designado jefe del Departamento de Servicio de Campo de Suelos y Aguas, en el Servicio de Extensión del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural.

En 2008, Jorge Tarchitzky se incorporó al Departamento de Ciencias del Suelo y de Aguas en la Facultad “Roberto H. Smith”, de Agricultura, Alimentación y Ciencias Ambientales de la Universidad Hebrea de Jerusalén, donde es actualmente investigador asociado senior. Es responsable del curso “Reutilización de aguas residuales tratadas para irrigación de cultivos y sus consecuencias para el medio ambiente”. También actúa en la dirección de estudiantes de maestría y doctorado, y se desempeña como consultor de instituciones gubernamentales y empresas privadas en el campo de la calidad de aguas y aspectos medioambientales en la agricultura.

Agradecimientos

Queremos agradecer sinceramente por sus críticas y comentarios constructivos a:

- Eran Barak, Haifa Chemicals, Israel
- Kevin Moran, Yara, Reino Unido
- Giuseppe Natale, Valagro, Italia
- Terry Tindall, Simplot, EE.UU.
- Harmen Tjalling Holwerda, SQM, Bélgica

Por la revisión y corrección de los borradores a:

- Hillel Magen, IIP, Suiza
- Patrick Heffer, IFA, Francia
- Angela Olegario, IFA, Francia
- Ernest Kirkby, Reino Unido, por la edición
- Claudine Aholou-Pütz, IFA, Francia, por la diagramación

Estamos muy agradecidos por el apoyo recibido durante nuestro arduo trabajo de revisión de toda la literatura mundial sobre riego por goteo y en la combinación de esta información con nuestra experiencia práctica, para proveer al agricultor de una herramienta práctica para manejar y operar con seguridad la fertirrigación en varios cultivos de campo, frutícolas y hortícolas.

Agradecemos a Patricia Imas por la asistencia en el manuscrito traducido y a Edgardo Imas por la corrección del texto en español.

A todos aquellos que nos aportaron ilustraciones y fotografías, usadas o no en este libro.

A la Asociación Internacional de la Industria de los Fertilizantes (IFA) y al Instituto Internacional de la Potasa (IIP) por el apoyo financiero para la publicación de este libro.

Uzi Kafkafi y Jorge Tarchitzky, abril 2011.

Lista de abreviaturas, acrónimos y símbolos

Abreviaturas

ADP	adenosin difosfato
APP	polifosfato de amonio
ATP	adenosin trifosfato
DBO	demanda bioquímica de oxígeno
CIC	capacidad de intercambio catiónico
cm	centímetro
cm ³	centímetro cúbico
cmol	centimol de carga
C/N	relación carbono/nitrógeno
DDS	días después de la siembra/trasplante
MS	materia seca
dS m ⁻¹	deci-Siemens por metro
DTPA	ácido dietilen-triamin-penta acético
CE	conductividad eléctrica
EDDHA	ácido etilen-diamin-diorto-hidroxifenil acético
EDTA	ácido etilen-diamin-tetra acético
g	gramo
ha	hectárea
HAP	hidroxi apatita
HDP	fosfato hidroxí dicálcico
kg	kilogramo
kg ha ⁻¹	kilogramo por hectárea
kPa	kilopascal
L	litro
lb	libra
lb a ⁻¹	libras por acre
m ³	metro cúbico
meq	mili equivalente
meq g ⁻¹	mili equivalente por gramo (nota: cmolc por 100 g es ahora usado para reemplazar meq en CIC)
mm	milímetro
mg	miligramo
mg L ⁻¹	miligramo por litro

MKP	fosfato monopotásico
mL	mililitro
mmol	milimol
mM	milimolar
mol	mol
MOP	muriato de potasio (también conocido como cloruro de potasio)
pH	concentración de ion H (medida de acidez o alcalinidad)
ppm	partes por millón
RAS	relación de adsorción de sodio
TAS	tratamiento del acuífero del suelo
SDI	riego por goteo subsuperficial
SOP	sulfato de potasio
SST	sólidos suspendidos totales
AST	aguas servidas tratadas
t ha ⁻¹	toneladas por hectárea

Acrónimos

EPA	Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental)
EEUU	Estados Unidos de América
UE	Unión Europea

Símbolos

Al	aluminio
B	boro
B(OH) ₃	ácido bórico
B(OH) ₄ ⁻	borato
Ca	calcio
CaCl	cloruro de calcio
CaCO ₃	carbonato de calcio
Ca(NO ₃) ₂	nitrato de calcio
5 Ca(NO ₃) ₂ · NH ₄ NH ₃ · 10H ₂ O	nitrato de calcio calcáreo
Cd	cadmio
Cl	cloruro
CO(NH ₂) ₂	urea
Cu	cobre

Fe	hierro
Fe ²⁺	ion ferroso
Fe ³⁺	ion férrico
H ⁺	ion hidrógeno
HCO ₃	bicarbonato
HPO ₄ ²⁻	fosfato de hidrógeno
H ₂ PO ₄ ⁻	fosfato de dihidrógeno
H ₃ PO ₄	ácido fosfórico
K	potasio
KCl	cloruro de potasio
K ₂ O	potasa
KH ₂ PO ₄	fosfato monopotásico (MKP)
KNO ₃	nitrato de potasio
K ₂ SO ₄	sulfato de potasio
Mg	magnesio
Mg(NO ₃) ₂	nitrato de magnesio
Mn ²⁺	ion manganeso
N	nitrógeno
Na	sodio
NaCl	cloruro de sodio
NH ₃	amoníaco
NH ₄ ⁺	ion amonio
NH ₄ CO ₃	carbonato de amonio
NH ₄ H ₂ PO ₄	fosfato monoamónico (MAP)
NH ₄ NO ₃	nitrato de amonio
NH ₄ OH	hidróxido de amonio
(NH ₄) ₂ SO ₄	sulfato de amonio
Ni	níquel
NO	óxido nítrico
NO ₃ ⁻	ion nitrato
N ₂ O	óxido nitroso
P	fósforo
Se	selenio
Si	sílice
SO ₄ ²⁻	sulfato
Zn	zinc

Resumen

El objetivo de esta obra es proveer al agricultor avanzado y al personal de extensión de un amplio espectro de experiencia y conocimiento de la fertirrigación. En los 16 capítulos se le ofrecerán al lector consejos sobre la apropiada selección de compuestos fertilizantes para usar en la fertirrigación de varios cultivos de campo y frutihortícolas de determinadas regiones, basados en el tipo de suelo y las condiciones climáticas. Como resultado de aplicar los principios de la cuatro c, se sincronizarán las demandas de nutrientes del cultivo con el aporte de fertilizantes a lo largo del crecimiento.

El libro se centra principalmente en las interacciones de fertilizantes en el suelo y su capacidad de suministrar nutrientes a los cultivos. La fertirrigación es una herramienta para satisfacer la demanda diaria de agua y de nutrientes por parte de las plantas, según los requerimientos de su etapa específica del crecimiento a través del desarrollo para alcanzar la máxima eficiencia del fertilizante aplicado. Usando esta estrategia de nutrición por una fertilización sitio-cultivo-etapa específica, las unidades de aplicación de fertilizante en fertirrigación se calculan sobre la base de la demanda individual de la planta expresada en unidades de miligramos de nutrientes (N, P o K) por día a lo largo de todo el período de crecimiento. Adoptando esta estrategia, los nutrientes fácilmente solubles pueden suministrarse directamente al volumen explorado por las raíces, de tal modo que se maximiza la eficiencia de uso de los nutrientes y se minimiza la sobrefertilización y las pérdidas de agua a las napas subterráneas, causando el menor daño posible al ambiente.

Los autores han intentado reunir el conocimiento de nutrición y fisiología vegetal de muchos centros y laboratorios de investigación en el mundo entero e integrar esta información con el uso actual de fertilizantes en la producción comercial de cultivos de campo y de invernaderos. Han evitado ex profeso una discusión detallada del agua del suelo y de su distribución, en parte debido a la escasez de espacio pero también porque hay muchas y excelentes revisiones anteriores sobre este asunto, que han sido citadas al describir los procesos de transporte del fertilizante en el suelo. La extensa experiencia de los autores en el uso del fertilizante en sistemas de cultivos de campo y de invernadero se refleja en el tratamiento de estudios específicos de casos y en el amplio conocimiento de numerosas referencias aparecidas en publicaciones de todo el mundo durante más de medio siglo. Los fertilizantes más convenientes para la fertirrigación se explican desde el punto de vista de la demanda fisiológica de la planta en varias etapas de crecimiento, del suelo y del tipo de medios de crecimiento, las condiciones climáticas y la calidad del agua de irrigación. La fertirrigación ha permitido a los agricultores cultivar en dunas de arena para la producción de hortalizas, áreas que en el pasado fueron clasificadas como “regiones no agrícolas.” La introducción de técnicas de fertirrigación probadas y eficientes en el mundo ayudará a recuperar extensas áreas en las que se revertirá el proceso de desertificación en tareas agrícolas productivas, así como se salvarán aguas preciosas evitando que se pierdan en sistemas agrícolas convencionales.

1. Introducción

La composición química y el contenido de nutrientes de los fertilizantes solubles simples y compuestos producidos por la industria son casi los mismos en todo el mundo. Por una parte, el uso de estos fertilizantes es altamente sitio-específica, dependiendo del tipo del suelo, las condiciones climáticas y la calidad del agua. Por otra, la demanda de fertilizantes en sistemas intensivos de producción es particularmente variable, cambiando de manera rápida durante la estación y el año, e incluso del día a la noche. Los requisitos de nutrientes de cultivos anuales son mucho más dependientes del estado biológico del crecimiento, variando desde la siembra hasta la cosecha, y, de la misma forma, en los cultivos frutícolas desde los estadios vegetativos a los de fructificación.

El riego por sistemas tradicionales de inundación o de aspersión aérea resulta en un perfil de suelo mojado. Los nutrientes vegetales se distribuyen en este volumen de suelo húmedo, dependiendo de su movilidad y de las reacciones de adsorción y precipitación que ocurren en la superficie de las partículas de suelo.

El movimiento de agua en el suelo desde un gotero como punto de emisión progresa tanto en dirección circular horizontal en la superficie del suelo como en dirección vertical hacia abajo del perfil de suelo. Esto crea un volumen mojado del suelo donde el contenido de agua varía en profundidad (Bresler, 1977). La interacción de las partículas del suelo con el agua es principalmente física en esencia, e implica la absorción y las fuerzas capilares que controlan la distribución de un volumen de agua en un volumen de suelo. El volumen del suelo está sujeto a la compactación mecánica por el tráfico de implementos agrícolas que afectan la distribución de los tamaños de los poros y el contenido volumétrico de agua del suelo.

La necesidad de suministrar cada vez más alimentos a una creciente población del mundo estimuló el interés por aumentar la eficiencia del riego. El riego por goteo fue desarrollado antes de 1920, y luego, en los años treinta, se desarrollaron los aspersores y tubos de acero liviano (Keller y Bliesner, 1990).

Los primeros experimentos que condujeron al desarrollo del riego por goteo datan de fines del siglo XIX, pero el verdadero progreso no fue alcanzado sino hasta fines de los cincuenta y principios de los sesenta (Keller y Bliesner, 1990). La rápida implementación del riego por goteo comenzó en los años setenta como resultado de la invención de tubos de plástico baratos. Los sistemas de goteo o de microrriego incluyen los de goteo propiamente dichos, los microjet y los emisores microaspersores. El área mundial regada por estos sistemas en 1974 era cerca de 66.000 hectáreas, las que aumentaron a 2,98 millones de hectáreas en 1996 (Magen e Imas, 2003) y a 6 millones de hectáreas en 2006 (Sne, 2006).

La adopción de métodos de riego por goteo con el mojado parcial del suelo llevó adelante la transición hacia sistemas radicales restringidos solamente a la zona de mojado. Estos sistemas radicales limitados modificaron considerablemente el manejo

de la fertilización tradicional. Este cambio desde la aplicación de fertilizantes al voleo en toda la superficie a una fertilización en bandas y a fertilizantes agregados al agua de riego fue desarrollado para satisfacer las necesidades de nutrientes a cultivos regados por goteo. Cronológicamente, la fertirrigación fue el resultado del riego localizado.

Las reacciones de las partículas del suelo con los diferentes compuestos químicos entregados por las soluciones de riego por goteo son, sin embargo, muy complejas. Implican interacciones químicas entre los componentes de las partículas del suelo que llevan cargas eléctricas permanentes en sus superficies, reacciones de precipitación con el carbonato de calcio (calcáreo) en suelos alcalinos y con el aluminio y el hierro en los suelos ácidos.

El nitrógeno (N) en las soluciones fertilizantes está disponible principalmente en tres formas:

- **N-amoniaco:** que tiene carga eléctrica positiva (catión).
- **N- nitrato:** que tiene carga eléctrica negativa (anión).
- **N- urea:** que es una molécula sin carga.

Estos compuestos nitrogenados encuentran un ambiente sumamente complejo cuando entran en contacto con el suelo. El catión amonio se fija por adsorción a las partículas cargadas negativamente de la arcilla y es oxidado lentamente a N-nitrato por las bacterias del suelo. El N-nitrato entra en el suelo debajo del gotero en una zona saturada de agua, desprovista de oxígeno, que contiene bacterias del suelo que procuran activamente una fuente del oxígeno para cubrir sus demandas respiratorias. En consecuencia, antes de que pueda ser absorbida por la planta, una parte del nitrato oxidado presente en el suelo puede reducirse a óxido nitroso (N_2O) o a nitrógeno elemental (N_2), para volver en forma gaseosa a la atmósfera. Otra parte del nitrato se mueve con el agua y se acumula a una concentración muy alta en el límite entre las zonas mojadas y secas del suelo. La fracción más importante es la de N-nitrato proveniente del fertilizante nitrogenado aplicado que será absorbido por las plantas, un factor clave que determina el éxito de la fertirrigación económica. La urea, molécula sin carga eléctrica, puede viajar considerables distancias en el suelo con el agua móvil. Una vez en contacto con la ureasa, enzima específica en el suelo, la molécula de urea se convierte rápidamente a dióxido de carbono (CO_2) y amoníaco, la que se disuelve en agua y da lugar por algunos días a un aumento localizado del pH del suelo.

Los fertilizantes fosfato solubles son propensos a reacciones de precipitación con calcio (Ca) y magnesio (Mg), ya presentes en el agua de riego cuando la solución tiene un pH superior a 7, o cuando hay hierro soluble (Fe) en un pH bajo. Así, incluso antes de que el fósforo (P) emerja del emisor, tiene que estar protegido contra la precipitación tanto en las líneas de goteo como en los tanques de fertilización. Entre todos los nutrientes aplicados por la fertirrigación, la distancia que el P, una vez en el suelo, se desplaza desde el punto de aplicación es la más pequeña. La fertirrigación con fósforo tiene que considerar la calidad del agua, la composición química del suelo y la edad de la planta.

El potasio (K) es la forma más estable de todos los nutrientes primarios aplicados por la fertirrigación, ya que permanece siempre en la misma forma química como catión monovalente (K^+).

Las dunas arenosas, los suelos altamente calcáreos, salinos y alcalinos ocupan extensas áreas en las zonas áridas del mundo (Richards, 1954). Estos suelos se caracterizan por el bajo contenido de nutrientes disponibles y una baja a media capacidad de retención de agua en sus capas superiores. Estas características dan lugar a una baja densidad de vegetación en estas condiciones climáticas áridas. Las dunas arenosas en zonas desérticas fueron apenas utilizadas para cultivos bajo riego por inundación o por aspersión regular, ya que están localizadas generalmente muy lejos de fuentes de suministro de agua y además tienen muy baja capacidad de retención hídrica. La introducción de la fertirrigación tuvo un importante impacto en la transformación del uso de estas tierras casi improductivas, tales como las dunas arenosas desérticas y los suelos altamente calcáreos, en suelos agrícolas productivos para cultivos comerciales de alto valor (Kafkafi y Bar-Yosef, 1980). En áreas desérticas, la fertirrigación permite el cultivo de plantaciones de dátiles donde el riego se entrega a cada árbol individualmente, previniendo así el derroche de grandes cantidades de agua debido a la evaporación directa de la superficie expuesta del suelo. De manera semejante, la técnica del riego por goteo permite el cultivo en suelos marginales en los que nunca antes se había hecho una agricultura productiva.

Varias revisiones se ocupan de aspectos técnicos de la incorporación del fertilizante en el agua de irrigación y de las características esenciales de los fertilizantes usados en la fertirrigación. El propósito principal de este manuscrito es explicar el comportamiento básico de los fertilizantes solubles suministrados por el riego por goteo en el desarrollo de diversos cultivos, en varios tipos de suelos y en distintas condiciones climáticas. La fertirrigación permite al agricultor seleccionar y utilizar fertilizantes de la calidad más conveniente para el suelo, la fuente de agua de riego, el cultivo y las condiciones climáticas, y así producir cosechas de alta calidad y, al mismo tiempo, prevenir la contaminación ambiental.

2. Fertirrigación

2.1. Definición

La práctica de aplicar fertilizantes a los cultivos por vía del agua de riego se llama fertirrigación o fertirriego (Bar-Yosef, 1991). La fertirrigación es una moderna técnica agrícola que provee la excelente oportunidad de maximizar los rendimientos y a la vez reducir la polución ambiental (Hagin *et al.*, 2002), al incrementar la eficiencia de uso de los fertilizantes, minimizar la aplicación de éstos y aumentar los beneficios económicos de la inversión en fertilizantes. En la fertirrigación, el momento, las cantidades y la concentración de los fertilizantes aplicados son fácilmente controlados. La incorporación de los fertilizantes en el sistema de riego demanda los siguientes requerimientos básicos:

- Equipo
 - En sistemas de riego presurizados, la presión de inyección de la solución fertilizante debe ser mayor que la presión interna.
 - Un filtro que prevenga el taponamiento de los emisores por partículas sólidas que puedan llegar al emisor.
 - Una válvula que prevenga el retroflujo.
- Fertilizantes
 - Solubilidad de los fertilizantes en el agua de riego, que contiene constituyentes químicos que pueden interactuar con los fertilizantes disueltos, provocando efectos indeseados.
 - El grado de acidez de los fertilizantes en la solución fertilizante debe considerarse en relación con su corrosividad a los componentes del sistema de riego.

2.2. Equipamiento en la fertirrigación

La elección del equipo de fertirrigación debe tener en cuenta tanto los requerimientos del cultivo como la capacidad del sistema de riego.

2.2.1. Sistemas de riego por gravedad

Es un sistema muy simple que sólo es aplicable a sistemas de riego que trabajan a presión atmosférica, donde el agua fluye en canales abiertos. La solución fertilizante gotea en el canal de riego debido a que el tanque fertilizante está a un nivel superior sobre el canal. Para obtener un buen mezclado con el agua, la velocidad de la corriente de riego debe ser suficientemente alta.

2.2.2. Sistemas presurizados de riego

La inyección de fertilizante consume energía para superar la presión interna de la red de riego. El equipo de inyección de fertilizantes se clasifica en tres grupos principales, de acuerdo con el medio empleado para obtener la mayor presión para la solución fertilizante.

- Inyección por un **aparato Venturi**. Ésta es una unidad que hace uso del principio de succión de Venturi al emplear la presión inducida por el flujo de agua para chupar la solución fertilizante del tanque hacia la línea de riego. Una contracción cónica del tubo induce un aumento de la velocidad del flujo de agua y una disminución de la presión a un valor extremadamente bajo, causando la succión de la solución fertilizante (a través del filtro de malla) desde un tubo en el tanque alimentador hacia el sistema de riego. Por medio del ajuste de una válvula se puede controlar la diferencia de velocidades en los dos extremos.
- Inyección por **presión diferencial**. Este sistema utiliza un tanque metálico presurizado hermético con protección interna antiácida en sus paredes, donde la presión diferencial se crea por una válvula mariposa que conduce parte del agua de riego hacia el tanque. Éste es el único sistema de fertirrigación que permite el uso tanto de fertilizantes sólidos como líquidos. Se dispone de una cantidad completa de fertilizante dentro del tanque para aplicar a un área determinada bajo riego. La concentración en el emisor al final de la línea se mantiene constante en tanto haya fertilizante sólido presente en el tanque y que el fertilizante se diluya rápidamente. Una vez que la fracción sólida se disuelve completamente, la concentración del fertilizante se reduce a una tasa exponencial. En la práctica, cuando haya pasado a través del tanque un volumen equivalente a cuatro tanques, sólo quedan cantidades ínfimas dentro de éste. Este equipo se utilizó en los primeros estadios del desarrollo de la fertirrigación. Puede regarse un área limitada por vez, según el volumen del tanque. Si se usan fertilizantes sólidos, deben manipularse con cuidado. Los fertilizantes que tienen reacción endotérmica cuando se disuelven, como el KNO_3 , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, urea, NH_4NO_3 , KCl y $5\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot \text{NH}_4\text{NH}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, disminuyen la temperatura en el tanque, y cuando se agregan en horas frías a la mañana temprano antes del riego, parte de la solución puede congelarse, lo que genera cambios inesperados en la concentración de nutrientes.
- Inyección por **presión positiva**. Las bombas de inyección pueden aumentar la presión en el tanque de la solución madre del fertilizante líquido y llevar a una relación predeterminada entre el volumen de solución fertilizante y el volumen de agua de riego, alcanzando así, por lo tanto, una distribución proporcional de nutrientes en el agua de riego. Entre las ventajas de usar bombas de inyección se mencionan el mantenimiento sin pérdidas de la presión de la línea de riego, su exactitud en la dosificación y la capacidad de proveer una concentración determinada a lo largo de todo el ciclo de riego. Se usan dos tipos comunes de inyectores en fertirrigación: las bombas de pistón y las bombas de diafragma. Las fuentes más comunes de energía para las bombas de fertirrigación son:
 - **Energía hidráulica**. Este aparato usa la presión hidráulica del agua de riego para inyectar la solución de nutrientes, mientras que el agua usada para empujarla

(aproximadamente tres veces el volumen de la solución inyectada) es descargada. Estas bombas son adecuadas para fertilizar en áreas sin electricidad.

- **Bombas eléctricas dosificadoras.** Estos aparatos activan las bombas fertilizadoras. Son comunes en invernaderos y en áreas donde hay electricidad disponible y confiable.

2.3. Dosificación de fertilizantes en la fertirrigación

De acuerdo con Sne (2006), para aplicar la misma dosis de fertilizante durante un estadio específico fenológico de una planta, pueden realizarse dos patrones diferentes de aplicación según el cultivo, el tipo de suelo y el sistema de manejo del establecimiento.

- **Dosificación cuantitativa.** Una cantidad determinada de fertilizante se inyecta en el sistema de riego durante cada aplicación de agua. La inyección puede iniciarse y controlarse manual o automáticamente.
- **Dosificación proporcional.** En este proceso se mantiene una relación constante y predeterminada entre el volumen de agua de riego y el volumen de solución fertilizante, cuyo resultado es una concentración constante de nutrientes en el agua de riego.

2.4. Fertilizantes apropiados para la fertirrigación

Un amplio rango de fertilizantes, tanto sólidos como líquidos, es adecuado para la fertirrigación, dependiendo de las propiedades fisicoquímicas de la solución fertilizante. Para operaciones de gran escala a campo, las fuentes de fertilizantes sólidos son normalmente una alternativa menos cara que las formulaciones líquidas. Las solubilidades de estos fertilizantes varían sensiblemente. Cuando se cambia a una fuente fertilizante sólida, pueden evitarse problemas en los tanques nutritivos asegurándose de que haya suficiente agua agregada a la solución madre.

Deben considerarse cuatro factores principales al elegir fertilizantes para fertirrigación (Kafafi, 2005):

- Tipo de cultivo y estadio de crecimiento.
- Condiciones del suelo.
- Calidad de agua.
- Disponibilidad y precio del fertilizante.

El tipo de fertilizante para fertirrigación debe ser de alta calidad y de elevada solubilidad y pureza, contener bajos niveles de sales y un pH aceptable, y adecuarse al programa de manejo del establecimiento. Las características de los fertilizantes, así como sus efectos en el suelo y los cultivos, son presentados más adelante.

Hagin y Lowengart-Aycicegi (1996) enumeraron las principales propiedades relacionadas con la conveniencia de los fertilizantes para el método de inyección. Son las siguientes:

- **Forma.** Los fertilizantes sólidos solubles y líquidos son adecuados para la fertirrigación, dependiendo de la disponibilidad, precio y conveniencia.

Tabla 1.1. Carta de compatibilidad entre fertilizantes (Roddy, 2008).

	Urea	Nitrato de amonio	Nitrato de amonio	Sulfato de amonio	Nitrato de calcio	Nitrato de potasio	Cloruro de potasio	Sulfato de potasio	Fosfato de amonio	Sulfato de Fe, Zn, Cu, Mn	Quelatos de Fe, Zn, Cu, Mn	Sulfato de magnesio	Acido fosfórico	Acido sulfúrico	Acido nítrico
Urea	✓														
Nitrato de amonio	✓	✓													
Sulfato de amonio	✓	✓	✓	✓											
Nitrato de calcio	✓	✓	x	✓											
Nitrato de potasio	✓	✓	✓	✓	✓										
Cloruro de potasio	✓	✓	✓	✓	✓	✓									
Sulfato de potasio	✓	✓	R	✓	x	✓	R	✓							
Fosfato de amonio	✓	✓	✓	✓	x	✓	✓	✓	✓						
Sulfatos de Fe, Zn, Cu, Mn	✓	✓	✓	✓	x	✓	✓	R	X	✓					
Quelatos de Fe, Zn, Cu, Mn	✓	✓	✓	✓	R	✓	✓	✓	R	✓	✓				
Sulfato de magnesio	✓	✓	✓	✓	x	✓	✓	R	x	✓	✓	✓			
Acido fosfórico	✓	✓	✓	✓	x	✓	✓	✓	✓	✓	R	✓	✓		
Acido sulfúrico	✓	✓	✓	✓	x	✓	✓	R	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Acido nítrico	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	x	✓	✓	✓	✓

✓ = compatible x = incompatible R = compatibilidad reducida

- **Solubilidad.** Alta y completa solubilidad son prerrequisitos para los fertilizantes usados en la fertilización. La solubilidad de los fertilizantes en general aumenta con la temperatura, dependiendo del fertilizante.
- **Interacción entre fertilizantes en la solución.** Cuando un tipo de fertilizante o más son preparados y mezclados por el agricultor, o en la línea de riego (en menor medida), debe chequearse la compatibilidad entre ellos (ver Tabla 1.1). Normalmente deben tomarse en cuenta algunas precauciones básicas:
 - Asegurarse de que los fertilizantes que se utilizarán sean compatibles para prevenir la precipitación. Evitar especialmente mezclar soluciones fertilizantes que contengan calcio con soluciones que contengan fosfatos o sulfatos cuando el pH en la solución no sea suficientemente ácido.
 - Corroborar la solubilidad y la precipitación potencial con la composición química del agua local. Antes de usar un nuevo fertilizante, mezclar 50 ml de la solución fertilizante con 1 litro del agua de riego y observar la precipitación dentro de las siguientes 1 a 2 horas. Si se forma precipitado o la muestra se vuelve turbia, evite utilizar este fertilizante en el sistema de riego (Roddy, 2008).

Tabla 1.2. Solubilidad, pH y otras características de algunos fertilizantes (adaptado de Primary Industries: Agriculture, 2000).

	Cantidad máxima (kg) disuelta en 100 L a 20°C	Tiempo para disolver (min)	pH de la solución	Insolubles (%)	Comentarios
Urea	105	20 ¹	9,5	Despreciable	La solución se enfría a medida que se disuelve la urea.
Nitrato de amonio NH ₄ NO ₃	195	20 ¹	5,62	–	Corrosivo para el hierro galvanizado y bronce.
Sulfato de amonio (NH ₄) ₂ SO ₄	43	15	4,5	0,5	Corrosivo para el acero común.
Fosfato mono-amónico MAP	40	20	4,5	11	Corrosivo para el acero al carbono.
Fosfato diamónico DAP	60	20	7,6	15	Corrosivo para el acero al carbono.
Cloruro de potasio KCl	34	5	7,0–9,0 ²	0,5	Corrosivo para el bronce y el acero común.
Sulfato de potasio K ₂ SO ₄	11	5	8,5–9,5 ²	0,4–4 ²	Corrosivo para el acero común y el concreto.
Fosfato mono-potásico MKP	213	–	5,5+/-0,5	<0,1	No corrosivo.
Nitrato de potasio KNO ₃	31	3	10,8	0,1	La solución se enfría a medida que el producto se disuelve. Corrosivo para los metales.

¹La temperatura de la solución cae a 0°C; por eso toma más tiempo para que se disuelva todo el material.

²Estos datos están dentro del rango encontrado en varios análisis y se refieren a fuentes de diferentes orígenes.

- Chequear la temperatura resultante de mezclar varios tipos de fertilizantes en condiciones de campo. Algunos fertilizantes solos o en combinación pueden bajar la temperatura de la solución a niveles de congelamiento (por ejemplo, KNO_3 , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, urea, NH_4NO_3 , KCl y $5\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot \text{NH}_4\text{NH}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$). Sin embargo, cuando se adquieren fertilizantes líquidos listos para su uso, la reacción endotérmica no ocurre en el campo; por eso se pueden alcanzar concentraciones de nutrientes un poco más altas en la solución.
- **Corrosividad.** Pueden ocurrir reacciones químicas entre los fertilizantes y las partes metálicas del sistema de riego. La corrosión puede dañar componentes metálicos del sistema, como tuberías de acero no protegidas, válvulas, filtros y unidades de inyección.

Algunas características de los fertilizantes previamente descritos son presentadas en las Tablas 1.1 a 1.3. La Tabla 1.1 describe tres grados de compatibilidad entre varios fertilizantes usados en fertirrigación. La Tabla 1.2 describe características de las soluciones de fertirrigación hechas en condiciones de campo. La Tabla 1.3 muestra los cambios en la solubilidad de algunos fertilizantes con cambio de temperatura.

Tabla 1.3. Solubilidad aproximada (gramos de producto por 100 g de agua) a diferentes temperaturas (adaptado de Primary Industries: Agriculture, 2000).

Temperatura	KNO_3	KCl	K_2SO_4	NH_4NO_3	Urea
10°C	21	31	9	158	84
20°C	31	34	11	195	105
40°C	46	37	13	242	133

3. Propiedades del suelo y condiciones de crecimiento de las plantas

3.1. Régimen hídrico y distribución del agua en el suelo

En los sistemas de riego tradicional como inundación, por surcos o aspersión, el agua se aplica normalmente en grandes cantidades con intervalos de varios días, o aun semanas entre turnos de riego. Por el contrario, los sistemas de riego por goteo (goteo, en superficie o subsuperficie, microaspersión o microjet) se caracterizan por intervalos más cortos, que duran horas o unos pocos días, que expiden relativamente pequeñas cantidades de agua por unidad de tiempo desde cada emisor. En el riego de inundación o por aspersión el movimiento de agua dentro del suelo sigue un patrón de percolación vertical unidimensional. En los sistemas de riego por goteo, sin embargo, normalmente se moja una porción de la superficie en dimensión horizontal y vertical del suelo.

El movimiento de agua dentro del suelo sigue un patrón de flujo tridimensional donde hay dos fuerzas que afectan simultáneamente el flujo de agua en el suelo, las que se denominan gravitacional y de capilaridad. En la primera, la gravedad dirige el agua hacia abajo; en cambio, las fuerzas de capilaridad impulsan el agua en todas las direcciones. En el riego por goteo subsuperficial, el patrón de mojado es muy diferente, y el agua puede moverse parcialmente también hacia arriba (Sne, 2006). El porcentaje de área humedecida comparada con el área total cultivada depende del volumen y la dosificación de la descarga en cada punto de emisión, del espaciamiento de los puntos de emisión y del tipo de suelo que se riega (Keller y Bliesner, 1990). El riego por goteo se caracteriza por expedir cantidades relativamente pequeñas de agua por unidad de tiempo desde cada emisor. En los períodos estivales secos, parte del suelo permanece seco durante toda la etapa de riego (por ejemplo, en el riego del algodón, cuando las líneas de irrigación se disponen alternativamente en cada surco de por medio, como en la Figura 3.1).

Bresler (1977) realizó una de las primeras revisiones sobre la distribución del agua desde un punto de emisión en un suelo homogéneo, compactado a densidad aparente constante. En este trabajo, Bresler pudo mostrar que para un tipo específico de suelo, la distancia vertical y horizontal del agua que se mueve en el suelo con el tiempo desde un punto de emisión es función de la velocidad de la descarga. A una baja velocidad o volumen por unidad de tiempo (2 L h^{-1}), el agua penetra más profundamente en el suelo que la misma cantidad de agua descargada a una tasa de 20 L h^{-1} .

Si bien los principios teóricos de transporte de agua se usan en la planificación de las instalaciones de líneas de riego por goteo (Dasberg y Or, 1999), la distribución real del agua desde un emisor en el campo es muy afectada por varios factores relacionados con el suelo. Éstos incluyen el tipo y contenido de arcilla, la preparación mecánica de la superficie y la composición química del suelo, así como su contenido de carbonatos



Figura 3.1. Riego de un cultivo de algodón (© Haifa Chemicals).

y el desarrollo de salinidad o sodicidad a consecuencia del riego. Investigaciones recientes sobre patrones de distribución que emplean aguas servidas tratadas para el riego por goteo (Tarchitzky *et al.*, 2007) demostraron que los compuestos orgánicos disueltos, presentes en las aguas servidas tratadas, inducen cambios significativos en el movimiento del agua en comparación con el riego realizado con aguas dulces naturales. Estos investigadores midieron un aumento en las características hidrofóbicas del suelo debido a la adsorción de películas orgánicas sobre las partículas de suelo, luego del secado de éste entre los intervalos de riego. Estos ciclos de secado y mojado del suelo cambiaron sus características de mojado. Tales alteraciones en las propiedades de mojado del suelo durante los ciclos de humedecido y secado en los lotes regados también pueden esperarse por las excreciones orgánicas intensas de las raíces (Imas *et al.*, 1997a y 1997b), y por la alta actividad de los microorganismos del suelo, o como resultado de elevadas aplicaciones de abonos orgánicos.

3.2. Régimen de aireación

Luego de un riego por inundación o por aspersión, el perfil completo del suelo queda mojado, y más tarde se seca debido a los efectos combinados de la transpiración de las plantas y la evaporación directa desde la superficie del suelo. La operación de riego del cultivo, en especial en suelos pesados arcillosos en condiciones de veranos cálidos, está expuesta a largos turnos de riego que reponen el agua extraída de la zona de las raíces. Tales períodos intensos de riego, que pueden durar varias horas durante el ciclo, en presencia de plantas que crecen activamente, pueden causar un área de sobresaturación de agua en el perfil de suelo, causando zonas con deficiencias de oxígeno y, como consecuencia, resultar en grandes pérdidas de nitratos por desnitrificación (Bar-Yosef y Kafkafi, 1972).

En los suelos pesados, la tasa de descarga de un emisor a menudo excede la de infiltración en el suelo, observándose que éste se encharca debajo del emisor (Bar-Yosef y Sheikolslami, 1976). El área encharcada bajo el gotero es mayor en suelos arcillosos que en suelos arenosos (Ben-Gal y Dudley, 2003). El encharcado induce una escasez de oxígeno debajo del emisor. La velocidad de penetración de agua en el suelo desde un punto de emisión fue estudiada por Silberbush *et al.* (1979), que midieron la distribución de humedad, el contenido de oxígeno y la distribución de raíces a varias distancias desde el punto de entrada del agua. Huck y Hillel (1983) encontraron que el contenido de humedad justo debajo del punto de entrada casi saturaba el suelo y daba como resultado un mínimo contenido de oxígeno.

3.3. Distribución de raíces

La distribución de agua y nutrientes en suelos bajo riego por goteo es vital para determinar el patrón de distribución de raíces. Esta distribución varía y depende de numerosos factores, que incluyen el tiempo, el tipo de cultivo, la humedad y la temperatura del suelo, y el tipo y la concentración de fertilizante nitrogenado. En la zona saturada debajo de la descarga del gotero, las raíces mueren rápidamente debido a la falta de oxígeno en el suelo (Huck y Hillel, 1983) y, por lo tanto, las raíces vivas se encuentran solamente en el espacio de suelo que provee tanto de humedad como de oxígeno (ver en el Capítulo 4 más discusiones sobre pérdidas de N-NO_3).

El riego por goteo permite la entrega directa de agua desde la fuente emisora al punto de demanda, cercano a una planta en crecimiento, con mínimas pérdidas de agua por evaporación desde áreas de suelo no cubiertas por plantas. Las raíces de las plantas proliferan donde el agua y los nutrientes están disponibles. Esta adaptación radicular a las condiciones de suelo húmedo permite el uso de una única línea entre dos hileras de cultivo (Figura 3.1), o incluso una línea de riego por cada tres surcos de un cultivo de pimientos (Figura 3.2) o el mojado parcial de la superficie del suelo de quintas frutales (Figura 3.3) y plantaciones (Figura 3.4).

Aplicaciones frecuentes y pequeñas de agua en el riego por goteo inducen sistemas radiculares someros y compactos (Sne, 2006) en comparación con sistemas radiculares más profundos y extendidos en cultivos regados por aspersión o por inundación. En contraste, a causa de una mejor aireación y nutrición en la zona de transición del volumen de suelo regado por goteo, la densidad de las raíces finas es significativamente más alta que en los sistemas radiculares que crecen bajo sistemas de riego por aspersión (Figura 3.5; Sne, 2006). Por lo tanto, los agricultores deben evitar la compactación del suelo en las zonas de plantación durante la preparación del suelo (Huck, 1970).



Figura 3.2. Una línea de riego por goteo cada tres líneas de pimientos en el sur de Israel (© Hillel Magen).



Figura 3.3. Mojado parcial de la superficie del suelo con fertirrigación en una plantación de cítricos (© Yara International ASA).



Figura 3.4. Mojado parcial de la superficie del suelo con fertirrigación de una plantación de bananos en el sur de China (© Hillel Magen).

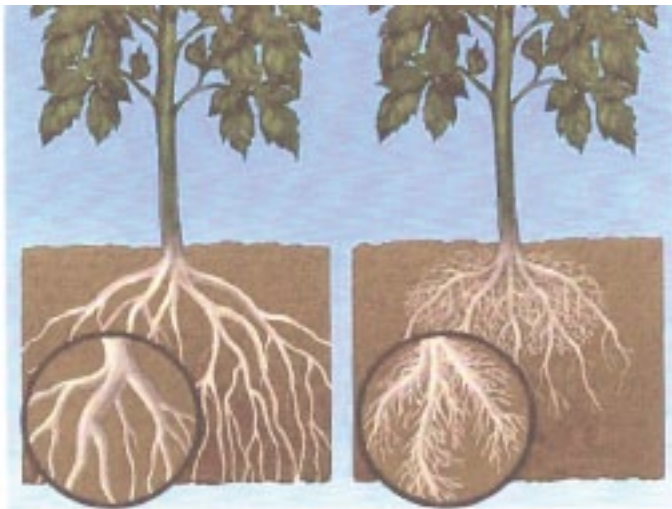


Figura 3.5. Ilustración de un sistema radicular en riego por goteo (derecha) vs. un sistema radicular en riego por aspersión (izquierda) (© Netafim).

3.4. Distribución de sales y nutrientes

El patrón de penetración de agua tiene influencia adicional en la distribución de nutrientes y de sales en el volumen de suelo mojado. Con el riego por surcos, las sales tienden a acumularse en la línea de siembra debido a que el lavado ocurre primariamente debajo del surco de riego. Los sistemas de riego por inundación y por aspersión que mojan el volumen completo de suelo crean un perfil que aumenta sostenidamente en salinidad con la profundidad del suelo hacia el fondo de la zona de raíces (Hoffman *et al.*, 1990).

En sistemas de riego por goteo, el mojado más superficial implica que áreas de mojado superficial están expuestas a la evaporación directa de agua y a una gradual acumulación de sales en la superficie del suelo. Los ciclos repetidos de riego y de evaporación crean un área de lavado justo debajo del gotero, y la sal se acumula en los bordes del volumen mojado en la superficie del suelo (Kafkafi y Bar-Yosef, 1980). La distribución de sales en la zona de mojado se presenta en la Figura 3.6 (Kremmer y Kenig, 1996).

Cuando se agrega al suelo un soluto no adsorbible (por ejemplo, nitrato o cloruro) por vía del agua de riego, se espera que el gradiente de concentración resultante en el suelo sea similar a la distribución de una sal tal como se describió previamente. En contraste, los nutrientes adsorbibles (por ejemplo, fósforo, potasio y amonio) son de baja movilidad en el suelo. En suelos arcillosos y arenosos, la distribución de nitratos es similar a la distribución del agua. Por el contrario, el movimiento del fósforo está restringido a una distancia aproximada de 11 cm y 6 cm desde el emisor, en suelos arenosos y arcillosos, respectivamente, según han reportado Bar-Yosef y Sheikolslami (1976). El potasio es fuertemente retenido en suelos arcillosos, en especial en presencia de illita. La fertirrigación con fósforo en riego por aspersión debería evitarse, debido

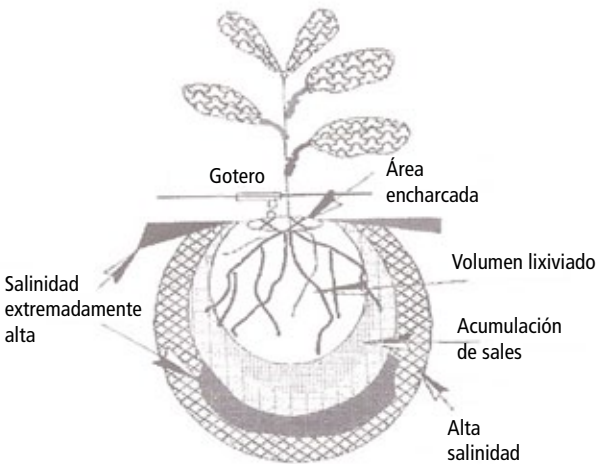


Figura 3.6. Distribución de sales en un volumen de suelo húmedo debajo del emisor (adaptado de Kremmer y Kenig, 1996).

a que el movimiento de este nutriente es más limitado aún que en el riego por goteo. Casi todo el P aplicado con riego por aspersión se acumula en los primeros centímetros superiores del perfil de suelo, que se seca rápidamente entre los ciclos de riego.

3.5. Suministro de nutrientes desde un emisor

El volumen de raíces en el riego por goteo es relativamente pequeño, comparado con el volumen total bajo riego por aspersión o superficial (Sagiv *et al.*, 1974). Esto requiere que los cultivos que crecen en suelos arenosos pobres reciban un suministro continuo de agua y nutrientes minerales durante el ciclo completo de crecimiento, desde la siembra hasta la cosecha. El conocimiento básico del suministro de nutrientes a cultivos bajo fertirrigación surge de los estudios iniciales de fisiología en nutrición de cultivos en medios hidropónicos (Benton-Jones, 1983). En los cultivos sin suelo e hidropónicos, la técnica consiste en reemplazar la totalidad de la solución nutritiva con soluciones frescas a intervalos periódicos. Este procedimiento asegura que no habrá deficiencia de ningún nutriente durante el ciclo de crecimiento. Una estrategia cercana a este método fue desarrollada por Assouline *et al.* (2006). Estos investigadores utilizaron riegos diarios múltiples en pimiento cultivado en un suelo franco arenoso. El empleo de tal protocolo de cultivo de suministro continuo de nutrientes en suelos arenosos en condiciones de campo, sin embargo, podría resultar en un sobresuministro de nutrientes que podría lixiviarse debajo de la zona radicular y consecuentemente en contaminación con nitrato en las fuentes de agua subterráneas.

Comparando los riegos diarios múltiples en condiciones de campo, con un riego una vez por día o una vez por semana en un huerto de cítricos, Bar-Tal *et al.* (2006, informe no publicado) reportaron un aumento en la salinidad de las capas superiores de suelos en los tratamientos con múltiples riegos diarios. Este problema se desarrolló a causa de que los riegos insuficientes no ayudaron a lixiviar los cloruros. En ciclos frecuentes de riego, la proporción de pérdida de agua evaporada desde las capas superiores de suelo húmedas es muy alta, lo que hace que la sal se acumule en la superficie del suelo.

Otra estrategia en la fertirrigación para cultivos de campo ha sido descrita por Scaife y Bar-Yosef (1995). En ella las cantidades actuales diarias suministradas de agua y nutrientes acompañan la demanda por transpiración a medida que el cultivo crece y se desarrolla con el tiempo. Este procedimiento de cultivo es más ambientalmente amigable, pero necesita de un monitoreo diario del agricultor para seguir la demanda de agua y nutrientes. El uso de una técnica de “alimentación diaria” en maíz cultivado con un sistema de microaspersor de gravedad permitió que los nutrientes sean aportados al cultivo y evidenció la capacidad de las plantas para absorber todos los nutrientes, sin dejar excesos a las plantas vecinas (Abura, 2001). En establecimientos bien equipados, donde se programa por computadora el control de suministro de agua y nutrientes, es posible acompañar la demanda diaria, y así ahorrar significativas cantidades de agua y nutrientes.

3.6. Fertirrigación en suelos alcalinos vs. suelos ácidos

3.6.1. Suelos alcalinos

Las características de los suelos básicos o alcalinos son: presencia de carbonato de Ca activos, exceso de iones de Ca solubles, una alta velocidad de nitrificación y una leve fijación del P agregado por los fertilizantes. Todos los tipos de fertilizantes nitrogenados son adecuados para agregarse con el agua de riego. Aun la urea, que es completamente soluble y causa un aumento inicial del pH debido a la actividad de la ureasa en el suelo, es segura para ser utilizada en el riego por goteo, ya que no se espera un incremento local en la concentración de urea en el suelo. En suelos alcalinos, las arcillas son principalmente del tipo 2:1 y el amonio se adsorbe a las arcillas, evitando causar toxicidad por amonio a las raíces, dado que se diluye en el agua de riego. El mismo razonamiento se aplica a todos los fertilizantes basados en amonio. El pH del suelo no tiene influencia en ninguna prioridad de selección para el K, los nutrientes secundarios y todos los micronutrientes que sean suministrados en forma de quelatos, excepto para el Fe^{2+} . Dado que Fe-EDTA no es estable por encima de pH 6,5, en suelos básicos con pH de más de 7,5 se recomienda el uso del Fe-DTPA, mientras que el Fe-EDDHA se recomienda para suelos extremadamente alcalinos, dado que es estable hasta con un pH de 9,0.

3.6.2. Suelos ácidos

Los suelos ácidos se caracterizan por iones activos de aluminio (Al), escasez de Ca, baja velocidad de nitrificación y una fuerte fijación de P de los fertilizantes. El uso de fertilizantes con nitrato como fuente de N aumenta el pH de la rizósfera debido a la nutrición con nitratos tal como se sugiere en la Tabla 3.1 (ver Capítulo 4 para una descripción completa). El aumento del pH en la rizósfera alivia la toxicidad de iones de Al y permite la elongación de las raíces.

Tabla 3.1. Fertilizantes recomendados para la fertirrigación en suelos neutros-alcalinos (6,5-8,5) y en suelos ácidos (4,5-6,5).

Nutriente	Suelos neutros-básicos pH 6,5 - 8,5	Suelos ácidos-neutros pH 4,5-6,5
Nitrógeno	Nitrato de amonio (NH_4NO_3)	
	Nitrato potasio (KNO_3)	
	Nitrato de calcio ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$)	
	Urea	
	Sulfato de amonio ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$)	
	Fosfato de amonio ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$)	
Fósforo	Fosfato monopotásico (KH_2PO_4)	
	Polifosfato de amonio	
	Ácido fosfórico (H_3PO_4)	
Potasio	Muriato (cloruro) de potasio (KCl)	
	Sulfato de potasio (K_2SO_4)	
	Nitrato de potasio (KNO_3)	
Nutrientes secundarios	Nitrato de calcio ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$)	
	Nitrato de magnesio ($\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$)	
	Sulfato de potasio (K_2SO_4)	
Micronutrientes	B como ácido bórico	
	Mo como molibdato de sodio	
	Complejos de EDTA con Cu, Zn, Mo, Mn	
	Fe-EDDHA	Fe-EDTA
	Fe-DTPA	

4. Nitrógeno (N) en la fertirrigación

4.1. Formas del nitrógeno en los fertilizantes

Hay tres formas básicas de fertilizantes nitrogenados

- **N-Urea:** una molécula eléctricamente neutra- $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$.
- **N- Amoniaco:** que lleva una carga eléctrica positiva- catión NH_4^+ .
- **N-Nitrato:** que lleva una carga eléctrica negativa- anión NO_3^- .

4.2. Reacciones en el suelo

4.2.1. Urea

La urea [$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$] no lleva carga eléctrica cuando se disuelve en agua pura. Una vez que la urea se pone en contacto con el suelo, se transforma muy rápidamente (entre 24 y 48 horas después de la aplicación) en amonio (NH_3) y dióxido de carbono (CO_2). Esta rápida transformación es efectuada por la enzima ureasa, que está presente en la mayoría de los suelos. El amonio producido interactúa inmediatamente con el agua para dar hidróxido de amonio, ($\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O} = \text{NH}_4\text{OH}$), lo que resulta en un aumento localizado del pH del suelo. El primer cambio que se observa un día después de la aplicación de urea es un incremento del pH del suelo cerca del sitio donde se incorporó a él (Court *et al.*, 1962).

Cuando se desparraman gránulos de urea en la superficie del suelo, las pérdidas directas a la atmósfera están bien documentadas (Black, 1968; Hoffman y Van Cleemput, 2004). Los principales factores que influyen en la volatilización de amonio luego de la aplicación de urea son:

- Capacidad de intercambio catiónico (CIC).
- pH del suelo.
- Contenido de CaCO_3 .
- Contenido de humedad.

La CIC es función directa del contenido de arcilla del suelo. Las pérdidas de amonio desde el suelo decrecen a medida que aumenta la CIC y son significativas en suelos donde la CIC es menor de $10 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (Volk, 1959), pero se vuelven despreciables en suelo arcillosos (con más de $100 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$). Las menores pérdidas en suelos arcillosos se deben a que el amonio producido durante la hidrólisis de la urea se adsorbe fuertemente a las partículas de arcilla que no son liberadas a la atmósfera, siempre y cuando aquella sea incorporada al suelo.

El pH del suelo es el segundo factor más importante que regula las pérdidas de urea durante la hidrólisis de ésta (Hoffman y Van Cleemput, 1995 y 2004), la extensión de las pérdidas depende de la incorporación de la urea al suelo (Terman y Hunt, 1964). La

aplicación de urea en la superficie del suelo con un pH de 5,2 resultó en pérdidas de N de hasta 70% de la urea aplicada. Este número aumentó a 82% cuando la urea se aplicó al mismo suelo luego de haber sido encalado a pH 7,5. Sin embargo, cuando la urea se mezcló con el suelo al pH original de 5,2, sólo se perdió el 25% de la urea aplicada (Terman y Hunt, 1964).

En la fertirrigación, la urea aplicada se mueve con el agua en el suelo. Su distribución en la zona de suelo húmedo depende del momento de su incorporación con el agua de riego. Cuando se agrega durante el tercer cuarto del ciclo de riego, seguido por un enjuague del resto del ciclo de riego, la urea fertirrigada que alcanza los bordes del bulbo húmedo se vuelve susceptible a la volatilización. La evaporación de la superficie del suelo resulta en un aumento de la concentración de urea cerca de la superficie. Esta urea residual en la superficie también seguramente se perderá en la atmósfera como amoníaco. Tales pérdidas son difíciles de monitorear en condiciones de campo, pero muchos trabajos que han medido la recuperación del N por el cultivo sugieren que ésta es una vía directa para perder N (Haynes, 1985). Cuando el amonio o la urea se usan como fuente de nitrógeno para fertirrigación, también se han reportado pérdidas significativas de óxidos nitroso (N_2O) y nítrico (NO) (Hoffman y Van Cleemput, 2004). Otra preocupación acerca de la urea es el problema potencial relacionado con los efectos dañinos del biuret, una impureza normalmente encontrada a baja concentración. Durante la germinación y los estadios iniciales de crecimiento de los plantines, niveles de biuret superiores al 2 % pueden ser tolerados en la mayor parte de los programas de fertilización (Tisdale *et al.*, 1985).

4.2.2. Amonio

El amonio (NH_4^+) lleva carga eléctrica positiva (catión) y se adsorbe a los sitios cargados negativamente de las arcillas, pudiendo también reemplazar a otros cationes adsorbidos a la superficie de las arcillas. Éstos son principalmente Ca y Mg, que constituyen los principales cationes adsorbidos en el suelo. Como resultado de estas interacciones, el amonio se concentra cerca de los goteros desplazando al Ca y en menor medida al Mg, que se mueven con el frente de mojado. En pocos días, el amonio normalmente se oxida por las bacterias del suelo para formar nitrato, que se dispersa en el suelo con los siguientes ciclos de riego.

4.2.3. Nitrato

El nitrato (NO_3^-) lleva carga eléctrica negativa (anión). No puede, por lo tanto, unirse a las partículas de arcilla de suelos neutros o básicos, que llevan cargas negativas. Sin embargo, el ion nitrato se añade a los óxidos de hierro y aluminio cargados negativamente que están presentes en suelos ácidos. Como en el caso de la urea, el nitrato se mueve con el agua y su distribución en el suelo depende del momento de su inyección a la línea de riego. El nitrato es un fuerte agente oxidante. Bajo el gotero, hay un cierto volumen de suelo que está saturado de agua y, por lo tanto, con deficiencia de oxígeno (condición anaeróbica) (Silberbush *et al.*, 1979; Bar-Yosef y Sheikolslami, 1976; Martínez *et al.*, 1991). En tales condiciones, muchos microorganismos de suelo usan el oxígeno del nitrato en lugar del oxígeno molecular para sus necesidades respiratorias, lo cual genera

pérdidas de óxido nitroso y nitrógeno elemental a la atmósfera. Este mecanismo, la reducción biológica del nitrato a óxido nitroso o nitrógeno elemental (usualmente llamado desnitrificación), es responsable de algunas pérdidas del N aplicado. En un lote de maíz regado en suelos arcillosos, un riego continuo de 70 mm tuvo pérdidas de 250 kg N ha⁻¹ como gas nitrógeno. El efecto combinado del exceso de agua con los factores que causan escasez de oxígeno son responsables de grandes pérdidas gaseosas de N₂ normalmente no percibidas por el agricultor (Bar-Yosef y Kafkafi, 1972). Estos factores incluyen un elevado contenido de arcilla y altas temperaturas de suelo en presencia de raíces activas, las que proveen condiciones para que los microorganismos en la rizósfera usen nitratos en la respiración.

4.3. Consideraciones sobre la aplicación de fertilizantes nitrogenados en la fertirrigación

La cantidad de N absorbido por un cultivo depende de las condiciones de crecimiento del predio en particular y varía de acuerdo con las condiciones de crecimiento de la estación. La mineralización del N de la materia orgánica también varía de año en año. La dosis de aplicación “correcta” de fertilización para un mismo cultivo en el mismo lote es, por lo tanto, diferente de año en año, y puede necesitar ajustes durante la estación de crecimiento.

En relación con el riego y la fertilización con N, el agricultor debería considerar los aspectos mencionados en las siguientes subsecciones.

4.3.1. Pérdidas potenciales de fertilizante nitrogenado desde el volumen ocupado por raíces viables

Hay tres principales clases de pérdidas de N:

- Lixiviado (lavado) del N (nitratos y urea) fuera de la zona radicular.
- Acumulación de sales de N en la superficie seca del suelo debido a la evaporación de la solución del suelo.
- Pérdidas de nitratos por desnitrificación.

4.3.2. Programación del riego o velocidad de descarga para prevenir el encharcado bajo el emisor

Un comando automático de riego del tipo on/off que permita airear la zona de raíces debajo del emisor podría necesitarse para limitar el exceso de saturación de agua; éste sería un procedimiento que podría ahorrar la pérdida de grandes cantidades de N a la atmósfera.

El movimiento del frente de mojado en un suelo arenoso y en otro de textura franca fue descrito por Zhang *et al.* (2004), quienes presentaron un análisis general del efecto de la tasa de descarga de agua de riego en el patrón de distribución de agua del suelo. Para la aplicación de un volumen dado, aumentar la velocidad de descarga de aplicación

incrementa la distribución de agua en dirección horizontal, mientras que su disminución permite que el agua se distribuya mayormente en dirección vertical. Anteriormente se llegó a conclusiones similares a partir de cálculos realizados por Bresler (1977).

4.4. Conveniencia de formas de fertilizante nitrogenado según el suelo y las condiciones de crecimiento

Con temperaturas altas en suelos arcillosos pesados, la urea podría ser la mejor fuente de N, dado que no se perdería por desnitrificación. Sin embargo, como los suelos arcillosos son en general neutros a alcalinos, se podría esperar una mayor volatilización, a causa de que el equilibrio entre NH_3 : $\text{NH}_4\text{OH} \rightarrow \text{NH}_3$ [(gas) + H_2O] se mueve hacia el gas amoníaco en estas condiciones. En suelos arenosos, comparados con la urea los nitratos podrían ser una fuente más apropiada debido a que el alto pH generado durante la actividad de la ureasa podría producir concentraciones tóxicas de amoníaco. Los suelos arenosos tienen una menor CIC y capacidad de retención de agua. Los suelos con una alta CIC mantienen el amonio producido durante la hidrólisis de la urea como amonio adsorbido, y previenen así que el amoníaco dañe las raíces.

Entender las formas del N en los fertilizantes y su reacción y comportamiento en los distintos tipos de suelos es fundamental, por un lado, para aprovechar los beneficios potenciales y, por otro, para evitar los efectos tóxicos en el crecimiento de los cultivos, como se discutirá más adelante. Haynes (1990) estudió en un experimento de campo el movimiento y las transformaciones de N desde amonio, urea y nitrato en un volumen de suelo mojado debajo del gotero emisor, comparando sulfato de amonio, urea y nitrato de calcio. Durante un ciclo de fertirrigación (descarga del emisor de 2 L h^{-1}), el amonio aplicado se concentró en los 10 cm superiores del suelo inmediatamente debajo del emisor, con escaso movimiento lateral. Por el contrario, debido a su mayor movilidad en el suelo, la urea y el nitrato se distribuyeron más uniformemente hacia abajo en el perfil de suelo debajo del emisor, y su extensión lateral en el perfil alcanzó un radio de 15 cm desde el emisor. El N aplicado como urea, se convirtió a N-nitrato más rápidamente que el N aplicado como sulfato de amonio. Haynes (1990) sugirió que la acumulación de grandes cantidades de amonio debajo del emisor probablemente retarde la nitrificación. Esta observación implica que en estas circunstancias las raíces de las plantas deben absorber amonio y no nitrato en condiciones de campo, con sus consecuencias en la fisiología de las plantas y el crecimiento de las raíces. Luego de la conversión a N-nitrato, la fertirrigación, tanto con sulfato de amonio como con urea, causó acidificación del bulbo de mojado. La acidificación estuvo confinada a los primeros 20 cm de suelo en el tratamiento con sulfato de amonio. Sin embargo, a causa de su gran movilidad, la urea fertirrigada (2 L h^{-1}) hizo que la acidificación ocurriera más abajo, llegando a los 40 cm de profundidad. Tal acidez del subsuelo probablemente sea muy difícil de mejorar, y en suelos no calcáreos podría inducir a toxicidad por aluminio. Al elevarse la tasa de descarga del gotero, desde 2 L h^{-1} a 4 L h^{-1} , también aumentó la distribución lateral de la urea en la capa superficial del suelo. Y, como consecuencia, la acidificación estuvo confinada sólo a la superficie (0-20 cm) del suelo.

La elección del fertilizante nitrogenado más adecuado para el tipo de cultivo y de suelo y las condiciones climáticas locales son decisiones clave que debe tomar un agricultor o un asesor de fertilización. Por ejemplo, con los mismos tratamientos de fertilización usados por Haynes (1990) en un suelo calcáreo con agua de riego que contenga iones bicarbonato (HCO_3^-), se esperan las mismas reacciones del fertilizante, pero la condición de alta alcalinidad del suelo podría resultar en cambios significativos en el pH del suelo.

En huertos frutales, las líneas de goteros quedan en el mismo lugar por varios años. El suelo y las plantas están expuestos al mismo tipo de fertirrigación durante muchos años, y los efectos acumulados del N en el suelo y en las raíces pueden ser muy dañinos. Zhang *et al.* (1996) estudiaron el efecto de métodos de fertilización con N en la distribución de raíces y concentración de elementos minerales en árboles de pomelo (o toronja) White Marsh (*Citrus paradise* MacFadyen) injertadas sobre pie de naranjo agrio (*C. aurantium* Lush) en un suelo pobremente drenado. En los primeros 15 cm superficiales del suelo, la densidad de las raíces era significativamente mayor para los árboles que recibieron $112 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ como fertilizante seco granular distribuido al voleo que aquellos que recibieron la misma dosis de N suministrada por fertirrigación. Con ésta, del total de raíces en los primeros 60 cm de suelo, más del 75% se encontraron en los primeros 15 cm y menos del 10% entre 30 y 60 cm. La densidad de raíces fue mayor cerca del emisor. La concentración de N en las raíces fue mayor para los árboles que recibieron fertirrigación en comparación con los árboles que recibieron fertilizante seco al voleo o que no recibieron N. Tales estudios enfatizan el hecho de que la morfología de las raíces de la planta es el resultado de la respuesta de éstas a la concentración de nutrientes específicos suministrados por la fertirrigación. El estudio preciso de la exacta localización de cada forma de N en el volumen de suelo no tiene valor práctico, ya que las raíces responden y se desarrollan en el volumen adecuado del suelo y extraen los compuestos nitrogenados disponibles.

4.5. Movimientos de las formas de N en la fertirrigación y estrategias de aplicación

Las principales consideraciones y la atención de los agricultores que usen fertirrigación deberían enfocarse en la fuente de fertilizante nitrogenado (urea, o sales de amonio o nitratos) más adecuada a las condiciones de cultivo, suelo y clima del agricultor. Esto es especialmente importante en viveros y cultivos bajo plástico o invernaderos.

4.5.1. Nitrato de amonio

La distribución de las concentraciones de amonio y nitrato en el suelo se midió según diferentes estrategias de fertirrigación, que variaron de acuerdo al orden en que se aplicaron el agua y los nutrientes. En la solución emitida desde el gotero, la concentración de amonio fue igual a la de nitrato. Justo debajo del emisor, se observó una concentración extremadamente alta de amonio en el suelo debida a la adsorción a las partículas de arcilla. Al mismo tiempo, los iones nitrato se movieron a los bordes

del bulbo de mojado. Esta observación sugiere que en la práctica de campo el enjuague del remanente de la solución fertilizante en el sistema de líneas de goteros deberá ser lo más corto posible luego de que haya terminado la inyección de nitratos, para evitar las pérdidas potenciales de nitratos desde la zona de raíces. Zhang *et al.* (2004) recomendaron los siguientes procedimientos de fertirrigación para los fertilizantes con nitratos:

- Aplicar sólo agua el primer cuarto del tiempo total de riego.
 - Aplicar la solución de fertilizantes con nitratos durante la mitad del tiempo total de riego.
 - Aplicar agua en el cuarto de tiempo restante del total del turno de riego.
- Este procedimiento mantuvo la mayor parte del nitrato cerca del gotero emisor.

4.5.2. Urea

La urea soluble se mueve con el agua en el suelo. El momento de la inyección de fertilizante a las líneas de riego tiene una gran influencia en la distribución de N en el suelo mojado. Para la misma cantidad de riego, si la urea se aplica en el primer cuarto del ciclo de riego, continuará moviéndose con el agua suministrada más tarde, empujando la urea hacia el extremo del bulbo de mojado. Si la urea se inyecta en la línea de fertirrigación en el último cuarto del período de riego, sin embargo, la urea se encontrará cerca del gotero. Como se mencionó antes, las reacciones secundarias en el suelo del nitrato o la urea no deben ignorarse.

4.6. Consideraciones relativas a la fisiología

A causa del importante rol del N y las reacciones de las diferentes fuentes de N en el suelo, las principales consideraciones y la atención de los agricultores deberían enfocarse en la nutrición nitrogenada. Las principales fuentes de N disponible deberían elegirse de acuerdo con el cultivo y con las condiciones del suelo y el clima local. Los puntos clave para elegir el fertilizante nitrogenado específico relativo a las condiciones fisiológicas son:

- Sensibilidad del cultivo a la nutrición con amonio (Moritsugu *et al.*, 1983; ver 4.6.1).
- Rango de temperaturas en la zona radicular (Ganmore-Newmann y Kafkafi, 1985; ver 4.6.2).
- El estadio fisiológico del cultivo.

En cultivos de campo no fertirrigados, donde todo el fertilizante nitrogenado se aplica de una vez con la preparación del suelo antes de la siembra, o aun cuando se hace una aplicación complementaria, normalmente se elige el tipo de fertilizante nitrogenado teniendo en cuenta su economía y las expectativas de lluvias, para prevenir el lavado de los nitratos debajo de la zona de raíces. En el campo, las raíces del cultivo normalmente absorben los nitratos, aun si se hubiera aplicado como fertilizante de urea o de amonio. En condiciones de suelo saturado, como en el arroz bajo riego de inundación, la elección común será urea o fertilizantes amoniacaes para que el cultivo lo absorba como amonio. Cuando el fertilizante se aplica en plantas que se cultivan

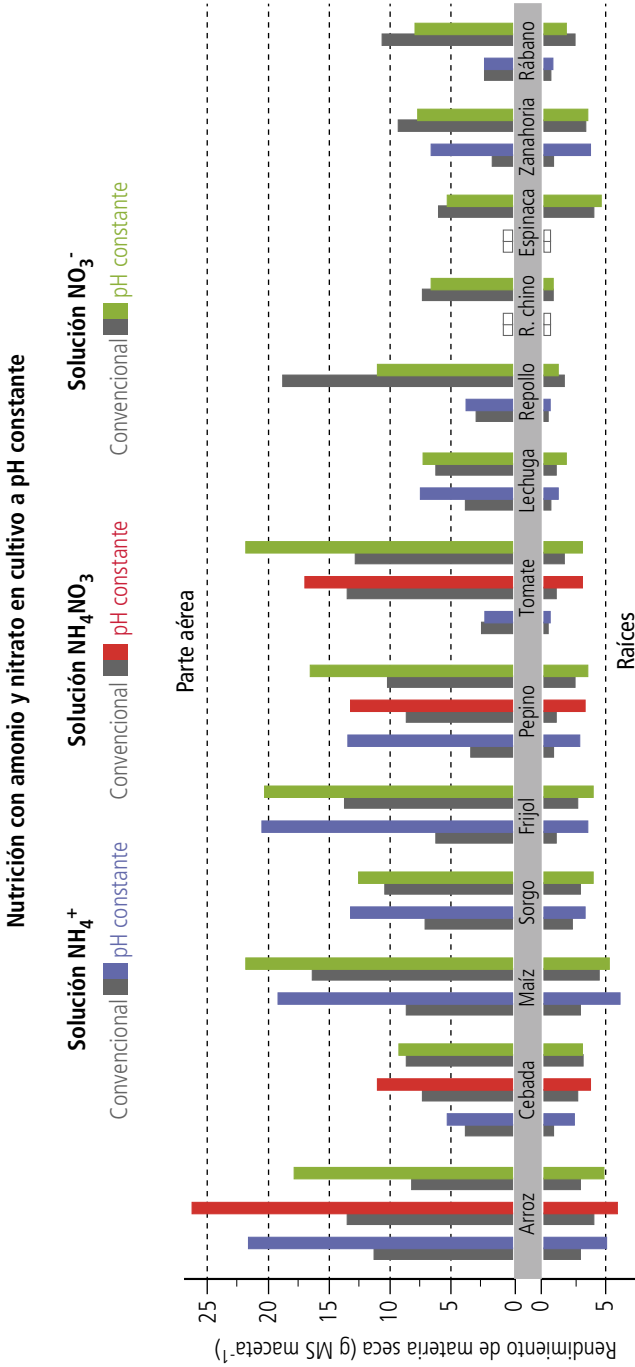


Figura 4.1. Efecto de la fuente de nitrógeno sobre el crecimiento de la planta (adaptado de Moritsugu y Kawasaki, 1983)

en pequeñas macetas, como en la producción intensiva en invernáculos, o fertirrigada diariamente en suelo arenoso, el suministro diario de fertilizante nitrogenado dicta la forma de N que debe ser absorbido por las raíces de las plantas, dado que la tasa de absorción es más rápida que la transformación de N por la actividad bacteriana.

4.6.1. Sensibilidad de los cultivos al amonio

De acuerdo con Moritsugu *et al.* (1983), las diferentes especies vegetales responden de manera distinta a una fuente constante de suministro de N. El preciso trabajo de Moritsugu y Kawasaki (1983) (Figura 4.1) demostró que cuando el N era mantenido a una concentración de 5 mM en la solución (70 mg N L⁻¹), plantas como el arroz, cebada, maíz, sorgo y porotos (judías) eran insensibles a la forma de N suministrada. Sin embargo, plantas de tomate, rábano, repollo chino y espinaca sufrieron con la presencia de amonio en la solución. Las plantas de repollo chino y de espinaca murieron finalmente con la concentración de 5 mM de NH₄⁺. Moritsugu *et al.* (1983) mostraron además que las plantas sensibles que murieron con esa concentración de 5 mM de NH₄⁺ crecieron muy bien cuando se cultivaron a una concentración muy baja de amonio (menor a 0,05 mM de NH₄⁺), la que se suministró en forma continua por medio de un equipo de titulación para mantener una concentración constante de N en la solución luego de la absorción por las plantas (Figura 4.2).

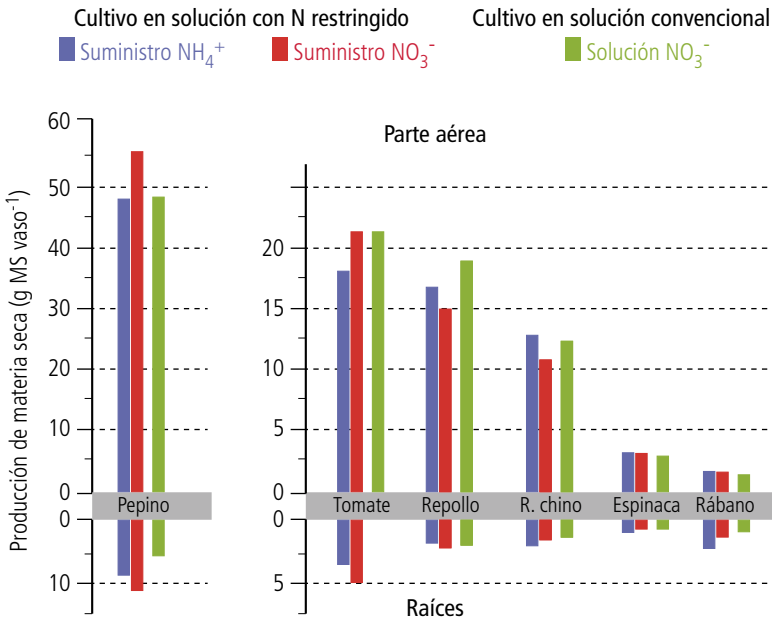


Figura 4.2. Efecto de la fuente de nitrógeno en el crecimiento de las plantas por el método de cultivo con nitrógeno restringido (adaptado de Moritsugu *et al.*, 1983)

4.6.2. Temperatura de la zona radicular

Ganmore-Newmann y Kafkafi (1983) cultivaron plantas de frutilla (o fresa) en soluciones nutritivas con distintas relaciones entre amonio y nitrato, pero con la misma concentración de N total (Figura 4.3). Las plantas crecieron muy bien con la fuente amoniacal cuando las raíces se mantuvieron debajo de 17°C, pero murieron después de cuatro semanas, cuando la temperatura de las raíces se aumentó a 32°C. A medida que se elevó la temperatura de las raíces, el contenido de azúcares de las raíces disminuyó en ambos tratamientos de N.

Con la nutrición a base del amonio, el contenido de azúcares fue más bajo a cada temperatura de las raíces en comparación con las raíces alimentadas a base de nitrato. En la práctica, la sensibilidad a la forma de N de las distintas especies ante diversas temperaturas de las raíces explica muchos casos y problemas, especialmente en plantas cultivadas en macetas plásticas que crecen durante períodos cálidos en el campo y principalmente en viveros. La razón de las diferencias encontradas entre las plantas en su sensibilidad al amonio resulta de la variación en la distribución del azúcar entre los tallos y las raíces. Las especies monocotiledóneas son menos sensibles a la concentración del N amoniacal que las plantas dicotiledóneas de hoja ancha, que son muy sensibles a la concentración de amonio (Moritsugu *et al.*, 1983).

La asimilación del nitrógeno en las plantas (Marschner, 1995) ocurre tanto en las raíces como en las hojas. Cuando se absorbe el N-nitrato, entre el 70 y el 90% se transporta como nitrato a las hojas (Van Beusichem *et al.*, 1988). En las hojas, el nitrato se reduce a amonio. La toxicidad del amonio en las hojas se previene cuando el amonio se combina inmediatamente con los azúcares para producir un aminoácido, generalmente glutamina (Marschner, 1995). El azúcar producido en las células foliares

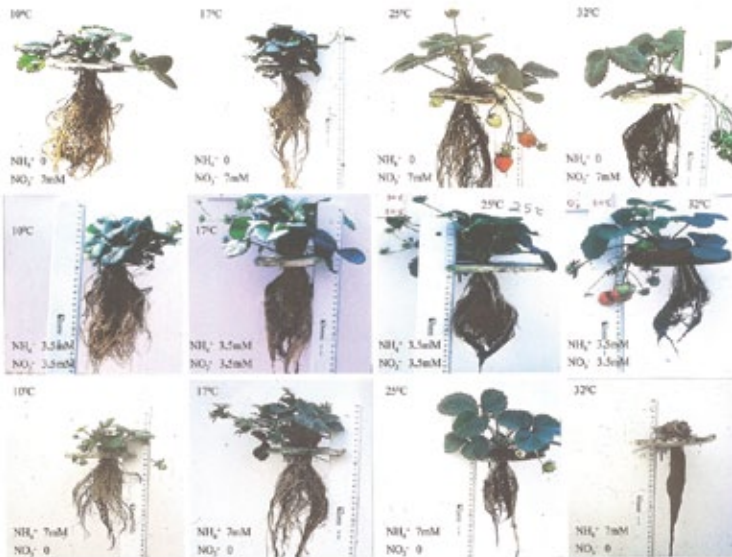


Figura 4.3. Plantas de frutilla cultivadas en soluciones nutritivas con distintas relaciones NH_4^+ a NO_3^- , pero con la misma concentración de N total y diferentes temperaturas (Ganmore-Newmann y Kafkafi, 1983).

está muy próximo al sitio de su consumo y se utiliza así en la desintoxicación del amonio en la célula de la hoja. Sin embargo, cuando el amonio se incorpora a la raíz, todo el N-amonio se metaboliza totalmente en la raíz, consumiendo el azúcar que se transporta a las raíces por el flujo del floema (Marschner, 1995). En las raíces, hay dos destinos principales de consumo de los azúcares: (i) respiración de las células y (ii) metabolismo del amonio. Cuando la temperatura de la raíz aumenta, la concentración de azúcares se reduce debido al aumento en su consumo por la respiración de las células radiculares. Se ha demostrado (Ganmore-Newmann y Kafkafi, 1985) que cuando el nivel del azúcar baja a un punto tal que ya no queda disponible para el metabolismo del amonio, se acumula amoniaco libre en la célula, que es tóxico para su respiración, y mueren en consecuencia las raíces de la planta. Estos resultados explican muchas fallas en los invernaderos durante los períodos de crecimiento cálidos en el verano. Por lo tanto, con temperaturas cálidas del suelo, los nitratos serían una mejor opción para la fertirrigación, en especial con volúmenes restringidos de crecimiento de raíces en macetas de invernaderos. Por otra parte, en plantas cultivadas a campo, no todo el volumen radicular está expuesto a la misma temperatura, o a igual concentración de amonio o de escasez de oxígeno. Por lo tanto, la fertirrigación de plantas cultivadas a campo es menos sensible a la fuente de N. Sin embargo, deben tomarse en consideración otras condiciones de suelo, como se detallan a continuación.

4.6.3. El estadio fisiológico de la planta

Cuando el amonio es la fuente de N, las concentraciones de Mg y de Ca en la planta son más bajas que cuando la fuente es el nitrato (Van Tuil, 1965). Durante el crecimiento vegetativo, una leve reducción en la concentración del Ca y de Mg en el transporte del xilema dentro de la planta apenas se nota en plantas sensibles como el tomate (Chio y Bould, 1976). Sin embargo, durante el desarrollo del fruto, la deficiencia del Ca inducida por el amonio causó una severa incidencia de la podredumbre apical (blossom end rot) en los frutos de tomate. En el pimiento, Xu *et al.* (2001) informaron que el suministro de hasta el 30% del N total como amonio hasta la floración no causó ninguna reducción en el desarrollo del cultivo. Sin embargo, luego de la fructificación, sólo con el tratamiento de aporte con nitrato los frutos estuvieron libres de podredumbre apical. Para explicar estas observaciones, se ha sugerido que el amonio reduce la presión interna de la raíz, la que es responsable de la presión de turgor y de la extensión del fruto durante la noche. Como el Ca se entrega al fruto en expansión por la presión radicular durante la noche, en presencia del amonio, menos Ca llega al fruto en desarrollo.

4.7. Esquemas cuantitativos de fertirrigación con N de acuerdo con el crecimiento de las plantas

4.7.1. Cronograma de la demanda del cultivo

La partición del nitrógeno en plantas de rosa a lo largo de un ciclo de floración fue estudiado por Cabrera *et al.* (1995). La menor absorción de N de las rosas de invernáculo se encontró cuando los tallos florales se alargaban rápidamente, y la mayor absorción

posible, cuando los tallos florales cesaron su alargamiento. Para estudiar la partición del N recientemente absorbido y la dinámica del N total dentro de la planta, se suministró fertilizante marcado con ^{15}N en distintas etapas de un ciclo de floración a plantas de rosa Royalty cultivadas hidropónicamente. Se observó que durante el período de alargamiento rápido del tallo, la absorción del N desde la solución nutritiva aportó solamente entre el 16 y 36% del N del tallo floral. El resto, que representaba la mayor parte del N en los tallos en crecimiento, provino del N almacenado en otros órganos de la planta, particularmente en vástagos y hojas maduras. La mayor absorción de N que ocurrió más tarde en el ciclo de floración fue suficiente para cubrir la demanda de N de los tallos florales y reponer el suministro de N desde el follaje maduro y los tejidos leñosos. Estos órganos continuaron acumulando N hasta la brotación subsecuente, cuando se volvió disponible para el siguiente ciclo de desarrollo de los tallos florales.

En manzanas, Millard y Neilsen (1989) demostraron que, al elevar el suministro de N, aumentaba también el crecimiento de las hojas, pero no tenía ningún efecto sobre la masa radicular, alterando así la relación de materia seca entre raíces y hojas. Las plantas que no recibieron fertilizante nitrogenado tuvieron que confiar enteramente en sus reservas almacenadas de N para el crecimiento estacional. Inicialmente, este N fue utilizado para el crecimiento de las hojas, que se detuvo luego de algunas semanas. Después de este período, en las plantas deficientes de N, parte del N foliar fue traslocado para apoyar el crecimiento de las raíces. Aumentar el suministro de N tuvo escaso efecto sobre la cantidad de N removilizado para el crecimiento, aunque las plantas bien fertilizadas acumularon N en sus hojas, que no fue traslocado para apoyar el crecimiento radicular. Este trabajo también demostró que las formas principales de N removilizado durante el crecimiento eran abundantes en proteínas ricas en asparagina y arginina.

Estos resultados demuestran la importancia del reciclado del N interno para el crecimiento de manzanos jóvenes y del reciclado del N en todos los árboles de hojas caducas (Millard y Neilsen, 1989). Mattos, Jr. *et al.* (2003) estudiaron la distribución de biomasa en árboles de naranja Hamlin de seis años [*Citrus sinensis* (L.) Osbeck] injertados en citrumelo Swingle [*Poncirus trifoliata* (L.) Raf. x *C. x paradisi* Macfad.], cultivado en un suelo arenoso bajo irrigación de bajo volumen en Florida. Cerca del 70% de la biomasa de los árboles era aérea. La mayor parte de las raíces activas estaban concentradas en los 15 cm superficiales del suelo, y su densidad variaba desde 1,87 a 0,88 cm cm^{-3} a una distancia de 0,5 y 1,5 m desde el tronco, respectivamente. La recuperación total de ^{15}N por los árboles fue del 25,5% para la urea y del 39,5% para el nitrato de amonio en el momento de la cosecha de las frutas, 280 días después de la fertilización. La acumulación promedio de ^{15}N aplicado en la brotación foliar más reciente fue del 4,2% y en las hojas más maduras fue del 2,5%. Sin embargo, la acumulación de ^{15}N fue baja en el tejido leñoso. Los frutos representaron el mayor destino del N (con una recuperación del 10,2 y 18,4% de ^{15}N aplicado como nitrato de amonio y urea, respectivamente). Su trabajo confirmó la importancia de la fertilización con nitrógeno en cítricos antes del desarrollo de los frutos.

En manzanos (Frith y Nichols, 1975), distintas proporciones de las raíces fueron inducidas a un estrés nutricional, poniendo parte de las raíces en una solución sin

N. Bajo una iluminación óptima se encontró que, privando de N a parte del sistema radicular, el sistema radicular remanente que recibió N compensó parcialmente esta deficiencia aumentando su absorción. Esta adaptación es, sin embargo, sustancialmente reducida con bajos niveles de iluminación. Desde el punto de vista de la fertirrigación, los resultados de estos experimentos demuestran que no es necesario distribuir uniformemente el fertilizante en el suelo debido a que las raíces compensan la presencia reducida de nutrientes en una porción del suelo con una mayor absorción desde lugares en el suelo con alta concentración del fertilizante.

4.7.2. Oscilación de absorción de N con el desarrollo del cultivo

Cuando el nitrato es la única fuente de N en cultivos de solución fluyente, el índice neto de absorción de N por plantas de soja no nodulantes (*Glycine max* L. Merr. cv Ransom) varía entre un máximo y un mínimo con una periodicidad de oscilación que corresponde con el intervalo de la aparición de las hojas (Henry y Raper, Jr., 1989). Durante un período de 21 días de desarrollo vegetativo, la absorción neta del amonio también fue medida diariamente. El índice neto de absorción de amonio osciló con una periodicidad que era similar al intervalo de la aparición de la hoja. Los casos de índices netos negativos de absorción indican que la transición entre los máximos y los mínimos implica cambios en los componentes de influjo y eflujo de la absorción neta de amonio. Por lo tanto, se puede concluir que la absorción real de N por las plantas se controla internamente por los mecanismos fisiológicos internos, mientras que el rol del agricultor es mantener suficiente N disponible cerca de las raíces a través de una fuente apropiada de fertirrigación.

4.8. Absorción de N

La absorción de todos los nutrientes minerales a lo largo del desarrollo de la planta debe ser adecuada para nutrientes específicos durante momentos determinados de crecimiento para satisfacer la demanda del cultivo. Por ejemplo, el K se almacena en las frutas y órganos de almacenamiento suculentos como las uvas (Conradie, 1981), remolacha, mandioca, papas (o patatas), frutos cítricos y la mayoría de los frutos. El potasio, por lo tanto, se remueve del suelo por la parte cosechada de los cultivos. Las semillas y grano remueven principalmente el N y el P cuando se cosechan, pero no se consideran exportadores de K del suelo, a menos que la cosecha se realice cuando esté en el máximo de producción de materia verde a la floración, o cuando la paja y los residuos del cultivo también se remueven del campo.

Los cambios en su función como raíces individuales tienen importantes implicaciones para entender la adquisición de recursos, la capacidad competitiva y una óptima vida útil. Tanto la absorción de nitratos como la respiración de las raíces declinan rápidamente con el aumento de edad de las raíces, según lo informado sobre raíces finas de los viñedos (Volder *et al.*, 2005). La declinación en la absorción de N y la respiración de las raíces corresponde a una fuerte baja en la concentración de N de las raíces, sugiriendo la traslocación del N de las raíces. La principal declinación en la absorción

radicular ocurre dentro de cinco días de actividad en las raíces finas. Estos resultados acentúan la importancia de mantener las condiciones del suelo fértil para permitir el crecimiento ininterrumpido de las raíces y la adquisición adecuada de nutrientes para estimular el crecimiento vegetal. Las demandas medidas de N en distintos cultivos de campo se presentan en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Absorción de nitrógeno por distintos cultivos de campo y hortalizas respecto de la época relativa de crecimiento (Kafkafi y Kant, 2004).

Cultivo	Tiempo relativo de crecimiento (%)					Absorción total (g planta ⁻¹)	Plantas (no. ha ⁻¹)	Rendimiento esperado (t ha ⁻¹)
	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100			
	Absorción* (g planta ⁻¹)							
Algodón	0,20 (6)	1,80 (58)	3,80 (123)	2,20 (71)	1,60 (52)	9,60 (62)	25.000	1,3**
Maíz	0,25 (11)	1,58 (70)	1,00 (44)	0,83 (37)	0,50 (22)	4,17 (37)	60.000	8
Tomate	0,50 (19)	0,75 (28)	2,50 (91)	4,25 (156)	3,25 (119)	11,25 (83)	20.000	100
Pimiento dulce	0,40 (20)	1,80 (90)	1,10 (55)	0,70 (35)	0,60 (30)	4,60 (46)	50.000	55
Patata	0,08 (4)	1,00 (50)	1,08 (54)	0,50 (25)	0,17 (9)	2,83 (28)	60.000	50
Melón	0,20 (10)	0,60 (30)	1,60 (80)	2,80 (140)	0,80 (40)	6,00 (60)	25.000	50
Sandía	0,83 (41)	1,67 (84)	3,33 (166)	6,67 (333)	2,50 (125)	15,00 (150)	12.000	75
Repollo	0,10 (8)	0,20 (16)	0,80 (63)	1,90 (150)	0,60 (47)	3,60 (56)	50.000	29
Coliflor	0,10 (8)	0,20 (16)	0,50 (40)	2,00 (157)	1,40 (110)	4,20 (66)	50.000	9
Berenjena	0,50 (14)	3,25 (89)	2,00 (55)	2,50 (69)	1,50 (41)	9,75 (54)	20.000	40

*Los números entre paréntesis son las cantidades diarias de N (mg N planta⁻¹ día⁻¹) para agregarse con fertirrigación por goteo durante el respectivo tiempo relativo de crecimiento. Esta cantidad incluye el 10% adicional de N por consumo de las raíces.

**Rendimiento de semilla de algodón (fibra).

5. Fósforo (P) en la fertirrigación

5.1. Interacciones de los fosfatos con las partículas del suelo: adsorción, desorción, precipitación y recuperación

El fósforo (P) en la solución del suelo está sujeto a interacciones con constituyentes orgánicos e inorgánicos del suelo. El ion H_2PO_4^- permanece estable en la solución dentro de la línea de riego en tanto el pH se mantenga bajo. Una vez que se libera al suelo, éste reacciona muy rápidamente con los minerales de arcilla, como la montmorillonita o la illita en los suelos neutros y básicos, y la caolinita y compuestos de hierro y aluminio en suelos ácidos. El P reacciona principalmente con el carbonato de calcio (CaCO_3) en los suelos alcalinos. El rango de productos químicos de reacción relativamente insolubles de P en el suelo es tan grande que en general se alude a ellos como “P fijado”. Desde el punto de vista del agricultor es inútil identificar cada compuesto del suelo. En la práctica, la pregunta más importante que el agricultor tiene es si hay suficiente “P disponible” en el suelo como para asegurar un suministro adecuado al cultivo. Para contestar ese interrogante se han desarrollado en el último siglo varios métodos extractantes de suelo para proveer una correlación entre el valor del análisis del suelo y la respuesta actual de un cultivo al agregado de P (Kafkafi, 1979).

5.1.1. Iones fosfato y pH de la solución de suelo

El ácido fosfórico $-\text{H}_3\text{PO}_4$, también escrito como $\text{PO}(\text{OH})_3-$ tiene tres grupos hidroxilo que interactúan activamente en el suelo con el Ca (usualmente presente como carbonato), en suelos básicos, y con los hidróxidos de hierro y aluminio, en suelos ácidos, para formar muchas combinaciones potenciales que dependen del pH. Los principales iones fosfatos solubles en agua en el rango de pH de 5 a 9 son: H_2PO_4^- y HPO_4^{2-} . Mientras el total de P en la solución permanece constante, la distribución relativa entre los iones mono y divalentes de P depende del pH, como se muestra en la figura 5.1. A pH= 7,2, el 50 % del P está presente como H_2PO_4^- . A medida que el pH del suelo aumenta por encima de 7,2, la proporción de P divalente aumenta muy rápidamente, mientras que debajo de 7,2, el anión monovalente es el principal constituyente.

Las plantas absorben sólo el P monovalente como H_2PO_4^- (Marschner, 1995). Es claro a partir de la Figura 5.1 que la disponibilidad de P en la solución disminuye a medida que el pH de la solución aumenta. Por ejemplo, si un recipiente contiene 1 g de P en solución a pH 5, todo el P está plenamente disponible (100%) para las plantas. Sin embargo, si el pH del recipiente aumenta a cerca de 8, sólo 0,1 g de P (10%) estarán disponibles, a pesar del hecho de que la cantidad total de P en el recipiente no ha cambiado. Cuando las plantas absorben amonio, el ambiente alrededor de las raíces se vuelve ácido, mientras que si el nitrato es absorbido, la excreción de las raíces es básica

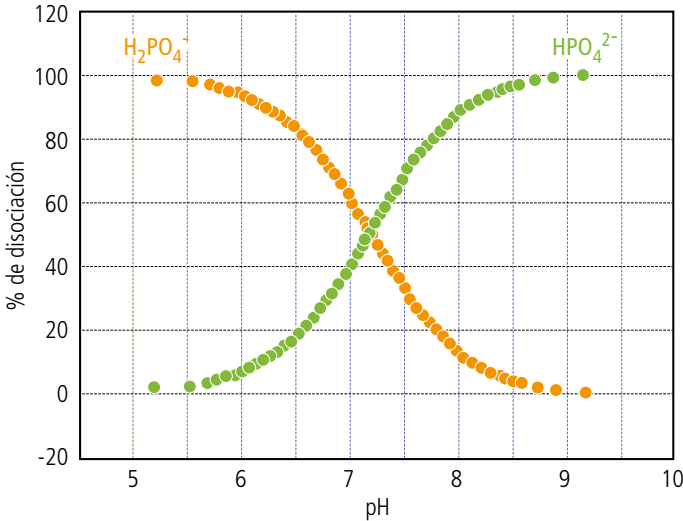


Figura 5.1. Concentración relativa de iones mono y divalentes de P ($H_2PO_4^-$: HPO_4^{2-}) en función del pH de la solución (basado en la 2^{da} pK=7,2 de H_3PO_4).

(Marschner, 1995). La forma de N absorbida por las plantas, de esa manera, controla el pH en la cercanía de las raíces. Como resultado, el suelo que está en contacto directo con las raíces es la principal fuente de P. La difusión del P en el suelo es más bien lenta en comparación con la tasa de elongación de las raíces, a menos que haya una enorme concentración local de P o el P sea agregado (Lewis y Quirk, 1965).

5.2. Excreciones de las raíces y absorción del P

Las raíces de garbanzo (*Cicer arietinum* L.) excretan compuestos orgánicos ácidos mientras que las del maíz no lo hacen. Se ha demostrado que cuando se aplican fertilizantes a base de nitratos, el pH cerca de las raíces de maíz aumenta a 6,5, mientras que las de garbanzo en las mismas condiciones inducen una reducción del pH desde 5,0 a 3,9 cerca de las raíces (Marschner, 1995). Esto muestra que por medio de excreciones ácidas de las raíces, algunas especies de plantas pueden extraer P aun de muy bajas concentraciones de P en el suelo.

5.3. El efecto de los fertilizantes de N en la absorción del P

La absorción de amonio disminuye el pH de la zona radicular mientras que la de nitratos la aumenta. Se ha demostrado que cuando el fertilizante fosfatado se coloca en bandas con sulfato de amonio, resulta en más de cinco veces P absorbido por maíz que cuando se coloca junto con una fuente de nitrato (Black, 1968). La combinación de un

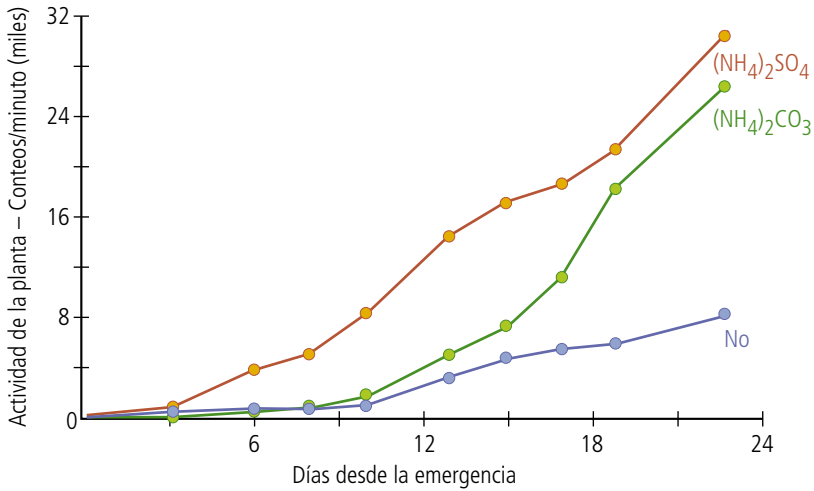


Figura 5.2. Absorción de P radiactivo por el maíz cuando se coloca en una banda de fertilizante nitrogenado ácido o básico (redibujado de Duncan y Ohlrogge, 1957).

fertilizante amoniacal (de reacción ácida) y un fertilizante aplicado en bandas permite una absorción de P mayor por las plántulas jóvenes de maíz en comparación con un carbonato de amonio, un típico fertilizante básico (Figura 5.2) (Duncan y Ohlrogge, 1957). Mayores evidencias por la preferencia de absorción de P en presencia de amonio fueron encontradas por Imas *et al.* (1997a, 1997b), quienes también mostraron que la absorción de amonio reducía el pH cerca de la rizósfera y, como resultado, aumentaba la absorción de P.

5.4. Movimiento de los fosfatos en el suelo desde el punto del gotero

Las rápidas reacciones de los fosfatos con el Ca (suelos enriquecidos con carbonatos) en suelos básicos, y con el Fe y Al en suelos ácidos, restringen las distancias de movimiento del P aplicado al suelo. Cuanto más alto sea el contenido de arcilla o la fracción de CaCO₃ en el suelo, más corta será la distancia de movimiento del P desde el gotero. Aun en suelos arenosos (Ben Gal y Dudley, 2003), la distancia desplazada del P es bastante limitada en comparación con la del agua (Figura 5.3).

Sin embargo, cuando se aplica al suelo estiércol de pollo, se forman complejos orgánicos de P (Kleinman *et al.*, 2005). Como resultado, la concentración de P en la solución lixiviada no está relacionada con el flujo de agua a través del suelo. Estos descubrimientos enfatizan la importancia de los macroporos en los suelos como senderos preferenciales para el P. Cuando el P se acompleja con compuestos orgánicos como los estiércoles, no reacciona con los constituyentes del suelo y, por lo tanto, puede moverse a distancias considerables desde el punto de aplicación en el suelo. El

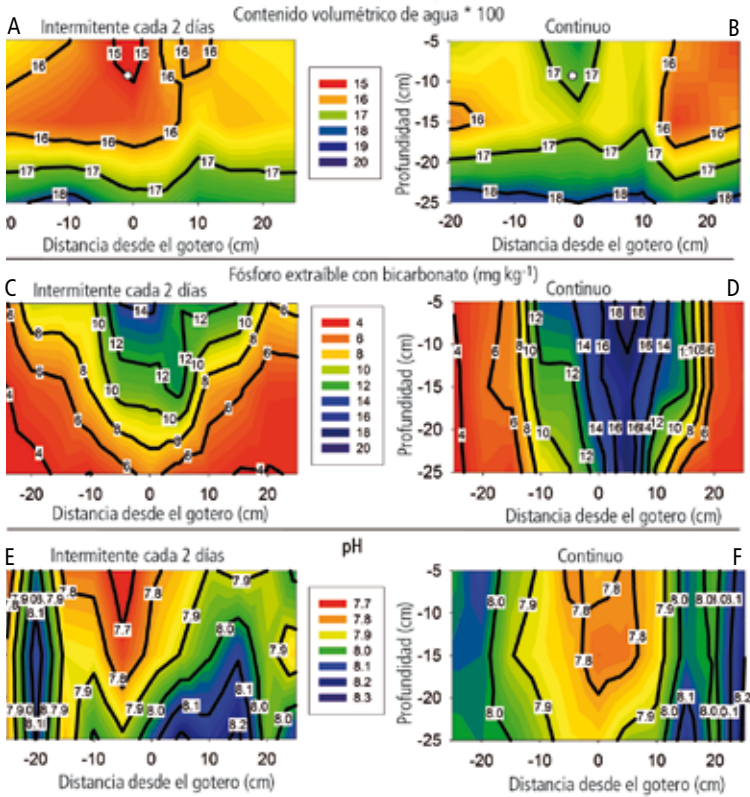


Figura 5.3. Isocartas que muestran la distribución del contenido de agua gravimétrica, P extraíble por bicarbonato y pH en agua: suelo 2:1, después de 14 días de fertirrigación intermitente (A, C, E) y continuo (B, D, F) en un suelo desnudo. Las muestras fueron tomadas en el medio del ciclo de riego de dos días (Ben-Gal y Dudley, 2003).

mecanismo que gobierna el transporte de P es apenas comprendido. El movimiento de P a través del suelo se ha vuelto un tema ambiental. El lixiviado de P a través del perfil de suelo es común que ocurra sólo en suelos de estructura gruesa debido a la rápida infiltración de agua, y en suelos arenosos debido a la ausencia de sitios activos para la adsorción del P (Ozanne *et al.*, 1961; Mansell *et al.*, 1977; Peverill *et al.*, 1976; Sharpley *et al.*, 1993). Una opinión en contrario es que, dado que el suelo, como reservorio de P soluble, no está saturado, el P no se lixivia más que unos pocos centímetros dentro del perfil que contiene suficientes cantidades de arcilla, debido a que los procesos de adsorción y fijación dependen del tiempo y suceden principalmente en la superficie de los óxidos de hierro y aluminio y de los carbonatos de calcio y magnesio (Rajan *et al.*, 1974; Rolston *et al.*, 1975; Bolt, 1976). Pueden ocurrir excepciones en turbas o en suelos con alto contenido de materia orgánica, donde la materia orgánica soluble

puede facilitar el transporte del P en el flujo subsuperficial al impregnar los sitios activos para la adsorción de P (Pierzynski *et al.*, 1994). Kirkby *et al.* (1997), trabajando en investigación pedológica en una cuenca en pendiente, demostraron que el P puede percolar en profundidad si el agua se mueve a través de las cavidades de los macroporos del suelo.

5.5. Fertilizantes fosfatados

Los fertilizantes usados en fertirrigación deben ser completamente solubles. Las clases más comunes son sales de potasio o de amonio del ácido fosfórico, urea fosfato y ácido fosfórico industrial. Compuestos solubles de polifosfatos están disponibles en la industria de fosfatos, pero su uso como fertilizante es aún limitado.

Tabla 5.1. Características de los fertilizantes fosfatos usados en fertirrigación.

Nombre	Ácido fosfórico (75%) ¹	Urea fosfato	MKP ²	MKP ³ Acidulado	MAP ⁴
Fórmula	H ₃ PO ₄	(NH ₂) ₂ CO·H ₃ PO ₄	KH ₂ PO ₄	KH ₂ PO ₄ +H ₃ PO ₄	NH ₄ H ₂ PO ₄
pH (solución al 1%)	0	1,8	4,5	2,2	4,3-4,5
P ₂ O ₅ (%)	52-54	44	51,5	60	61
K ₂ O (%)	0	0	34	20	0
N-NH ₂ (%)	0	17,5	0	0	0
N-NH ₄ (%)	0	0	0	0	12
Comentarios	Evitar partes metálicas	Evitar partes metálicas	Seguro para partes metálicas	Evitar partes metálicas	Seguro para partes metálicas

¹Ácido fosfórico industrial verde

²MKP (fosfato mono potásico)

³MKP acidulado – una mezcla de MKP y ácido fosfórico

⁴MAP (fosfato mono amónico); grado fertirrigación

Nota: En muchos fertilizantes líquidos para fertirrigación, la fuente de P deriva de alguna de las mencionadas en la Tabla 5.1.

5.5.1. Ácido fosfórico

El ácido fosfórico se usa normalmente en procesos industriales como en el lavado de superficies metálicas. Se suministra en contenedores plásticos con una gravedad específica de 1,6. En fertirrigación, el ácido fosfórico se emplea para limpiar las líneas de fertirrigación de precipitados inorgánicos, así como para destapar los goteros obstruidos y al mismo tiempo suministrar P a los cultivos. Es seguro si se lo utiliza como si fuera ácido sulfúrico o nítrico. Sin embargo, como el ácido fosfórico es un ácido concentrado, debe tenerse cuidado en el manipuleo usando guantes y anteojos para protegerse de

salpicaduras en la piel y en las ropas. Dado que es una fuente altamente concentrada de P, se usa una bomba de entrega separada.

5.5.2. Fertilizantes polifosfatos

El término “poli” significa que la estructura molecular de la sustancia contiene más de un átomo de P. Los compuestos que tienen sólo un átomo de P se llaman “ortofosfatos”. Al calentar y remover la molécula de agua, se produce una molécula de P que contiene dos átomos de P, y se denomina “pirofosfato”, y cuando tres o más átomos de P están presentes en la molécula, el término usado es “polifosfato”. Los pirofosfatos son la principal forma condensada de P en el fertilizante polifosfato de amonio (APP). Cuando el APP se aplica al suelo, el pirofosfato se hidroliza a ortofosfato.

En la industria de fertilizantes los polifosfatos son producidos en presencia de amoniaco para dar fertilizantes concentrados líquidos de P con composiciones de 10-34-0 u 11-37-0. La relativamente alta concentración de P es un parámetro importante para el costo del transporte. Sin embargo, la única forma de P que las plantas absorben es el anión $H_2PO_4^-$, lo que significa que el fertilizante polifosfato debe revertirse a la forma monofosfato antes de que las plantas puedan absorber el P. Esta reacción necesita un ambiente ácido para el suministro de los iones H^+ (protones). El principal proveedor de protones es la raíz misma, la que libera iones H^+ en la solución de suelo durante la absorción del N-amonio. En suelos calcáreos, el tiempo necesario para degradar el 50% del P (media vida) se determinó entre 14 y 21 días (Khasawneh *et al.*, 1974 y 1979). Esta media vida es muy larga dado que son necesarias cerca de cinco medias vidas (por ejemplo, 70-100 días) para que el 90% del material se revierta a formas disponibles para las plantas (McBeath *et al.*, 2006). En el suelo, el pH varía constantemente a distancias microscópicas desde las raíces, de modo que el pH del volumen total de suelo, tal como se mide en el laboratorio sobre suelo secado al aire y luego mojado, no necesariamente describe los microeventos en el área cercana a las raíces.

Lombi *et al.* (2004) compararon MAP líquido con fertilizante MAP granular en un suelo altamente calcáreo de Australia. La fuente de “P líquido” mejoró la absorción de P y aumentó los rendimientos en comparación con el fertilizante granular, que se aplicó a la misma dosis. Estos resultados indicaron que el P del MAP líquido se difundió más rápidamente y estuvo más disponible que el P suministrado como MAP granular. Estudios detallados de los gránulos de MAP indicaron que un porcentaje significativo (12%) del P inicial permanecía en los gránulos aun después de cinco semanas de incubación en el suelo. La mejor disponibilidad de las fuentes de P líquido en comparación con las formas granulares podría ser el resultado de muchas diferencias en los procesos de disolución, difusión y reacción en los suelos.

En EE.UU., un cultivo de alfalfa fue fertilizado con APP líquido (10-34-0) y comparado con un fertilizante MAP sólido (11-2-0) (Ottman *et al.*, 2006). En este estudio, el mayor costo de APP líquido en relación con el MAP granular no fue recuperado por los pequeños incrementos en el rendimiento. Sin embargo, se argumenta que, a dosis bajas de P, las soluciones APP pueden ser más económicas que el MAP aplicado al voleo, debido a su menor costo de aplicación. Por lo tanto, el costo del fertilizante mismo y su costo de aplicación son las principales consideraciones en la elección. En

la fertirrigación a través de las líneas de riego es posible controlar la aplicación de P con sistemas automáticos de control remoto, preferidos por el agricultor debido a los ahorros en los costos de aplicación. La técnica de fertirrigación suministra una solución fácil para un problema práctico.

5.5.3. Urea fosfato (UP) ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2 \cdot \text{H}_3\text{PO}_4$)

La urea fosfato es un compuesto químico producido por la adición de moléculas de urea a las de ácido fosfórico. Contiene un mínimo de 17,5% de N y 44% de P_2O_5 . Se usa en la fertirrigación de cultivos en suelo en condiciones neutras o alcalinas. La urea fosfato es fácil de manipular y segura en su uso, en comparación con los ácidos líquidos, ya que fluye libremente, es un ácido seco en forma cristalina. Más aún, luego de disolverse, se liberan 6,3 mol H^+ por kg de UP, lo que lo hace un acidificador concentrado. Debido a su acción ácida, ayuda a mantener los tanques de soluciones limpios y previene el taponamiento del equipo de fertirrigación. La urea fosfato reduce el pH del agua de riego y del suelo, lo que mejora la disponibilidad de nutrientes y la eficiencia de uso de los nutrientes. En suelos calcáreos sódicos, la UP reacciona con el carbonato de calcio, reemplazando los iones calcio a los del sodio del complejo catiónico, lo que mejora la estructura del suelo (menos compactación). Luego de algunos flujos de lavado con suficiente agua, el sodio se lixivia de la zona radicular. El resultado es que la infiltración de agua mejora y los niveles de sodio en la zona radicular son reducidos (Ryan y Tabbara, 1989). El riesgo de la volatilización del N disminuye con la UP (Mikkelsen y Bock, 1988). El uso de la UP ha resultado en floración y rendimientos más tempranos (Becker *et al.*, 2004). El factor primicia en los rendimientos es importante para los productores, ya que en general los precios son superiores para los que llegan primero al mercado.

5.5.4. Fosfato monopotásico (MKP) (KH_2PO_4)

El fosfato monopotásico es una sal soluble del hidróxido de potasio y del ácido fosfórico. Contiene 51,5% de P_2O_5 y 34% de K_2O . Se usa en fertirrigación cuando se recomienda un suministro diario de P y en cultivos en arenas. Debido a su residuo salino muy bajo, es muy adecuado para aguas salinas en agricultura de campo abierto.

5.5.5. Fosfato monopotásico (MKP) acidulado ($\text{KH}_2\text{PO}_4 + \text{H}_3\text{PO}_4$)

Es un fertilizante nuevo introducido recientemente para aumentar la concentración de P al 60% P_2O_5 , para aumentar la acidez y para prevenir la precipitación del P y el taponamiento de las líneas de riego cuando se usan aguas duras (altos contenidos de Ca) como fuente de agua de riego.

5.5.6. Fosfato monoamónico (MAP) ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$)

El fertilizante fosfato monoamónico contiene 61% de P_2O_5 y 12% de N en forma amoniacal. Se usa comúnmente en prácticas de fertirrigación de campo. En sistemas hidropónicos, puede mantener la solución ácida cuando el amonio no es tóxico para las plantas. Los productores de cultivos sensibles al amonio, como lechuga en sistemas hidropónicos, deberían cuidarse cuando usan amonio en la solución. En cultivos de sustratos tales como turbas o suelo, cuando prevalece la nitrificación, este fertilizante es normalmente seguro.

5.6. Absorción del P

Las demandas medidas de fósforo por cultivos de campo son mostradas en la Tabla 5.2. Los patrones de absorción de P por los cultivos que se pueden ver allí demuestran las diferencias en la demanda de P durante los distintos estadios fisiológicos de desarrollo de los cultivos. Normalmente, el pico de la demanda de P se da durante el crecimiento inicial a través de la diferenciación de los órganos reproductivos. Las espigas del maíz demandan un alto transporte de P, de ese modo una elevada dosis de P se ofrece a las espigas en crecimiento entre los 30 a 40 días desde la emergencia.

Tabla 5.2. Absorción de fósforo por varios cultivos de campo y hortalizas respecto del tiempo relativo de crecimiento (Kafkafi y Kant, 2004).

Cultivo	Tiempo relativo de crecimiento (%)					Absorción total (g planta ⁻¹)	Plantas (no. ha ⁻¹)	Rendimiento esperado (t ha ⁻¹)
	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100			
	Absorción* (g planta ⁻¹)							
Algodón	0,20 (6)	1,80 (58)	3,80 (123)	2,20 (71)	1,60 (52)	9,60 (62)	25.000	1,3**
Maíz	0,25 (11)	1,58 (70)	1,00 (44)	0,83 (37)	0,50 (22)	4,17 (37)	60.000	8
Tomate	0,50 (19)	0,75 (28)	2,50 (91)	4,25 (156)	3,25 (119)	11,25 (83)	20.000	100
Pimiento dulce	0,40 (20)	1,80 (90)	1,10 (55)	0,70 (35)	0,60 (30)	4,60 (46)	50.000	55
Patata	0,08 (4)	1,00 (50)	1,08 (54)	0,50 (25)	0,17 (9)	2,83 (28)	60.000	50
Melón	0,20 (10)	0,60 (30)	1,60 (80)	2,80 (140)	0,80 (40)	6,00 (60)	25.000	50
Sandía	0,83 (41)	1,67 (84)	3,33 (166)	6,67 (333)	2,50 (125)	15,00 (150)	12.000	75
Repollo	0,10 (8)	0,20 (16)	0,80 (63)	1,90 (150)	0,60 (47)	3,60 (56)	50.000	29
Coliflor	0,10 (8)	0,20 (16)	0,50 (40)	2,00 (157)	1,40 (110)	4,20 (66)	50.000	9
Berenjena	0,50 (14)	3,25 (89)	2,00 (55)	2,50 (69)	1,50 (41)	9,75 (54)	20.000	40

*Los números entre paréntesis son las cantidades diarias de fósforo (mg P₂O₅ planta⁻¹ día⁻¹) que se agregan con fertirrigación por goteo durante el tiempo relativo de crecimiento. Estas cantidades incluyen el 10% adicional de P para consumo de las raíces.

**Rendimiento de algodón semilla (fibra).

En tomate (para industria) la mayor parte del P está presente en las semillas del fruto, a los 60-80 días desde la germinación y en un corto período, se desarrollan todos los frutos para cosecha desde el segundo ciclo de floración. El riego por goteo es el único método (Kafkafi, resultados sin publicar) que puede minimizar la fijación de P, dado que puede ser entregado cuando la planta necesita el máximo suministro de P, y, por lo tanto, minimizando el tiempo de contacto del fertilizante fosfato con el suelo antes de que sea absorbido por las plantas. Usando un suministro de P radiactivo en el medio del surco, se demostró que la superficie de las raíces en la zona húmeda absorbía el P inmediatamente después de suministrarlo.

6. Potasio (K) en la fertirrigación

El potasio es un macronutriente esencial y se encuentra en varias partes de la planta. Está siempre presente en la planta en la forma iónica K^+ , que nunca se modifica. Se mueve por los vasos del xilema como catión, balanceando principalmente al anión nitrato (Ben Zioni *et al.*, 1971). En la hoja, el nitrato se metaboliza y el K se desplaza hacia abajo con los aniones orgánicos acompañantes hacia las raíces. Estas importantes características del K fueron estudiadas por Ben Zioni *et al.* (1971) y por Kirkby y Knight (1977).

6.1. Interacciones del potasio con las partículas del suelo: adsorción, desorción y fijación

El potasio está presente como un catión estable (K^+) en las rocas, suelos y en la solución del suelo, y tiene una carga positiva activa. El ion K^+ es un componente de las rocas graníticas y aparece en las partículas de arcilla illita, donde su contenido es de cerca del 6% del peso molecular de la arcilla. También se encuentra como catión intercambiable en todas las partículas de arcilla, pero su fracción es normalmente no mayor del 3% del total de la CIC de las arcillas. Una vez que la concentración externa en la solución de suelo aumenta por la adición de fertilizantes, los iones K^+ se dividen entre tres fases: (1) en la solución de suelo, (2) en el reservorio de cationes intercambiables de las arcillas y (3) en el espacio interlaminar de las arcillas, donde se “fija”. La tasa de intercambio entre el K^+ de la solución y el K^+ adsorbido es alta, obteniéndose un equilibrio inmediato. Sin embargo, la “fijación” y “liberación” del K del suelo son lentas y no pueden alcanzar la tasa de absorción de potasio por las raíces (Kafkafi *et al.*, 1978). Dado que la tasa de liberación desde las “posiciones de K fijado” es más lenta que la tasa de demanda de K por las plantas en crecimiento, el agregado de K de los fertilizantes es necesario para sincronizar la absorción de K por las plantas durante su desarrollo. Esto es especialmente importante cuando se usa riego por goteo, dado que el volumen de suelo ocupado por las raíces activas es pequeño, y no todo el volumen de suelo contribuye con K para las plantas en crecimiento.

6.2. Clases de fertilizantes potásicos usados en la fertirrigación

Hay cuatro fertilizantes potásicos disponibles para fertirrigación: cloruro de potasio (KCl) o muriato de potasio (MOP), sulfato de potasio (SOP), fosfato monopotásico (MKP) y nitrato de potasio (KNO_3). Los cuatro están mencionados en orden creciente

de importancia del anión acompañante en la molécula que satisface las necesidades de nutrientes de los cultivos.

El cloruro de potasio es el fertilizante potásico más abundante en el mundo. Es soluble y se disuelve de manera rápida, así como también es fácilmente mezclado con otros fertilizantes nitrogenados. Las razones en contra de su uso normalmente apuntan al anión acompañante, el cloruro (Cl^-). Las cantidades de Cl^- suministradas por el fertilizante podrían afectar a cultivos sensibles al Cl^- como el tabaco (Xu *et al.*, 2000), donde el Cl^- interfiere con la calidad de quemado de las hojas. En la mayoría de los otros cultivos el KCl es un fertilizante aceptable. También los agricultores lo usan por ser la fuente más barata de K .

El sulfato de potasio, K_2SO_4 , es ampliamente empleado en condiciones salinas. Debido a la presencia de SO_4^{2-} , se usa donde el agua disponible es baja en Ca , por ejemplo, allí donde haya aguas “blandas” disponibles para el riego. La presencia de altos niveles de Ca en el agua puede dar como resultado precipitaciones de yeso en las tuberías de riego, lo que tapa los goteros.

El fosfato monopotásico puede ser una fuente de potasio, pero es más una de fósforo para fertirrigación. Dado que las cantidades de fosfato necesarias por los cultivos son sólo de 1/10 de las de potasio, se considera a este fertilizante una fuente de fósforo para fertirrigación.

El nitrato de potasio es altamente soluble a temperaturas superiores a 20°C y presenta una óptima relación K/N desde el punto de vista de absorción de nutrientes. A bajas temperaturas nocturnas, este fertilizante puede precipitar en el tanque; por lo tanto, debe tenerse mucho cuidado cuando se operan tanques de almacenamiento de KNO_3 , que se dejan abiertos durante la noche.

6.3. Ventajas de la fertirrigación con K

Los cultivos regados por goteo bajo un estricto control de uso del agua normalmente desarrollan un bajo volumen de raíces. Las cantidades de potasio presentes como catión intercambiable en las superficies de las arcillas, o como K^+ dentro del látice cristalino de las partículas de la arcilla illita en el suelo, podrían no ser suficientes para satisfacer completamente las necesidades de potasio de los cultivos. Dado que las hortalizas frescas, frutas, hojas verdes, tubérculos y cultivos de raíces contienen altas proporciones de K , se exportan grandes cantidades de potasio del campo. Un suministro continuo de K durante la fertirrigación es, por lo tanto, requerido para asegurar el crecimiento, la calidad y el rendimiento de los cultivos.

El contenido de licopeno del tomate aumentó con un suministro continuo de K al cultivo. El efecto de la concentración de potasio en la solución de suelo en el color fue medido por Sosnitsky (1996) (Figura 6.1). El cultivar experimental de tomate cv. 8687 mostró que un incremento gradual de la concentración de K en la solución reciclada de riego mejoraba la calidad del fruto por un mayor contenido de licopeno, sin aumentar el rendimiento total de frutos. Debido al efecto del potasio en la calidad de la producción, es importante incluir al K en la fertirrigación de cultivos de campo, hortalizas y frutícolas.

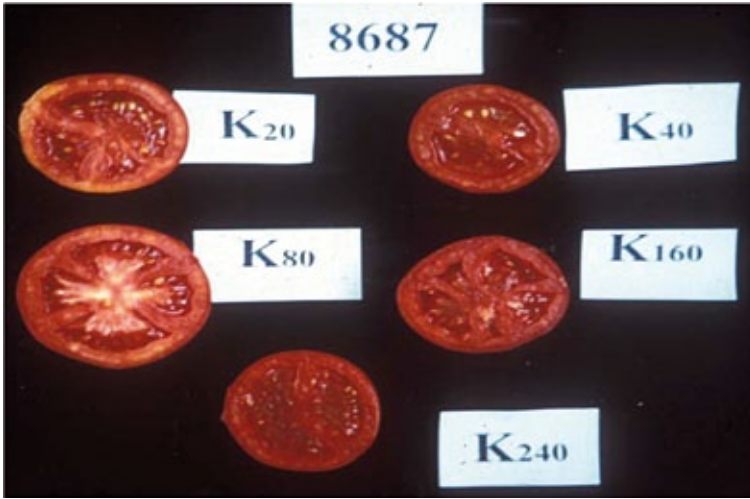


Figura 6.1. Efecto de la concentración de potasio en el suelo sobre el color y el contenido de licopeno de un cultivar experimental de tomate para procesado cv. 8687 (Sosnitsky, 1996).

6.4. Evaluación de los aniones de los fertilizantes potásicos usados en la fertirrigación

Las plantas absorben cantidades de nitrato casi equivalentes a las de potasio, y su concentración en la solución de suelo se expresa en moles L^{-1} . Dado que la relación de peso molecular es 39:14, la concentración de potasio en los tejidos vegetales, expresados como porcentaje de su peso, es más alta que la del N. Sin embargo, desde el punto de vista de las cargas eléctricas que entran en la planta, el N es cerca de cuatro veces mayor que el K (Marschner, 1995). El azufre (S) es esencial para las plantas, pero su concentración en los tejidos vegetales es de sólo alrededor del 6% de la de N. El sulfato se transporta con el K en el suelo, pero queda detrás de la superficie de las raíces (dado que la planta absorbe mucho más K que sulfato). El cloruro es un elemento esencial, pero las plantas lo necesitan sólo en microcantidades (Marschner, 1995); aun si está presente en la solución de suelo alrededor de las raíces, las plantas absorben el Cl^{-} , compitiendo con la absorción de nitrato (Xu *et al.*, 2000). Por lo tanto, para cultivos de alto valor de invernadero o de calidad premium que son regados por goteo, el suministro continuo de KNO_3 satisface plenamente las necesidades del cultivo de K y parcialmente las de N. Cuando se usan fertilizantes de sulfato o cloruro de potasio, se necesita suministrar una fuente adicional de N.

6.5. Movimiento del potasio desde el punto del gotero

Mmolawa y Or (2000) hicieron un estudio en detalle de la dinámica del movimiento de nutrientes en el suelo bajo riego por goteo. Bar-Yosef (1999) discutió el transporte de potasio en el suelo. En la práctica, la distribución exacta del K en el suelo desde el punto de emisión es poco importante, dado que las raíces pueden crecer y encontrar el K en la zona húmeda del bulbo. La eficiencia de las raíces de las plantas para absorber K es tan alta que donde las raíces encuentren una fuente de K, ésta es fácilmente absorbida. En suelos muy arenosos y con muy bajo contenido de K, es necesaria la fertirrigación con un suministro diario de K y de N para asegurar satisfacer las necesidades de las plantas, particularmente si hay un volumen restringido de raíces. Cuando el suelo no adsorbe potasio debido a que hay bajos contenidos de arcilla, la distribución de K es normalmente mayor que la del P, pero menor que la del N. Esto se demostró en un campo fertirrigado donde se cultivaba tomate en un suelo que contenía 95% de carbonato de calcio con baja CIC (Kafkafi y Bar-Yosef, 1980).

6.6. Absorción del potasio

La Tabla 6.1 muestra la absorción de K por distintos cultivos, convertidos los valores absolutos de días de crecimiento de cada cultivo a un valor relativo como % del tiempo total necesario desde la siembra hasta la cosecha.

Tabla 6.1. Absorción de potasio por distintos cultivos de campo y hortícolas con respecto a un tiempo relativo de crecimiento entre la siembra (0%) y la cosecha (100%) (Kafkafi y Kant, 2004).

*Cultivo	Tiempo relativo de crecimiento (%)					Absorción total (g planta ⁻¹)	Plantas (no. ha ⁻¹)	Rendimiento esperado (t ha ⁻¹)
	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100			
	Absorción* (g planta ⁻¹)							
Algodón	0,60 (20)	2,00 (65)	3,60 (117)	0,60 (20)	0,20 (7)	7,00 (45)	25.000	1,3**
Maíz	0,25 (11)	1,83 (80)	1,00 (44)	0,33 (14)	0,08 (4)	3,50 (31)	60.000	8
Caña de azúcar	0,50 (11)	0,60 (13)	0,70 (15)	1,80 (40)	0,60 (13)	4,20 (19)	50.000	140
Tomate	0,70 (25)	0,80 (30)	3,50 (128)	7,00 (256)	4,50 (165)	16,50 (121)	20.000	100
Pimiento dulce	0,50 (25)	2,00 (100)	1,40 (70)	1,40 (70)	0,40 (20)	5,70 (57)	50.000	55
Papa (o patata)	0,20 (10)	0,80 (40)	1,80 (90)	1,50 (75)	0,40 (20)	4,70 (47)	60.000	50
Melón	0,40 (20)	1,20 (60)	4,00 (190)	4,40 (220)	2,00 (100)	12,00 (120)	25.000	50
Berenjena	0,75 (21)	5,00 (138)	3,00 (82)	1,75 (48)	1,00 (28)	11,50 (64)	20.000	40

*Los números entre paréntesis son las cantidades diarias de potasio (mg K₂O planta⁻¹ día⁻¹) a agregarse con fertirrigación por goteo durante el tiempo relativo de crecimiento. Estas cantidades incluyen el 10% adicional de K para el consumo de las raíces.

**Rendimiento de algodón semilla (fibra).

7. Nutrientes secundarios en la fertirrigación

El término “nutriente secundario” se refiere a aquellos nutrientes como el calcio (Ca), magnesio (Mg) y el azufre (S), que son de importancia secundaria comparados con los nutrientes primarios, como el nitrógeno (N), potasio (K) y el fósforo (P). Sin embargo, las cantidades de Ca, Mg y S que necesitan algunas plantas son similares o a veces aún más grandes que las de fósforo. Las cantidades comúnmente absorbidas de nutrientes secundarios por las plantas se presentan en la Tabla 7.1.

Tabla 7.1. Absorción típica de calcio, magnesio y azufre por las plantas.

Elemento	Símbolo	Absorción como	kg absorbidos t ⁻¹ MS*
Calcio	Ca	Ca ⁺²	5 (0,5%)
Magnesio	Mg	Mg ⁺²	2 (0,2%)
Azufre	S	SO ₄ ⁻²	1 (0,1%)

*Concentración suficiente para la mayoría de las plantas (Marschner, 1995).

En la mayoría de los suelos básicos y neutros, la disponibilidad y el transporte de Ca y Mg hacia las raíces ocurre por flujo de masa en la solución de suelo. Las cantidades de Ca y Mg que alcanzan las raíces de las plantas por flujo de masa son normalmente cientos de veces mayores que la tasa de absorción por las raíces. Como resultado, el Ca y el Mg se acumulan cerca de las raíces de las plantas (Barber, 1962). Algunos de los nutrientes secundarios son suministrados a través de la aplicación de los fertilizantes con macronutrientes N, P y K, como se muestra en la Tabla 7.2.

Tabla 7.2. Nutrientes secundarios suministrados con fertilizantes comunes de N, P y K.

Fertilizante	Contenido del nutriente principal	Suministro de nutrientes secundarios
Superfosfato simple	P ₂ O ₅	Ca, SO ₄ , más algunos micronutrientes
Superfosfato triple	P ₂ O ₅	Ca, más algunos micronutrientes
Sulfato de amonio	N	SO ₄
Sulfato de potasio	K ₂ O	SO ₄

En las aplicaciones al suelo en presiembra de los fertilizantes con macronutrientes, el sulfato y el Ca son ofrecidos en mayores cantidades que el contenido de N y de P de esos fertilizantes, mientras que la absorción por las plantas es menor que la del N, como con el sulfato de amonio. El superfosfato simple contiene más calcio y azufre en peso que fósforo, por lo tanto, el agregado de Ca, Mg y S a los cultivos agrícolas es secundario en importancia. Sin embargo, debe darse gran prioridad al agregado de Ca, Mg y S en los suelos ácidos, donde pueden ocurrir deficiencias agudas de Ca y alta fijación de P (Marschner, 1995).

7.1. Calcio (Ca)

El calcio es único en su comportamiento en la planta. Debe ser suministrado continuamente en la solución de suelo a las raíces que se elongan. Se mueve en la planta en una dirección que va desde las raíces hacia arriba (Marschner, 1995), y es el único elemento que no se mueve hacia atrás en el floema desde las hojas a las raíces o a los frutos en desarrollo. Por lo tanto, cualquier deficiencia de suministro de Ca a las raíces resulta de la muerte de las células radiculares en la zona de elongación. Ésta es la principal razón de la restricción del crecimiento en los suelos ácidos, así como también de la necesidad de agregar carbonato de calcio (CaCO_3) o cal agrícola para disminuir la acidez del suelo y promover la proliferación de raíces. En fertirrigación, el nitrato de calcio $5(\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}) \cdot \text{NH}_4\text{NO}_3$ es la principal fuente de Ca. Este fertilizante es esencial cuando el agua de riego tiene muy bajos niveles de Ca. En tierras de secano y en suelos ricos en carbonatos, el agregado de Ca en la fertirrigación debe ser cuidadosamente verificado, dado que altos niveles de Ca en el agua pueden tapar los emisores por precipitación de CaCO_3 si los residuos no son enjuagados al final del turno de riego.

7.2. Magnesio (Mg)

El magnesio es un nutriente esencial muy bien conocido por su papel central en la estructura de la molécula de clorofila, que les confiere el color verde a las hojas de las plantas. Sin embargo, tiene otras importantes funciones en el metabolismo vegetal, incluyendo la síntesis de proteínas, la síntesis y activación de compuestos de ATP de alta energía y la partición de carbohidratos dentro de la planta (Marschner, 1995).

En suelos neutros y básicos, el tipo de arcilla dominante es la montmorillonita, que contiene Mg en una proporción cercana al 6% del peso del látice cristalino. Por lo tanto, esta arcilla puede ser una fuente de suministro lento de Mg a la solución de suelo.

Los fertilizantes magnésicos están disponibles en diferentes formas:

- Kieserita ($\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$): un mineral de ocurrencia natural y usado como un fertilizante soluble de Mg en suelos ácidos, calcáreo dolomítico, magnesita calcinada y fosfato magnésico fundido (Loganathan *et al.*, 2005).

- Fertilizantes solubles de Mg: el nitrato de magnesio ($\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) y el sulfato de magnesio ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) son usados principalmente en formulaciones altamente solubles para la práctica de la fertirrigación.

El amonio, cuando se suministra por riego por goteo, puede competir con la absorción de Mg^{2+} y resultar en una deficiencia de Mg (Kafkafi *et al.*, 1971). La competencia entre el Mg y el amonio puede esperarse cuando el riego por goteo se emplea en suelos arenosos con muy bajo contenido de arcilla (Kafkafi, 1994).

7.3. Azufre (S)

El azufre es un elemento esencial y está presente en la planta en cantidades cercanas a las del P. Siendo otro elemento esencial, su suministro (como ion sulfato SO_4^{2-}) en el agua de riego normalmente satisface los requerimientos del cultivo. Su presencia como anión en los fertilizantes de sulfato de potasio, sulfato de amonio y fertilizantes de Mg es capaz de satisfacer todas las necesidades de S del cultivo.

7.4. Ca, Mg y S en las fuentes de agua de riego

Debe considerarse la concentración local de sales en el agua y la salinidad total de una fuente específica de agua para fertirrigación. La fuente de agua de riego contiene distintas concentraciones de diferentes elementos (Harward, 1953). El rango de Ca en distintos ríos en el norte de California es de sólo 6 a 9 mg L^{-1} , mientras que en las aguas de pozo, está en un rango de 26 a 200 mg L^{-1} . Los nutrientes más abundantes en las aguas de riego son: Ca, con 26 a 200 g m^{-3} ; Mg, con 14 a 60 g m^{-3} , y S-SO_4 , desde 21 a 599 g m^{-3} . Con dosis de riego de 500 mm (1 mm de agua equivale a 10 toneladas de agua por hectárea), las cantidades de Ca que se suministran a un cultivo pueden estar en el rango de 130 a 1.000 kg Ca ha^{-1} . Si todo el Ca fuera suministrado dentro del volumen de las raíces, podría ser suficiente para la mayoría de los cultivos. Este ejemplo enfatiza el punto en que el uso de riego por goteo debe tomar en cuenta los nutrientes ya presentes en el agua de riego para prevenir una carga de sales muy elevada.

En la fertirrigación, la concentración natural de un nutriente en el suelo no debería ser relevante para el suministro de ese nutriente dado que el volumen de raíces podría estar restringido por el volumen del suelo mojado (ver la sección de distribución de agua desde un emisor), de modo tal que el cultivo puede no hacer uso del total de elementos nutrientes presentes en el volumen total de suelo.

8. Micronutrientes

8.1. Observaciones visuales

Las deficiencias de micronutrientes son primeramente observadas en las hojas más jóvenes del ápice, en contraste con las deficiencias de macronutrientes (N, P y K), las que primero ocurren en las hojas más bajas y maduras de la planta. Los macronutrientes en una planta en crecimiento están concentrados en los tejidos jóvenes en desarrollo. Cuando ocurre una escasez de macronutrientes en las plantas, los meristemas de las plantas jóvenes en desarrollo movilizan los macronutrientes desde los tejidos más maduros hacia los órganos nuevos en desarrollo. De acuerdo con esta explicación, las plantas deficientes en N muestran un amarillamiento (a veces llamado clorosis) de las hojas más bajas y más maduras, mientras se hace evidente una deficiencia del micronutriente hierro por la clorosis en las hojas superiores, más jóvenes del ápice.

8.2. Micronutrientes en la fertirrigación

Los elementos químicos que están presentes en las plantas en cantidades relativamente pequeñas en comparación con el N, P y K son llamados “micronutrientes” (Harmsen y Vlek, 1985), o a veces “elementos traza” (Moran, 2004). Los micronutrientes que son absorbidos por las plantas como cationes divalentes son el hierro (Fe^{2+}), manganeso (Mn^{2+}), cobre (Cu^{2+}) y zinc (Zn^{2+}). Los micronutrientes absorbidos como aniones son el molibdeno como molibdato [MoO_4^{2-}] y el boro como ácido bórico [$\text{B}(\text{OH})_3$] o como borato [$\text{B}(\text{OH})_4^-$].

8.3. Formas de fertilizantes micronutrientes usados en la fertirrigación

Los micronutrientes Fe, Cu, Zn y Mn son muy reactivos con las partículas de arcilla y otros componentes del suelo; por lo tanto, cuando se los suministra al suelo como simples sales inorgánicas (por ejemplo, sulfatos), su disponibilidad para las plantas se ve muy reducida, y es probable que vuelvan rápidamente a formas indisponibles. Sin embargo, cuando se agregan en forma de quelatos (Moran, 2004), mantienen su disponibilidad para la absorción por las plantas. En la cercanía de las raíces el elemento metálico se libera del quelato (Chaney, 1988) y, una vez absorbido, se puede combinar dentro de la planta con un ácido orgánico interno, por ejemplo, ácido cítrico, para formar sales de citrato, las que se traslocan desde las raíces por vía del xilema en esta forma acomplejada. Hay un gran número de sustancias acomplejantes producidas por las plantas que permiten la absorción y la traslocación de micronutrientes específicos.

8.3.1. Boro (B)

A diferencia de los micronutrientes metálicos discutidos antes, el B no está presente en ninguna enzima, pero una escasez de B deprime fuertemente el crecimiento y el desarrollo de las plantas. Por ejemplo, la elongación de las raíces se detiene completamente dentro de las 100 horas después de transferirse a una solución sin B (Chapman y Jackson, 1974). Más aún, el B es absolutamente crítico para la germinación del polen, la elongación del tubo polínico y la mitosis generativa de las células (Jackson y Linskens, 1978). El boro también es importante para un metabolismo eficiente del calcio (Ca) y su utilización por las plantas. En una solución pura de fertirrigación, el B está presente como ácido bórico $[B(OH)_3]$ o como anión borato $[B(OH)_4^-]$. Dentro del citoplasma de la planta (a pH 7,5), más del 98% del B está en la forma de $B(OH)_3$ y, a pH 5,5, en la vacuola, 99,95% del B está en la forma de $B(OH)_3$ (Brown *et al.*, 2002). El pH alrededor de las raíces afecta la absorción de B. La influencia del pH en la absorción relativa se muestra en la Figura 8.1. Por encima de pH 8 hay una marcada y rápida declinación de la absorción de B, y la forma en que se absorbe el B es como $B(OH)_3$.

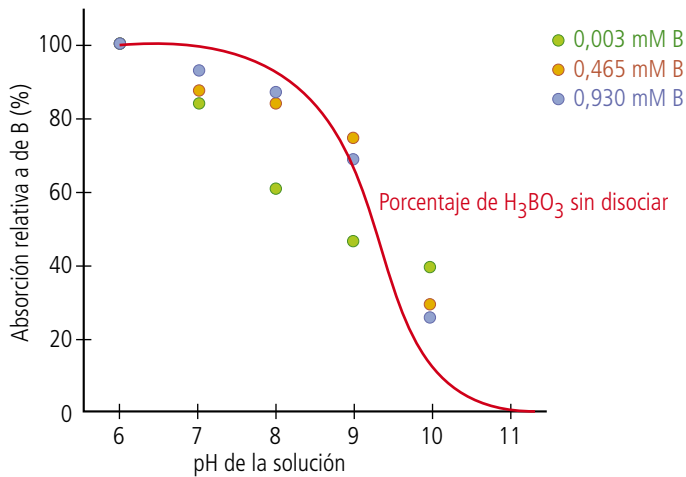


Figura 8.1. Absorción relativa de boro en función del pH de la solución. Absorción a pH 6 = 100% a cada concentración suministrada (adaptado de Oertli y Grgurevic, 1975).

8.3.2. Cloro (Cl)

El cloro es considerado ser un micronutriente esencial (Shorrocks, 1994). Se requiere, sin embargo, sólo en cantidades ínfimas, y es muy poco probable que haya una deficiencia ya que el anión cloruro (Cl^-) es absorbido en grandes cantidades de fuentes fácilmente accesibles en la solución de suelo y en aguas de riego. Las deficiencias de cloro se encuentran en áreas lejanas de los océanos debido a que las lluvias están libres de los aerosoles generados en los ambientes marinos y que contienen este

micronutriente esencial (Xu *et al.*, 2000). Dentro de la planta, el cloro es esencial para la partición de la molécula de agua durante la fotosíntesis (Marschner, 1995) y se sabe que toma parte del proceso de evolución del oxígeno fotosintético del fotosistema II junto con el Mn (Ferreira *et al.*, 2004). También actúa en el balance de cargas iónicas durante la absorción de nutrientes cationes y aniones por las plantas. En aguas salinas, las que pueden contener grandes cantidades de Cl, puede ocurrir toxicidad debido a la acumulación de Cl en las hojas, lo que causa una necrosis en los bordes de plantas sensibles, como la palta (o aguacate) (Xu *et al.*, 2000; Bar, 1986) (Figura 8.2).

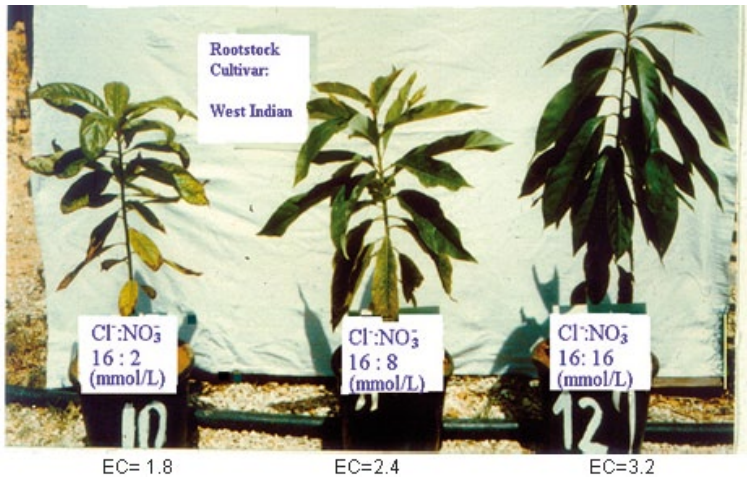


Figura 8.2. Alivio de la toxicidad por cloro en hojas de palta (o aguacate) al aumentar la concentración de nitratos en el agua de riego que contenía 16 mM Cl (Bar, 1986).

8.3.3. Cobre (Cu)

El cobre es un componente esencial en los cloroplastos de las células fotosintéticas. El cobre es un típico micronutriente demandado por las plantas en cantidades relativamente pequeñas, pero absolutamente esencial para el proceso de la fotosíntesis. En el suelo, el Cu es secuestrado por la materia orgánica, lo que podría limitar su disponibilidad para los cultivos, particularmente a pH>7,0. Sin embargo, con sistemas como la técnica de película de nutrientes (nutrient film technique) e hidroponía, niveles altos de Cu disponible, por encima de unos pocos g m⁻³, pueden causar efectos tóxicos conocidos como el “shock de cobre” (Marschner, 1995). Por ello, es esencial un control cuidadoso de los niveles de Cu en las soluciones de fertirrigación.

8.3.4. Hierro (Fe)

En general, en suelos bien aireados, el Fe está presente en formas muy poco solubles, como el hidróxido férrico [Fe(OH)₃]. Cuando el pH cerca de las raíces es bajo—por ejemplo cuando las plantas absorben N en forma amoniacal—, el Fe puede estar

naturalmente presente en una proporción suficiente para satisfacer la demanda del cultivo, aun en suelos que contienen más del 95% de su peso como carbonato de calcio [CaCO_3], lo que normalmente reduce la disponibilidad de Fe (Kafkafi y Ganmore-Newmann, 1985). Una vez dentro de la planta, el Fe se trasloca y se acompleja con ácidos orgánicos, tales como en la forma de Fe-citrato, en su sitio específico de actividad en las células vegetales. El síntoma más común de deficiencia de Fe es el amarillamiento (clorosis) de las hojas jóvenes del ápice de la planta, particularmente en suelos calcáreos con $\text{pH} > 8,0$, donde se refiere normalmente como clorosis “inducida por calcáreo”. A veces los análisis muestran grandes cantidades de Fe en las hojas, aun cuando hay una fuerte deficiencia que afecta a las plantas; por lo tanto, su función en la hoja debe ser “retardada” (Römheld, 2000).

El reino vegetal ha desarrollado dos estrategias para absorber Fe (Marschner, 1995):

- Estrategia I: se encuentra en todas las plantas excepto en los pastos. El primer estadio es una reducción del Fe^{3+} a Fe^{2+} , que es llevada a cabo por una enzima membrano-plasmática de la raíz llamada Fe-quelato reductasa. Luego el Fe^{2+} se transporta a través de las membranas celulares de la epidermis radicular. Esto fue demostrado hace tiempo en soja por Chaney *et al.* (1972).
- Estrategia II: se encuentra solamente en los pastos. En respuesta a la deficiencia de Fe, las células radiculares de los pastos liberan compuestos llamados fitosideróforas, que son ligandos específicos del Fe^{3+} .

En fertirrigación, la mayor parte de los micronutrientes metálicos, como el Cu, Fe, Mn y Zn, son suministrados en forma de quelatos, principalmente como EDTA [ácido etilen-diamin-tetraacético] (Moran, 2004). En esta forma, la mayor parte de los compuestos metal-quelato son estables debajo de $\text{pH} 7,0$ (Lehman, 1963). Quelatos estables de Fe para suelos alcalinos ($\text{pH} > 7,5$) son normalmente basados en EDDHA [ácido etilen-diamin diorto-hidroxifenilacético] (Barak y Chen, 1982). Los compuestos de quelatos de hierro son indispensables para la fertirrigación.

8.3.5. Manganese (Mn)

El manganeso es un componente esencial de la evolución del oxígeno fotosintético del fotosistema II (Ferreira *et al.*, 2004) en el aparato fotosintético de los cloroplastos, donde tiene una función esencial en la partición fotolítica de las moléculas de agua en electrones (e^-), protones (H^+) y oxígeno (O_2) durante la fotosíntesis. Los electrones (e^-) son transportados para producir energía en la forma de ATP (adenosin trifosfato); los protones (H^+) son usados para reducir el dióxido de carbono (CO_2) a carbohidratos (azúcares) y en la reducción del N-nitrito a N-amonio, que también tiene lugar en los cloroplastos. El manganeso, por lo tanto, es fundamental para la producción de carbohidratos y de proteínas en el crecimiento y desarrollo de las plantas.

Varios problemas pueden ocurrir en el mantenimiento del Mn en la solución de suelo durante la fertirrigación. Un rápido decrecimiento (en una escala de segundos o minutos) de la concentración de Mn en la solución de suelo hasta llegar a un nivel de deficiencia fue observada después de la adición del Mn(II) a las plantas (Sonneveld y Voogt, 1997; Silber *et al.*, 2005). Esto ha sido atribuido a la rápida reacción de adsorción en superficies negativamente cargadas de las partículas de arcilla del suelo

(Davies y Morgan, 1989; Morgan, 2005). La condición bien aireada que caracteriza la capa superior de los suelos irrigados puede favorecer la formación de especies oxidadas de Mn– Mn (III) y Mn (IV) (Lindsay, 1979), de modo que la formación de minerales insolubles podría disminuir más aún la solubilidad de Mn hasta concentraciones muy bajas. Así, la cinética de la reacción debe tomarse en cuenta cuando se evalúa la importancia relativa de las reacciones de adsorción, precipitación y oxidación (Morgan, 2005). En la fertirrigación, la solubilidad del Mn (II) está predominantemente controlado por reacciones dependientes del pH, por ejemplo, la adsorción y oxidación (Silber *et al.*, 2008). El rol de la precipitación, incluyendo la formación de nuevas fases sólidas de fosfato-Mn (II) o carbonato-Mn (II), como posibles factores contribuyentes para la remoción del Mn (II), es probablemente menos importante. La solubilidad del Mn (II), en una escala de tiempo que va de segundos a unas pocas horas después de la aplicación, está controlada por procesos de adsorción instantánea, pero, pasado un tiempo, la importancia de la oxidación biótica del Mn (II) aumenta y se vuelve el mecanismo predominante de remoción del Mn (II) (Silber *et al.*, 2008).

8.3.6. Molibdeno (Mo)

El molibdeno sirve como cofactor en la enzima nitrato reductasa (Sagi *et al.*, 2002). En este rol, es esencial para el metabolismo del nitrato por las plantas. En términos de absorción por las plantas, alrededor de un anión molibdato entra en la planta en comparación con un millón de aniones nitrato (Lucas y Knezek, 1972). Normalmente no se lo incluye en ninguna fórmula de fertilizantes a menos que haya una demanda específica que sea identificada debido a síntomas de deficiencia en el cultivo (Loue, 1986).

8.3.7. Zinc (Zn)

La deficiencia de zinc con frecuencia se debe a la baja disponibilidad de Zn antes que a un bajo contenido absoluto de Zn en el suelo. Un pH alto, $\text{pH} > 7,5$, contenido de carbonato de calcio, bajos niveles de materia orgánica y baja humedad del suelo son los factores predominantes responsables de una escasa disponibilidad de Zn para las raíces de las plantas (Kalayci *et al.*, 1999). El zinc es crítico en la producción de auxinas para la elongación y expansión de los tejidos vegetales. Los síntomas de deficiencia de Zn incluyen el “arrosetado” de los tallos y ramas y “hojas pequeñas”, donde las hojas permanecen pequeñas y débiles.

8.4. Disponibilidad de micronutrientes en función del pH del suelo

El rango de pH del suelo para una efectiva absorción de micronutrientes por las plantas se presenta en la Tabla 8.1.

Tabla 8.1. pH más adecuado para la absorción de micronutrientes por las plantas (Soil Fertility Manual, 2003).

Micronutriente	Rango de pH para una máxima disponibilidad
Hierro	4,0-6,5
Manganeso	5,0-6,5
Zinc	5,0-7,0
Cobre	5,0-7,0
Boro	5,0-7,5
Molibdeno	7,0-8,5
Cloro	Indiferente al pH

9. Calidad del agua y la fertirrigación

En el manejo de la fertirrigación, la elección del fertilizante y la calidad del agua de riego son los dos factores más importantes. Las características de la calidad del agua de riego que más influyen en las operaciones son la composición iónica, el nivel de salinidad, el pH, la concentración de bicarbonato y el potencial redox.

Cuando se considera la calidad del agua para fertirrigación son importantes los siguientes dos asuntos:

- El efecto de la calidad de agua en la nutrición del cultivo.
- Las interacciones fertilizante-agua en el sistema de riego.

9.1. Efecto en la nutrición del cultivo

Aunque la calidad del agua de todas las fuentes para riego puede tener efecto en la nutrición de las plantas, las siguientes dos fuentes de agua son de creciente importancia en proyectos de riego:

- Aguas salinas, que se caracterizan por una elevada concentración de sales totales y una potencial toxicidad iónica específica debido al sodio y al cloro.
- Aguas servidas tratadas (AST), que se caracterizan por su contenido en nutrientes y alta concentración de sales.

9.1.1. Fuentes de aguas salinas

9.1.1.1. Concentración de sales totales

El riego con aguas salinas es común en regiones climáticas áridas y semiáridas. La sensibilidad de las plantas a la salinidad varía entre especies y cultivares. La sensibilidad de los cultivos a la salinidad ha estado sujeta a muchas revisiones y aquí citamos la de Maas (1985). Los valores de conductividad eléctrica (CE), más allá de los cuales se reduce el rendimiento, varían ampliamente. La remolacha azucarera puede tolerar una CE de 7 dS m^{-1} (pero no durante el estadio de plántula), mientras que el tomate comienza a reducir los rindes con una CE de solo $2,5 \text{ dS m}^{-1}$. El naranjo, según sea el portainjerto, puede sufrir con valores de CE de $1,7 \text{ dS m}^{-1}$. El tipo de cultivo, el suelo local y las condiciones climáticas influyen en la sensibilidad de los cultivos a la salinidad. El calcio en las aguas salinas está presente como CaCl_2 . El sulfato de calcio (CaSO_4) podría detectarse también en aguas salinas para riego, pero su baja solubilidad en agua ($\sim 0,1\%$) ($0,24 \text{ g}/100 \text{ mL} = 0,24\% \text{ w/v}$ a 20°C , $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) restringe su uso para contrarrestar la salinidad. En la fertirrigación, la continua presencia de nitratos inyectados en el riego a concentraciones entre 5 a 10 mM ($70\text{-}140 \text{ g N m}^{-3}$), y las concentraciones de Ca, entre 5 a 10 mM ($200\text{-}400 \text{ g Ca m}^{-3}$) en la solución externa, puede reducir el riesgo de salinidad para los cultivos regados (Yermiyahu *et al.*, 1997; Bar, 1990).

9.1.1.2. Toxicidad por iones específicos

Sodio (Na)

La sodicidad del suelo se expresa por el valor RAS (relación de absorción de sodio) (Richards, 1954). La estructura del suelo se deteriora con valores crecientes de RAS. Sin embargo, el Na no se absorbe en grandes cantidades por la mayor parte de los cultivos. Altos valores de Na en la solución dañan la zona de elongación de las raíces (Kafkafi, 1991). El sodio compite con el Ca^{2+} en la adsorción en sitios específicos en las paredes celulares de la zona de elongación (Yermiyahu *et al.*, 1997). Aumentar las concentraciones de Ca^{2+} alivia el efecto deletéreo del Na en la elongación de las raíces. Yermiyahu *et al.* (1997) demostraron que, en el rango de 0 a 40 mM NaCl en la solución, el Ca^{2+} compite con el Na^+ para permitir el crecimiento normal de las raíces a pesar de las altas concentraciones de Na en la solución alrededor de las raíces. A elevadas concentraciones de Na, el crecimiento de la raíz decrece debido a excesivas condiciones “osmóticas” (Figura 9.1).

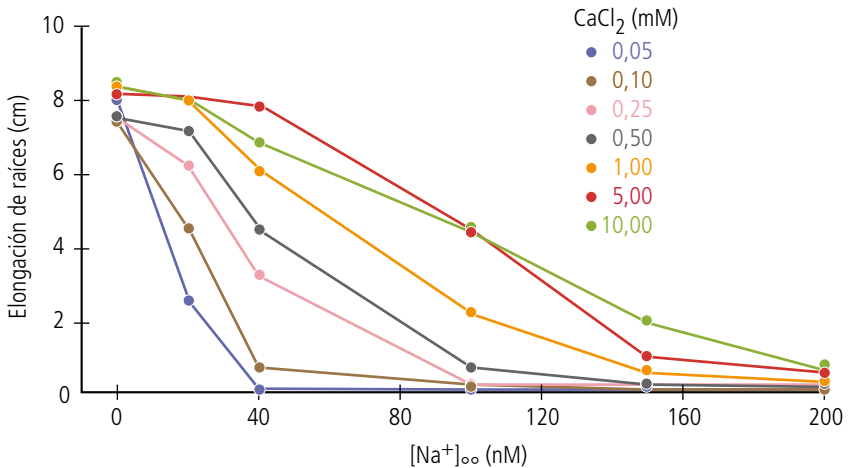


Figura 9.1. Inhibición por Na de la elongación de raíces y alivio de los efectos del Na al aumentar los iones de Ca en la solución (adaptado de Yermiyahu *et al.*, 1997).

Cloruro (Cl)

Aparte de los efectos de la salinidad del Na^+ , el ion cloruro (Cl^-) está presente muy abundantemente en la solución salina, y es absorbido por todas las plantas en grandes cantidades. Ciertos componentes en algunos fertilizantes pueden contrarrestar el efecto deletéreo de la salinidad del agua. Por ejemplo, el nitrato de potasio (KNO_3), o el nitrato de calcio ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$), cuando se aplican constantemente en la solución salina, puede reducir la absorción de Cl^- por las plantas (Xu *et al.*, 2000). La concentración de Cl^- foliar aumenta con el tiempo durante el crecimiento y puede alcanzar concentraciones internas muy elevadas, las que podrían causar marchitamiento y la muerte completa de la hoja en casos extremos. Bar (1990) demostró que, al elevar las concentraciones

de nitratos en la solución nutritiva, la absorción de Cl se redujo y aun plantas muy sensibles al Cl, tales como la palta (o aguacate), sobrevivieron a una concentración en la solución de riego de 568 g Cl⁻ por m³ (16 mM). A 2 mM de NO₃ (28 g NO₃ m⁻³), las hojas inferiores de palta mostraban una acumulación de Cl y síntomas de marchitamiento (ver Figura 8.2 en el Capítulo 8). El aumento de las concentraciones de nitrato a 16 mM de NO₃ (224 g NO₃ m⁻³) en la solución previno la acumulación de Cl en las hojas.

9.1.2. Aguas servidas tratadas (AST)

9.1.2.1. Reutilización de las aguas servidas tratadas en agricultura

Las aguas servidas tratadas están siendo usadas para el riego en distintas partes del mundo y en diferentes condiciones climáticas como Arizona, California, Nuevo México, Pensilvania, México, Australia, Canadá y Alemania (Feigin *et al.*, 1991). Una publicación de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, 1992) presenta el generalizado uso de las AST, mostrando ejemplos de la Argentina, Brasil, Chile, Chipre, India, Israel, Japón, Kuwait, México, China, Perú, Sudáfrica, Arabia Saudita, Singapur, Omán, Túnez y Emiratos Árabes Unidos. El creciente uso de las AST para riego se debe a:

- En zonas áridas y semiáridas, las AST son un importante recurso hídrico y mejoran el balance nacional y regional de aguas.
- Proveen un medio para proteger la salud humana y prevenir la polución ambiental.

La demanda de agua potable para consumo humano es la fuerza que motiva el reciclado y uso de las AST para riego en agricultura. En Israel, el riego por goteo y subsuperficial (SDI) usando AST ha sido permitido en cultivos no comestibles como

Tabla 9.1. Oferta y demanda hídrica – Israel, 1995-2020, en millones de m³ año⁻¹ (pronóstico de Israel Water Commission, 2002).

Oferta					
Año	Población (millones)	Fuentes de agua			Total
		Suministro natural	Servidas tratadas	Desalinizada	
1995	5,6	1.710	245	5	1.960
2000	6,0	1.720	360	20	2.100
2010	7,0	1.725	520	75	2.320
2020	8,0	1.740	780	160	2.680

Demanda					
Año	Sector urbano	Agricultura			Total general
		Natural	Servidas tratadas	Total agua de riego	
1995	730	980	250	1.230	1.960
2000	850	900	350	1.250	2.100
2010	1.060	760	500	1.260	2.320
2020	1.330	600	750	1.350	2.680

el algodón. El objetivo ha sido regar el 70% de las tierras totales bajo riego con agua reciclada o AST. El uso proyectado de agua en Israel para el período 1995-2020 se muestra en la Tabla 9.1.

A pesar del uso generalizado del agua reciclada en el mundo, debe enfatizarse aquí que esta práctica debería ser llevada a cabo con cuidado antes que la salinidad del suelo alcance niveles irreversibles resultantes de la acumulación excesiva de sales. La última respuesta para el manejo de las aguas salinas es la desalinización con la devolución de las salmueras al mar (Kafkafi, 2010).

9.1.2.2. Valor nutricional de las AST

Las aguas servidas tratadas contienen nutrientes que no están presentes en el agua dulce, tales como N, P, K y micronutrientes. Las concentraciones de N y P en las AST dependen del nivel de tratamiento, dado que el origen principal de las AST es orgánico, mientras que las concentraciones de K no cambian con los niveles de tratado, por lo que su concentración refleja el origen de esas aguas. El nitrógeno en las aguas cloacales es principalmente orgánico (proteínas, amidas, aminoácidos, urea). Por lo tanto, las principales formas de N en las AST son orgánicas y amoniacales. Las plantas de tratado de las aguas servidas emplean diferentes procesos de tratamientos que pueden cambiar la forma del N de las AST, y, en el caso de una intensa aireación, también están presentes los nitratos. El fósforo en las aguas cloacales y efluentes asimismo se origina de compuestos orgánicos y su concentración decrece con el aumento del nivel de tratamiento. Generalmente entre el 50 y el 90% del total de P en las AST está en forma soluble. El potasio en las aguas cloacales y efluentes se presenta en forma iónica y su concentración no cambia con cualquier nivel de tratamiento. La Tabla 9.2 ilustra las formas de N y las concentraciones de P y K en las aguas cloacales y efluentes con diferentes niveles de tratamiento. Los contenidos de N, P y K de las aguas servidas de origen doméstico se estima en 50, 10, y 30 g m⁻³, respectivamente (Magen, 2002).

El valor nutricional de los efluentes depende de los siguientes factores:

- Disponibilidad: si el cultivo puede usar el nutriente. El potasio es completamente disponible, mientras que el N inmediatamente disponible está en formas minerales (amonio y nitrato), y el P soluble está como ortofosfato. Las formas orgánicas de N y P están disponibles para las plantas pero a más largo plazo.
- Cantidad: si la cantidad total de nutrientes en las AST pueden satisfacer los requerimientos de las plantas y no hay interacciones negativas “macro-micro” nutrientes. La cantidad de nutrientes en las AST pueden estimarse al multiplicar su concentración por la cantidad de agua aplicada. Demasiado P aplicado de las AST pueden causa acumulación de P en el suelo, el que puede deprimir la absorción de Fe y de Zn por las plantas.
- Momento: si la concentración de nutrientes en las AST satisface los requerimientos específicos del estadio de crecimiento del cultivo. Las concentraciones de nutrientes en los efluentes son difíciles de controlar, en algunos casos no se necesita o son demasiado altas, y esto puede causar problemas a los cultivos, tales como retrasar la madurez de los frutos, tanto en árboles frutales deciduos como en cítricos, formación de color debido a demasiado N, demora en la caída de las hojas en algodón antes de la cosecha debido al N y exceso de K que pueda influir en la acidez del fruto.

Tabla 9.2. Concentraciones típicas de nutrientes (mg L^{-1}) en aguas servidas tratadas (AST) (Maggen, 2002).

Fuente de agua	Agua servida domiciliar típica	Tratamiento secundario antes del TAS ¹	Tratamiento secundario después del TAS ¹	Tratamiento terciario	Efluente filtrado	Tratamiento secundario
Nitrógeno (total como N)	85					
NH ₄ -N		7	<0,02	0,55		30-60
NO ₃ -N		0,28	9,34	7,74	0,08-20,6	
Fósforo (como P)	20	2,2	<0,05	1,6	3,8-14,6	6-15
Potasio (como K)		18	24	15,5	13-31,2	30-120
Referencia	FAO, 2002	Icekson-Tal <i>et al.</i> , 2003	Icekson-Tal <i>et al.</i> , 2003	Gori <i>et al.</i> , 2004	Asano, 1989	National Wastewater Survey, 2004

¹ TAS: tratamiento del acuífero del suelo

Sin embargo, cuando las concentraciones son más bajas que las requeridas, deben aplicarse fertilizantes.

Un ejemplo de contenido de nutrientes donde se usaron dos fuentes de agua, AST y agua potable, para el cultivo de rosas en Israel, se presenta en la Tabla 9.3 (Berenstein *et al.*, 2006). Cien veces aumenta la concentración de amonio, ocho veces la de K y siete veces el P en las AST. Sin embargo, todos ellos estaban en un rango adecuado de concentración para el crecimiento del cultivo.

9.1.2.3. Variación en el contenido de nutrientes en las AST

La composición de las AST cambia durante la estación, el origen de la fuente y por el proceso de tratamiento del agua antes del uso final. Las aguas cloacales son producidas diariamente por la población urbana, pero la demanda de riego está concentrada durante la estación de cultivo, la que también está afectada por la acumulación de precipitación de invierno en el suelo antes de la temporada de riego. Como resultado, los grandes reservorios a cielo abierto deben construirse para acumular la producción urbana de efluentes durante el invierno.

Normalmente, después del tratamiento secundario la concentración de amonio en el agua podría variar entre 10 y 50 g N m^{-3} . Dado que el amonio está disponible para las plantas y es comparable con los fertilizantes de N, un suplemento de 3.000 m^{-3} de agua ha^{-1} puede contribuir con una cantidad significativa, equivalente a entre 30 y 150 kg de N ha^{-1} . Dependiendo de las concentraciones iniciales del suelo, podría

Tabla 9.3. Concentración de iones nutrientes en agua potable y AST usadas para el riego de rosas (meq L⁻¹) (Berenstein *et al.*, 2006).

Cationes	Potable	AST	Aniones	Potable	AST
N-NH ₄	0,03	3	N-NO ₃	0,05	0,01
K	0,22	1,75	HCO ₃	2,9	10
Ca	1,5	1,75	P	0,03	0,21
Mg	1,5	1,7	Cl	8,5	11,8
Na	5,6	12,9			
Suma de cationes (+)	8,85	21,1	Suma de aniones (-)	11,48	22,02
Micronutrientes en mg L ⁻¹					
Fe	0,001	0,079			
Mn	0,0001	0,02			
Zn	0,04	0,05			
Cu	0,0001	0,003			
B	0,18	0,49			
Cd	0,0001	0,0009			
Ni	0,0001	0,016			
CE dS m ⁻¹	1,1	2,5			
pH	7,4	7,7			

necesitarse fertilización con N, o bien el contenido de N en las AST podría satisfacer completamente las necesidades de un buen cultivo de algodón. Para tomar una decisión sobre la necesidad o no de fertilizantes adicionales, el contenido local de nutrientes de las AST tiene que medirse en cada sitio. En las plantas de tratamiento de aguas servidas se emplean procesos de remoción biológica del P para reducir significativamente el crecimiento excesivo de algas en el sistema. Una parte de este P puede eliminarse por precipitación química. En experimentos con aguas cloacales desactivadas que contenían relativamente altas concentraciones de Ca (~ 1.5 mol m⁻³) y P (~1 mol m⁻³) disueltos, se observó una reacción sensible al pH con precipitación parcialmente reversible de fosfatos de Ca con pH debajo de 8,0. Las siguientes reacciones deben ser consideradas cuando la concentración del P en las AST sea un tema importante: (i) precipitación totalmente reversible de fosfato hidroxilo dicálcico (HDP) (Ca₂HPO₄(OH)₂) como un producto intermedio; (ii) formación de hidroxiapatita (HAP) (Ca₅(PO₄)₃OH) del HDP (Maurer *et al.*, 1999).

En un estudio llevado a cabo por Vangush y Keren (1995) durante los diez años posteriores a la introducción de las AST al acuífero casi no se observaron cambios en la composición del agua. Sin embargo, se observó por el monitoreo un aumento continuo en Na, Cl, HCO₃, Ca, Mg, SO₄, mientras que el K apenas cambió y no hubo datos de P

disponible. El uso de las AST en fertirrigación necesita un continuo monitoreo y debe tomar en cuenta las cantidades variables de nutrientes vegetales encontrados en las AST antes que se deba realizar una fertilización adicional.

9.1.2.4. Factores de salinidad en aguas recicladas o AST

Los contenidos de Na, Cl y B de las AST (originadas de fuentes de aguas servidas domiciliarias) son la principal preocupación cuando se usan aguas recicladas o las AST para la agricultura. Por ejemplo, altos contenido de Cl se reportaron en palmas datileras regadas con AST (El Mardi *et al.*, 1998). El uso continuo de las AST sin monitoreo pueden causar acumulación de Na en el suelo y un deterioro de la estructura de éste. En citrus, las concentraciones foliares de Na, Cl, y B fueron significativamente más altas en parcelas que usaban aguas tratadas o AST que aquellas regadas con agua de pozo (Zekri *et al.*, 1994). Sin embargo, en el centro de Florida, se encontró que aguas bien manejadas y tratadas eran muy seguras y una buena opción de suministro adicional de agua. En aguas servidas bien tratadas, la mayoría de los nutrientes son removidos y así, cuando se usan para el riego de cultivos de campo, demandan fertilización adicional.

El uso de AST como agua alternativa para riego de cítricos en España fue estudiado para evaluar sus efectos en diferentes suelos y cultivos (Reboll *et al.*, 2000). Plantas jóvenes de cítricos fueron regadas con las AST de una planta de tratamiento de residuos cloacales durante tres estaciones de crecimiento consecutivas. Se midieron el crecimiento, el estado nutricional del follaje y la calidad de las frutas. Algunas diferencias se encontraron entre la composición del agua subterránea y las AST. Las concentraciones de Na, Cl, B y materia orgánica fueron siempre más altas en las AST. Sin embargo, los niveles de Na, Cl, y B en los tejidos foliares estuvieron por debajo de los niveles tóxicos para los citrus. Los contenidos foliares de N estaban en el rango óptimo y no hubo diferencias significativas entre las muestras de árboles irrigados con AST y con aguas subterráneas. Tanto el crecimiento como los parámetros de calidad de frutos no fueron afectados por los altos niveles de Na, Cl, y B en las AST. Luego de tres años de estudio no se encontraron efectos deletéreos en plantas cítricas jóvenes regadas con AST. Altos niveles de nitratos fueron encontrados en aguas subterráneas, probablemente debido a la contaminación de los acuíferos. En todas las estaciones estudiadas, los valores de los nutrientes analizados en el suelo y en la planta estuvieron dentro del rango óptimo para citrus. Las dosis de fertilizante podrían reducirse significativamente sin comprometer los rendimientos o afectar los niveles foliares de nutrientes cuando se usan las AST. Reboll *et al.* (2000) concluyeron que las AST parecen ser una alternativa adecuada como fuente de agua de riego para los cítricos.

Sin embargo, estudios sobre la calidad del vino afectada por el uso de AST en el riego de viñedos en Australia mostraron que su composición química había sido alterada. Los niveles de Na y Cl en los vinos provenientes de tratamientos con AST fueron considerablemente más elevados que los normales para vinos rojos australianos. Las concentraciones más altas de N, P, K y Mg totales, encontradas en los vinos de viñedos que habían recibido 135 litros de AST por semana (comparados con los 45 litros de AST por semana o los 135 litros de agua dulce por semana), no estuvieron muy por encima del rango reportado para vinos australianos Shiraz (McCarthy y Downton, 1981).

Los principales resultados de una investigación intensiva acerca del uso de agua reciclada para viñedos han sido publicados (Prior *et al.*, 1992a, y 1992b; Walker *et al.*, 1996). La sensibilidad de los árboles cítricos en una variedad de portainjertos fue reportada por Maas (1993) y para frutos de carozo por Catlin *et al.* (1993). En Australia, la sensibilidad había sido informada en árboles de pera (Myers *et al.*, 1995) y en duraznos (o melocotones) (Boland *et al.*, 1993). La sensibilidad de las hortalizas a las aguas salinas fue revisada por Shannon y Grieve (1999). Todas las fuentes de salinidad natural poseen a largo plazo la amenaza de acumulación de Na y Cl en las partículas de arcilla del suelo. El uso a largo plazo de efluentes domiciliarios e industriales como fuente de agua es peligroso debido a la acumulación de B y de metales pesados hasta llegar a niveles tóxicos. El empleo futuro de aguas urbanas recicladas dependerá de la prevención de la contaminación y acumulación de B de los productos químicos industriales y domiciliarios de los desagües del sistema y su dilución con aguas deionizadas antes de la aplicación a sistemas agrícolas comerciales bajo riego.

La investigación de las aguas de desecho tratadas demuestra el intenso esfuerzo para adoptar el uso de las AST en la producción agrícola, y, por lo tanto, para monitorear los efectos a largo plazo de su aplicación en agricultura. Uno de los principales riesgos en el uso continuo de AST es la acumulación de B, que podría alcanzar niveles tóxicos para las plantas. La fuente de B en las aguas cloacales domiciliarias son los detergentes y polvos de lavar. En las áreas regadas en climas áridos, los compuestos que contienen nB deberían, por lo tanto, eliminarse del mercado dado que no hay hoy disponible un proceso de bajo costo para remover el B del agua.

Los altos niveles de Na en el agua podrían, a largo plazo, causar la destrucción de la estructura del suelo. El agregado de calcio al suelo puede aliviar el peligro del Na, pero no por largos períodos de riego. Los compuestos orgánicos que están presentes en el agua reciclada pueden acumularse en la superficie del suelo y, una vez secos, volverse de naturaleza hidrofóbica, que podría resultar en características de mojado del suelo desuniforme (Tarchitzky *et al.*, 2007). En los casos descritos antes, la importancia del monitoreo a largo plazo es indispensable. La acumulación o reconstrucción de efectos negativos puede ser más bien lenta por unos pocos años, de ahí que se necesiten períodos de observaciones y pruebas más duraderas.

9.2. Calidad del agua y el sistema de riego

El taponamiento de los emisores, que afecta adversamente la tasa de aplicación y la uniformidad de la distribución de agua, es uno de los más grandes problemas en el riego por goteo. Las sustancias físicas, químicas y biológicas en el agua de riego son las causas primarias de los taponamientos.

9.2.1. Aguas que contienen hierro ferroso (Fe^{2+})

Los depósitos de hierro aparecen como un tipo de precipitado gelatinoso amorfo de barro pardo rojizo que contiene Fe soluble. Este barro con Fe causa un taponamiento completo de los emisores. Este problema existe en áreas donde los acuíferos de aguas

subterráneas están formados sobre suelos arenosos o turbas orgánicas (muy común en el estado de Florida) con agua de pozo de pH debajo de 7,0 y en ausencia de oxígeno disuelto. Tales aguas contienen hierro ferroso (Fe^{2+}), que es soluble en agua y sirve como materia prima inicial para la formación de lodos. Bacterias del hierro, como *Gallionella sp. leptolhris*, *Sphaerotihus*, *Pseudomonas* y *Enterobacter*, cuando están presentes en el agua, reaccionan con el hierro ferroso a través de procesos de oxidación para formar hierro férrico (Fe^{3+}), que es insoluble. El hierro férrico insoluble está rodeado por colonias filamentosas de bacterias y crean un gel mucilaginoso y pegajoso de Fe que es responsable del taponamiento de los goteros.

Concentraciones de hierro ferroso tan bajas como 0,15-0,22 g Fe m^{-3} son consideradas potencialmente peligrosas para los sistemas de goteo (Ford, 1982). Entre 0,2 y 1,5 g Fe m^{-3} , el riesgo de taponamiento de los emisores es moderado, y concentraciones de Fe por encima de 1,5 g Fe m^{-3} son descritas como muy peligrosas para los emisores de riego (Nakayama y Bucks, 1991). Prácticamente cualquier fuente de agua que posea concentraciones mayores a 0,5 g Fe m^{-3} no debería usarse en sistemas por goteo, a menos que sea tratadas químicamente antes de su introducción a las tuberías de goteros.

Experimentos en Florida indican que la clorinación controla exitosamente la formación de mucilagos de Fe cuando las concentraciones fueron inferiores a 3,5 g Fe m^{-3} y el pH estaba debajo de 6,5 (Nakayama y Bucks, 1991). También establecieron que el uso a largo plazo de aguas con altos niveles de Fe no puede ser adecuada para el riego por goteo. Aguas que contienen más de 4,0 g Fe m^{-3} fueron consideradas inútiles como fuentes para riego por goteo, dado que necesitan un proceso de sedimentación y estancado antes de bombearlas nuevamente al sistema de goteo. Para superar y corregir el problema del taponamiento, debido a la actividad biológica dentro de las líneas de riego, la siguiente sucesión de procedimientos ha probado ser exitosa en Florida: (i) inyección de gas Cl en la misma línea junto el hidrociclón que contiene discos de filtrado para alcanzar una mezcla uniforme de gas Cl en un pequeño volumen; (ii) filtro de arena para remover los precipitados de Fe oxidados; (iii) filtros de respaldo para asegurar una buena filtración final y mantener el agua de riego libre de precipitados de Fe. Tal sistema puede ser operado con éxito diariamente y permite un uso seguro del agua para fertirrigación.

9.2.2. Aguas que contienen Ca y Mg

Altas concentraciones de Ca, Mg y HCO_3 en el agua de riego (alta dureza total) aumentan el riesgo de taponamientos, especialmente cuando se introducen fertilizantes fosfatados en el sistema (ver también 9.2.3). El precipitado de carbonato de calcio es común en aguas alcalinas (pH elevado) y ricas en Ca y en HCO_3 . La acumulación de depósitos en el sistema de riego como resultado del uso de estas aguas puede causar taponamientos y el mal funcionamiento del sistema (Feigin *et al.*, 1991). La reacción depende de la temperatura y del pH. Es más probable que ocurran los problemas de acumulación con aguas de pH > 7,5 y contenido de bicarbonatos > 5 mmol L^{-1} . Las deposiciones aumentan con la suba del pH de los fertilizantes aplicados a través del sistema de riego.

9.2.3. Interacciones entre P, Ca y Fe en el agua de riego para fertirrigación

El uso de fertilizantes fosfatados en fertirrigación es muy sensible a la calidad del agua y de su pH en particular. La concentración de Ca en el agua de riego es un aspecto importante, debiéndose mantener un pH bajo (ácido) para prevenir la formación de precipitados de Ca-P. Algunas fuentes como las aguas subterráneas someras (por ejemplo, en Miami) a veces contienen hierro soluble divalente (Fe^{2+}) (Bar, 1995). Estos dos elementos, Ca y Fe, rápidamente precipitan en presencia de P a valores de pH por arriba de 4 para el Fe, y por arriba de 5,5 para Ca. Por lo tanto, el P no debería introducirse en las líneas de goteros si hay Fe soluble presente en el agua. El problema de la precipitación es más agudo en las líneas de goteros subsuperficiales, donde el taponamiento no se observa hasta que la pobre performance de las plantas cerca de los emisores tapados se haga evidente.

Los fertilizantes fosfatados pueden ser corrosivos; por ejemplo, las reacciones químicas del P con los metales en el sistema de servicio del agua pueden causar precipitados. Trabajos pioneros con tanques fertilizantes generaban un precipitado pastoso de color chocolate de fosfato de hierro que bloqueaba todos los filtros y líneas de goteros (Malchi, 1986 a y b).

Una vez producidos los precipitados de fosfato de hierro, el único camino para liberar y restaurar la emisión del agua a las líneas de riego es enjuagando éstas con ácido nítrico para disolver los precipitados. Debido a este riesgo de taponamiento, la fertirrigación con fosfato debería hacerse con precaución y con un monitoreo cuidadoso del flujo de agua para prevenir el desarrollo de precipitados y taponamientos de filtro y goteros. Los fertilizantes polifosfatos en ciertas concentraciones también forman suspensiones gel con Ca y Mg, que taponan los emisores. El ácido polifosfórico es un polímero del ácido ortofosfórico y los fertilizantes polifosfatos contienen generalmente una mezcla de compuestos de variada extensión de su cadena molecular (Hagin *et al.*, 2002).

Las sales de amonio de los polifosfatos pueden usarse en las formulaciones fertilizantes. Los fertilizantes polifosfatos en ciertas concentraciones generan suspensiones gel. Sin embargo, concentraciones específicas de polifosfatos inducen el acomplejado de los iones de Ca y previenen la formación de geles (Noy y Yoles, 1979; Hagin *et al.*, 2002). Las concentraciones mínimas de polifosfato de amonio (APP) requeridas para prevenir la formación de gel en aguas de riego con diferentes niveles de Ca se presentan en la Tabla 9.4.

Tabla 9.4. Concentraciones mínimas de polifosfato de amonio (APP) en el agua de riego para prevenir la formación de geles y taponamientos (Noy y Yoles, 1979).

Ca^{2+} en el agua de riego (meq L^{-1})	Concentración mínima de APP en agua de riego (%)
<2	< 1,0
2-5	1,0
5-8	2,5
8-11	4,0

10. Fertirrigación de cultivos de campo

10.1. Maíz

Mediciones diarias del crecimiento y del consumo de nutrientes en el cultivo de maíz fueron reportadas por André *et al.* (1978) en varios estadios fisiológicos: vegetativo, período de floración femenina y masculina y desarrollo de las espigas. Desde el desarrollo de las semillas hasta la aparición de la panoja masculina, la transpiración está en relación constante con la fotosíntesis. Durante el período de floración, la transpiración excede a la fotosíntesis. Después de la emisión de barbas de la espiga femenina, se verifica una continua declinación en el consumo de agua durante el desarrollo de aquélla y la formación de los granos. En el día 62 del crecimiento (máxima absorción de N), una única planta consume 140 mg de N y 254 mg de K. La planta continúa absorbiendo N y K hasta la cosecha cerca del 20% del máximo. La absorción de las plantas fluctúa diariamente, aun si el cultivo en solución nutritiva se renovara diariamente durante el período experimental completo. La demanda de la planta de N está controlada por el metabolismo interno de varios órganos en desarrollo durante momentos específicos.

Los estadios fisiológicos son muy importantes para la planificación de la fertirrigación de tal forma que el agua y los nutrientes sean suministrados para satisfacer la demanda oportuna del cultivo. Si el volumen de raíces estuviera limitado por un recipiente, tales



Figura 10.1. Maíz regado por microgoteo. La aplicación diaria de fertilizantes NPK se realizó exactamente de acuerdo con la demanda diaria de nutrientes por las plantas de maíz, como se demuestra por el fuerte contraste entre los tratamientos de plantas fertilizadas con un suministro completo de N y aquellas sin aplicación de N (al frente) (Abura, 2001).

como en el cultivo en invernáculos, la frecuencia de renovación del agua y los nutrientes debería hacerse diariamente. En el maíz cultivado a campo es importante seguir la distribución del volumen radicular para definir los momentos de riego y aplicación de nutrientes. En la Figura 10.1, un cultivo de maíz en un suelo arenoso con fertirrigación diaria absorbió todo el N aplicado sin dejar exceso alguno de N a las plantas vecinas, como se evidencia por el agudo contraste entre el testigo absoluto sin fertilización con N (Abura, 2001). El volumen total de agua y nutrientes fue suministrado de acuerdo con la demanda esperada del cultivo, según datos tomados del trabajo de André *et al.* (1978).

En el momento de la emisión de barbas (aparición de la espiga femenina), 68 días desde la siembra, o alrededor de la mitad del ciclo de crecimiento, se han alcanzado el 75% del K, el 66% del N y el 43% de la absorción total del P a la cosecha, en valores expresados en gramos por planta. La mayor parte del P es absorbido por la planta de maíz un mes después de la floración femenina y transportada a los granos en desarrollo. Dado que la mayor parte del P se encuentra en las capas superiores del suelo, es crucial mantener humedad del suelo (por riego o por las lluvias) hasta cerca de 40 días después de la floración femenina para asegurar la absorción de P. Cualquier período de suelo seco dentro de las cinco o seis semanas después de la floración reducirá la absorción de P por el maíz y afectará la formación de los granos.

Es claro que el rendimiento de maíz exporta a través de la semilla o el grano cantidades sustanciales de N y P del campo, pero relativamente poco K (Tabla 10.1). Por otra parte, el maíz cultivado para ensilado exporta cantidades considerablemente mayores de K.

Tabla 10.1. Cantidades promedio de nutrientes (kg) en la biomasa aérea de un maíz de 10 t ha⁻¹ de rinde cultivado en el medio-oeste de Estados Unidos (Voss, 1993).

Elemento	Grano	Paja	Total	% en grano
	kg de nutrientes en un rinde de 10 t ha ⁻¹			
N	49,5	28,1	77,6	63,8
P	10,3	4,3	14,6	71
K	16,8	43	59	28
Ca	0,3	15,6	15,9	1,9
Mg	3,5	12,3	15,7	22
S	3,1	3,4	6,5	47,7
Fe	0,05	0,9	0,91	5,5
Zn	0,08	0,08	0,16	50
Mn	0,02	0,12	0,14	14,3
Cu	0,01	0,04	0,05	20
B	0,02	0,06	0,08	25
Mo	0,002	0,001	0,004	50
Cl	1,8	32,7	34,5	5

El rol de la fertirrigación es enviar a las plantas nutrientes de los fertilizantes con el agua de riego a las raíces en cantidades suficientes para prevenir deficiencias durante el desarrollo de las plantas. El suministro de las cantidades apropiadas de agua y nutrientes diariamente al momento correcto para satisfacer las necesidades de las plantas es crucial para prevenir un exceso en el suministro de nutrientes y pérdida de sales de nitratos a los acuíferos subterráneos. La fertirrigación precisa puede prevenir la polución de los acuíferos y es menos costoso para los agricultores.

El momento del riego afecta la distribución de agua y nutrientes en el suelo. Ben-Gal y Dudley (2003) mostraron que un suelo arenoso con muy baja capacidad de adsorción de P, la concentración más alta de P se encontró a 10 cm debajo del emisor. Con la misma cantidad de agua pero con aplicación continua, el P se encontró debajo de los 25 cm. La frecuencia del riego también influye el contenido de agua y pH del suelo. Se espera que en un suelo arcilloso pesado, la distribución de nutrientes desde el punto de emisión, difiera de aquella encontrada en un suelo arenoso (Bar-Yosef, 1999). Desde el punto de vista de la absorción de P o de la producción de material seca, la distribución exacta del P en el suelo no es importante como puede deducirse de los datos de Ben-Gal y Dudley (2003). Dado que la mayor parte del P es absorbido por el maíz durante la formación del grano y a la madurez, aplicaciones tardías de P con niveles bajos de

Tabla 10.2. Cálculos de un plan de fertirrigación para aplicar nutrientes basada en intervalos de 10 días (André *et al.*, 1978).

Días	Absorción diaria de N (mg)	Nitrógeno kg ha ⁻¹ día ⁻¹ para 100.000 plantas	Absorción diaria de P (mg)	Fósforo kg ha ⁻¹ día ⁻¹ para 100.000 plantas	Absorción diaria de K (mg)	Potasio kg ha ⁻¹ día ⁻¹ para 100.000 plantas
0-10	1,4	0,14	3,1	0,31	0	0
10-20	1,4	0,14	3,1	0,31	11,7	1,17
20-30	12,6	1,26	7,75	0,78	31,2	3,12
30-40	77	7,7	12,4	1,24	15,6	15,6
40-50	119	11,9	21,7	2,17	<u>253,5</u>	<u>25,35</u>
50-60	<u>140</u>	<u>14</u>	24,8	2,48	<u>253,5</u>	<u>25,35</u>
60-70	63	6,3	34,1	3,41	128,7	12,87
70-80	28	2,8	<u>38,75</u>	3,88	78,0	7,80
80-90	35	3,5	20,15	2,02	62,4	6,24
90-100	35	3,5	13,95	1,40	35,1	3,51
100-110	28	2,8	18,62	1,86	19,5	1,95
110-120	7	0,7	0	0	0	0

Un total aproximado de: 336 kg N ha⁻¹, 200 kg P ha⁻¹, 1.000 kg K ha⁻¹

Los números subrayados marcan la edad de la planta con la máxima demanda para un nutriente específico.

N y de K podrían asegurar altos rendimientos de grano con bajos niveles de aplicación de agua, pero solo con aplicaciones diarias de P. Tal combinación podría mitigar la contaminación del agua y el derroche de fertilizantes. Un ejemplo de planilla de planificación para la aplicación de nutrientes durante intervalos de a diez días puede servir como guía para un esquema práctico de fertilización a campo (Tabla 10.2).

Un detallado estudio de absorción de agua por un maíz con riego por goteo superficial y subsuperficial fue reportado por Coelho y Or (1996), quienes encontraron que la distribución de las raíces sigue la distribución de agua en el suelo en los dos sistemas de riego.

10.2. Algodón

10.2.1. Crecimiento del algodón y el riego

Los beneficios del riego han sido reconocidos desde hace tiempo en el cultivo del algodón. El cultivo se realiza en muchas partes del mundo bajo climas cálidos con abundantes precipitaciones. El algodón es un cultivo de verano. Su desarrollo puede dividirse en tres períodos: (1) siembra hasta la aparición de la primera flor, cerca de sesenta días después de la siembra (DDS); (2) el período principal de desarrollo: 60 a 110 DDS; (3) madurez, 110 a 160 DDS: madurez de las cápsulas y desarrollo de la fibra.

Hasta 1970, el riego por goteo no se usaba en algodón. Los métodos de riego empleados eran en surcos (el sistema más común para el algodón), aspersión, en bordos y bordos nivelados o por paños (Berger, 1969). El riego de superficie, que se usa en todo el mundo, requiere de un suelo profundo, con alta capacidad de almacenamiento de agua. El uso de riego en surcos puede resultar en la acumulación de sales entre los bordos.

El riego por goteo en algodón, principalmente por riego subsuperficial por goteo (SDI) está aumentando en los Estados Unidos, principalmente en California, donde prevalecen los veranos secos (Robertson *et al.*, 2007). Los beneficios del riego por goteo para el algodón consisten en poder realizar el cultivo en climas áridos y cálidos, donde la nubosidad no interfiere con el desarrollo de las cápsulas, y en áreas con suelos someros, que son favorables para la producción de algodón.

El riego por goteo se aplica en Israel usando aguas servidas recicladas, en especial para cultivos no comestibles, como el algodón y el maíz para ensilado. Más aún, el algodón puede tolerar aguas con relativa salinidad. Desde un punto de vista de la salud pública, un método seguro para expedir las cantidades necesarias de agua reciclada es por goteo. En un ensayo de riego en Arkansas, Robertson *et al.* (2007), usando un nuevo tipo de sistema de riego superficial de baja presión por goteo, reportaron un 39% de ahorro de agua sobre la base del cálculo por unidad de producción. Como la escasez de agua es un creciente problema en el mundo, el riego de baja presión (energía de gravedad), aplicado por goteo en superficie, es la técnica más utilizada. Sin embargo, esta tecnología no ha sido aún estudiada utilizando riego subsuperficial por goteo (SDI).

10.2.2. Nutrición del algodón

La absorción total o remoción de nutrientes por las plantas de algodón se presenta en las tablas 10.3 y 10.4.

Dosis típicas de absorción de nutrientes (N, P, K, Ca, Mg y S) donde el agua o los nutrientes no son limitantes fueron descritas extensivamente por Mendes (1960) y se presentan abajo:

Tabla 10.3. Absorción-remoción de nutrientes por algodón – Macro y nutrientes secundarios (IFA, 1992).

País	Fuente	Rinde de algodón cápsulas (kg ha ⁻¹)	(kg ha ⁻¹)					
			N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	CaO	S
Brasil	Malavolta, 1987	(2.500)*	156	36	151	40	168	64
China**	An Yang, 1985	1.421	183	64	156	–	–	–
	An Yang, 1985	1.115	153	53	112	93	204	–
	An Yang, 1985	941	128	45	90	–	–	–
EE.UU.	Mullins & Burmester, 1988	por 100 kg fibra	19,9	5,2	18,4			

* Algodón semilla

** Absorción de nutrientes = Toda la parte aérea más parte de las raíces

Tabla 10.4. Absorción-remoción de nutrientes por algodón – Micronutrientes (IFA, 1992).

País	Fuente	Rendimiento de algodón cápsulas (kg ha ⁻¹)	(g ha ⁻¹)				
			Fe	Mn	Zn	Cu	B
Brasil	Malavolta, 1987	(2.500)*	2.960	250	116	120	320
China	An Yang, 1985	1.115	5.000	254	397	71	205

* Algodón semilla

Nitrógeno (N)

La absorción de N por el algodón, medida a través de análisis químico, reveló cuatro periodos de absorción linear:

- Días 10 a 20: por el 20° día, 4,6% del total de N absorbido a la cosecha ya se encuentra en la parte aérea de la planta.
- Días 20 a 60 (desde la primera hoja hasta la ramificación): la tasa diaria de absorción aumenta a 1,159% de la absorción total a la cosecha.

- Días 60 a 100 (durante la floración): la velocidad declina a 0,743% de la absorción diaria total de N.
- Días 100 a 150: en el último período durante la maduración, que dura cerca de 50 días (cerca de un tercio del período de crecimiento total), sólo el 20% del total de N es absorbido por el algodón.

Absorción de N y su distribución en los órganos de la planta

La cantidad total de N absorbido ha sido reportada en valores cercanos a 240 kg N ha⁻¹ (Halevy, 1976). La cantidad de N exportada del campo en las semillas, sin embargo, es de sólo el 40% de N total presente en la planta de algodón entera. Este valor es mucho menor que el del maíz, que exporta el 68% del N total presente en la materia seca. El algodón es así un cultivo mucho menos expoliante en N que el maíz. Durante los primeros dos meses después de la siembra, la planta absorbe cerca de 15 kg de N ha⁻¹. Durante ese tiempo, se establece un sistema radicular profundo y extenso (Adams *et al.*, 1942). En los 55 días siguientes, se absorben 215 kg de N ha⁻¹. Este patrón de crecimiento sugiere que el algodón desarrolla su sistema radicular tempranamente, lo que le permite absorber N durante la etapa vegetativa y de floración en un mayor volumen de suelo. En los suelos aluviales arcillosos profundos, el suministro inicial de agua y de N afecta el balance entre las etapas vegetativas y fructíferas. El exceso de N en una etapa vegetativa inicial favorece el crecimiento de hojas y ramas y causa la caída de cápsulas que se desarrollaron en los brotes laterales inferiores (Yogev, 1986). Consecuentemente, sólo las últimas cápsulas desarrolladas llegan a la cosecha. Sin embargo, la cosecha tardía de las últimas producciones podría encontrar lluvias tempranas de invierno, que pueden dañar la calidad de la fibra. Se comprobó que mantener una tasa de crecimiento igual a 1 cm por día de aumento en altura de la planta era la mejor tasa de elongación del tallo principal para asegurar una elevada producción de algodón (Yogev, 1986). La fertirrigación por goteo permite que el agricultor controle la tasa de crecimiento vegetativo al monitorear continuamente la altura del algodón, controlando el volumen y los intervalos de riego así como la concentración del fertilizante nitrogenado en el agua de riego. La sincronización del riego para una floración temprana en algodón es posible sólo bajo un estricto control de la fertirrigación de N, P y K. Dado que sólo la mitad del volumen de suelo se moja debajo del emisor, se necesita compensar con agregado de nutrientes adicionales la disminución del volumen de suelo y, por lo tanto, de nutrientes disponibles.

Fósforo (P)

El período relativamente más rápido de absorción de P también se ha encontrado entre los días 30 y 50 después de la germinación con una tasa de absorción diaria de 0,993% del total de P al final del crecimiento. El segundo período de absorción lineal dura desde los días 50 a 120 del desarrollo con una tasa de absorción diaria de 0,746% de la absorción total de P. Ésta es la máxima absorción potencial de una solución nutritiva con ilimitada provisión de P a las raíces. El patrón de absorción de P sugiere que, para mantener una tasa de absorción constante de P en condiciones de campo por un



Figura 10.2. Raíces expuestas en el perfil de suelo perpendicular a la línea de viñas en un viñedo luego de siete años de tratamiento de riego por goteo subsuperficial (SDI) (Ben-Gal *et al.*, 2004).

período tan largo, debe mantenerse suficiente humedad y contenido de P en la zona húmeda para asegurar la difusión de P a las raíces. Sólo el 15% de la absorción total de P ocurre en el último mes antes de la cosecha.

Absorción de P y distribución en las partes de la planta de algodón

Cerca del 44% del P del cultivo de algodón es exportado en las semillas con la cosecha, respecto del 80% de uno de maíz. Es claro que el P se absorbe del suelo durante el período completo de desarrollo de las cápsulas y no de una traslocación interna entre partes de la planta. Este patrón de absorción de P es para el maíz, el algodón y las papas (o patatas). El último período de suministro de P a las cápsulas es un desafío para los productores de algodón de climas áridos. Dado que el riego se suspende al menos seis semanas antes de la cosecha mecánica, la parte superior del suelo, generalmente rico en P, está seco y puede ser posible que el P se convierta en el factor limitante en los estadios finales del desarrollo de las cápsulas en climas secos. Los agregados de P en riego por goteo durante el último mes de cultivo podrían demostrar algunas ventajas. En el riego por goteo subsuperficial no hay limitantes para una aplicación tardía de P. Sin embargo, usando el SDI, existe una zona de saturación hídrica alrededor de la tubería enterrada, como se evidencia por la distribución de raíces alrededor de la línea del SDI (Figura 10.2) (Ben-Gal *et al.*, 2004). Si el suelo fija el P agregado por adsorción, la fertilización no sería eficiente y la aplicación al suelo antes de la siembra del algodón podría ser más efectiva.

Potasio (K)

La tasa de absorción de K es la más rápida durante la formación de las hojas desde los días 25 a 47 desde la germinación. Durante este período, la absorción de K lleva el 36,5% del total de K encontrado en la planta a la cosecha. El potasio continúa absorbiéndose

a una tasa algo menor durante el largo período entre los días 50 a 111 después de la germinación, cuando cerca del 44% del total de K a la cosecha se absorbe desde el suelo. Finalmente, durante el último mes de crecimiento, sólo el 10% del total de K en la planta a la cosecha es absorbido, pero a una tasa mucho más lenta.

Consideraciones sobre la fertilización con potasio

El K se concentra en los órganos reproductivos durante el desarrollo de la planta. Casi el 40% del total de K en la planta está presente en las cápsulas, brácteas y semillas (Halevy, 1976; Mullins y Burmester, 1990). Sólo el 25% del total de K en la planta se remueve del campo con la cosecha de las semillas y la fibra, mientras que el resto retorna con los residuos del cultivo en la preparación, a menos que sea removido. El algodón remueve relativamente más que el maíz (en términos de kg ha^{-1} para un rinde promedio).

A partir de observaciones de campo en parcelas con más de veinte años de cultivo continuo con algodón, el riego se detiene entre seis y ocho semanas antes de la cosecha, dejando sin agua los primeros 30 cm superiores de suelo. Así, el K se vuelve un factor limitante y aparecen síntomas de deficiencia de K en las hojas y cápsulas. El agregado de K en el último riego podría mitigar esas deficiencias. Esta situación ocurre debido a la necesaria preparación específica del suelo antes de la cosecha mecánica, que detiene el riego seis semanas antes de la cosecha. Luego de muchos años de cultivo continuo de algodón se desarrolla una capa con niveles menores de K. La arada profunda se empleó en el pasado para enriquecer las capas más profundas. Con la tradicional práctica de labranza superficial de suelo y de riego por aspersión aparecen síntomas de deficiencia de K, mientras que los análisis de suelo en la capa superior muestran niveles suficientes. Cuando el riego por aspersión en grandes áreas se vuelve rutinario, el volumen limitado de raíces demandará probablemente aplicaciones continuas de nutrientes con el riego por goteo.

Calcio (Ca)

De manera similar al K, el Ca se absorbe principalmente durante el desarrollo inicial de la canopia desde el día 25 al 50 con la aparición de las ramas a una tasa diaria del 1,53% de la absorción total. Al final de la floración, la tasa de absorción de Ca se reduce a la mitad, cercana al 0,89% por día. Durante los dos últimos meses de formación de cápsulas, sólo se ha absorbido el 16% de todo el Ca.

Magnesio (Mg)

El magnesio se absorbe a una tasa constante de 0,89% en los primeros 50 días, pero desde el día 50 hasta el final de la maduración de las cápsulas, la tasa de absorción de Mg es casi constante, con una velocidad del 0,66% por día. La tasa de absorción de Mg es paralela con la de P durante los primeros cuatro meses de crecimiento del algodón.

Azufre (S)

El azufre muestra tres períodos distintivos de absorción lineal: desde los días 20 a 50, la tasa es del 1,36% por día, en tándem con el K y el Ca. Luego declina al 0,73% durante los

días 50 a 90 (al final de la floración), pero luego se absorbe a una tasa constante hasta la cosecha, igual al 0,38% por día.

Normalmente, el algodón se cultiva en EE.UU. en extensas superficies operadas por equipos mecánicos de siembra y de cosecha, y debido al tráfico pesado de maquinarias sobre el suelo, el riego subsuperficial es el sistema preferido. En otras partes del mundo, las líneas de riego por goteo se instalan en la superficie anualmente un mes después de la siembra y permiten que las plántulas se desarrollen inicialmente con la humedad del suelo almacenada durante el invierno anterior.

La acumulación de materia seca y la absorción acumulativa de nutrientes por el algodón durante una estación de cultivo fueron presentadas por Halevy (1976) (Tabla 10.5), que también describe la absorción absoluta y la distribución de nutrientes entre los diferentes órganos de la planta.

Tabla 10.5. Acumulación relativa de materia seca (MS) y absorción de nutrientes en algodón durante una estación de cultivo que duró 156 días (cálculo de Halevy, 1976).

Largo de la estación (%)	MS (%)	N (%)	P (%)	K (%)
36	4	7	8	8
46	15	28	18	29
53	36	44	37	56
62	60	72	62	83
71	89	97	92	95
100	100	100	100	100

El principal factor que afecta los rendimientos del algodón es la escasez de energía lumínica debido al sombreado mutuo en poblaciones densas de plantación (Eaton, 1955). Yogev (1986) controló la intercepción lumínica en algodón usando fertirrigación en un cultivo de algodón sobre lana de roca (de origen volcánico) en recipientes, de forma tal que se prevenía la penetración más profunda de las raíces en el suelo. Se controló la distancia entre las hileras de 0,5, 1 y 2 m sin restricción de agua o nutrientes. Sus resultados se presentan en la Tabla 10.6. Cuantas más partes de las plantas se exponían a la radiación solar directa (2 m entre hileras), el rendimiento total por planta aumentaba por un factor de 10, mientras que el rendimiento por unidad de área aumentaba por un factor de 2,5 a pesar de la reducción en materia seca total. Si la misma nutrición y riego se ofrecían sin restricción al crecimiento radicular, el crecimiento vegetativo superaba el desarrollo de fibra. La conclusión práctica de este trabajo es que una restricción del crecimiento vegetativo del algodón en áreas de veranos libres de lluvias es posible gracias al riego por goteo, que puede suministrar agua y nutrientes según las necesidades de las plantas y restringir el crecimiento vegetativo. El riego por goteo de algodón con 2 m de distancia entre hileras en condiciones desérticas puede ofrecer un nuevo sistema de producción con mínimo consumo de agua. Esta clase de tratamiento combinado con experimentos de fertirrigación es la que será imperioso estudiar en el futuro.

Tabla 10.6. Parámetros de cultivo y de rendimiento a cosecha de un cultivo de algodón en camas de lana roca a tres distancias entre hileras (Yogev, 1986).

Parámetros de cultivo*	Distancia entre hileras (m)		
	0,5	1	2
Altura de planta (cm)	173 c	145 b	120 a
Algodón 1 ^{era} recolección (g m ⁻¹)	91,4 a	435,6 b	828,4 c
Algodón 2 ^{da} recolección (g m ⁻¹)	90,6 a	94,3 a	231,1 b
Algodón total (g m ⁻¹) por hilera	182 a	529 b	1.059 c
Rendimiento total (semilla + fibra) (g m ⁻²)	364 a	529 b	530 b
Primicia (%)	50 a	82 b	78 b
MS Total (g m ⁻²)	1.494 c	1.116 b	889 a
Relación semilla + fibra /tallos	0,32 a	0,9 b	1,47 c

* Datos con la misma letra no son diferentes a un nivel de 0,05 de significancia.

Fertirrigación por goteo de algodón en sistemas de dos cultivos por año

En el riego por goteo, cuando se aplican cantidades muy pequeñas pero frecuentes, se fuerza a la planta de algodón a limitar el volumen radicular en el suelo y, por lo tanto, se induce una floración de baja magnitud pero temprana (Carmi *et al.*, 1992). El desarrollo de un sistema radicular somero y restringido se caracteriza por poseer una alta proporción de raíces finas (menos de 1 mm por día), que comprende casi el 90% de la materia seca radicular. La proximidad de las raíces a los goteros y la limitada cantidad de agua en el suelo con raíces conducen a una rápida y sensible respuesta de las plantas a pequeñas cantidades de riego. Sin embargo, tal sistema falla si no se lo acompaña con una solución nutritiva aplicada diariamente, dado que la principal reserva de nutrientes del suelo está muy lejos de las raíces de la planta. El rendimiento de algodón por planta se reduce, pero la relación entre órganos reproductivos vegetativos aumenta. Los volúmenes restringidos de raíces requieren de una densidad de siembra mayor que lo usual, y resultan en un rendimiento de fibra mayor que con una siembra a densidad normal. Tal sistema de cultivo sensible permite el doble cultivo por año, por ejemplo, trigo para ensilado sembrado en noviembre, cosechado a mediados de marzo y, en suelo seco, después del trigo, sobre uno de algodón con riego por goteo controlado (hemisferio norte). Tal sistema es posible en parcelas relativamente pequeñas donde se necesita el silo en el campo. Para ensilado, el trigo remueve cerca de 500 kg K ha⁻¹, (Kafkafi y Halevy, 1974), y las plántulas de algodón inmediatamente sembradas luego de remover el forraje de trigo podrían sufrir una deficiencia de K. Para prevenir ésta y otras deficiencias, el algodón cultivado con un volumen restringido de raíces debería ser fertilizado con una cierta cantidad de NPK ofrecida con el primer riego por goteo. En suelos ácidos, también se debe prestar atención al Ca, al Mg y al S si no estuvieran presentes en el agua de riego.

11. Fertirrigación de cultivos frutícolas

11.1. Banana (o plátano)

Se han reportado algunos trabajos de fertirrigación en banana (o plátano) realizados en la India y Brasil sobre suelos ácidos. El banano es un gran consumidor de fertilizantes nitrogenados y potásicos. Reddy *et al.* (2002) y Badgujar (2004) en la India enfatizaron los beneficios de la fertirrigación en bananos con N y K, a niveles de 200 g N y K por planta día⁻¹ ha⁻¹.

En 1997 le fue entregado el premio Crawford Reid Memorial a Mr. B. H. Jain por sus significativos avances en la promoción de técnicas y procedimientos adecuados de fertirrigación que podían traer avances importantes en los sistemas de riego así como en infraestructura. Su trabajo se tituló “Microrriego para pequeños productores de banana en Jalgaon (India): un estudio de caso”.

En Brasil, el pH del suelo disminuyó con dosis crecientes de fertilizantes nitrogenados (Teixeira *et al.*, 2002). Estas disminuciones informadas de pH en áreas tropicales sugieren que las fuentes amoniacales, o más probablemente la urea, sean los principales fertilizantes utilizados. El K intercambiable se redujo sensiblemente debido a la expoliación del cultivo. El riego por microaspersión se usó en conjunto con varias dosis de N (0, 200, 400 y 800 kg N ha⁻¹) y de K (0, 300, 600 y 900 kg K₂O ha⁻¹). El riego causó un aumento significativo en el rinde de frutos, siendo la respuesta atribuida a la fertilización con N y con K. A pesar de un alto nivel de K intercambiable, también se observó una respuesta positiva a la aplicación de K en el rendimiento de bananos no irrigados. En Australia se reportó una severa acidificación del subsuelo bajo una plantación de banano (Moody y Aitken, 1997), a pesar de aplicaciones anuales superficiales de 2.4 t ha⁻¹ de calcáreo. De todos los sistemas de cultivo observados, el banano era el más acidificador del suelo. Se usan fertilizantes amoniacales, lo que resulta en una severa acidificación y lixiviado de nitratos debido a las dosis excesivas de aplicación de N (Figura 11.1). La única manera práctica de aumentar el pH cerca de las raíces es usando fertilizantes a base de nitratos (ver explicaciones detalladas en el Capítulo 4).

En España (islas Canarias), la fertirrigación del banano se realiza con miniaspersores que aplican agua en exceso (Muñoz-Carpena *et al.*, 2002). El balance hídrico en el suelo mostró que la mayor parte del drenaje (18% del riego total + precipitaciones) se produjo durante el período de mayor demanda de agua por el cultivo y durante la corta estación de lluvias, cuando no se aplica riego. El monitoreo de la solución de suelo reveló que había una alta concentración de nitratos durante todo el período experimental (50-120 mg L⁻¹ N-NO₃). Los grandes flujos de agua y la concentración de nitratos en la parte inferior del perfil del suelo produjeron una pérdida anual de 48-52% del total

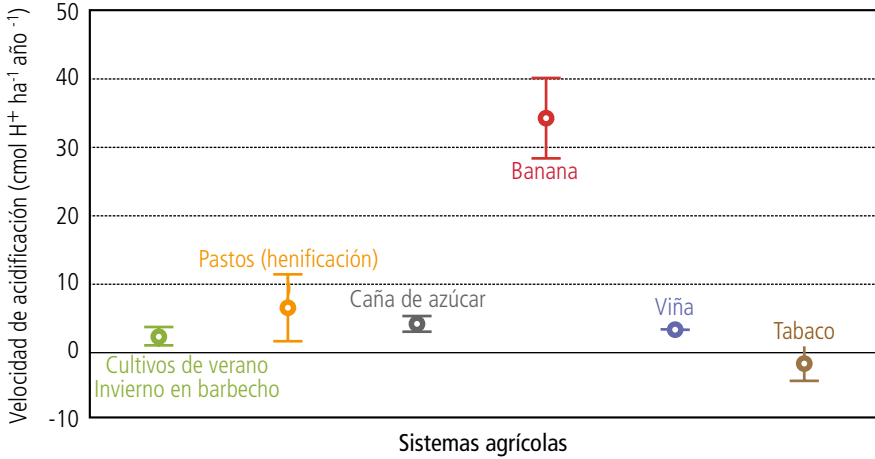


Figura 11.1. Velocidad de acidificación promedio y rango (barras verticales) de distintos sistemas agrícolas del este de Queensland (Moody y Aitken, 1997).

de N aplicado (202-218 kg N ha⁻¹ por año). Por lo tanto, se recomiendan menores aplicaciones de N y de agua, pero más frecuentes para reducir el impacto ambiental del sistema.

La absorción mensual de N por el banano en las islas Canarias (Figura 11.2) muestra dos picos en el año: en enero y en agosto. Esta información de absorción del cultivo es esencial para satisfacer sus necesidades de la manera más eficiente posible. La diferencia entre la demanda máxima y mínima es de cerca de 20 kg de N por mes. La Figura 11.2

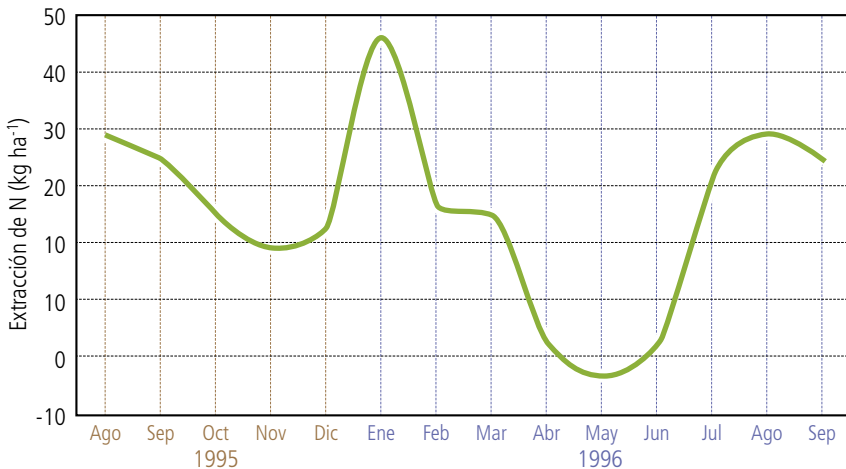


Figura 11.2. Extracción de N del suelo por un cultivo de banano en las islas Canarias, España (Muñoz-Carpena *et al.*, 2002).

sirve como ejemplo para una localidad. La tasa de aparición de las hojas de banano es de cerca de una hoja cada seis días. Cada hoja contiene cerca de 100 g de N, por lo que conocer la tasa de producción de hojas nos da una idea de la necesidad semanal de N.

La fertirrigación del banano debería seguir los siguientes principios:

- Aplicar fertilizantes de N y K de acuerdo con la demanda del cultivo. La demanda varía con el desarrollo de la planta y la temperatura durante el año.
- En suelos ácidos deberían usarse fuentes de fertilizantes a base de nitratos para prevenir una mayor acidificación del suelo que resulte en toxicidad de aluminio.
- El monitoreo de la velocidad de crecimiento de las hojas puede ayudar para determinar las necesidades de suministro de N.

11.2. Viñedos

El riego por goteo fue adoptado por primera vez en plantaciones perennes de viñedos y huertos frutales adultos (Elfving, 1982) sin reducción de los rendimientos. Las pruebas iniciales en los años setenta abrieron el camino para la rápida adopción de la fertirrigación en fruticultura a lo largo y a lo ancho, incluyendo viñedos (Goldberg *et al.*, 1971), cítricos (Bester *et al.*, 1974), manzanos (Groot Obbink y Alexander, 1977), perales (Black y Mitchell, 1974) y ciruelos (Aljibury *et al.*, 1974). Actualmente, las nuevas plantaciones de viñedos en todo el mundo utilizan la técnica del riego por goteo y la fertirrigación (Figura 11.3).

El nitrógeno (N) es el nutriente más común aplicado como fertilizante a los viñedos (Christensen *et al.*, 1978). Los momentos apropiados para aplicarlo varían desde antes de la brotación (Cahoon *et al.*, 1991) y entre ese momento y la floración (Bates, 2001). En localidades con largos veranos cálidos también son útiles las aplicaciones después de la cosecha (Conradie, 1986).



Figura 11.3. Riego por goteo en un viñedo (línea de goteros colgante) (© SQM).

Las viñas absorben eficientemente el N de las aplicaciones tardías en regiones donde el período de crecimiento es largo. Los viñedos de Chenin blancos en Sudáfrica absorben hasta el 34% de la absorción total del ciclo de crecimiento después de la cosecha de las uvas (Conradie, 1980, 1991).

En California, las viñas absorben más del N que fue aplicado en julio (media estación) y septiembre (poscosecha) que el fertilizante aplicado al comienzo de la brotación en marzo (Peacock *et al.*, 1989). Las aplicaciones tardías o de poscosecha se asumen como de menor efectividad en las regiones de corta duración de ciclo de cultivo, donde el período de canopia activa después de la cosecha es muy corto (Bates *et al.*, 2002).

La mayoría de los nuevos viñedos plantados en Australia usan riego por goteo. Sólo se usan fuentes nitrogenadas (urea, nitrato de calcio o, a veces, potasio en suelos deficientes, como nitrato KNO_3) en los esquemas de fertirrigación. Debido a las severas deficiencias naturales de fósforo en los suelos australianos, se realizan fuertes aplicaciones de P al suelo antes del establecimiento de las viñas, mientras que los micronutrientes son normalmente aplicados como pulverizaciones foliares (Robinson, 2000).

Muchos de los nuevos viñedos alrededor del mundo usan fertirrigación. Los experimentos iniciales en Israel en todos los viñedos adonde se usaba riego por goteo, incluían al fósforo en el cóctel de fertirrigación (Bravdo *et al.*, 1984, 1985; Hepner y Bravdo, 1985). Bravdo y Hepner (1987) revisaron los ensayos de fertirrigación de viñedos en Israel, mientras que Bravdo y Proebsting (1993) revisaron las prácticas de fertirrigación en el mundo. Las líneas de riego en los viñedos se cuelgan debajo de la estructura que soporta la canopia, como se muestra en la fotografía (Figura 11.3), o bien son dejados sobre el suelo a lo largo de las hileras de viñas, como se muestra en la Figura 11.4. Un estudio detallado del método de análisis foliar, el más común para diagnosticar el estado nutricional de fósforo en los viñedos, fue publicado por Atalay (1978).



Figura 11.4. Riego por goteo en un viñedo (apoyados sobre el suelo, a lo largo de la plantación de viñas) (© Yara International ASA).

Otro estudio detallado de análisis foliares de 26 cultivares de uvas durante la estación de cultivo fue publicado por Christensen (1984), quien comparó los niveles de nutrientes en el pecíolo y en la lámina de hojas de cultivares de uvas para pasa, para mesa y para vinificar en cinco estadios de crecimiento a largo de tres años. Los cultivares se ordenaron de acuerdo con los contenidos de N total, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, P, K, Zn y B. Este trabajo detallado sugiere que cada cultivar debe estudiarse separadamente. Los análisis de lámina y de pecíolo pueden servir para monitorear los niveles de K y de nitratos en las plantas, pero sus valores deben calibrarse separadamente para cada cultivar. Una vez que este estudio se complete, el análisis foliar se podrá usar como guía para la fertilización de viñedos.

12. Fertirrigación de cultivos hortícolas

12.1. Papas (o patatas)

La planta de papa, o patata, se propaga por los tubérculos vegetativos, y los estadios básicos del desarrollo del cultivo son profundamente afectados por el agua disponible y la concentración de N en la zona de las raíces. Los estadios específicos de crecimiento y la demanda de agua y nutrientes son los que siguen:

- Estadios de crecimiento de la papa (ver Tabla 12.1):
 - Período vegetativo aéreo: finaliza con la aparición de flores (inicial).
 - Nuevo desarrollo de tubérculos (desarrollo hasta media estación).
 - Declinación del follaje y maduración de los tubérculos (engrosado hasta maduración).
- Duración de los estadios de crecimiento: las variedades de papa han sido agrupadas de acuerdo con la extensión de su período de crecimiento (Bald, 1946; Jackson y Haddock, 1959):
 - Tempranas (90-120 días).
 - Intermedias (120-150 días).
 - Tardías (150-180 días).

Tabla 12.1. Demanda hídrica en función del estadio de crecimiento de la papa y del clima (Shalhevet *et al.*, 1983).

Estadio de crecimiento	Inicial	Desarrollo	Media estación ¹	Engrosado	Maduración
Duración (días)	20-30	30-40	40-60	20-35	
Coefficiente hídrico del cultivo ²	0,4-0,5	0,7-0,8	1,05-1,2	0,85-0,95	0,7-0,75

¹ Nota: durante la floración, la demanda de agua es mayor que la evaporación de una superficie libre de agua.

² % de la evaporación de agua de un tanque tipo "A".

En la mayoría de los campos comerciales de producción, durante las etapas iniciales después de la germinación, el suelo se trabaja a ambos lados de la hilera de plantación como para formar un "lomo" de suelo suelto como medio donde los futuros estolones subterráneos se desarrollarán y producirán los tubérculos. Esta operación implica que las líneas de goteos sólo pueden instalarse una vez que la operación de alomado se haya completado. Los tubérculos en desarrollo deben estar en la zona del bulbo húmedo para asegurar que los iones de Ca del suelo puedan permitir el desarrollo de la piel del tubérculo sin interrupciones (Marschner, 1995). Así, el riego por aspersión es el método más seguro y práctico para la producción de papas a gran escala.

12.1.1. Demanda de agua

El rendimiento y la calidad de los tubérculos se reducen con el déficit hídrico. Muchos parámetros de calidad de los tubérculos son influidos por el estrés hídrico (escasez de agua), tales como el grado comercial, densidad, necrosis del centro, manchas, centro hueco y otros. El grado comercial es muy sensible a las deficiencias de manejo del riego. El momento del riego basado en la cantidad de agua consumida, la tensión hídrica del suelo y la evapotranspiración del cultivo son usados para establecer un cronograma del riego de una región en particular (Susnoschi y Shimshi, 1985; Onder *et al.*, 2005). La demanda de agua varía con el estadio de crecimiento y el clima (Shalhevet *et al.*, 1983) (Tabla 12.1). El aumento de la duración del estrés hídrico antes de la iniciación de los tubérculos reduce el establecimiento de tubérculos por cada estolón (MacKerron y Jefferies, 1986).

12.1.2. Demanda de nutrientes

La demanda de nutrientes varía con el tiempo y estadio de crecimiento.

Nitrógeno (N)

Las necesidades de nitrógeno de un cultivo de papas requieren un cuidadoso manejo. Un elevado suministro de N durante el período inicial de crecimiento demora la formación de los tubérculos y deriva el crecimiento a las partes aéreas vegetativas como se ve en la Tabla 12.2. La mejor decisión sobre la conveniencia de aplicar N durante la estación de crecimiento se realiza sobre la base de un análisis de tejido. El análisis del pecíolo es una herramienta efectiva para manejar los requerimientos de N de la papa, en especial para realizar un ajuste con aplicaciones suplementarias a través de la fertirrigación. Los valores de N-NO_3^- del pecíolo en papa deberían mantenerse en las 25.000 ppm hasta la iniciación de los tubérculos, y en el rango de 13.000 a 15.000 ppm durante el período de su engrosado (Zhang *et al.*, 1996).

Tabla 12.2. Tasa de crecimiento de los tubérculos de papa en relación con el suministro de nitratos (Krauss y Marschner, 1982).

NO_3^- (mM L ⁻¹)	Absorción de N (mM día ⁻¹)	Crecimiento del tubérculo (cm día ⁻¹)
0	0	3,89
1,5	1,18	3,24
3,5	2,10	4,06
7	6,04	0,44

Fósforo (P)

Una elevada concentración de P en el suelo durante los estadios iniciales estimula el número de tubérculos iniciales (Jenkins y Ali, 2000). La planta absorbe P durante todo el período de crecimiento de los tubérculos, desde los días 35 a 95, a una tasa constante diaria de 51 mg de P por planta (Figura 12.1; Carpenter, 1957). En los sistemas tradicionales de cultivo de papa, el P normalmente se aplica junto con el

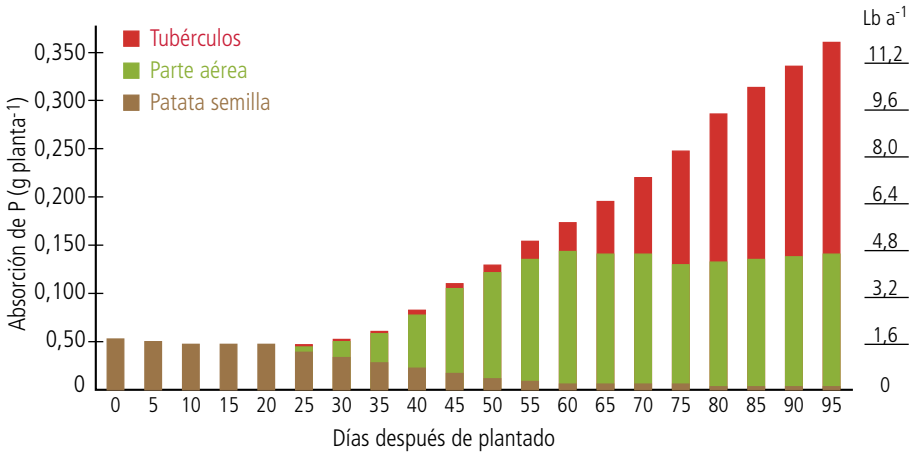


Figura 12.1. Contenido de fósforo de parte aérea, tubérculos y semillas de patata en varios estadios de crecimiento (Carpenter, 1957).

K como fertilización de base durante la preparación del suelo, o en el momento de la siembra, mayormente en forma de distintos abonos orgánicos (Van Delden, 2001). Esta práctica es preferida por los agricultores, ya que minimiza el riesgo de deficiencias de nutrientes, aunque los abonos orgánicos pueden suministrar cantidades no controladas de N que resultan en un exceso de crecimiento vegetativo y demoras en la formación de los tubérculos.

Para estudiar el P en riego por goteo, Papadopoulos (1992) utilizó una concentración constante de 40 mg P L^{-1} en el agua del riego por goteo a través de todo el período de crecimiento; así mantuvo el nivel de P en los pecíolos y aseguró un alto rendimiento de buena calidad. Los tubérculos removieron $22 \text{ kg ha}^{-1} \text{ P}$ del suelo.

Potasio (K)

El potasio se acumula principalmente en las hojas superiores y ramas hasta el fin del estadio de crecimiento II a una tasa de 128 mg de K por día. Durante el período de crecimiento III, los tubérculos absorben K del suelo e importan K de las ramas para el desarrollo de los tubérculos, a una tasa de 60 mg por planta por día (Figura 12.2) (Carpenter, 1957). De este modo el potasio se acumula en los tubérculos durante el período de crecimiento completo, siendo alimentado tanto desde las partes vegetativas como por la absorción directa del suelo.

Calcio (Ca)

El calcio en la piel de los tubérculos se obtiene directamente desde la solución del suelo (Marschner, 1995), lo que implica que el tubérculo en crecimiento debe estar rodeado de suelo húmedo todo el tiempo. Los períodos de suelos secos entre riegos resultan en una

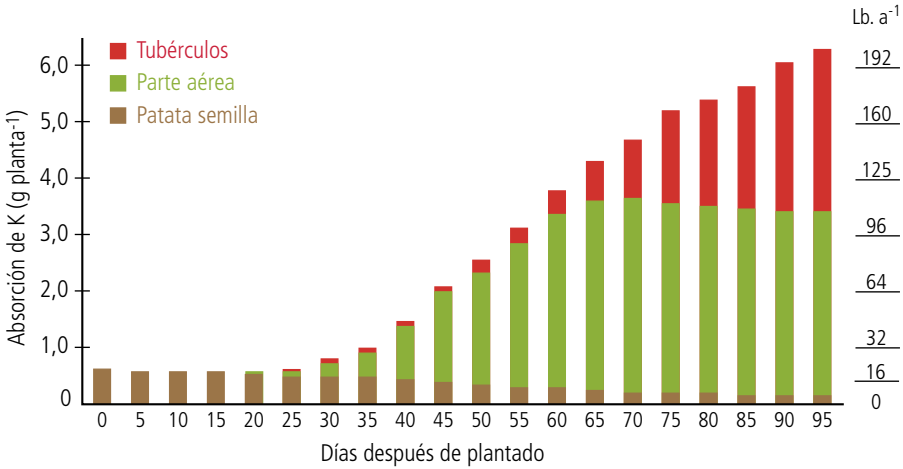


Figura 12.2. Contenido de potasio de parte aérea, tubérculos y semillas de patata en varios estadios de crecimiento (Carpenter, 1957).

escasez del Ca necesario para el desarrollo de nuevo tejido epidérmico, lo que conduce a rupturas de la piel y pérdidas de rendimiento. Con la fertirrigación, es posible proveer la condición húmeda del suelo en el lomo que cubre el tubérculo durante todo el período completo de crecimiento. Así, la ubicación de la línea de fertirrigación debería estar en el tope del bordo, por encima de la profundidad de desarrollo del tubérculo. Las líneas de riego subsuperficiales debajo del tubérculo podrían causar la ruptura de la epidermis y bajar la calidad de los tubérculos maduros. Los aspersores, pivotes centrales y microaspersores son empleados en la práctica para controlar la aplicación de agua y de nitrógeno.

Los suelos arenosos y franco-arenosos son los más favorecidos para un mejor control del riego y de la fertilización nitrogenada durante la estación, así como los que más facilitan la cosecha de los tubérculos al fin del ciclo. Las papas cultivadas en suelos arcillosos son de difícil manejo y cosecha, ya que el barro pegajoso suele adherirse a los tubérculos reduciendo su calidad.

La densidad de los tubérculos es el parámetro más importante en las papas para industrialización. En una experiencia donde se aplicaron dosis crecientes de N como sulfato de amonio con la fertirrigación a dosis de 0, 35, 70 y 105 mg N L⁻¹, tuvo el máximo valor cuando no se aplicó nitrógeno. El aumento del rendimiento total observado con las dosis crecientes de aplicación de N se debió a un mayor tamaño de los tubérculos a expensas de su densidad (Mohammad *et al.*, 1999).

12.1.3. Sistemas de riego por goteo en la producción de papas en varios países

India: Gupta y Saxena (1976) encontraron que la concentración crítica de N-NO_3^- en pecíolos de plantas de 45 días se sitúa en un rango desde 9.100 a 9.600 ppm y se correspondía con valores en la nervadura media que van desde 3.000 a 3.900 ppm. Para el P-PO_4^- , la concentración crítica para pecíolos de plantas de 45 días es 2.250 ppm. El análisis de los contenidos de nutrientes de las hojas durante el período de crecimiento es el método más exacto para determinar el estado nutricional y así permitir una rápida respuesta a la necesidad adicional de fertilizantes nitrogenados vía riego por goteo. Este aspecto es particular porque es el único método de riego que puede adaptarse para controlar el suministro diario de nutrientes cuando la planta lo necesita.

Israel: los estudios de riego por goteo más antiguos realizados en Israel para evaluar los efectos simultáneos de variar la humedad y los niveles de N en el desarrollo de la planta de papa y la partición de los asimilatos fueron llevados a cabo por Shalhevet *et al.* (1983), Shimshi y Susnochi (1985) y Susnochi y Shimshi (1985) en un suelo loésico. Sin embargo, el método más aceptado en 2007 era la fertirrigación con microaspersores (U. Kafkafi, comunicación personal).

España: Fabeiro *et al.* (2001) usaron diez tratamientos de riego por goteo para examinar el efecto de momento del déficit de riego en el rendimiento de la papa y la eficiencia de uso del agua. Las deficiencias de agua durante el engrosado de los tubérculos en la mitad y el final de la estación fueron particularmente dañinas para el rendimiento de los tubérculos. Los rendimientos fueron el resultado de una alta eficiencia de uso del agua combinado con el momento en que el déficit de riego estuvo restringido al comienzo de la estación.

Siria: la fertirrigación de papas en Siria fue informada por Mussaddak (2007). Allí el rendimiento de los tubérculos de tamaño comercial de un cultivo de papas de primavera fertirrigado se comparó con el de uno regado por surcos. Con las siguientes dosis de fertilizante nitrogenado de 70, 140, 210 y 280 kg N ha⁻¹ aplicadas en el cultivo con fertirrigación, los rendimientos de los tubérculos aumentaron 4, 2, 31 y 13% para papas de primavera, respectivamente, mientras que en las papas de otoño con riego por surcos los valores comparativos fueron de 13, 27, 20 y 35%, respectivamente. Este informe demuestra la delicada interacción entre las condiciones climáticas durante el crecimiento de las papas y el rendimiento de los tubérculos a altas dosis de aplicación de N. La fertirrigación por goteo mejoró la eficiencia de uso del agua de campo en los estadios de engrosamiento y de cosecha. También aumentó la densidad de los tubérculos de papa comparado con la de los de riego por surcos, mientras que, por otra parte, los altos niveles de N disminuyeron la densidad de los tubérculos de papa con los dos métodos de riego, según fue reportado por Mohammad *et al.* (1999).

Estados Unidos: el riego por goteo en cultivos de papa fue introducido recientemente en los Estados Unidos, y todavía sólo se usa en una pequeña proporción respecto del total de la producción comercial de papas. El riego por goteo en papas no pudo superar la productividad y calidad conseguidas por el riego por aspersión en el noroeste del Pacífico (Shock *et al.*, 1993). El empleo de la variedad Russet Burbank y las dificultades en la colocación de los tubos de goteros fueron las causas de las fallas del sistema de riego por goteo. La colocación profunda de la cinta de goteros derivó en una reducción del rendimiento y del grado comercial debido a varias razones: pobre suministro de agua al sistema radicular somero de las papas, deficiencias de humedecimiento en la epidermis externa de los tubérculos y sobrecalentamiento del tubérculo en el lomo relativamente seco. La colocación más superficial de la cinta de riego en suelos arcillosos generó un ahorro de agua, pero también dificultades para asegurar una buena calidad de los tubérculos a causa de la adherencia de arcilla a ellos durante la cosecha mecánica. Sammis (1980) comparó el riego por aspersión con el goteo superficial, el goteo subsuperficial y el riego por surcos en la producción de papas en Nuevo México. El riego por goteo subsuperficial con 20 kPa como criterio de riego fue el sistema de riego más productivo. Shae *et al.* (1999) estudiaron cuatro opciones para el manejo del riego por goteo en Dakota del Norte. La automatización del riego basado en el criterio de tensión hídrica del agua edáfica a 30 kPa tuvo una eficiencia de uso de agua relativamente alta.

En Florida, Smajstrla *et al.* (2000) compararon un sistema de riego subsuperficial automatizado y controlado con un subriego convencional semicerrado de pérdida. La necesidad de un cambio en el antiguo sistema de riego se debía a los problemas del escurrimiento superficial y a la contaminación con nutrientes en las vías de agua adyacentes. El sistema de riego subsuperficial empleado por Smajstrla *et al.* (2000) requirió más energía eléctrica, pero utilizó 36% menos de agua para obtener el mismo rendimiento de papas. Steyn *et al.* (2000) examinaron opciones de programación de riego para papas regadas por goteo. El riego por aspersión con distintos criterios de riego fue comparado con el riego por goteo superficial y subsuperficial con un rango de tratamientos fertilizantes sobre el rendimiento y la calidad comercial de papas en Minnesota (Waddell *et al.*, 2000). El riego por goteo superficial y subsuperficial estuvo entre los mejores sistemas con mayor rendimiento total y comercial.

El riego por goteo o el riego por aspersión redujeron el lixiviado de nitratos comparados con el riego normal por aspersión (Waddell *et al.*, 1999). Simonne *et al.* (2002) concluyeron que el riego por goteo es un método de producción económicamente viable en el sudeste de los Estados Unidos.

Zartman *et al.* (1992) examinaron los efectos de la profundidad de la cinta y del espaciamiento de los emisores sobre el rendimiento y grado comercial de tubérculos de papas Norgold Russet en Lubbock (Texas). Ni la profundidad ni el espaciamiento de los emisores tuvieron influencia en el rendimiento de papas, pero la proporción de tubérculos deformados fue mayor cuando la cinta estuvo enterrada a 0,2 m en comparación con colocaciones más superficiales. La temperatura del suelo fue mayor con profundidades de la cinta a 0,2 m que a 0,1 m o 0,025 m. DeTar *et al.* (1996) encontraron que la mejor colocación para las cintas de riego era a profundidades de 0,08 m (arriba del tubérculo

semilla) y 0,46 m (debajo del tubérculo semilla). Los experimentos de DeTar *et al.* (1996) y los de Zartman *et al.* (1992), así como los más antiguos de Susnoschi y Shimshi (1985) en Israel, demostraron la necesidad de adaptación de los sistemas de emisión de agua y de fertilizantes para cada tipo de suelo, cultivar de papa y condición climática.

Turquía: en la región de Capadocia el área bajo riego por goteo y fertirrigación aumentó desde 500 ha en 2003 a 4.000 ha en 2006, lo cual evidencia que el riego por goteo y la fertirrigación fueron los sistemas predominantes en la región. Los resultados de Capadocia pueden ser extrapolados a otros suelos de texturas livianas en la región de Anatolia Central, Bolu y del mar Egeo, que tienen condiciones climáticas casi similares (FAO, 1990).

12.1.4. Panorama de la fertirrigación en papas

La complejidad del mantenimiento del cultivo bajo riego y el amplio rango de técnicas de producción de papa, por ejemplo, para consumo en fresco en relación con las demandas de la industria y de las cadenas de restaurantes, demoran la introducción de sistemas de riego por goteo en la producción de papas.

Mantener una humedad de suelo uniforme alrededor de los tubérculos durante su desarrollo, y al mismo tiempo adoptar técnicas de riego específicas para distintos tipos de suelo, métodos de preparación y condiciones climáticas, son los principales aspectos en la producción de papas. En suelos arenosos de texturas livianas se emplean microaspersores y fertirrigación, con aplicaciones frecuentes, aun diarias o de varias veces al día, de pequeñas dosis de agua y nutrientes. En suelos pesados arcillosos, las tuberías de riego por aspersión son las más utilizadas, con una fertilización basal durante la preparación del suelo, o bien dividiendo la dosis de N y aplicándola con el cronograma de riego hasta la floración. Los fertilizantes fosfatados y potásicos son aplicados durante la preparación del suelo, parte como abonos orgánicos y parte como fertilizantes inorgánicos.

La complejidad de manejo de los cultivos de papa en condiciones de campo y la diversidad del mercado mundial determinan la necesidad de soluciones sitio-específicas para alcanzar el mejor rendimiento comercial posible. Los cultivares de papa difieren en su performance bajo riego por goteo (Shock *et al.*, 2003). La adopción de riego por goteo y fertirrigación en papas es por lo tanto un trabajo tedioso y continuo que se vuelve económico sólo cuando existen grandes superficies y buenos mercados y cuando el agua es un factor limitante. Sin embargo, la fertirrigación con microaspersores en suelos arenosos es un método aceptable. Suministrar el fertilizante nitrogenado por sistemas de riego de pivote central también es una práctica común, usando sólo tres o cuatro aplicaciones.

12.2. Tomates

12.2.1. Tomates cultivados en invernáculos

Los tomates de invernaderos son podados de forma tal de conducir un solo tallo por planta. El patrón de crecimiento es de nueve hojas y un racimo en el primer estrato, y luego tres hojas y un racimo, que teóricamente puede proceder indefinidamente mientras que la dominancia del ápice se mantenga viva (Figura 12.3). Tal sistema se mantiene durante todo el período de crecimiento de la planta en el invernadero. Una vez que se obtienen las nueve hojas y el racimo inicial, se observa un patrón de absorción casi constante de N, P, K y Ca.

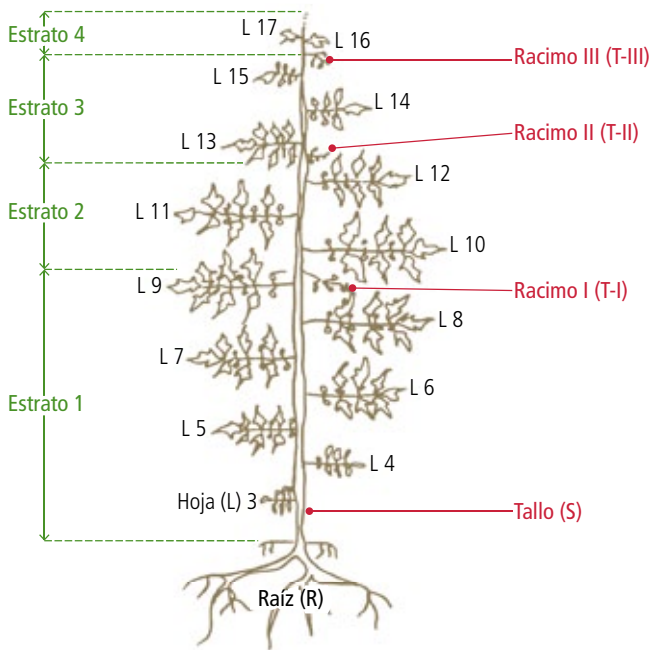


Figura 12.3. Diagrama de una planta de tomate (después de Tanaka *et al.*, 1974).

El corte de la punta de crecimiento de la planta (líneas de puntos; Figura 12.4) detiene la elongación de la planta y la absorción de nutrientes. Durante el tiempo de absorción lineal, la absorción de N alcanza 4 kg N ha^{-1} por día.

El patrón de distribución de nutrientes en las partes vegetativas y frutos (Figura 12.5) demuestra el control interno de la planta sobre la distribución de minerales dentro de la planta (Tanaka *et al.*, 1974). El 62% de todo el N absorbido por la planta de tomate se encuentra en los frutos. Comparativamente, casi el 70% del P se halla en las semillas. El potasio está uniformemente distribuido entre las partes vegetativas y los frutos, mientras que menos del 5% del Ca entra a los frutos (Figura 12.4).

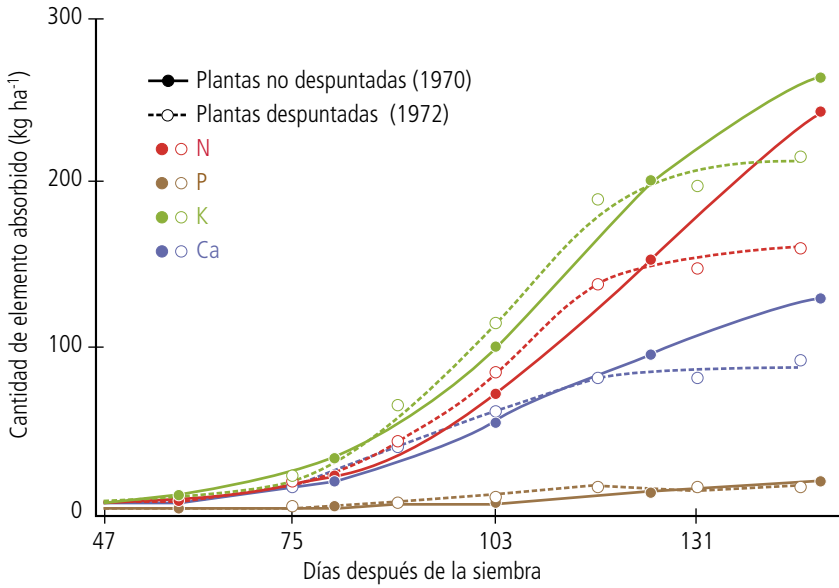


Figura 12.4. Cantidades absorbidas de N, P, K y Ca por plantas despuntadas y sin despuntar (adaptado de Tanaka *et al.*, 1974).

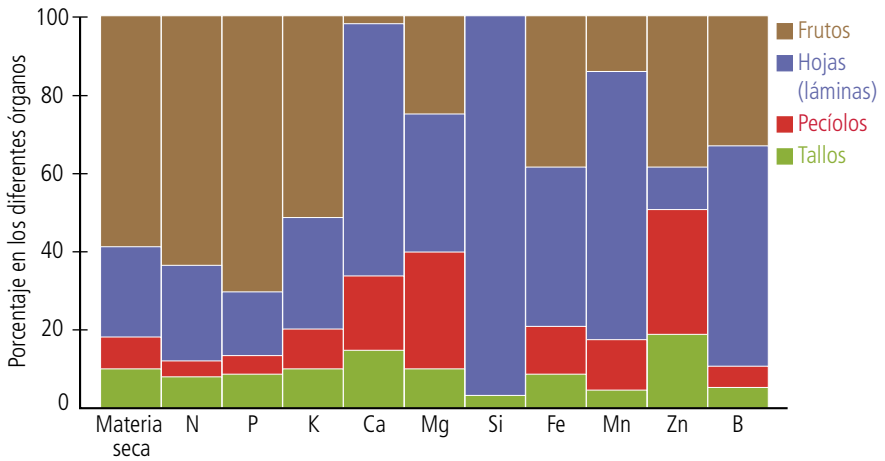


Figura 12.5. Distribución de elementos minerales en plantas de tomate (adaptado de Tanaka *et al.*, 1974).

Un patrón de suministro diario de N, P y K para tomates de invernadero cultivados en arena se muestra resumido en la Tabla 12.3 (Bar-Yosef *et al.*, 1992).

Tabla 12.3. Suministro diario de nutrientes por fertirrigación para tomates cultivados en invernaderos*.

Días después de la siembra	kg N (ha ⁻¹ día ⁻¹)	kg P (ha ⁻¹ día ⁻¹)	kg K (ha ⁻¹ día ⁻¹)
1-10	1	0,1	2
11-20	1	0,1	4
21-30	1	0,1	3,5
31-40	2	0,2	3,5
41-50	2,5	0,4	5,5
51-60	2,5	0,6	5,5
61-70	2,5	0,3	6
71-80	2,5	0,3	4
81-90	1,5	0,3	6
91-100	1,5	0,1	0,1
101-110	1	0,1	0,1
111-120	1	0,1	1
121-130	1,5	0,2	1
131-150	1,5	0,35	1,3
151-180	4	0,5	3,8
181-220	2	0,3	3
Total (kg ha ⁻¹)	450	65	710

*cv F-144 Daniela, sembrado el 25 de septiembre, a 23.000 plantas ha⁻¹, rindió 195 t ha⁻¹ (Bar-Yosef *et al.*, 1992).

El tomate en los invernaderos puede cultivarse en medios de cultivo realizados a partir de una mezcla de fuentes orgánicas (por ejemplo, turbas o compost) y fuentes minerales (por ejemplo, perlita, lana de roca o de vidrio, o arena), así como con técnicas de película de nutrientes (NFT). Tales sistemas exponen las raíces a las temperaturas internas del invernadero. Los invernáculos en climas fríos son calefaccionados durante la noche. En climas cálidos, los invernaderos pueden sobrecalentarse y las raíces son expuestas a temperaturas más altas que las hojas, dado que la evaporación refresca las hojas, pero las raíces no pueden escapar al calor del invernáculo. Este factor es muy importante en la elección de la forma de N para los fertilizantes.

El ion nitrato (NO₃⁻) se transporta como nitrato a las hojas, donde se transforma y se asimila como amonio. El amonio es inmediatamente ligado a un azúcar que también se

elabora en la hoja por la fotosíntesis, y ambos producen los aminoácidos. El amonio es una sustancia tóxica en la célula y se elimina durante la producción de aminoácidos, un mecanismo que mantiene el crecimiento de la planta (Marschner, 1995).

El N amoniacal se metaboliza en las raíces a aminoácidos, usando el azúcar presente en las células de las raíces. Los azúcares en las raíces dependen de su transporte desde las hojas. Cuando la temperatura de las raíces sube, la respiración de éstas aumenta y consumen el azúcar en paralelo pero independientemente del metabolismo del N. Estos dos procesos metabólicos, respiración y metabolismo del amonio, compiten fuertemente por los azúcares en las raíces. Cuando los azúcares son totalmente consumidos por la respiración, la producción de amonio durante su metabolismo se vuelve tóxica para las células de los órganos, se detiene el crecimiento de las raíces y se observa la muerte de las células de las raíces (Ganmore-Newmann y Kafkafi, 1985) (Figura 12.6). El metabolismo del amonio o del nitrato dentro de la planta fue estudiado por Britto y Kronzucker (2002), cubriendo el ciclo metabólico completo en las diferentes familias de plantas, sensibles y tolerantes a la nutrición de amonio. La sensibilidad de los cultivos que prefieren amonio o nitratos debería considerarse para elegir la mejor fuente de N para una condición específica de clima y cultivo.



Figura 12.6. Tomate de invernadero (tomate cv. Money Maker). Derecha: sólo con fuente de nitratos; izquierda: niveles crecientes de amonio en la solución nutritiva recirculada (Kafkafi, 1964).

12.2.2. Salinidad

La relación entre la materia seca de los frutos, el transporte de agua al fruto y la salinidad fue estudiada por Ho *et al.* (1987), quienes mostraron que la entrada total de agua en los frutos es mucho menor en los tratamientos con alta salinidad, cuyo

resultado es un menor peso del fruto fresco. Dado que el tamaño del fruto de tomate es muy dependiente de la disponibilidad de agua, los agricultores pueden controlar la entrada de agua al fruto de acuerdo con un objetivo específico de mercado. Frutos pequeños, con alta cantidad de sólidos solubles totales (SST), normalmente contienen concentraciones de azúcares más altas que los frutos más grandes del mismo cultivar en la misma ubicación, pero que recibieron mayores aplicaciones de agua. Tanto los tomates para mercado fresco como aquellos para la industria de enlatados responden de la misma forma a los niveles de riego y de salinidad. Los sólidos solubles totales en tomates aumentan con un incremento en la salinidad y la relación entre amonio y nitrato en las solución fertilizante, según fue demostrado por el trabajo de Flores *et al.* (2003) y por los datos presentados en la Tabla 12.4 adaptados de Ben-Oliel (2004).

Tabla 12.4. Efecto de la fuente de N y salinidad en el rendimiento y los parámetros de calidad del fruto de tomate cv. R144.

NH ₄ ⁺ (mM)*	RC ¹ (g planta ⁻¹)	PB ² (g planta ⁻¹)	RT ³ (g planta ⁻¹)	RB ⁴	PPF ⁵ (g)	SST ⁶ (%)	CESF ⁷ (dSm ⁻¹)	AT ⁸ (%)	pH	IAF ⁹ (m ² planta ⁻¹)
NaCl - 0 mM										
0	5.480b	158d	6.084b	322b	141a	5,3b	5,3c	0,51b	4,07a	1,8ab
1	5.980a	236c	6.814a	368a	143a	5,4b	5,3c	0,48b	4,04a	2,1a
2	5.160b	247c	5.906b	325b	140a	5,5b	5,5c	0,53b	4,00a	1,8ab
4	4.430c	356c	4.927b	256c	126b	5,2b	5,1c	0,46b	4,04a	1,6b
NaCl - 45 mM										
0	2.700e	763c	3.663e	267c	82d	7,3a	6,9ab	0,67a	4,02a	1,25d
1	3.820d	821bc	4.840d	334b	103c	6,9a	7,2a	0,64a	4,00a	1,7b
2	2.810e	954ab	3.914e	282c	89d	7,2a	7,2a	0,64a	3,96a	1,5c
4	1.670f	1183a	2.919f	201d	87d	6,9a	6,4b	0,43b	3,98a	1,05e

*Concentración de NH₄⁺ sobre un total de 8 mM N.

¹RC: rendimiento comercial

²PB: pudrición basal (*blossom end rot*)

³RT: rendimiento total = RC + PB + frutos en desarrollo

⁴RB: rendimiento brix

⁵PPM: peso promedio de frutos

⁶SST: sólidos solubles totales

⁷CESF: conductividad eléctrica del suero del fruto

⁸AT: acidez titulable como ácido cítrico

⁹LAI: índice de área foliar

Dentro de cada columna, los promedios seguidos por la misma letra no difieren significativamente del P < 0,05.

En un invernáculo se estudiaron los efectos del aumento de la proporción de amonio en la solución nutritiva a expensas del nitrato (total 8 mM N) con cloruro de sodio y sin él, sobre el rendimiento y los parámetros de calidad de los frutos (Tabla 12.4). Las plantas se cultivaron en envases de 10 L llenados con perlita (un material esponjoso de silicato) y eran alimentadas por una corriente constante de solución nutritiva que era drenada continuamente. Es claro que los altos niveles de amonio aumentaron la incidencia de la podredumbre basal (*blossom end rot*) independiente de la presencia o ausencia de NaCl en la solución nutritiva. Sin embargo, la incidencia fue mucho mayor en el tratamiento salino. Mientras que el rendimiento total fue severamente deprimido por el alto nivel de amonio y la alta salinidad, los valores de SST de los frutos de las plantas tratadas con sales aumentaron. La salinidad deprimió el peso promedio de frutos y, como resultado, la dulzura de los frutos (concentración de azúcares) fue mayor en los frutos más pequeños bajo salinidad debido a las mayores concentraciones de SST.

12.2.3. Fertirrigación de tomates para procesamiento industrial

La industria del tomate reformó el sistema de pago por peso del tomate (Santos, 1996). En la actualidad, un productor recibe su paga basada en el porcentaje de materia seca del fruto. Esta sola decisión indujo cambios significativos en el manejo del tomate para industria de los sistemas de riego, con mayor necesidad de enfatizar la calidad tecnológica del producto comercial. La optimización de la producción de materia seca, los beneficios esperados y la aplicación estacional del agua fueron estudiados por Santos (1996). El factor crítico que controla el beneficio económico fue identificado como la uniformidad de distribución del rendimiento de la calidad del fruto. La disminución en la materia seca de los frutos proviene de un aumento del agua aplicada en la estación. El nivel óptimo de riego para una alta producción de materia seca es siempre más bajo que el requerido para un máximo rendimiento de tomate fresco. Tal interacción sugiere una relación inversa entre el beneficio económico y el agua aplicada para tomate para industria. Dado que el rendimiento de SST por ha es el resultado de multiplicar el rendimiento de tomate en fresco por ha y la concentración de SST, la falta de agua puede volverse el factor limitante para el crecimiento de la planta, causando una reducción del rendimiento en fresco, que no puede compensarse por una mayor concentración de SST. La introducción de riego subsuperficial permite un riego más exacto sin sobreflujo, controlando el rendimiento total.

Un estudio de campo que comparó varias formas de riego y fertirrigación en tomates cultivados a campo en la India fue llevado a cabo por Hebbar *et al.* (2004). La fertirrigación con 100% de fertilizantes solubles en agua aumentó el rendimiento de frutos significativamente (79,2 t ha⁻¹) sobre el riego subsuperficial por goteo (76,55 t ha⁻¹). La fertirrigación alcanzó un número mucho más elevado de frutos por plantas (56,9) y una eficiencia de uso de fertilizantes más alta (226,48 kg rinde kg⁻¹ NPK) comparado con el goteo y el control regado por surcos. Dado que las dosis de nutrientes en fertirrigación son aplicadas en pequeñas cantidades diarias, a medida que aumenta la demanda de la planta con el crecimiento, se observa menor lixiviación de NO₃⁻-N y K a las capas más profundas del suelo.

Los cronogramas de fertirrigación usados en los Estados Unidos en tomate para la industria son mostrados en las tablas 12.5 y 12.6 (Snyder y Thomas, 2007).

Los principales métodos de riego por goteo usados en los Estados Unidos son subsuperficiales, a una profundidad de 15 a 20 cm, para asegurarse que las líneas de riego no sean dañadas por la cosecha mecánica.

Tabla 12.5. Cronograma sugerido de fertirrigación para tomates trasplantados en Mississippi, usando fertilizantes aplicados por vía fertirrigación (cronograma de 14 semanas)*.

Total (lb a ⁻¹)		Estadio de crecimiento	No. de semanas fertirrigados	Tasa de inyección (lb a ⁻¹ semana ⁻¹)	Total inyectado en el estadio (lb)
N	K ₂ O	Vegetativo	2	6	12
		Floración	3	8	24
120	120	Fructificación	7	10	70
		Final fructificación	1	8	8
		Maduración	1	6	6
Total			14		120

*Nota: los fertilizantes fosfatados no se mencionan en estas tablas ya que todo el P debería aplicarse en preplantación y no fertirrigado.

Tabla 12.6. Cronograma sugerido de fertirrigación para tomates de trasplante en Mississippi, usando el 20% del N y K₂O preplantación (cronograma de 12 semanas)*.

Total (lb a ⁻¹)		Estadio de crecimiento	No. de semanas fertirrigados	Tasa de inyección (lb a ⁻¹ semana ⁻¹)	Total inyectado en el estadio (lb)
N	K ₂ O	Vegetativo	2	0	0
		Floración	3	7	21
96	96	Fructificación	7	9	63
		Final fructificación	1	7	7
		Maduración	1	5	5
Totales			12		96

*Nota: los fertilizantes fosfatados no se mencionan en estas tablas porque todo el P debería aplicarse en preplantación y no fertirrigado.

12.2.4. Calidad industrial del tomate

La intensidad de color rojo y los contenidos de azúcares y de SST están directamente relacionados con el contenido de licopenos y con la calidad de los tomates. La relación

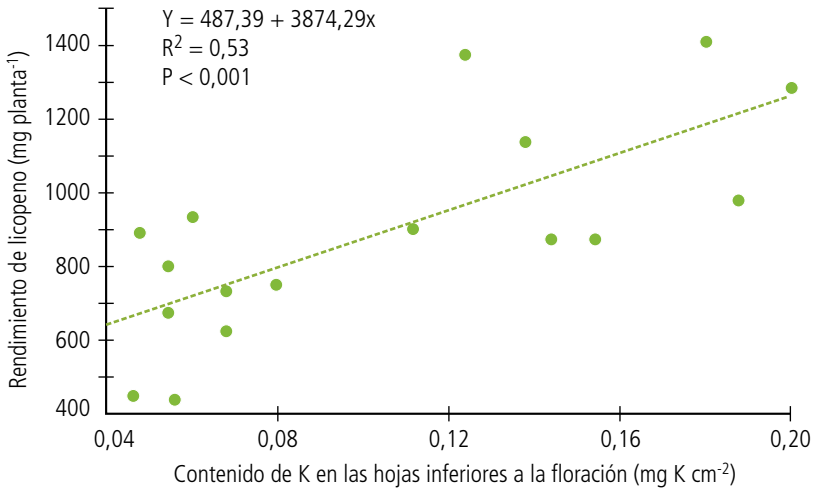


Figura 12.7. Contenido de licopeno en el fruto de tomate como función de la concentración de K en la hoja inferior en el día 40 después del trasplante (Sosnitsky, 1996).

entre la concentración de K en las hojas inferiores y el contenido de licopeno se presentan en la Figura 12.7 (Sosnitsky, 1996) (ver también Figura 6.1).

Entre los días 50 y 65 se da el principal ciclo de floración, que está caracterizado por un mínimo consumo de K. Inmediatamente luego del fin de la floración, el desarrollo de los frutos se maximiza por un período de dos semanas. El suministro de potasio por la fertirrigación debe asegurar suficiente nutriente en la zona activa de las raíces antes del período de máxima fructificación. Por ejemplo, (i) una aplicación de K de base para asegurar el crecimiento inicial; (ii) cantidades crecientes para asegurar la primer fructificación; (iii) niveles crecientes de hasta 1 g de K por planta por día para asegurar el suministro completo de K (Figura 12.8 A y B).

Los resultados de un experimento de fertilización conducido por Sosnitsky (1996) con tomate para la industria explican los principios más importantes de la fertirrigación para tomate para procesamiento:

- Una aplicación de base de fertilizante fosfatado debe satisfacer toda la demanda del cultivo desde la siembra.
- Niveles iniciales altos de N reducen la tasa de crecimiento del cultivo al competir con la absorción de P.
- Aplicaciones de K se necesitan durante todo el período de cultivo, principalmente al comienzo de la primera floración.

La Tabla 12.7 demostró que durante los estadios tempranos después de una siembra directa entre los días 37 y 81, el fertilizante amoniacal aplicado después de la siembra demoró el crecimiento vegetativo en un 25% en relación con las parcelas de control.

Los símbolos de las líneas se refieren a las concentraciones de K en la solución del medio inerte de cultivo, que variaron desde 0,5 a 8 mM K l⁻¹

● 0,5 ● 1 ● 2 ● 4 ● 6 ● 8

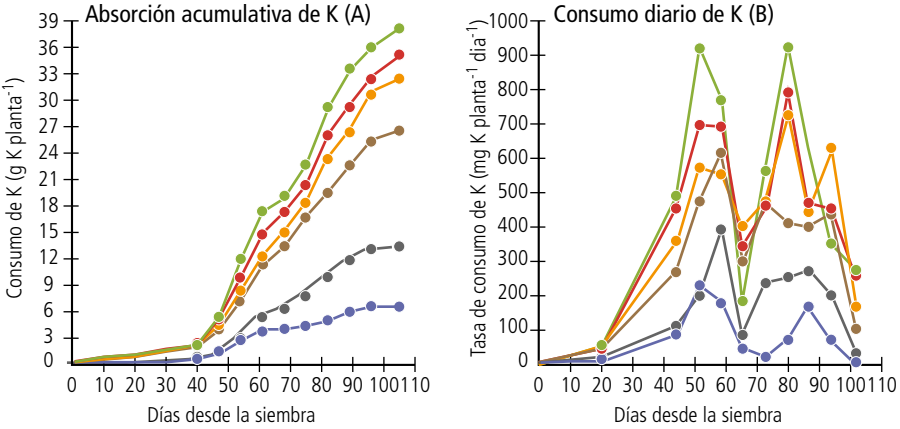


Figura 12.8. Absorción acumulativa (A) y consumo diario de K (B) durante la estación de crecimiento de tomate cv 8687 (Sosnitsky, 1996).

El efecto de una fuerte aplicación basal de fertilizantes fosfatados (Tabla 12.8) en el tomate para industria es muy positivo para el desarrollo del cultivo y el rendimiento de frutos. El fósforo aumenta el número de flores, y una cantidad elevada aplicada inicialmente durante la preparación del suelo incrementa el rendimiento del fruto. En un período de 40 días, la biomasa de frutos aumenta cuatro veces, mientras que las partes vegetativas sólo el 50%. Este procedimiento se utiliza en los Estados Unidos, donde los fertilizantes fosfatados se evitan en la fertirrigación subsuperficial (Snyder y Thomas, 2007).

Durante las últimas seis semanas de cultivo del tomate a campo, el total de N absorbido del suelo se deriva a los frutos en desarrollo. En las parcelas de control, las partes vegetativas pierden N para favorecer los frutos en desarrollo, comenzando 40 días antes de la cosecha. En estas parcelas de control, las cantidades iniciales de N en el suelo fueron suficientes para los primeros 37 días de crecimiento, pero no pudieron suministrar el suficiente N para alcanzar el rendimiento potencial. Por lo tanto, en general, la cantidad total de P puede ser aplicada durante la preparación del suelo, mientras que el N debería dividirse durante las últimas diez semanas de cultivo, con cantidades crecientes paralelas al crecimiento del cultivo (Tabla 12.9).

Tabla 12.7. Producción de materia seca de tomate cultivado a campo influido por la fertilización con N (Feigin, A., comunicación personal).

Parte de la planta	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ (kg N ha ⁻¹)	Materia seca acumulada (kg ha ⁻¹)			
		27 mayo 37 DDS*	11 julio 81 DDS	30 julio 100 DDS	19 agosto 120 DDS
Frutos	0	0	905	2.429	4.143
	60	0	1.000	2.762	4.286
	120	0	1.095	2.905	4.000
	180	0	619	3.352	3.905
Parte vegetativa aérea	0	166	2.143	2.619	3.000
	60	119	2.095	2.524	3.810
	120	95	2.048	2.905	3.619
	180	72	1.905	2.571	3.381
Total	0	166	3.048	5.048	7.143
	60	119	3.095	5.286	8.095
	120	95	3.143	5.810	7.619
	180	72	2.524	5.924	7.286

*DDS: días después de la siembra

Tabla 12.8. Rendimiento de materia seca de tomate cultivado a campo influido por la fertilización fosfatada (Feigin, A., comunicación personal).

Parte de la planta	Superfosfato (kg P ha ⁻¹)	Producción de materia seca acumulada (kg ha ⁻¹)			
		27 mayo 37 DDS	11 julio 81 DDS	30 julio 100 DDS	19 agosto 120 DDS
Frutos	0	0	714	2.190	3.619
	80	0	905	2.648	4.000
	240	0	1.238	3.619	5.095
Parte vegetativa aérea	0	48	1.667	2.571	3.143
	80	114	1.952	2.476	3.857
	240	190	2.286	2.905	3.381
Total	0	48	2.381	4.762	6.762
	80	114	2.857	5.124	7.857
	240	190	3.524	6.524	8.476

Tabla 12.9. Absorción acumulada de N influida por la fertilización con N (Feigin, A., comunicación personal).

Parte de la planta	Absorción acumulada de N (kg N ha ⁻¹)				
	(NH ₄)SO ₄ (kg N ha ⁻¹)	27 mayo 37 DDS	11 julio 81 DDS	30 julio 100 DDS	19 agosto 120 DDS
Frutos	0	0	22	53	94
	60	0	28	76	112
	120	0	34	97	109
	180	0	25	90	118
Parte vegetativa aérea	0	7	52	47	37
	60	5	58	53	59
	120	5	60	62	59
	180	4	58	69	65
Total	0	7	74	100	131
	60	5	86	129	171
	120	5	94	159	168
	180	4	83	160	182

Los efectos del P en la absorción del N son obvios durante los estadios iniciales de crecimiento. En ese período, la absorción de N por el cultivo debido a la alta aplicación de P es seis veces mayor que el testigo. Este efecto “arrancador” inicial de los plantines se refleja en el N final en los frutos (Tabla 12.10).

Tabla 12.10. Absorción acumulada de N influida por la fertilización fosfatada (Feigin, A., comunicación personal).

Parte de la planta	Absorción acumulada de N (kg N ha ⁻¹)				
	Superfosfato (kg P ha ⁻¹)	27 mayo 37 DDS	11 julio 81 DDS	30 julio 100 DDS	19 agosto 120 DDS
Frutos	0	0,0	2,2	8,2	11,7
	80	0,0	4,2	10,6	14,7
	240	0,0	5,4	11,7	16,9
Parte vegetativa aérea	0	0,1	3,3	4,5	4,2
	80	0,3	4,8	4,4	5,0
	240	0,6	4,1	4,8	4,7
Total	0	0,1	5,6	12,6	16,0
	80	0,3	8,9	15,0	19,8
	240	0,6	9,5	16,5	21,6

La absorción de potasio sigue el patrón de crecimiento de la planta y de los frutos. Cuando se aplica una dosis inicial alta de N, como sulfato de amonio (el usado en este estudio), una disminución en el crecimiento del cultivo se refleja en la menor absorción de K (Tabla 12.11). Como se muestra para los cuatro cultivares de tomate (Figura 12.9), el K en el jugo de los frutos está linealmente relacionado con la materia seca del fruto de tomate para procesado.

Tabla 12.11. Absorción acumulada de K influida por la fertilización nitrogenada (Feigin, A., comunicación personal).

Partes de la planta	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ (kg N ha ⁻¹)	Absorción acumulada de K (kg ha ⁻¹)			
		27 mayo 37 DDS	11 julio 81 DDS	30 julio 100 DDS	19 agosto 120 DDS
Frutos	0	0	48	112	187
	60	0	57	127	212
	120	0	58	146	187
	180	0	42	167	206
Parte vegetativa aérea	0	5	56	52	67
	60	4	53	46	77
	120	3	56	58	67
	180	2	50	62	63
Total	0	5	104	163	254
	60	4	110	173	288
	120	3	113	204	254
	180	2	92	229	269

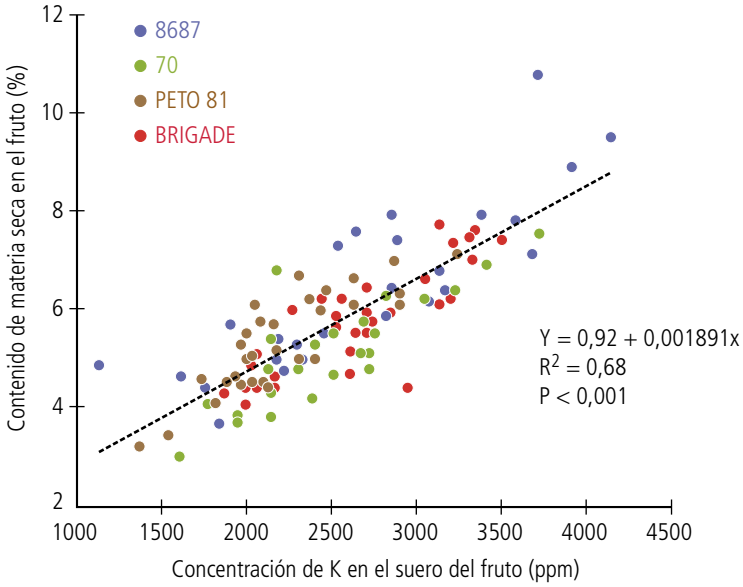


Figura 12.9. Potasio en el jugo del fruto (suero del fruto) de cuatro cultivares de tomate para procesado.

13. Fertirrigación en floricultura y plantas ornamentales cultivadas en el suelo

La floricultura para la seguridad alimentaria (*floriculture for food security*) es promovida por la FAO (Baudoin *et al.*, 2007), ya que la biodiversidad floral es percibida como una fuente potencial de ingresos en los países en desarrollo. En la mayoría de los casos, el riego por goteo y la fertirrigación son métodos usados para asegurar la producción de estas delicadas especies de plantas.

Las flores, endémicas de varias partes del mundo, han desarrollado una adaptación específica a las condiciones locales del suelo y el clima, de modo que su transferencia al cultivo comercial normalmente implica problemas en la respuesta al medio de cultivo y la composición de nutrientes. Las flores nativas de Australia en particular son sensibles al aumento de P en el suelo. Los agregados de fertilizantes NPK y micronutrientes, o la aplicación de P para elevar sólo la concentración de éste en el cultivo de una de esas especies, Safari Sunset, aumentó el peso fresco total y mejoró el cultivo de la planta. Se desarrollaron agrupamientos de raíces proteoides (densa concentración de raicillas de crecimiento limitado) cuando había muy baja concentración de P en la solución nutritiva (Watt y Evans, 1999), y no se desarrollaron raíces proteoides en los tratamientos en los que el P estuvo presente (Silber *et al.*, 1998).

13.1. Alegría (*Impatiens*)

La producción de plantas de alta calidad demanda un óptimo suministro de nutrientes durante el crecimiento, en especial respecto de la concentración de N total y la relación entre las fuentes de N provistas. La alegría de la casa o *Impatiens* (*Impatiens wallerana* Hook. F.) es uno de los cultivos florícolas más importantes en los Estados Unidos. Un estudio detallado de la adecuada relación entre nitratos (NO_3^-) y amonio (NH_4^+) en la fertirrigación de esta especie (Romero *et al.*, 2006) sugirió que los pesos fresco y seco de la parte aérea y el número de botones florales fueron máximos con una relación entre nitrato a amonio de 1:3 a una concentración de N total de $10,5 \text{ mmol L}^{-1}$. Dado que el medio usado para el cultivo de las plantas es sitio-específico, la relación actual de nitrato a amonio en la solución será afectada por la capacidad reguladora de ese medio específico utilizado. Como se menciona en el Capítulo 4, la relación entre nitrato y amonio es la principal herramienta utilizada para controlar el pH del medio de cultivo en el que las raíces prosperan.

13.2. Rosas

Las rosas son las flores más comunes que se producen, y se cultivan en muchas partes del mundo. El riego por goteo en roca volcánica o sobre otros medios de cultivo son comúnmente utilizados (Paradiso *et al.*, 2003). El pH cerca de las raíces (alrededor de 6,5) se mide normalmente a diario en el agua de drenaje y se mantiene dentro de un estrecho rango al controlar la relación nitrato a amonio en la solución nutritiva. El pH de la rizósfera también es afectado por la edad de la planta, la radiación y el estadio de crecimiento de las plantas. Una composición típica de solución nutritiva recirculante para rosas se presenta en la Tabla 13.1 (Lykas *et al.*, 2006).

Tabla 13.1. Composición mineral inicial de una solución nutritiva recirculante para rosas (Lykas *et al.*, 2006).

Elemento	Concentración (ppm)
Nitrógeno, como N-NO ₃	172
Nitrógeno, como N-NH ₄	14
Fósforo, como P-H ₂ PO ₄	31
Azufre, como S-SO ₄	24
Potasio (K)	250
Calcio (Ca)	160
Magnesio (Mg)	24
Hierro (Fe)	1.3
Boro (B)	0,28
Cobre (Cu)	0.6
Molibdeno (Mo)	0,027
Manganeso (Mn)	0,50
Zinc (Zn)	0,23

En un sistema de solución nutritiva recirculante, la absorción de N por plantas de rosa en invernáculo Royalty fue estudiado en relación con la irradiación y el estadio de desarrollo del cultivo (Cabrera *et al.*, 1995). La velocidad de absorción de N siguió un patrón cíclico que estuvo vinculado con el desarrollo de los tallos y la cosecha, pero independientemente de la tasa de transpiración. La tasa de absorción de N varió entre 4 y 5 veces durante un ciclo simple de crecimiento de tallos florales cultivados en el rango de 29-146 mg N por planta día⁻¹. Luego de una cosecha de flores, la tasa de absorción de N disminuyó aun cuando comenzaban a desarrollarse nuevos tallos florales. La absorción mínima ocurrió cuando la tasa de elongación de tallos florales alcanzó el máximo. Luego, las tasas de absorción aumentaron, con una velocidad máxima que se alcanzaba a medida que los tallos florales llegaban a la madurez comercial. El K, Ca, Mg y P siguieron el mismo patrón de absorción que el observado para N. La irradiación no

controló la periodicidad de los ciclos de absorción del N, pero afectó la demanda diaria de N de las plantas. Las tasas de absorción en días de verano alcanzaron los 60 a 70 mg N por planta día⁻¹, cerca del doble que en el invierno (alrededor de 30 mg N por planta día⁻¹). La absorción total anual de N fue de 16,8 g N por planta año⁻¹.

13.3. Claveles

El cambio de las concentraciones y las tasas de nutrientes en el medio edáfico puede afectar la calidad de las flores. Desórdenes fisiológicos tales como partición del cáliz y un alto porcentaje de tallos quebradizos en claveles (*Dianthus caryophyllus* L.), cv. Standard White Candy, cultivados bajo fertirrigación en un suelo franco arenoso, en la planicie costera de Israel, 18 km al este, fueron tratados aumentando el K (K_2SO_4 y KNO_3) y la relación de $NO_3^-:NH_4^+$ en el medio de fertirrigación (Yermiyahu y Kafkafi, 2009). El aumento de los niveles de K en el medio de fertirrigación fue reflejado en el contenido de K en la materia seca total (MS). Los efectos benéficos del tratamiento con KNO_3 probablemente fueron causados por la ausencia de NH_4^- -N en el medio de fertirrigación, y se expresaron como un 17% de aumento en el rendimiento de flores y en la reducción de la partición del cáliz. Cuando se compararon con fertilizante con amonio en el agua de riego, la calidad de las flores, medida por la fragilidad de los tallos, mejoró con el suministro del nivel más alto de K, independientemente de la fuente de fertilizante potásico, KNO_3 o K_2SO_4 . Estos resultados sugieren que mantener un suministro continuo de K a una concentración muy superior a la solución de suelo, y por encima del nivel de “suficiencia” para un máximo rendimiento, se puede considerar como el “costo de un seguro” contra los efectos deletéreos de eventos climáticos inesperados, como noches frías seguidas de días soleados, los que son la principal causa de esta desorden fisiológico.

14. Fertirrigación de especies en medios de cultivo sin suelo y sustratos de crecimiento

Las plantas que se cultivan en recipientes difieren de aquellas que crecen a campo en varios aspectos. Los recipientes limitan el desarrollo de las raíces y, como consecuencia, los requerimientos de agua, oxígeno y nutrientes son mucho más intensivos. Los productores y agrónomos utilizan varios medios de cultivo naturales y artificiales adecuados a las condiciones específicas locales, tomando en consideración las propiedades físicas y químicas requeridas para el cultivo de la especie en cuestión. Sin embargo, la extracción de nutrientes de una zona limitada de raíces en el cultivo sin suelo necesita de un continuo reemplazo de las reservas de nutrientes. Silber *et al.* (2003) sugirieron que la reducción de rendimiento obtenida con el riego de baja frecuencia (y la fertirrigación) resultaba de la deficiencia de nutrientes, antes que de una escasez de agua, y que el riego de alta frecuencia puede compensar la deficiencia de nutrientes. La fertirrigación frecuente mejora la absorción de nutrientes a través de dos mecanismos: el reemplazo continuo de los nutrientes de la zona de extracción en la vecindad de la interfaz de las raíces y el mejor transporte de los nutrientes disueltos por el flujo de masa, debido a un contenido promedio más alto de agua en el medio de cultivo. La frecuencia de fertirrigación, la concentración de nutrientes y la relación entre ellos, así como el pH del agua de riego luego de la inyección de fertilizantes, deben ser adecuados a las características del medio de cultivo.

En las secciones siguientes serán definidos los medios de cultivo, las características físicas y químicas relacionadas con el suministro de nutrientes así como el apropiado manejo de la fertirrigación.

14.1. Definición de medio de crecimiento

La expresión “medio de crecimiento” se aplica a cualquier material sólido, diferente del suelo mismo en su sitio, natural o sintético, o residuo de un proceso de producción industrial, mineral u orgánico, que ha sido introducido en un recipiente, solo o en mezcla, que permite el anclaje del sistema radicular de una planta. El “medio de crecimiento” puede participar (ser químicamente activo) o no (ser un material inerte) en el complicado proceso de suministrar nutrientes a las plantas (Abad Berjón *et al.*, 2005).

14.2. Medios de crecimiento usados en recipientes para el cultivo de plantas

Abad Berjón *et al.* (2005) clasificaron los medios de crecimiento de acuerdo con su material de origen.

14.2.1. Medios de crecimiento minerales

- Medio natural: obtenido de rocas o minerales sin tratamiento, o por un tratamiento físico simple como el tamizado (por ejemplo, arena, gravas o escoria volcánica).
- Tratados o transformados por tratamientos físicos o químicos: arcilla expandida, perlita (derivado de una roca volcánica silícea calentada hasta los 1.000°C), vermiculita (aluminio-silicato magnésico hidratado), lana de roca (obtenida de una mezcla de rocas basálticas, calcáreos y carbón fundidos en conjunto a 1.600°C).
- Residuos o subproductos industriales: briquetas molidas, carbón de altos hornos.

14.2.2. Medios de crecimiento orgánicos

- Fuentes naturales: turbas de diferente origen botánico, musgos de turberas Sphagnum, musgo verdadero (Bryales Broilers), juncos, acículas de pinos, hojarasca y plantas leñosas.
- Sintéticos: polímeros orgánicos, no biodegradables, obtenidos por síntesis químicas (poliestireno expandido, urea-formaldehído y espumas de poliuretano).
- Residuos o subproductos de actividades domésticas, industriales o agrícolas: (la mayoría debe ser compostada antes de usarla para obtener un material estable) cáscara de arroz, corteza de árboles, estiércoles, aserrín, fibra de coco, residuos de corcho, residuos municipales sólidos, barros cloacales tratados, etcétera.

14.3. Características de los medios de crecimiento

Chen e Inbar (1985) resumieron las características deseadas de los medios de crecimiento para una performance óptima de los cultivos (Poole *et al.*, 1981; Hanan *et al.*, 1978; Hartmann y Kester, 1975; Richards *et al.*, 1964; Wilson, 1984).

14.3.1. Características físicas

- Alta retención hídrica para facilitar la disponibilidad de agua para las plantas
- Alto contenido de aire a baja tensión hídrica.
- Distribución de tamaño de partículas que permita las condiciones (a) y (b).
- Baja densidad aparente para asegurar un medio de crecimiento liviano.
- Alta porosidad para permitir una buena aireación.
- Alta conductividad hidráulica para permitir un drenaje eficiente.
- Proveer estabilidad de anclaje a las plantas.
- Volumen constante, minimizando los cambios en el tiempo del medio de crecimiento debido a la contracción y la compactación.

14.3.2. Características químicas

- Alta capacidad de intercambio catiónico.
- Razonable nivel de nutrientes y capacidad de suministrarlos a las plantas.
- Capacidad de regular y preservar (poder “buffer”) un nivel de pH uniforme.
- Bajo contenido de sales solubles.
- Los medios de crecimiento orgánicos deberían tener una baja relación C/N, estable, con una baja tasa de descomposición.

Algunas de estas características no son comunes para todos los medios de crecimiento, pero existe la posibilidad de introducir algunas de ellas por vía de un adecuado riego y fertilización. Las plantas pueden cultivarse en un medio de crecimiento compuesto por un único sustrato, pero, más comúnmente, se componen de dos o más ingredientes que se complementan uno con el otro. Como resultado, el medio de crecimiento final es más efectivo que los componentes individuales y sus características son balanceadas.

14.4. Características químicas y contenido de nutrientes

14.4.1. Relación C/N y concentración de N

La materia orgánica fresca es descompuesta por los microorganismos, que utilizan N para esa actividad. La relación C/N en la biomasa de los microorganismos está en un rango de 5 a 30 (Chen e Inbar, 1985). Cuando el medio de crecimiento está en este rango, se considera que es relativamente estable a la descomposición. La descomposición de materiales de alta relación C/N por los microbios induce a la fijación de N por los microorganismos; por lo tanto, decrece el N disponible para las plantas en el medio de crecimiento. Diferentes medios de crecimiento tienen relaciones distintas C/N (Tabla 14.1).

Tabla 14.1. Relaciones C/N en diferentes medios orgánicos de crecimiento (Verdonck, 1983).

Material	Relación C/N
Corteza fresca	75-110
Corteza de maderas duras compostada	30-40
Corteza de maderas blandas compostada	30-40
Turba	± 50
Acículas de pino	± 25
Barros cloacales	50-80

14.4.2. Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) es la cantidad total de cationes intercambiables que un material en particular o suelo puede adsorber a un pH determinado. Esta propiedad juega un rol importante en las reservas de nutrientes

disponibles para las plantas. Los iones adsorbidos están protegidos de la lixiviación y pueden liberarse para volverse disponibles para las plantas. La CIC se expresa en términos de miliequivalentes (meq) por unidad de peso. La CIC de un medio de crecimiento orgánico varía con el pH del medio. La CIC de las sustancias húmicas en los medios orgánicos de crecimiento aumenta 0,30 meq g⁻¹ cuando el pH de la solución se incrementa en una unidad. En comparación, la CIC de la arcilla aumenta sólo 0,044 meq g⁻¹ (Helling *et al.*, 1964). Abad *et al.* (2005) definieron la CIC óptima para un medio de crecimiento de acuerdo con la frecuencia de la fertirrigación. Con fertirrigación continua (una o más veces al día), la CIC de un medio de crecimiento no tiene efecto significativo; así, los medios de crecimiento inerte pueden utilizarse sin problemas. Con fertirrigación intermitente es conveniente utilizar medios de crecimiento con una CIC moderada o alta, siempre mayor a 0,20 meq g⁻¹.

Tabla 14.2. Capacidad de intercambio catiónico en diferentes medios de crecimiento (modificado de Chen e Inbar [1985] y Verdonck [1983]).

Medio de crecimiento	Capacidad de intercambio catiónico (meq 100 g ⁻¹ materia seca)
Turba: <i>Sphagnum fuscum</i>	140
Turba: <i>Sphagnum papillosum</i>	110
Turba: <i>Sphagnum cuspidatum</i>	90
Turba: <i>Sphagnum sedge</i>	110
Turba: Sphagnum	130
Turba: juncáceas	80
Turba negra	160
Vermiculita	150
Montmorillonita	100
Perlita	1,5
Corteza fresca	40-50
Corteza de madera dura compostada	70-75
Corteza de madera blanda compostada	70-80
Turba	120-140
Acícula de pinos	70-80
<i>Polvo de fibra de coco</i>	
Fresca	107
De 3-4 meses	120
De 3-4 años	150

14.4.3. pH

Los agricultores pueden trabajar con un amplio rango de pH (4-8) de los medios de crecimiento sin desarrollar desórdenes fisiológicos. Sin embargo, el crecimiento y el desarrollo de las plantas se deprimen en condiciones extremadamente ácidas o alcalinas. El pH del medio influye en la disponibilidad de nutrientes, la CIC y la actividad biológica total. Las plantas que se desarrollan en un medio de crecimiento generalmente requieren un manejo intensivo. En estas condiciones se recomienda un rango limitado de pH. El rango óptimo de pH en extracto saturado para plantas ornamentales es de 5,2-6,0 y para hortalizas, 5,5-6,8. Con un pH alto, alcalino (pH más alto que 7,5-8,0), la disponibilidad de P, Fe, Mn, B, Zn y Cu para la absorción por las plantas disminuye. Al contrario, a pH bajo (menor de 5,0) pueden encontrarse deficiencias de N, K, Ca, Mg y otros nutrientes en las plantas. La mayor solubilidad de óxidos metálicos a pH bajo pueden resultar en síntomas de fitotoxicidad (Roy *et al.*, 2006). El valor de pH de distintos medios de crecimiento comerciales se presenta en la Tabla 14.3.

Tabla 14.3. pH de diferentes medios de crecimiento (modificado de Verdonck [1981] y Verdonck [1983]).

Medio de crecimiento	pH
Acículas de pino	3,9-5,5
Corteza	6,0-6,8
Perlita	6,5-7,2
Lana de roca	±7,0
Vermiculita	±7,0
Cortezas frescas	5,5
Corteza de madera dura compostada	6,5
Corteza de madera blanda compostada	6,7
Turba	4,0-5,0
Barros cloacales	7,3-7,6
Cama de pino	5,0-5,5
<i>Polvo de fibra de coco</i>	
Fresca	5,8
3-4 meses	6,0
3-4 años	6,0

Algunas consideraciones especiales son necesarias para el manejo del pH en el medio de crecimiento. El pH de una lana de roca nueva (sin usar) puede ser alto (7 a 8). Esta condición deberá corregirse antes de plantar usando una solución nutritiva acidificadora (pH= 5,0 a 5,5). Luego, un pH levemente ácido (5,5 a 6,5) es apropiado para muchos cultivos (FAO, 1990).

Los medios orgánicos de crecimiento tiene una capacidad reguladora de pH más alta que los sustratos minerales e inertes (Penningsfeld, 1978). Cuando el pH de un medio orgánico no está a un nivel adecuado de pH, se necesita ajustarlo. Se pueden utilizar calcáreo o dolomita molida para aumentar el pH de un medio de crecimiento ácido, mientras que el azufre se usa para disminuir el pH alto de algunos sustratos. Las cantidades por aplicar dependerán del pH inicial, del pH final que se desee alcanzar y de la CIC del medio de crecimiento. Cuando en el medio de crecimiento no hay calcáreo ni dolomita, se requiere una fuente sustituta de calcio y magnesio si la concentración de estos dos nutrientes en el agua de riego no fuera suficientemente alto (Benton Jones, 2005).

Un pH neutro o alto en un medio de crecimiento inerte puede regularse por la acidificación de la solución de riego. La dosis de ácido que se debe agregar a la solución depende de la calidad del agua o, más específicamente, de la concentración de carbonato y bicarbonato en el agua de irrigación.

14.5. Aplicación de la fertirrigación

Como se describió antes, los medios de crecimiento pueden diferir ampliamente en sus propiedades químicas y físicas. Las propiedades químicas son el aspecto más importante que se debe tener en cuenta a la hora de establecer el régimen de fertirrigación, ya que los sustratos inorgánicos inertes y los orgánicos activos pueden tener requerimientos muy diferentes.

El medio de crecimiento inerte se caracteriza por una CIC casi nula, no tiene capacidad buffer o reguladora y no provee nutrientes. El sistema de fertirrigación para este tipo de sustrato debe ser muy similar al empleado en hidroponía, proveyendo todos los nutrientes esenciales ausentes en el agua de irrigación. Este régimen sólo es posible usando la fertirrigación, lo que representa una gran ventaja sobre la fertilización tradicional. Sin embargo, como el sistema de fertirrigación tiene que suministrar todos los nutrientes exactamente en las cantidades necesarias a través de todo el crecimiento —y esto es crítico—, cualquier error o mal funcionamiento en el sistema puede causar daños al cultivo. Los fertilizantes usados para medios de crecimiento inertes deben ser cuidadosamente seleccionados considerando la calidad del agua (principalmente su concentración de bicarbonatos). Similarmente, el pH deseado de la solución en el medio tiene que ser elegido debido a la falta de capacidad reguladora del medio. Una alta concentración de fertilizantes ácidos reduce el pH. Los cálculos, que dependen de la composición química del agua, deben realizarse para determinar la concentración máxima de fertilizante ácido permitido antes de la inducción de una caída indeseable de pH en la solución del sustrato. Alternativamente, se pueden establecer los valores en condiciones de campo por titulación del agua con el fertilizante que se va a utilizar en el programa de fertirrigación. La relación de nitrato a amonio en la fórmula de fertirrigación también debe tomarse en cuenta. El N amoniacal disminuye el pH durante el crecimiento como consecuencia de la absorción del cultivo y por la nitrificación en el medio; el N-nitrato aumenta el pH durante la absorción. La ventaja de estos medios de

crecimiento combinados con la fertirrigación es la posibilidad de manejar la solución del medio de crecimiento casi conformando los requerimientos específicos del cultivo. Sin embargo, junto con esta gran ventaja potencial, acecha el peligro de fallas en los sistemas de irrigación y de fertirrigación a causa de la falta de capacidad reguladora, la que puede cambiar rápidamente a condiciones extremas, que causarían daños irreversibles al cultivo.

Por otra parte, los medios de crecimiento orgánicos presentan las propiedades exactamente opuestas: alta CIC, elevada capacidad reguladora del pH del medio y, normalmente, mucho más estable. Las interacciones entre el agua de irrigación y el medio de crecimiento determinan la composición de la solución del sustrato. Como resultado, sólo existe un control parcial de la composición de la solución. Sin embargo, esto también puede ser una ventaja, ya que los medios orgánicos de crecimiento son capaces de mantener las concentraciones apropiadas de nutrientes y del pH durante las fallas en el sistema de fertirrigación a diferencia de los medios de crecimiento inertes.

Generalmente, se usa una mezcla de materiales en el cultivo sin suelo de modo que se usan las propiedades químicas individuales como una ventaja en la preparación del medio de crecimiento adecuado para las necesidades del cultivo en combinación con la fertirrigación.

15. Monitoreo del agua, el suelo y la planta en la fertirrigación

La fertirrigación es una herramienta de avanzada que provee al agricultor un instrumento preciso para la fertilización y el riego de acuerdo con los requerimientos del cultivo y las condiciones del suelo o del medio de crecimiento. Para aprovechar las ventajas de los beneficios agrotecnológicos de la fertirrigación, se recomienda un monitoreo del agua de riego, del suelo o el sustrato de crecimiento, del drenaje y del cultivo.

15.1. Monitoreo de la calidad del agua de irrigación

Los objetivos de muestreo y análisis del agua de riego son:

- Evaluar su adaptación a la combinación específica de cultivo, suelo, método de riego, grado de filtrado y otros tratamientos químicos necesarios.
- Determinar el nivel de salinidad y concentración de elementos tóxicos en el agua para estimar su efecto en los cultivos.
- Determinar la concentración de sodio y la relación de absorción de sodio (RAS) para estimar el efecto potencial de largo plazo en la estructura del suelo y la infiltración de agua.
- Determinar el valor nutricional para considerar qué nutrientes deberán agregarse al agua en el programa de fertirrigación.

La salinidad en el agua de riego se define como la suma total de iones inorgánicos disueltos expresados en unidades de moles por litro o peso total de sales en gramos por litro de agua. Los principales componentes de la salinidad son los cationes calcio (Ca), magnesio (Mg) y sodio (Na), y los aniones cloruro (Cl⁻), sulfato (SO₄²⁻) y bicarbonato (HCO₃⁻). El nitrato (NO₃⁻) y el potasio (K) son normalmente componentes menores de la salinidad. El boro (B) y otros micronutrientes disueltos son despreciables para considerar la salinidad del agua de irrigación. La salinidad se mide simplemente determinando la conductividad eléctrica (CE) del agua.

La sodicidad o el riesgo del Na del riego se relaciona con la dispersión del suelo, la destrucción de la estructura del suelo, el potencial de aparición de problemas de infiltración de agua y la acumulación de Na en las plantas. El procedimiento más común para evaluar el daño potencial por Na es la relación de adsorción de sodio (RAS). La presencia de HCO₃⁻ reduce la actividad del Ca en la solución y, por lo tanto, al tomarse en cuenta su concentración para los cálculos de las actividades catiónicas en el agua, provee un diagnóstico mejor de la reducción de la concentración de Ca en la solución del suelo por cambios impuestos en la solubilidad de los compuestos de Ca.

Los problemas de elementos tóxicos en el agua de irrigación son diferentes de aquellos derivados de la salinidad, y normalmente ocurren cuando ciertos iones son

absorbidos por las plantas durante la transpiración y acumulados en las hojas hasta un nivel que resulta perjudicial para ellas. El grado de daño depende de la concentración en el agua de irrigación, tiempo, cantidad, sensibilidad del cultivo y del consumo de agua por el cultivo. Los elementos tóxicos más comúnmente observados son Cl, B y Na.

Normalmente, en la mayor parte de las fuentes de aguas superficiales y subterráneas, el P y el K están presentes en cantidades muy pequeñas. El contenido de nitratos en el agua subterránea puede alcanzar niveles considerables y, por lo tanto, su concentración en el agua de irrigación debería considerarse en la planificación de la fertirrigación.

Las determinaciones de laboratorio recomendadas para evaluar la calidad del agua de riego son listadas en la Tabla 15.1. No todas estas determinaciones son esenciales para todas las muestras y para todos los momentos de muestreos. Es importante, sin embargo, mantener guardados los resultados de los análisis de fuentes específicas de agua, así como las fechas y los momentos de muestreo, de modo de evitar la doble determinación, o bien reducir la frecuencia de los análisis de algunos elementos. Los datos incluidos en la Tabla 15.1 ilustran los rangos de las concentraciones en aguas servidas luego del tratamiento secundario. Sin embargo, estos datos pueden variar algo entre países y regiones, dependiendo de algunos factores: el agua potable suministrada a la población, los desechos industriales y agrícolas en las cloacas y los procesos en las plantas de tratamiento de aguas servidas.

Un método adicional de monitoreo es muestrear la solución de riego que fluye desde los emisores de riego (goteos, microjets o aspersores). Esta solución representa la calidad conjunta del agua y los fertilizantes agregados durante la fertirrigación. La inyección de fertilizante por los distintos elementos de la fertirrigación no es continua, pero recibe pulsos de fertilizantes con concentraciones más altas o más bajas que la concentración programada en el agua de irrigación. El muestro parcial de sólo una parte del agua cuando se está regando puede dar resultados erróneos, con concentraciones más altas o más bajas que la promedio. Para evitar este problema, se recomienda recolectar varias muestras del agua emitida por los elementos del riego durante un ciclo completo de fertirrigación. El envase para recolectar la solución debe estar adaptado al emisor de descarga y al período de riego. Los nutrientes y los factores de la salinidad pueden ser determinados en el laboratorio, pero algunos de los análisis de campo también pueden llevarse a cabo. Si el agricultor conoce la conductividad eléctrica (CE) del agua de riego y la contribución de los fertilizantes agregados a la CE, la CE total del agua de riego recolectada en el emisor puede usarse para evaluar la performance del inyector de fertilizante y para controlar la cantidad de fertilizante que se aplica en la línea de riego.

El uso creciente de las aguas servidas tratadas (AST) destaca la importancia del diagnóstico de la calidad de agua para evitar los daños causados por la salinidad y la sodicidad, la acumulación de nutrientes en los suelos y los cultivos y para considerar el valor nutricional del agua. El muestreo y el análisis de las AST también se llevan a cabo para evaluar el contenido de materia orgánica y la presencia de patógenos.

Las instrucciones para recolectar AST con fines de análisis utilizadas por el Servicio de Extensión Israelí (Ministry of Agriculture and Rural Development) son las siguientes (Tarchitzky y Eitan, 1997):

Tabla 15.1. Determinaciones recomendadas de laboratorio (marcadas en *) para evaluar la calidad del agua de irrigación (modificado de Westcot y Ayers, 1985, y Feigin *et al.*, 1991).

Parámetro analítico	Símbolo	Unidad	Agua servida tratada Rango típico	Aguas frescas
Conductividad eléctrica	CE _w	dS m ⁻¹	* 0,62-1,71	*
Calcio	Ca ²⁺	mg L ⁻¹	* 20-120	*
Magnesio	Mg ²⁺	mg L ⁻¹	* 10-50	*
Sodio	Na ⁺	mg L ⁻¹	* 50-250	*
Carbonato	CO ₃ ²⁻	mg L ⁻¹	* –	*
Bicarbonato	HCO ₃ ⁻	mg L ⁻¹	* –	*
Cloruro	Cl ⁻	mg L ⁻¹	* 40-200	*
Sulfato	SO ₄ ²⁻	mg L ⁻¹	* –	*
Boro	B	mg L ⁻¹	* 0-1	*
pH			* 7,8-8,1	*
Relación de adsorción sodio	SAR ¹	[meq L ⁻¹] ^{1/2}	* 4,5-7,9	*
Demanda bioquímica de oxígeno	BOD	mg L ⁻¹	* 10-80	
Demanda química de oxígeno	COD	mg L ⁻¹	* 30-160	
Sólidos suspendidos totales	TSS	mg L ⁻¹	* 10-100	
Nitrógeno de nitrato	NO ₃ -N	mg L ⁻¹	* 0-10	*
Nitrógeno amoniacal	NH ₄ -N	mg L ⁻¹	* 1-40	
Nitrógeno orgánico	Org-N	mg L ⁻¹	* –	
Nitrógeno total	Total-N	mg L ⁻¹	* 10-50	
Potasio	K	mg L ⁻¹	* 10-40	
Fósforo de ortofosfato	PO ₄ -P	mg L ⁻¹	* –	
Fósforo total	Total-P	mg L ⁻¹	* 6-17	
Cloro residual	Cl ₂	mg L ⁻¹	* –	
Elementos traza ²		mg L ⁻¹	* –	

¹Las concentraciones de sodio, calcio y magnesio necesitan transformarse a unidades de meq L⁻¹ para calcular la relación RAS.

²Aluminio, arsénico, bario, cadmio, cromo, cobre, fluoruro, hierro, plomo, litio, manganeso, mercurio, níquel, selenio, plata, vanadio y zinc.

- Para la mayor parte de los análisis físicos y químicos, es suficiente un volumen de un litro. Se recomienda enjuagar la botella con la muestra de agua antes de llenarla. Todos los detalles necesarios deben escribirse en una etiqueta adherida a la botella.
- Si la muestra es tomada directamente del sistema de riego, la válvula debería abrirse para permitir que el agua fluya por 20 a 30 segundos (dependiendo del diámetro de

la tubería). Esto se realiza para asegurar que la muestra no incluya agua que haya estado estacionada en la tubería por un período largo y que pueda haber cambiado su composición. Las muestras deberían recolectarse del filtro de control y desde los emisores de riego (aspersores, microjets o goteros). El muestreo del agua debería realizarse sólo cuando el sistema de fertirrigación no estuviera operando (para evitar fertilizantes en la muestra).

- Las muestras deberían enviarse lo antes posible al laboratorio. Se deberán mantener en cajas refrigeradas (4°C) para los análisis de nitrógeno, demanda bioquímica de oxígeno (DBO) o bacteriológicos.

Los mismos principios pueden emplearse para el muestreo de aguas dulces frescas.

Pueden utilizarse dos métodos cuando se recolectan AST directamente de los reservorios y no a través del sistema de riego:

- Utilizar un muestreador automático.
- Usar una botella conectada a un objeto pesado (este sistema se limita a un metro de profundidad).

Las muestras deben recolectarse lejos de las costas del reservorio para evitar la acumulación de grasas y aceites empujados por el viento. Al recolectar las muestras de AST se recomienda que el muestreo sea llevado a cabo lo más cerca posible del punto de bombeo. Si se usara una botella en lugar del muestreador automático, deberían observarse los siguientes aspectos. La botella debe tener un cuello angosto, estar conectada con una vara extensible, amarrada a una cuerda y a la vez a un objeto pesado. La botella debe sumergirse normalmente hasta un metro de profundidad y hundirse rápidamente para asegurar la mínima recolección de agua superficial.

Tipos de muestreo

Los cambios en la composición pueden ocurrir con frecuencia durante el día o la semana debido al suministro de distintas fuentes de aguas potables o agregados durante la formación del escurrimiento. Por lo tanto, se recomienda usar uno de los dos procedimientos indicados a continuación, dependiendo su elección de la información requerida:

- El muestreo ocasional se realiza arbitrariamente. Los resultados representan una situación en el momento del muestreo. Cuando se conoce que las fuentes varían en el tiempo, el muestreo a intervalos adecuados puede ilustrar la extensión, frecuencia y duración de estas variaciones (Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 1998).
- Muestras compuestas se obtienen al recolectarlas a lo largo de un período de tiempo, distintas profundidades o en diferentes puntos de muestreo, y en momentos específicos del día o de la noche (24 horas). Las muestras compuestas son conseguidas utilizando uno de los siguientes procedimientos:
 - Tomando muestras separadas, cada una de igual volumen y luego mezclando todas las muestras;
 - Usando un muestreador automático, las muestras son mezcladas para obtener una muestra compuesta.

15.2. Monitoreo del suelo y del medio de crecimiento

15.2.1. Suelo

Para cultivos realizados en suelos, el muestreo de la capa arable y su análisis son herramientas esenciales para manejar la salinidad del suelo y determinar el suministro de nutrientes. Por medio de los análisis de suelo, los desvíos entre las concentraciones óptimas y las actuales, se puede determinar y aplicar las medidas correctivas necesarias para restaurar las concentraciones requeridas en el suelo. El monitoreo del estado nutricional de los suelos puede realizarse por dos vías (Bar-Yosef, 1992). La primera implica el muestreo del suelo en una posición de referencia de la zona radicular y la extracción de nutrientes para determinar las concentraciones de las formas solubles y de los adsorbidos en el suelo. La segunda, sólo para NO_3^- y Cl^- , consiste en el muestreo de la solución de suelo directamente por medio de cápsulas de vacío insertadas en forma permanente en el suelo, analizando la solución recolectada.

La frecuencia del muestreo depende del tipo de suelo, la calidad del agua y la tasa de crecimiento del cultivo. En huertos frutales puede ser suficiente la toma de muestras dos veces al año, pero si se usa agua de salinidad relativamente alta, el muestreo debe realizarse cada 3 a 4 semanas para monitorear la salinidad del suelo y decidir llevar a cabo aplicaciones de riego de lavado. En cultivos intensivos como hortalizas, el suelo debería muestrearse frecuentemente (cada dos a tres semanas) para monitorear tanto la concentración de nutrientes en el suelo como la salinidad, y eventualmente para corregir el programa de fertilización o para lixiviar las sales acumuladas. Las instrucciones para el muestreo del suelo del Servicio Israelí de Extensión (Tarchitzky y Eitan, 1997) son las siguientes:

- Riego por goteo: la muestra se recolecta a lo largo del lateral de riego por goteo, a una distancia de 10 cm del emisor, a profundidades de 0-30, 30-60 y 60-90 cm. Se toman al azar alrededor de veinte muestras de un área de 2.000 m².
- Aspersores y microjets: la distancia de muestreo desde los accesorios de riego se selecciona según la descarga y la distribución de agua desde el emisor, por ejemplo, una distancia de 70-100 cm desde un microjet, o de 100-120 cm desde un miniaspersor o un aspersor. Las muestras son tomadas a profundidades de 0-30, 30-60 y 60-90 cm, recogiendo al azar alrededor de veinte muestras de un área de 2.000 m².

En general, todas las muestras de la misma profundidad son bien mezcladas para obtener una muestra compuesta representativa. Cada muestra compuesta de cierta profundidad se coloca en bolsas separadas, enviándose cerca de 1 kg al laboratorio. La identificación de las muestras incluye nombre, dirección, número de lote, cultivo, profundidad y fecha de muestreo.

Los métodos de extracción son específicos para cada nutriente y según las características del suelo (Hagin *et al.*, 2002). Los nutrientes solubles son normalmente determinados en extractos saturados de pasta de suelo y los nutrientes adsorbidos por extractantes específicos (Bar-Yosef, 1992). Algunos métodos se basan en extractantes ácidos suaves. El potasio a menudo se mide por una extracción de la fracción intercambiable o de alguna expresión que relaciona al K soluble y los cationes divalentes

con la fase intercambiable, tal como la relación de adsorción de potasio (RAP). Los análisis deben calibrarse con resultados de experimentos de campo en la respuesta del cultivo.

Los análisis de suelo para la estimación del “P disponible” presente en el suelo son usados como una guía para tomar decisiones para aplicar fertilizantes fosfatados por vía de las líneas de goteros. A causa de la inmensa variabilidad en la estimación del P disponible por los métodos de análisis de suelo y las diferentes formas de extracción usados por los laboratorios de análisis de suelo en todo el mundo cada localidad ha desarrollado sus propios métodos de estimación del P disponible en el suelo. Los sistemas de producción intensiva de hortalizas y bajo invernáculos normalmente no toman en cuenta los niveles detectados de P por los análisis de suelos y utilizan soluciones nutritivas completas durante todo el período de crecimiento para evitar deficiencias potenciales.

Los análisis de plantas o de sus partes son preferidos en los cultivos intensivos bajo riego por goteo, en los que se moja sólo una parte del suelo y el volumen radicular representa únicamente una pequeña fracción del volumen total de suelo.

15.2.2. Monitoreo de los medios de crecimiento y drenaje

El conocimiento del estado nutricional de todos los componentes de un sistema de cultivo sin suelo es importante por dos razones: (i) es un medio por el cual el agricultor puede juzgar el éxito de las prácticas de manejo de la fertirrigación y si los objetivos del programa planificado de fertilización son adecuados en términos de disponibilidad de nutrientes; (ii) ayuda a diagnosticar las deficiencias de nutrientes y corregir los síntomas que puedan ocurrir (Johnson, 2008). Los métodos usados en el análisis de nutrientes disponibles en el medio de crecimiento se basan en el equilibrio de una muestra del medio de crecimiento con una solución extractante. Una de las soluciones extractantes comunes es el DTPA, acetato de amonio y agua (Bunt, 1988). La extracción se lleva a cabo durante un tiempo estándar y con distintas relaciones de masa/volumen del medio de crecimiento y el extractante (1:1,5; 1:5 o 1:10). Las muestras de los medios de crecimiento se obtienen de la zona de raíces, tomando un número representativo de submuestras y mezclándolas bien antes de analizarlas. La solución del medio de crecimiento se puede obtener extrayendo un volumen prescrito del sustrato en el laboratorio o en el campo para medir los nitratos, el K y el P usando kits de campo. Las muestras de solución de sustratos de lana de roca o similares pueden extraerse por medio de una jeringa del tipo medio o por una conectada con un manómetro para extraer la solución a una tensión específica.

En sistemas de solución nutritiva recirculante es fácil muestrear y controlar la composición de nutrientes *online* y obtener una muestra para análisis de laboratorio. En sistemas de crecimiento en recipientes sin reciclado, el régimen de irrigación incluye un alto componente de nutrientes lixiviados necesarios, debiendo evitarse la acumulación de sales. Todos los excesos de nutrientes son drenados fuera del sistema a través de aberturas para el drenaje en la base de los envases. Instalando un sistema de recolección de la solución de drenaje debajo de algunos de los recipientes, distribuidos

al azar en todo el invernáculo, las muestras de drenaje pueden recolectarse y enviarse al laboratorio para su análisis. Así puede calcularse la pérdida relativa de nutrientes.

15.3. Monitoreo del cultivo

Los síntomas visuales de deficiencia de nutrientes son empleados como una herramienta de diagnóstico (Scaife y Turner, 1983; Winsor *et al.*, 1987). Es un prerequisite, sin embargo, que quien los utilice tenga mucha experiencia para lograr diagnósticos válidos. Una desventaja de tales observaciones es que, cuando aparecen los síntomas, el daño al cultivo ya se ha establecido, la deficiencia podría ser muy grande y su corrección demasiado tardía para evitar una disminución de los rendimientos.

El análisis de tejidos vegetales muestra el estado nutricional de las plantas en el momento del muestreo, si los nutrientes suministrados a la solución en las raíces fueron adecuados o más bien pueden confirmar los síntomas visuales de las deficiencias. Los niveles tóxicos también pueden detectarse. Los análisis de tejidos vegetales permiten la corrección de problemas nutricionales presentes o pueden actuar como una herramienta para un futuro programa de fertilización.

La determinación de materia seca y contenido de nutrientes en tejidos vegetales es tediosa, destructiva y necesita de instalaciones de laboratorio. En cultivos anuales y de corta estación de cultivo, como los de campo, hortalizas y floricultura, los análisis deben realizarse rápidamente. Para ser efectivos en la corrección de las deficiencias corrientes, los análisis deben completarse dentro de los dos o tres días después del muestreo.

En árboles frutales o perennes, los análisis foliares son una herramienta común para la guía nutricional. Éstos son usados para preparar un programa de fertilización a futuro, disponiéndose de un mayor período de tiempo para completar los análisis de laboratorio. Deducir las recomendaciones de fertilización de los datos de los análisis de planta no es siempre algo simple y directo. Las concentraciones de nutrientes cambian con la edad fisiológica de los tejidos. La humedad del aire, la temperatura y la humedad del suelo afectan la concentración de los nutrientes al influir en la transpiración y el transporte de solutos en la planta, así como también en su tasa de crecimiento. Es necesaria, por lo tanto, una estandarización muy estricta del procedimiento de muestreo de las partes de la planta (Hagin *et al.*, 2002). Sin embargo, comparar muestras de un área “buena” y una “mala” en cualquier momento durante la estación de cultivo con frecuencia ayuda a tomar decisiones correctivas.

Las partes de la planta que se deben muestrear dependen del cultivo y del estadio de crecimiento. Las técnicas para el muestreo de tejidos para una selección de cultivos de campo, hortalizas, ornamentales y flores, y árboles frutales son presentadas en las Tablas 15.2-15.5, respectivamente (Flynn *et al.*, 1999). Los siguientes nutrientes pueden determinarse en una muestra vegetal: nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), azufre (S), hierro (Fe), cobre (Cu), zinc (Zn), boro (B), sodio (Na), cloro (Cl) y otros micronutrientes. La hoja o muestras de plantas completas deben recolectarse en momentos óptimos de acuerdo con los estándares específicos de cada cultivo. Las instrucciones de muestreo para pecíolo u hojas pueden diferir.

Tabla 15.2. Técnicas de muestreo de tejidos para cultivos de campo (Flynn *et al.*, 1999).

Cultivo de campo			
Cultivo	Cuándo muestrear	Dónde muestrear	Número de muestras por parcela
Algodón	Floración plena	Hoja recientemente madura del tallo principal	40-50
Girasol	Antes del desarrollo del botón floral	Hoja más recientemente madura	20-30

Tabla 15.3. Técnicas de muestreo de tejidos para cultivos hortícolas (Flynn *et al.*, 1999).

Cultivos hortícolas			
Cultivo	Cuándo muestrear	Dónde muestrear	Número de muestras por parcela
Espárragos	Madurez	Brote, 18-30 pulgadas por sobre el suelo	10-30
Porotos (o frijoles)	Estado de plántula o antes o durante la floración	Toda la parte aérea. Hojas recientemente maduras	20-30
Brócoli	Antes de la floración	Hojas recientemente maduras	12-20
Repollo de Bruselas	Media estación	Hojas recientemente maduras	12-20
Apio	Media estación	Pecíolo exterior de una hoja recientemente madura	12-20
Pepino	Antes de la fructificación	Hoja recientemente madura	12-20
Cultivos de cabeza (coles, repollo, coliflor)	Antes de la floración	Hoja recientemente madura en el centro de la cabeza	12-20
Cultivos de hojas (lechuga, espinaca)	Media estación	Hoja recientemente madura	12-20
Melones	Antes de la fructificación	Hoja recientemente madura	12-20
Guisantes, arvejas	Antes o durante la floración	Hojas desde el 3 ^{er} nudo desde arriba	40-60
Pimiento (o Morrón)	Media estación	Hoja recientemente madura	25-50
Patata (o papa)	Antes o durante la floración	3 ^{ra} a 6 ^{ta} hoja desde la punta de crecimiento	25-30
Batata (o camote o boniato)	Media estación o antes del desarrollo de las raíces	3 ^{ra} a 6 ^{ta} hoja desde el centro u hojas maduras	25-35

Cultivos hortícolas			
Cultivo	Cuándo muestrear	Dónde muestrear	Número de muestras por parcela
Cultivo de raíces o de bulbos (zanahoria, remolacha, cebollas)	Media estación o antes del desarrollo de las raíces o bulbos	Hoja recientemente madura	20-30
Tomate (campo)	Mediados de floración	3 ^{ra} a 4 ^{ta} hoja desde la punta de crecimiento	15-20
Tomate (trellis o indeterminado)	Mediados de floración desde el estadio del 1 ^{er} al 6 ^{to} racimo	Pecíolo u hoja debajo u opuesta al racimo superior	12-20

Tabla 15.4. Técnicas de muestreo de tejidos para ornamentales y flores (Flynn *et al.*, 1999).

Ornamental y flores			
Cultivo	Cuándo muestrear	Dónde muestrear	Número de muestras por parcela
Claveles	Recientemente plantada. Ya establecida	4 ^{to} a 5 ^{to} par de hojas desde la base 5 ^{to} a 6 ^{to} par de hojas desde la base	20-30
Crisantemos	Antes o durante la floración	Hojas superiores en el tallo floral	20-30
Árboles y arbustos ornamentales	Crecimiento del año en curso	Hoja recientemente madura	30-70
Poinsetia	Antes o durante la floración	Hoja recientemente madura	15-20
Rosas	A la floración	Hojas compuestas recientemente maduras sobre el tallo floral	25-30
Helechos	Crecimiento activo	Láminas foliares (evitar contaminación con suelo)	2 tazas

Tabla 15.5. Técnicas de muestreo de tejidos para frutales y frutos secos (Flynn *et al.*, 1999).

Frutales deciduos y frutales de nueces			
Cultivo	Cuándo muestrear	Dónde muestrear	Número de muestras por parcela
Manzanos, perales, almendras, damascos (o albaricoques), cerezas, ciruelas	Media estación (junio-julio)	Hojas de la estación en curso, no fructíferas, brotes no elongantes	50-100
Duraznos (o melocotones) y nectarinas (o pelones)	Media estación (junio-julio)	Hojas y folíolos de la mitad del brote	25-100
Uvas	A la floración	Pecíolos u hojas adyacentes a los racimos basales	50-100
Pecanes	Media estación	Hojas, folíolos de la mitad de la rama	25-60
Pistacho	Media estación a estación tardía (agosto)	Folíolos terminales de brotes no fructíferos	25-60
Moras	Media estación	Hojas recientemente maduras de laterales	30-50
Frutillas (o fresas)	Media estación	Hojas recientemente maduras	25-40
Nogales	(junio-julio)	Folíolos y hojas terminales de brotes no fructíferos	25-40

16. Tendencias futuras en la fertirrigación

La fertirrigación fue al principio desarrollada para cultivos hortícolas y de campo, y más tarde aplicada a plantaciones arbóreas. En los últimos tiempos, los jardines más pequeños y el comercio de macetas adoptaron su uso con una programación automática de los ciclos de irrigación para el hogar y los jardines urbanos. La fertirrigación hoy es utilizada en cualquier sistema, pequeño o de gran escala, en todo el mundo.

La escasez de agua en el mundo para uso en agricultura y una urbanización creciente han forzado el desarrollo agrícola a nuevas localizaciones, menos apropiadas para los métodos antiguos de riego por inundación o por canales. Mientras existen grandes superficies planas que emplean sistemas de pivote centrales y combinan con fertilización nitrogenada, nuevas plantaciones en terrenos ondulados se han vuelto cada vez más comunes para viñedos y explotaciones frutícolas arbóreas. En estas condiciones de cultivo se espera que domine una nutrición completa, con todos los nutrientes, dado que el volumen de suelo disponible para los árboles en crecimiento es pequeño comparado con los sistemas antiguos de plantaciones en suelos profundos.

En las regiones áridas, la escasez de agua potable y el aumento de la población llevan a los productores agrícolas a usar cualquier fuente de agua disponible. Existen dos vías posibles para el desarrollo: la utilización de aguas urbanas cloacales recicladas y la desalinización, ya sea del agua marina o del agua reciclada. La desalinización del agua reciclada puede prevenir la acumulación de sales en la capa arable, pero el costo de energía limita su uso. La acumulación de cloruro de sodio en el área regada con aguas recicladas es el principal problema, mientras que un período largo de uso de tales fuentes de agua puede degradar la productividad del suelo. Llevar tierras áridas al cultivo puede ser sostenible sólo si hay disponible agua de buena calidad para la producción agrícola.

El riego por goteo y la fertirrigación continuarán expandiéndose y lentamente reemplazarán el riego tradicional por inundación allí donde la demanda de la población por aguas dulces imponga presión en los recursos hídricos. Esto liberará cantidades significativas de agua para el uso de las poblaciones urbanas.

Los costos del trabajo también son un factor importante en la transformación de sistemas de riego por inundación o por canales a otros permanentes con fertirrigación. A medida que la agricultura progresa desde la subsistencia a la comercial, el cambio a la fertirrigación es inevitable.

Creemos que los temas básicos sobre el uso combinado de nutrientes con el riego tratados en esta publicación serán beneficiosos para los productores de todo el mundo con objeto de lograr un uso eficiente del agua y de los fertilizantes en los sistemas de producción agrícola.

Bibliografía

- Abad Berjón, M., P. Noguera Murray y C. Carrión Benedito. 2005. "Sustratos para el cultivo sin suelo y fertirrigación". En *Fertirrigación. Cultivos hortícolas, frutales y ornamentales*. Ed.: C. Cadahía. Ed. Mundi-Prensa, Madrid, pp. 299-354.
- Abura, L. 2001. "Growth curves as a tool to understanding maize production in Uganda". M. Sc. Thesis, Faculty of Agriculture, The Hebrew University of Jerusalem, Rehovot.
- Adams, F., F. J. Veihmeyer y L. N. Brown. 1942. "Cotton irrigation investigations in San Joaquin Valley, California, 1926 to 1935". California Agr. Exp. Sta. Bull. 668.
- Aljibury, F. K., M. Gerdt, A. Lange, J. Huntamer y G. Leavitt. 1974. "Performance of plants with drip irrigation". Actas del 2nd Intern. Drip Irrigation Congr., San Diego (California). University of California, Riverside, pp 497-502.
- Andre, M., D. Massimino y A. Daguene. 1978. "Daily pattern under the life cycle of a maize crop II. Mineral nutrition, root respiration and root excretion". *Physiol. Plant.*, 44:197-204.
- Asano, T. 1998. "Wastewater reclamation, recycling, and reuse: An introduction". En *Wastewater Reclamation and Reuse*. Ed.: T. Asano. Water Quality Management Library. Vol. 10. Technomic Publishing Co. Inc. Lancaster, Basilea.
- Assouline, S., M. Moler, S. Cohen, M. Ben-Hur, A. Grava, K. Narkis y A. Silber. 2006. "Soil-Plant system response to pulsed drip irrigation and salinity: Bell pepper case study". *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 70:1556-1568.
- Atalay, I. Z. 1978. "The petiole and the leaf blade relationships for the determination of phosphorous and zinc status of vineyards". *Vitis*, 17:147-157.
- Badgujar, C. D., S. S. Deshmukh, S. M. Dusane y S. S. Shide. 2004. "Influence of 'N' and 'K' fertigation and different plant densities on yield of banana cv. Grand-Naine". *South Indian Horticulture*, 52: 22-28.
- Bald, J. G. 1946. "A plan of growth, maturity and yield of the potato plant". *Emp. J. Exp. Agric.*, 14:43-48.
- Bar, Y. 1995. "Iron control system for drip irrigation". Actas del Fifth International Micro-Irrigation Congress, Orlando (Florida, EE. UU.), pp. 239-247.
- Bar, Y. 1990. "Chloride nitrate interaction in avocado rootstocks". M.Sc. Thesis, Faculty of Agriculture, The Hebrew University of Jerusalem.
- Barak, P., y Y. Chen. 1982. "The evaluation of iron deficiency using a bioassay type test". *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46:1019-1022.
- Barber, S. A. 1962. "A diffusion and mass flow concept of soil nutrients availability". *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 93:39-49.
- Bar-Yosef, B. 1992. "Fertilization under drip irrigation". En *Fluid Fertilizer. Science and Technology*. Ed.: D. A. Palgrave. Marcel Dekker, Nueva York, pp. 285-329.
- Bar-Yosef, B. 1999. "Advances in Fertigation". *Adv. Agron.*, 65:1-77.

- Bar-Yosef, B. y U. Kafafi. 1972. "Rates of growth and nutrient uptake of irrigated corn as affected by N and P fertilization". *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 36:931-936.
- Bar-Yosef, B., y M. R. Sheikolslami. 1976. "Distribution of water and ions in soils irrigated and fertilized from a trickle source". *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 40:575-582.
- Bar-Yosef, B., E. Matan, I. Levkovich, A. Assaf, y E. Dayan. 1992. *Response of greenhouse tomato (CV F-144) to irrigation and fertilization*. ARO, Ministry of Agriculture, Bet Dagan (Israel) (en hebreo).
- Bates, T. R. 2001. "Vineyard nutrient management". Lake Erie Grape Research, Cornell University, Nueva York. <http://lenewa.netsync.net/public/Bates/NutrientRec.htm#Chart>
- Bates, T. R., R. M. Dunst y P. Joy. 2002. "Seasonal dry matter, starch, and nutrient distribution in 'Concord' grapevine roots". *HortScience*, 37:313-316.
- Baudoin, W. O., C. Bester, D. Chemonidou, N. Laws, M. Mohktari y E. Ozzambak. 2007. Actas del XX International Eucarpia Symposium (Section Ornamentals), Breeding for Beauty (Vol. II). Eds.: A. Mercuri y T. Schiva. *Acta Hort.* 743:25-32. ISHS 2007.
- Becker, S. J., A. Kania, G. Neumann y V. Römheld. 2004. "Effects of urea phosphate and monoammonium phosphate fertilizers on plant earliness in vegetable production". Institute of Plant Nutrition (330), University of Hohenheim, D-70599 Stuttgart.
- Ben-Gal, A., y L. M. Dudley. 2003. "Phosphorus availability under continuous point source irrigation". *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 67:1449-1456.
- Ben-Gal, A., N. Lazarovitch, y U. Shani. 2004. "Subsurface drip irrigation in gravel filled cavities". *The Vadose Zone Journal*, 3:1407-1413.A204.
- Ben-Oliel, G., S. Kant, M. Naim, H. D. Rabinowitch, G. R. Takeoka, R. G. Buttery y U. Kafafi. 2004. "Effects of ammonium to nitrate ratio and salinity on yield and fruit quality of large and small tomato fruit hybrids". *Journal of Plant Nutrition*, 27(10): 1795-1812.
- Benton Jones Jr., J. 2004. *Hydroponics: a practical guide for the soilless grower*. 2ª ed. CRC Press, Boca Raton (EE. UU.).
- Benton Jones Jr., J. 1983. *A guide for the hydroponic and soilless culture grower*. Timber Press, Portland (Oregon, EE. UU.).
- Ben-Zioni, A., Y. Vaadia y S. H. Lips. 1971. "Nitrate uptake by roots as regulated by nitrate reduction products in the shoot". *Physiol. Plant.*, 24:288-290.
- Berenstein, N., A. Bar-Tal, H. Fridman, P. Snir, I. Rot, A. Chazan y M. Ioffe. 2006. "Application of treated wastewater for cultivation of roses (*Rosa hybrida* L.)". En "Soil-Less Culture". *Scientia Hort.*, 108: 185-193.
- Berger, J. 1969. "The world's major fibre crops: their cultivation and manuring". Centre d'étude de l'azote, Monographs N° 6, Zurich.
- Bester, D. H., D. C. Lötter y G. H. Veldman. 1974. "Drip irrigation on citrus". Actas del 2nd Intern. Drip Irrigation Congress, San Diego (California), University of California, Riverside, pp 58-64.
- Black, C. A. 1968. *Soil-plant relationships*. J. Wiley, Nueva York (EE. UU.).
- Black, J. D. F., y P. D. Mitchell. 1974. "Changes in root distribution of mature pear trees in response to trickle irrigation". Actas del 2nd Intern. Drip Irrigation Congress, San Diego (California), University of California, Riverside, pp 437-438.

- Boland, A. M., P. D. Mitchell y P. H. Jerie. 1993. "Effect of saline water combined with restricted irrigation on peach tree and water use". *Austr. J. Agric. Res.*, 44:799-816.
- Bolt, G. H. 1976. "Adsorption of anions by soil". En *Soil Chemistry*. Eds.: G. H. Bolt y M. G. M. Bruggenwert. Elsevier Scientific Publishing Co., Nueva York.
- Bravdo, B., y E. L. Proebsting. 1993. "Use of drip irrigation in orchards". *Hortechology*, 3:44-49.
- Bravdo, B., y Y. Hepner. 1987. "Irrigation management and fertigation to optimize grape composition and vine performance". *Acta Hort.*, 206:49-67.
- Bravdo, B., Y. Hepner, C. Loinger, S. Cohen y H. Tabacman. 1984. "Effect of crop level on growth, yield and wine quality of a high yielding Carignane vineyard". *Am. J. Enol. Vitic.*, 35(4):247-252.
- Bravdo, B., Y. Hepner, C. Loinger, S. Cohen y H. Tabacman. 1985. "Effect of crop level and crop load on growth, yield, must and wine composition and quality of Cabernet Sauvignon". *Am. J. Enol. Vitic.*, 36:125-131.
- Bresler, E. 1977. "Trickle-drip irrigation: Principles and application to soil-water management". *Advances in Agronomy*, 29:343-393.
- Britto, D.T., y H. J. Kronzucker. 2002. "NH₄⁺ toxicity in higher plants: a critical review". *Journal of Plant Physiology*, 159:567-584.
- Brown, P. H., N. Bellaloui, M. A. Wimmer, E. S. Bassil, J. Ruiz, H. Hu, H. Pfeffer, F. Dannel y V. Römheld. 2002. "Boron in plant biology". *Plant Biol*, 4: 205-223.
- Bunt, A. C. 1988. *Media and mixes for container-grown plants: a manual on the preparation and use of growing media for pot plants*. 2ª ed. Unwin Hyman Ltd, Londres, p. 309.
- Burt, C., K. O'Connor y T. Ruehr. 1998. *Fertigation*. Irrigation Training Center, California Polytechnique State University, San Luis Obispo (California, EE. UU.).
- Cabrera R. I., R. Y. Evans y J. L. Paul. 1995. "Cyclic nitrogen uptake by greenhouse roses". *Scientia Horticulturae*, 63:57-66.
- Cahoon, G., M. Ellis, R. Williams y L. Lockshin. 1991. "Grapes: Production, Management, and Marketing". *Extension Bulletin*, 815. The Ohio State University, Columbus.
- Carmi, A., Z. Plaut, B. Heuer y A. Grava. 1992. "Establishment of shallow and restricted root systems in cotton and its impact on plant response to irrigation". *Irrig. Sci.*, 13:87-91.
- Carpenter, P. N. 1957. "Mineral accumulation in potato plants". Maine Agric. Exp. Sta. Univ. of Maine, Orono, Bul. 562, September.
- Catlin, P. B., G. J. Hoffman, R. M. Mead y R. S. Johnson. 1993. "Long term response of mature plum trees to salinity". *Irrig. Sci.*, 13:171-176.
- Chaney, R. L., J. C. Brown y L. O. Tiffin. 1972. "Obligatory reduction of ferric chelates in iron uptake by soybeans". *Plant Physiol.*, 50:208-213.
- Chapman, K. S. R., y J. F. Jackson. 1974. "Increased RNA labelling in boron-deficient root-tip segments". *Phytochem.*, 13:1311-1319.
- Chen, Y., y Y. Inbar. 1985. *Growth media: properties and characterization*. Faculty of Agriculture, Hebrew University of Jerusalem (en hebreo).
- Chio, T.F., y C. Bould. 1976. "Effect of shortage of calcium and other cations on 45-Ca mobility, growth and nutritional disorder of tomato plant". *J.Sci. Food Agric.*, 27: 969-977.

- Christensen, L. P., A. N. Kasimatis y F. L. Jensen. 1978. "Grapevine nutrition and fertilization in the San Joaquin Valley". Publication 4087. Division of Agricultural Sciences, University of California, Berkeley.
- Christensen, P. 1984. "Nutrient level comparisons of leaf petioles and blades in twenty-six grape cultivars over three years (1979 through 1981)", *Am. J. Enol. Vitic.*, 35: 124-133.
- Coelho, P. E., y D. Or. 1996. "A parametric model for two-dimensional water uptake intensity in corn roots under drip irrigation". *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60:1039-1049.
- Conradie, W. J. 1980. "Seasonal uptake of nutrients by 'Chenin blanc' in sand culture: I. Nitrogen". *S. Af. J. Enol. Vitic.*, 1:59-65.
- Conradie, W. J. 1981. "Seasonal uptake of nutrients by Chenin blanc culture: II. phosphorus, potassium, calcium and magnesium". *S. Af. J. Enol. Vitic.*, 2:7-18.
- Conradie, W. J. 1986. "Utilization of nitrogen by the grapevine as affected by time of application and soil type". *S. Af. J. Enol. Vitic.*, 7:76-83
- Conradie, W. J. 1991. "Translocation and storage of nitrogen by grapevines as affected by time of application". Actas del International Symposium on Nitrogen in Grapes and Wine. Ed.: J. M. Rantz. American Society for Enology and Viticulture, Davis, CA, pp. 32-42.
- Court, M. N., R. C. Stephen y J. S. Waid. 1962. "Nitrite toxicity arising from the use of urea fertilizer". *Nature*, 194:1263-1265.
- Dasberg, S., y D. Or. 1999. *Drip irrigation*. Springer Verlag, Berlin.
- Davies, S. H. R., Morgan, J. J. 1989. "Manganese (II) oxidation kinetics on metal oxide surfaces". *Journal of Colloid and Interface Science*, 129: 63 -77.
- DeTar, W. R., G. T. Browne, C. J. Phene y B. L. Sanden. 1996. "Real-time irrigation scheduling of potatoes with sprinkler and subsurface drip systems". Actas de la Int Conf. on Evapotranspiration and Irrigation Scheduling. Eds.: C. R. Camp, E. J. Sadler y R. E. Yoder. ASAE, St. Joseph (Michigan, EE. UU.), pp. 812-824.
- Duncan, W. G., y A. J. Ohlrogge. 1957. "Measuring fertilizer uptake in growing plants with the Geiger counter". *Agron. J.*, 49:57-58.
- Eaton, F. M. 1955. "Physiology of the cotton plant". *Ann. Rev. Plant Physiol.*, 6:299-328.
- EFMA (European Fertilizer Manufacturers Association). 2004. *Understanding nitrogen and its use in agriculture*. Eds.: Karl-Friedrich Kummer and Chris Dawson. EFMA, Bruselas (Bélgica).
- Elfuving, D. C. 1982. Crop response to trickle irrigation. In: *Horticultural Reviews*. Ed.: J. Janick. AVI publishing Co. Inc. Westport (Connecticut, EE. UU.), pp.1-48.
- El-Mardi, M. O., S. B. Salama, E. C. Consolacion y M. Al-Solomi. 1998. "Effect of treated sewage water on the concentration of certain nutrient elements in date palm leaves and fruits". *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 29:763-776.
- EPA (Environmental Protection Agency). 1992. *Guidelines for water reuse*. United States Environmental Protection Agency, EPA/625/r-92/004, Washington DC.
- Epstein, E. 1999. "Silicon". *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 50:641-665.
- Fabeiro, C., F. Martín de Santa Olalla y J.A. de Juan. 2001. "Yield and size of deficit irrigated potatoes". *Agricultural Water Management*, 48:255-266.

- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2002. "Wastewater treatment and use in agriculture – FAO irrigation and drainage, Paper 47. ISBN 92-5-103135-5. Roma (Italia).
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 1990. "Soilless culture for horticultural crop production. FAO Plant production and protection". Paper 101. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma (Italia). <http://www-naweb.iaea.org/nafa/news/crop-drop-turkey.html>
- Feigin, A., I. Ravina y J. Shalhevet. 1991. "Irrigation with treated sewage effluent. Management for Environmental Protection". *Advances Series in Agricultural Sciences*, 17. Pub. Springer-Verlag, Berlín, Heidelberg, Nueva York.
- Ferreira, K. N., T. M. Iverson, K. Maghlaoui, J. Barber y S. Iwata. 2004. "Architecture of the Photosynthetic Oxygen-Evolving Center". *Science* 303 (5665):1831-1838.
- Flores, P., J. M. Navarro, M. Caravajal, A. Cerada y V. Martínez. 2003. "Tomato yield and quality as affected by nitrogen source and salinity". *Agronomie*, 23:249-256.
- Flynn, R., S. T. Ball y R. D. Baker. 1999. "Sampling for plant tissue analysis". Guide A-123. College of Agriculture, Consumer and Environmental Sciences, New Mexico State University
- Ford, H. W. 1982. "Iron ochre and related sludge deposits in subsurface drain lines". Circular 671. Florida Cooperative Extension Service, I.F.A.S, University of Florida, Gainesville.
- Frith, G. J. T., y D. G. Nichols. 1975. "Nitrogen uptake by apple seedlings as affected by light, and nutrient stress in part of the root system". *Physiologia Plantarum*, 34:129-133.
- Ganmore-Newmann, R., y U. Kafkafi. 1983. "The effect of root temperature and $\text{NO}_3^- / \text{NH}_4^+$ ratio on strawberry plants". I. Growth, flowering and root development. *Agron. J.*, 75:941-947.
- Ganmore-Newmann, R. y U. Kafkafi. 1985. "The effect of root temperature and $\text{NO}_3^- / \text{NH}_4^+$ ratio on strawberry plants". II. Nutrient uptake and plant composition. *Agron. J.*, 77:835-840.
- Goldberg, S. D., M. Rinot y N. Karu. 1971. "Effect of trickle irrigation intervals on distribution and utilization of soil moisture in vineyard". *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 35: 127-130.
- Goodwin, P. B. 1983. "Nitrogen, phosphorus, potassium and iron nutrition of Australian native plants". Actas del National Technical Workshop on Production and Marketing of Australian Wild-flowers for export. Univ. Ext., Univ. West., Nedlands, pp 5-97.
- Groot Obbink, J., y D. M. Alexander. 1977. "Observations of soil water and salt movement under drip and flood irrigation in an apple orchard". *Agr. Water Management*, 1:179-190.
- Gupta, A. y M.C. Saxena. 1976. Evaluation of leaf analysis as a guide to nitrogen and phosphorus fertilization of potato (*Solanum tuberosum* L.). *Plant and Soil*, 44: 597-605.
- Hagin, J. y A. Lowengart. 1996. "Fertigation for minimizing environmental pollution by fertilizers". *Fert. Res.*, 43:5-7.

- Hagin, J., M. Sneh y A. Lowengart-Aycicegi. 2002. "Fertigation – Fertilization through irrigation". IPI Research Topics N° 23. Ed.: A. E. Johnston. International Potash Institute, Basilea (Suiza).
- Halevy, J. 1976. "Growth rate and nutrient uptake of two cotton cultivars grown under irrigation". *Agron. J.*, 68:701-705.
- Hanan, J. J., W. D. Holley, y K. L. Goldsberry. 1978. *Soils and soil mixtures. Greenhouse management*. Springer-Verlag, pp. 255-322.
- Harmsen, K., y P. L. G. Vlek. 1985. "The chemistry of micronutrients in soil". *Fertilizer Research*, 7:1-42.
- Hartmann, H. T. y D. E. Kester. 1975. *Propagation structure. Media, fertilizers, soil mixtures and containers plant propagation, principles and practices*. 3ª ed. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, NJ, pp. 17-55.
- Harward, C. S. 1953. "Determination of total dissolved solids in water analysis". *Ind. Eng. Chem.*, 5:4-6.
- Haynes, R. J. 1990. "Movement and transformations of fertigated nitrogen below trickle emitters and their effects on pH in the wetted soil volume". *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 23:105-112.
- Haynes, R. J. 1985. "Principles of fertilizer use for trickle irrigated crops". *Fertilizer Research*, 6:235-255.
- Hebbar, S. S., B. K. Ramachandrappa, H. V. Nanjappa y M. Prabhakar. 2004. "Studies on NPK drip fertigation in field grown tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.)". *European Journal of Agronomy*, 21:117-127.
- Helling, C. S., G. Chester y R. B. Corey. 1964. "Contribution of organic matter and clay to soil cation-exchange capacity as affected by the pH of the saturating solution". *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 28:517-520.
- Henry, L. T., y C. D. Raper, Jr. 1989. "Cyclic variations in nitrogen uptake rate of soybean plants; ammonium as a nitrogen source". *Plant Physiol.* 91:1345-1350.
- Hepner, Y. y B. Bravdo. 1985. Effect of crop level and drip irrigation scheduling on the potassium status of Cabernet Sauvignon and Carignane vines and its influence on must and wine composition and quality. *Am. J. Enol. Vitic.* 36:140-147.
- Ho, L. C., R. I. Grange y A. J. Picken. 1987. "An analysis of the accumulation of water and dry matter in tomato fruit". *Plant Cell and the Environment*, 10:157-162.
- Hofman, G. J., J. D. Rhoades y J. Letey. 1990. "Salinity Management". En *Management of farm irrigation systems*. Ed.: G. J. Hofman, T.A. Howell y K. H. Solomon. The American Society of Agricultural Engineers, Michigan (EE. UU.), pp. 667-715.
- Hofman, G. J., y O. van Cleemput. 1995. *Ammoniakvervluchtiging uit kunstrnest. Landbouwkundige Uitgeverij*. Ed.: G. C. van den Berg. Waddinxveen (Holanda), p. 27.
- Hofman, G. J., y O. van Cleemput. 2004. *Soil and plant nitrogen*. International Fertilizer Industry Association (IFA), París (Francia).
- Hu, H., y P. H. Brown. 1997. "Absorption of boron by plant roots". *Plant and Soil*, 193:49-58.
- Huck, M.G. y D. Hillel. 1983. "A model of root growth and water uptake accounting for photosynthesis, respiration, transpiration and soil hydraulics". En *Advances in Irrigation*, Vol. 2. Ed.: D. Hillel. Academic Press Nueva York, pp. 273-333.

- Huck, M. G. 1970. "Variation in tap root elongation rate as influenced by composition of the soil air". *Agron. J.*, 62:815-818.
- Icekson-Tal, N., O. Avraham, J. Sack y H. Cikurel. 2003. "Water reuse in Israel – The Dan Region Project: evaluation of water quality and reliability of plant's operation". *Water Science & Technology: Water Supply*, 3:231-237.
- IFA. 1992. "World Fertilizer Use Manual". Ed.: W. Wichman. Cotton. 457-471. <http://www.fertilizer.org./ifa/Home-Page/LIBRARY/World-Fertilizer-Use-Manual/by-type-of-crops>.
- Imas, P., B. Bar-Yosef, U. Kafkafi y R. Ganmore-Neumann. 1997a. "Release of carboxylic anions and protons by tomato roots in response to ammonium nitrate ratio and pH in solution culture". *Plant and Soil*, 191:27-34.
- Imas, P., B. Bar-Yosef, U. Kafkafi y R. Ganmore-Newmann. 1997b. "Phosphate induced carboxylate and proton release by tomato roots". *Plant and Soil*, 191:35-39.
- Israel Water Commission. 2002. National Water Plan 2002-2010. <http://www.water.gov.il>
- Jackson, J.F., y H.F. Linskens. 1978. Evidence for DNA repair after ultraviolet irradiation of *Petunia hybrida* pollen. *Molecular and General Genetics* 161:117-120.
- Jackson, R. D., y J. L. Haddock. 1959. "Growth and nutrient uptake of Russet Burbank potatoes". *Amer. Potato J.* 36:22-28.
- Jenkins, P. D., y H. Ali. 2000. "Phosphate supply and progeny tuber numbers in potato crops". *Annals of Applied Biology*, 136:41-46.
- Johnson, H. 2008. "Soilless culture of greenhouse vegetables". UC Davis, Vegetable Research and Information Center. http://vric.ucdavis.edu/pdf/hydroponics_soillesscultureofgreenhouse%20vegetables.pdf
- Kafkafi, U. 1979. "Measurements of available nutrients in the soil for prediction of fertilizer requirements by crops in the Mediterranean region". En *Soils in Mediterranean type climate and their yield potential*. Actas del 14th Colloq. of International Potash Institute, Sevilla (España), pp. 225-236.
- Kafkafi, U. 1991. "Root growth under stress: Salinity". En *Plant Roots. The Hidden Half*. Eds.: Y. Waisel, A. Eshel y U. Kafkafi. Marcel Dekker, Inc., Nueva York, pp 375-391.
- Kafkafi, U. 1994. "Combined irrigation and fertilization in arid zones". *Israel J. Plant Sci.*, 42:301-320.
- Kafkafi, U. 2005. Global aspects of fertigation usage. *Fertigation Proceedings, International Symposium on Fertigation Beijing, China. 20-24 September 2005*. pp. 8-22.
- Kafkafi, U. 2010. "Chlorides in TWW and their effects on plants". En *Use of treated wastewater in agriculture: impacts on crop and soil environment*. Eds.: G. J. Levy, P. Fine y A. Bar-Tal. Wiley Blackwell (en impresión).
- Kafkafi, U., y B. Bar-Yosef. 1980. "Trickle irrigation and fertilization of tomatoes in high calcareous soils". *Agron. J.*, 72:893-897.
- Kafkafi, U., y R. Ganmore-Newmann. 1985. "Correction of iron chlorosis in peanut by ammonium sulfate and nitrification inhibitor". *J. Plant Nutr.*, 8:303-310.
- Kafkafi, U., y J. Halevy. 1974. "Rates of growth and nutrients consumption of semidwarf wheat". *Trans. Int. Congr. Soil Sci.*, 10th (v. 4): 137-143.

- Kafkafi, U.2 y S. Kant. 2004. "Fertigation". En *Encyclopedia of Soils in the Environment*. Eds.: D. Hillel, C. Rosenzweig, D. Powlson, K. Scow, M. Singer y D. Sparks. Elsevier Ltd., Oxford, UK, Vol. 2: 1-9.
- Kafkafi, U., B. Bar-Yosef y A. Hadas. 1978. "Fertilization decision model". *Soil Science*, 125:261-268.
- Kafkafi, U., G. Xu, P. Imas, H. Magen y J. Tarchitzky. 2001. "Potassium and Chloride in Crops and Soils: The role of potassium chloride fertilizer in crop nutrition". Research Topics N° 22. International Potash Institute, Basilea (Suiza).
- Kafkafi, U., I. Walerstein y S. Feigenbaum. 1971. "Effect of potassium, nitrate and ammonium nitrate on the growth, cation uptake and water requirement of tomato grown in sand soil culture". *Israel J. agric. Res.*, 21:13-30.
- Kalayci, M., B. Torun, S. Eker, M. Aydin, L. Ozturk e I. Cakmak. 1999. "Grain yield, zinc efficiency and zinc concentration of wheat cultivars grown in a zinc-deficient calcareous soil in field and greenhouse". *Field Crops Research*, 63:87-98.
- Keller, J., y R. D. Bliesner. 1990. *Sprinkle and trickle irrigation*. Van Nostrand Reinhold, Nueva York.
- Khasawneh, F. E., E. C. Sample e I. Hashimoto. 1974. "Reactions of ammonium ortho- and polyphosphate fertilizers in soil". I. Mobility of phosphorus. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 38:446-450.
- Khasawneh, F.E., I. Hashimoto, y E.C. Sample. 1979. "Reactions of ammonium ortho- and polyphosphate fertilizers in soil". II. Hydrolysis and reactions with soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 43:52-58.
- Kirkby, E. A., y A. H. Knight. 1977. "Influence of the level of nitrate nutrition on ion uptake and assimilation, organic acid accumulation and cation-anion balance in whole tomato plants". *Plant Physiol.*, 60:349-353.
- Kirkby, C.A., L. J. Smythe, J. W. Cox, y D. J. Chittleborough. 1997. "Phosphorus movement down a top sequence from a landscape with texture contrast soils". *Aust. J. Soil Res.*, 35:399-417.
- Kleinman, P.,J.,A., M. S. Srinivasan, A. N. Sharpley y W. J. Gburek. 2005. "Phosphorus leaching through intact soil columns before and after poultry manure application". *Soil Science*, 170:153-166.
- Krauss, A., y H. Marschner. 1982. "Influence of nitrogen nutrition, day length and temperature on content of gibberellic and abscisic acid and on tuberization in potato plants". *Potato Res.*, 25:13-21.
- Kremmer, S., y Kenig E. 1996. "Principles of drip irrigation". Irrigation & Field Service. Extension Service, Ministry of Agriculture and Rural Development, Israel (en hebreo).
- Lamont, B. B. 1972. "The effect of soil nutrients on the production of proteoid roots by *Hakea* species". *Aust. J. Bot.*, 20:27-40.
- Lamont, B. B., G. Brown y D. T. Mitchell. 1984. "Structure, environmental effects on their formation, and function of proteoid roots in *Leucadendron laureolum* (Proteaceae)". *New Phytol.*, 97:381-390.
- Lehman, D. S. 1963. "Principles of chelation chemistry". *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 27: 167-170.

- Lewis, D. G., y J. P. Quirk. 1965. "Diffusion of phosphate to plant roots". *Nature*, 205: 765-766.
- Lindsay, W. L. 1979. *Chemical Equilibria in Soils*. Wiley, Nueva York, p. 449.
- Loganathan, P., A. D. Mitchell, J. A. Hanly y T. M. Aye. 2005. "An improved procedure for determining magnesium fertilizer dissolution in field soils". *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 36:2121-2128.
- Lombi, E., M. J. McLaughlin, C. Johnston, R. D. Armstrong y R. E. Holloway. 2004. "Mobility and lability of phosphorus from granular and fluid mono-ammonium phosphate differs in a calcareous soil". *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 68:682-689.
- Loué, A. 1986. *Les oligo-éléments en agriculture*. La nouvelle librairie - ISBN2.86479.943.X (en francés).
- Lucas, R. E., y B. D. Knezek. 1972. "Climatic and soil conditions promoting micronutrient deficiencies in plants". En "Micronutrients in Agriculture". Eds.: J. J. Mortvedt, P. M. Giordano y W. L. Lindsay. *Soil Sci. Soc. America*, Madison, pp. 265-288.
- Lykas, C., N. Katsoulas, P. Giaglaras y C. Kittas. 2006. "Electrical conductivity and pH prediction in a re-circulated nutrient solution of a greenhouse soilless rose crop". *Journal of Plant Nutrition*, 29:1585-1599.
- Maas, E. V. 1985. "Crop tolerance to sprinkling water". *Plant and Soil*, 89: 373-354.
- Maas, E. V. 1993. "Salinity and citriculture". *Tree Physiol.*, 12:195-216.
- Mac Kerron, D. K. L., y R. A. Jefferies. 1986. "The influence of early soil moisture stress on tuber numbers in potato". *Potato Res.*, 29:299-312.
- Magen, H. 2005. "Potential development of fertigation and its effect on fertilizer use". International Potash Institute (IPI), International Symposium on Fertigation: "Optimizing the utilization of water and nutrients", Beijing, septiembre de 2005. <http://www.ipipotash.org/udocs/Potential%20development%20of%20fertigation.pdf>
- Magen, H., y P. Imas. 2003. Fertigation, The Global View. 4th Fertigation Training Course, NWSUAF, septiembre de 2003. International Potash Institute, Basilea (Suiza).
- Malchi, I. 1986a. "Iron in irrigation water". *Hassadeh*, Vol. 66 (en hebreo).
- Malchi, I. 1986b. Personal and internal information. Netafim Irrigation Inc., EE. UU.
- Mansell, R. S., H. M. Selim, P. Kanchanasut, J. M. Davidson y J. G. A. Fiskell. 1977. "Experimental and simulated transport of P through sandy soils". *Water Resources Research*, 13:189-194.
- Marschner, H. 1995. *Mineral nutrition of higher plants*. 2^a ed. AP, Londres.
- Martinez Hernandez, J. J., B. Bar-Yosef y U. Kafkafi. 1991. "Effect of surface and subsurface drip fertigation on sweet corn rooting, uptake, dry matter production and yield". *Irrig. Sci.*, 12:153-159.
- Mattos Jr. D., D. Donald, A. Graetz y A. K. Alva. 2003. "Biomass distribution and nitrogen-15 partitioning in citrus trees on a sandy entisol". *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 67:555-563.
- Maurer, M., D. Abramovich, H. Siegrist y W. Gujer. 1999. "Kinetics of biologically induced phosphorus precipitation in waste-water treatment". *Water Research*, 33:484-493.

- McBeath, T. M., R. J. Smernik, E. Lombi y M. J. McLaughlin. 2006. "Hydrolysis of pyrophosphate in a highly calcareous soil: A solid-state phosphorus-³¹NMR study". *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 70:856-862.
- McCarthy, M. G., y W. J. S. Downton. 1981. "Irrigation of grapevines with sewage effluent". II. Effects on wine composition and quality. *Amer. J. Enology and Viticulture* 32:197-199.
- Mendes, H. C. 1960. "Nutrição do algodoeiro". *Baragantia*, 19:435-458.
- Mikkelsen, R. L., y B. R. Bock. 1988. "Ammonia volatilization from urea fertilizers". *TVA Bulletin*, pp. 175-189.
- Millard, P., y G. H. Neilsen. 1989. "The influence of nitrogen supply on the uptake and remobilization of stored N for the seasonal growth of apple trees". *Annals of Botany*, 63:301-309.
- Mmolawa, K. y D. Or. 2000. "Root zone solute dynamics under drip irrigation: A review". *Plant and Soil*, 222:163-190.
- Mohammad, M. J., S. Zuraiqi, W. Quasmeh e I. Papadopoulos. 1999. "Yield response and nitrogen utilization efficiency by drip-irrigated potato". *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 54:243-249.
- Moody, P. W. y R. L. Aitken. 1997. "Soil acidification under some tropical agricultural systems. 1. Rates of acidification and contributing factors". *Aust. J. Soil Res.*, 35:163-173.
- Morgan, J. J. 2005. "Kinetics of reaction between O₂ and Mn(II) species in aqueous solutions". *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69:35-48.
- Moran, K. 2004. "Micronutrient product types and their development". Proceedings N° 545, International Fertilizer Society, York, UK. 1-24.
- Moritsugu, M., y Kawasaki, T. 1983. "Effect of nitrogen sources on growth and mineral uptake in plants under nitrogen restricted culture solution". *Berichte des Ohara Instituts für landwirtschaftliche Biologie, Okayama Universität*, 18:145-158.
- Moritsugu, M., T. Suzuki y T. Kawasaki. 1983. "Effect of nitrogen sources on growth and mineral uptake in plants under constant pH and conventional culture solution". *Berichte des Ohara Instituts für landwirtschaftliche Biologie, Okayama Universität* 18:125-144.
- Mullins, G. L., y C. H. Burmester. 1990. "Dry matter, nitrogen phosphorus, and potassium accumulation by four cotton varieties". *Agronomy J.*, 82:729-736.
- Muñoz-Carpena, R., A. Ritter, A. R. Socorro y N. Pérez. 2002. "Nitrogen evolution and fate in a Canary Islands (Spain) sprinkler fertigated banana plot". *Agricultural Water Management*, 52:93-117.
- Mussaddak, J. 2007. "Efficiency of nitrogen fertilizer for potato under fertigation utilizing a nitrogen tracer technique". *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 38:2401-2422.
- Myers, B. A., D. W. West, L. Callinan y C. C. Hunter. 1995. "Long term effects of saline irrigation on the yield and growth of mature 'Williams' pear trees". *Irrig. Sci.*, 16:35-46.
- Nakayama, F. S., y D. A. Bucks. 1986. *Trickle irrigation for crop production*. Elsevier Science Publishers B. V. (383 p.).

- Nakayama, F. S., y D. A. Bucks. 1991. "Water quality in drip-trickle irrigation: A review". *Irrigation Science*, 12: 187-192.
- Nichols, D. G., D. L. Jones y D. V. Beardsell. 1979. "The effect of phosphorus on the growth of *Grevillea* 'Poorinda Firebird' in soil-less potting-mixtures". *Scientia Hort.*, 11:197-206.
- Noy, J., y D. Yoles. 1979. "Precipitates formed by APP 11-37-0 in irrigation water". *Hassadeh*, 59:2129-2130 (en hebreo).
- Oertli, J. J. y E. Grgurevic. 1975. "Effect of pH on the absorption of boron by excised barley roots". *Agronomy J.*, 67:278-280.
- Onder, S., M. E. Caliskan, D. Onder y S. Caliskan. 2005. "Different irrigation methods and water stress effects on potato yield and yield components". *Agricultural Water Management*, 73:73-86.
- Ottman, M. J., T. L. Thompson y T. A. Doerge. 2006. "Alfalfa yield and soil phosphorus increased with top dressed granular compared with fluid phosphorus fertilizer". *Agron. J.*, 98:899-906.
- Ozanne, P. G., D. J. Kirton y T. C. Shaw. 1961. "The loss of P from sandy soils". *Australian Journal of Agricultural Research*, 12:409-423.
- Papadopoulos, I. 1992. "Phosphorus fertigation of trickle-irrigated potato". *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 31:9-13.
- Paradiso, R., G. Raimondi, y G. De Pascale. 2003. "Growth and yield of rose in a closed soilless system on two inert substrates". Actas del 6th IS on Protected Cult. Eds.: G. La Malfa *et al. Acta Hort*, 614:193-198. ISHS, 2003.
- Peacock, W. L., L. P. Christensen y F. E. Broadbent. 1989. "Uptake, storage, and utilization of soil-applied nitrogen by 'Thompson Seedless' as affected by time of application". *Am. J. Enol. Vitic.*, 40:16-20.
- Penningsfeld, F. 1978. "Substrates for protected cropping". *Acta Horticulturae*, 82:13-22.
- Peverill, K. I., y L. A. Douglas. 1976. "Use of undisturbed cores of surface soil for investigating leaching losses of S and P". *Geoderma*, 16:193-199.
- Pierzynski, G. M., J. T. Sims y G. F. Vance. 1994. *Soils and Environmental Quality*. Lewis Publishers, Boca Raton (Florida, EE. UU.).
- Poole, R. T., C. A. Conover y J. N. Joiner. 1981. *Soils and potting mixtures. Foliage plant production*. Ed.: J. N. Joiner. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, pp. 179-202.
- Primary Industries: Agriculture. 2005. Horticultural fertigation- techniques, equipment and management. Industry and Investments. New South Wales, Australia. <http://www.dpi.nsw.gov.au/agriculture/resources/water/irrigation/crops/publications/fertigation>
- Prior, L. D., A. M. Grieve y B. R. Culis. 1992a. "Sodium chloride and soil texture interaction in irrigated field grown Sultana grapevines I. yield and fruit quality". *Austr. J. Agric. Res.*, 43:1051-1066.
- Prior, L. D., A. M. Grieve, P. G. Slavich y B. R. Culis. 1992b. "Sodium chloride and soil texture interactions in irrigated field grown Sultana grapevines". 3. Soil and root system effects. *Aust. J. Agric. Res.*, 43:1085-1100.

- Rajan, S. S., K. W. Perrott y W. M. H. Saunders. 1974. "Identification of phosphate reactive sites of hydrous alumina from proton consumption during phosphate adsorption at constant pH values". *Journal of Soil Science*, 25:438-447.
- Reboll, V., M. Cerezo, A. Roig, V. Flors, L. Lapena, y P. Garcia-Agustin, 2000. "Influence of wastewater vs. groundwater on young citrus trees". *J. Sci. Food and Agric.*, 80:1441-1446.
- Reddy, B. M. C., K. Srinivas, P. Padma y H. B. Raghupathi. 2002. "Response of Robusta banana to N and K fertigation". *Indian J. of Hort.*, 59:342-348.
- Richards, L. A. (editor). 1954. "Diagnosis and improvement of saline and alkalai soils". *Agriculture Handbook*, 60. USDA, Washington DC (EE. UU.).
- Richards, S. J., J. E. Warneka, A. W. Marsh y F. K. Aljibury. 1964. "Physical properties of soil mixes used by nurseries". *Calif. Agr.*, 18:12-13.
- Robertson, W. C., F. E. Groves, R. Hagen Jr., L. Espinoza, M. Ismanov y R. Franks. 2007. "Evaluation of drip irrigation for cotton in Arkansas". *Summaries of Arkansas Cotton Research 2006*, AAES research series 552, Ed: D. M. Oosterhuis, pp 73-77.
- Robinson J. B. 2000. "The mineral nutrition of wine grapes in Australia". *Acta Hort.*, 512 ISHS.
- Roddy, E. 2006. "Fertigation Fertilizer Sources". www.omafra.gov.on.ca/english/crops/hort/news/vegnews/2006/vg0406a2.htm
- Rolston, D. E., R. S. Rauschkolb y D. L. Hoffman. 1975. "Infiltration of organic phosphate compounds in soil". *Soil Science Society of America*, 39:1089-1094.
- Romero, F., H. Taber y R. Gladon. 2006. "Nitrogen source and concentration affect growth and performance of bedding-plant Impatiens". *J. Plant Nutrition*, 29:1315-1326.
- Römheld, V. 2000. "The chlorosis paradox: Fe inactivation as a secondary event in chlorotic leaves of grapevine". *J. Plant Nutrition*, 23:1629-1643.
- Roy, R. N., A. Finck, G. J. Blair y H. L. S. Tandon. 2006. "Plant Nutrition for Food Security. A guide for integrated nutrient management". *FAO Fertilizer & Plant Nutrition Bulletin*, 16. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma (Italia).
- Russell, E. J. 1950. *Soil Conditions and Plant Growth*, 8ª ed. Longmans Green & Co, Londres.
- Ryan, J., y H. Tabbara. 1989. "Urea phosphate effects on infiltration and sodium parameters of a calcareous sodic soil". *Soil Sci Soc of Am. J.*, 53:pp. 1531-1536.
- Sagi, M., C. Scazzocchio y R. Fluhr. 2002. "The absence of molybdenum co-factor sulfuration is the primary cause of the flacca phenotype in tomato plants". *The Plant J.*, 31:305-317.
- Sagiv, B., J. Ben-Asher, B. Bar-Yosef, U. Kafkafi y D. Goldberg. 1974. "Combined irrigation and fertilization of tomatoes grown on sand dunes. Symposium Israel-France on ecological research on development of arid zones (Mediterranean deserts) with winter precipitation". Special Publication, 39, Dept. of Scientific publications ARO, Volcani Center, Bet Dagan (Israel).
- Sammis, T. W. 1980. "Comparison of sprinkler, trickle, subsurface and furrow irrigation methods for row crops". *Agron. J.*, 72:701-704.

- Santos, F. L. 1996. "Quality and maximum profit of industrial tomato as affected by distribution uniformity of drip irrigation system". *Irrigation and Drainage Systems*, 10:281-294.
- Scaife, A., y B. Bar-Yosef. 1995. "Nutrient and fertilizer management in field grown vegetables". *IPI Bulletin*, 13. International Potash Institute, Basilea (Suiza).
- Scaife, A., y M. Turner. 1983. "Diagnosis of mineral disorders in plants". Vol. 2. Vegetables. Ed.: J. B. D. Robinson. Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, Londres.
- Shae, J. B., D. D. Steele y B. L. Gregory. 1999. "Irrigation scheduling methods for potatoes in the Northern Great Plains". *American Society of Agricultural Engineers*, 42:351-360.
- Shalhevet, J., D. Shimshi y T. Meir. 1983. "Potato irrigation requirements in a hot climate using sprinkler and drip method". *Agron. J.*, 75:13-16.
- Shannon, M. C., y C. M. Grieve. 1999. "Tolerance of vegetable crops to salinity". *Scientia Horticulturae*, 78, pp.5-38.
- Sharpley, A. N., T. C. Daniel, y D. R. Edwards. 1993. "P movement in the landscape". *Journal of Production Agriculture* 6:492-500.
- Shimshi, D., y M. Susnoschi. 1985. "Growth and yield studies of potato development in a semiarid region". 3. Effect of water stress and amounts of nitrogen top dressing on physiological indices and on tuber yield and quality of several cultivars. *Potato Res.*, 28:177-191.
- Shock, C. C., E. B. Feibert, L. D. Saunders y S. R. James. 2003. "'Umatilla' Russet' and 'Russet Legend' Potato Yield and Quality Response to Irrigation". *HortScience*, 38:1117-1121.
- Shorrocks, V. M., 1997. "The occurrence and correction of boron deficiency. *Plant Soil*, 193:121-148.
- Shock, C. C., Z. A. Holmes, T. D. Stieber, E. P. Eldredge y P. Zhang. 1993. "The effect of timed water stress on quality, total solids and reducing sugar content of potatoes". *Am. Potato J.*, 70:227-241.
- Silber, A., B. Bar-Yosef, I. Levkovitch, L. Kautzky y D. Minz. 2008. "Kinetics and mechanisms of pH-dependent Mn(II) reactions in plant-growth medium". *Soil Biology and Biochemistry*, 40:2787-2795.
- Silber, A., M. Bruner, E. Kenig, G. Reshef, H. Zohar, I. Polaski, H. Yehezkel, D. Shmuel, S. Cohen, M. Dinar, E. Matan, I. Dinkin, Y. Cohen, L. Karni, B. Aloni, y S. Assouline. 2005. "High fertigation frequency and phosphorus level: effects on summer-grown bell pepper growth and blossom-end rot incidence". *Plant and Soil*, 270: 135-146.
- Silber, A., G. Xu, I. Levkovitch, S. Soriano, A. Bilu y R. Wallach. 2003. "High fertigation frequency: the effects on uptake of nutrients, water and plant growth". *Plant and Soil*, 253:467-477.
- Silber A., R. Ganmore-Neumann y J. Ben-Jaacov. 1998. "Effects of nutrient addition on growth and rhizosphere pH of Leucadendron 'Safari Sunset'". *Plant and Soil*, 199:205-211.
- Silberbush, M., B. Gornat y D. Goldberg. 1979. "Effect of irrigation from a point source (trickling) on oxygen flux and on root extension in the soil". *Plant and Soil*, 53: 507-514.

- Simonne, E., N. Ouakrim y A. Caylor. 2002. "Evaluation of an irrigation scheduling model for drip-irrigated potato in southeastern United States". *HortScience*, 37:104-107.
- Smajstrla, A. G., S. J. Locascio, D. P. Weingartner y D. R. Hensel. 2000. "Subsurface drip irrigation for water table control and potato production". *Appl. Eng. Agric.*, 16:225-229.
- Sne, M. 2006. *Micro irrigation in arid and semi-arid regions. Guidelines for planning and design*. Ed.: S. A. Kulkarni. ICID-CIID. International Commission on Irrigation and Drainage, Nueva Delhi (India).
- Snyder, R. G. y J. G. Thomas. 2007. Publication 2037. Extension Service of Mississippi State University, en cooperación con el US Department of Agriculture. <http://msucares.com/pubs/publications/p2037.htm>
- Soil Fertility Manual*. 2003. Potash and Phosphate Institute. ISBN#0-9629598-5-5.
- Sonneveld, C., y W. Voogt. 1997. "Effects of pH value and Mn application on yield and nutrient absorption with rockwool grown gerbera". *Acta Horticulturae*, 450:139-147.
- Sosnitsky P. 1996. "Salinity, potassium and N nutrition effect on lycopene content of processing tomato". MSc. Thesis, Faculty of Agriculture, Rehovot (Israel). Supervisada por U. Kafkafi (en hebreo).
- Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 20ª ed. 1998. Eds.: L. S. Clesceri, WEF, A. E. Greenberg, APHA, y A. D. Eaton, AWWA. American Public Health Association, 1015 Fifteenth Street, NW Washington DC, 2005-2605.
- Steyn, J. M., H. F. Du Plessis, P. Fourie y T. Ross. 2000. «Irrigation scheduling of drip irrigated potatoes. Micro-irrigation technology for developing agriculture». 6th International Microirrigation Congress., Sudáfrica, octubre 22-27, 2000.
- Susnoschi, M., y D. Shimshi. 1985. "Effect of water stress and amounts of nitrogen top dressing on growth of several cultivars". *Potato Res.*, 28:161-176.
- Tanaka, A., K. Fujita y K. Kikuchi. 1974. "Nutro-physiological studies of the tomato plant" I. Outline of growth and nutrient absorption. *Soil Science Plant Nutrition*, 20:57-68.
- Tarchitzky, J., y G. Eitan. 1997. "Irrigation with wastewater. Recommendations for sampling and analyzing". Soil & Water Extension Service, Ministry of Agriculture and Rural Development, Israel (en hebreo).
- Tarchitzky, J., M. Bar-Hay, A. Lowengart-Aycicegi, M. Peres, A. Zilberman, E. Kenig, E., Y. Menashe, Y. Gal, A. Eizenkot y Y. Eisenstadt. 2004. "National survey on treated wastewater". Extension Service, Ministry of Agriculture and Rural Development, Israel (en hebreo).
- Tarchitzky, J., O. Lerner, U. Shani, A. Guilboa, A. Loewengart-Acyicii, A. Brener y Y. Chen. 2007. "Water distribution pattern in treated-wastewater-irrigated soils: hydrophobicity effect". *European J. Soil Sci.*, 58:573-588.
- Teixeira, L. A. J., W. Natale y C. Ruggiero. 2002. "Nitrogen and potassium fertilization of 'Nanicao' banana (MEE. UU. aaa cavendish subgroup) under irrigated and non-irrigated conditions". *Acta Hort.* (ISHS), 575:71-779.

- Terman, G. L., y C. M. Hunt. 1964. "Volatization losses of nitrogen from surface-applied fertilizers, as measured by crop response". *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 28:667-672.
- Tisdale, S. L., W. L. Nelson, y J. D. Beaton. 1985. *Soil Fertility and Fertilizers*. Macmillan Publishing Company, Nueva York.
- Van Beusichem M. L., E. A. Kirkby y R. Baas. 1988. "Influence of nitrate and ammonium nutrition, and the uptake, assimilation and distribution of nutrients in *Ricinus cummunis*". *Plant Physiol.*, 86:914-921.
- Van Delden, A. 2001. "Yield and growth components of potato and wheat under organic nitrogen management". *Agronomy J.*, 93:1370-1385.
- Van Tuil, H. D. W. 1965. "Organic salts in plants in relation to nutrition and growth". Ctr. for Agric. Pub. and Docu. Wageningen. *Agric. Res. Rep.* N° 657.
- Vangush, A., y R. Keren. 1995. "Saline water and saline sources In: Israel shore aquifer: Hydrogeochemical aspects". *Water and Irrigation*, 340:4-11 (en hebreo).
- Verdonck, O. 1981. "The influence of the substrate to plant growth". *Acta Horticulturae*, 126:251-258.
- Verdonck, O. 1983. "Reviewing and evaluation of new materials used as substrates". *Acta Horticulturae*, 150:467-473.
- Volder, A., D. R. Smart, A. J. Bloom y D. M. Eissenstat. 2005. "Rapid decline in nitrate uptake and respiration with age in fine lateral roots of grape: implications for root efficiency and competitive effectiveness". *New Phytologist*, 165:493-502.
- Volk, G. M. 1959. "Volatile loss of ammonia following surface application of urea to turf or bare soils". *Agron. J.*, 51:746-749.
- Voss, R. D. 1993. "Corn". En *Nutrients deficiencies and toxicities in crop plants*. Ed.: W. F. Bennet. The American Phytopathological Society, St. Paul (Minnesota, EE. UU.).
- Waddell, J. T., S. C. Gupta, J. F. Moncrief, C. J. Rosen y D. D. Steele. 1999. "Irrigation and nitrogen management effect on potato yield, tuber quality, and nitrogen uptake". *Agron. J.*, 91:991-997.
- Waddell, J. T., S. C. Gupta, J. F. Moncrief, C. J. Rosen y D. D. Steele. 2000. "Irrigation and nitrogen-management impacts on nitrate leaching under potato". *Environ. Qual.*, 29:251-261.
- Walker, R. R., D. H. Blackmore y P. R. Clingelffer. 1996. "Salinity-vine vigor interactions and their effect in fruitfulness and yield of Sultana on Ramsy and own roots". *Aust. Dried Fruit News*, NS 23:16-18.
- Watt, M., y J.R. Evan, 1999. "Proteoid roots: Physiology and development". *Plant Physiology*, American Society of Plant Physiologists, 121:317-323.
- Westcot, D. W., y R. S. Ayers. 1985. *Irrigation water quality criteria. In: Irrigation with reclaimed municipal wastewater: A guidance manual*. Eds.: G. S. Pettygrove y T. Asano. Lewis Publishers, Inc. Chelsea, MI.
- Wilson, G. C. S. 1984. "The physico-chemical properties of horticultural substrates". *Acta Horticulturae*, 150: 19-32.
- Winsor, G., P. Adams, P. Fiske y A. Smith. 1987. *Diagnosis of mineral disorders in plants*. Her Majesty's Stationary Office, Londres., V. 3, 168 p.

- Xu, G. H., H. Magen, J. Tarchitzky y U. Kafkafi. 2000. "Advances in chloride nutrition of plants". *Advances in Agronomy*, 68: 97-150.
- Xu, G. H., S. Wolf y U. Kafkafi. 2001. "Effect of varying nitrogen form and concentration during growing season on sweet pepper flowering and fruit yield". *J. Plant Nutr.*, 24:1099-1116.
- Yermiyahu, U., y U. Kafkafi. 2009. "Higher yields and reduction incidence of stem brittle in white carnation by increasing potassium concentration and $\text{NO}_3^-:\text{NH}_4^+$ ratio in the fertigation medium". International Fertilizer Correspondence (IFC), junio 2009. International Potash Institute, Horgen (Suiza). <http://www.ipipotash.org/eifc/2009/20/2>
- Yermiyahu, U., S. Nir, G. Ben Hayyim, U. Kafkafi y T.B. Kinraide. 1997. "Root elongation in saline solution related to calcium binding to root cell plasma membranes". *Plant and Soil*, 191:67-76.
- Yogev, H. 1986. "Radiation effects on translocation and assimilation partitioning in the cotton canopy". Ph. D. tesis, Faculty of Agriculture, Rehovot (Israel).
- Zartman, R. E., L. Rosado-Carpio y R. H. Ramsey. 1992. "Influence of trickle irrigation emitter placement on yield and grade distribution of potatoes". *HortTechnology*, 2:387-391.
- Zekri, M. y R.C.J. Koo. 1994. Treated municipal wastewater for citrus irrigation. *J. Plant Nutr.* 17:693-708.
- Zhang J., L. Jiu Sheng y R. Min Jie. 2004. "Wetting patterns and nitrogen distributions as affected by fertigation strategies from a surface point source". *Agricultural Water Management*, 67:89-104.
- Zhang, H., D. Smeal, R. N. Arnold y E. J. Gregory. 1996. "Potato nitrogen management by monitoring petiole nitrate level". *J. Plant. Nutr.*, 19:1405-1412.
- Zhang, M., A. K. Alva, Y. C. Li y D. V. Calvert. 1996. "Root distribution of grapefruit trees under dry granular broadcast vs. fertigation method". *Plant and Soil*, 183:79-84.

