



Universidad de Concepción



FERTIRRIGACIÓN: DESDE LA TEORÍA A LA PRÁCTICA

IVÁN VIDAL P.

Editorial Universidad de Concepción



Universidad de Concepción

FERTIRRIGACIÓN: DESDE LA TEORÍA A LA PRÁCTICA

IVÁN VIDAL P.

Editorial Universidad de Concepción

Fertirrigación: Desde la teoría a la práctica.
©2019 Iván Vidal P.

Editorial Universidad de Concepción.

ISBN 978-956-227-450-0
Primera edición, mayo 2019.

Facultad de Agronomía, Universidad de Concepción,
Avenida Vicente Méndez 595, Chillán, Chile.

Diseño de portada y diagramación
Ricardo González Toro.

Impresión
Trama Impresores S.A.

IMPRESO EN CHILE / *PRINTED IN CHILE*



PRÓLOGO	11
INTRODUCCIÓN	13
I NUTRICIÓN DE LAS PLANTAS	15
1. Rol de los fertilizantes	15
2. Nutrientes vegetales	15
3. Acceso de los nutrientes a las raíces	24
4. Absorción y transporte mineral	26
5. Movimiento descendente de nutrientes	26
II FERTIRRIGACIÓN	35
1. Situación mundial del recurso hídrico	35
2. Ventajas y desventajas	37
3. Fertilización convencional versus fertirriego	38
4. Volumen de suelo explorado por las raíces	40
5. Uso de colorante para mostrar el movimiento del agua del riego por goteo	41
III TÉCNICAS DE DIAGNÓSTICO NUTRICIONAL	47
1. Introducción	47
2. Análisis químico de suelos	48
3. Análisis de solución del suelo	57
4. Análisis de tejido vegetal	63
5. Análisis de savia	71
6. Análisis de frutos	73
7. Diagnóstico visual	74
IV FERTILIZANTES PARA FERTIRRIEGO	77
1. Introducción	77
2. Definición de fertilizante	77
3. Características generales de los fertilizantes para fertirriego	78
4. Fertilizantes nitrogenados	86
5. Fertilizantes fosforados	86
6. Fertilizantes potásicos	87
7. Otros fertilizantes	87
8. Fertilizantes comúnmente empleados en fertirrigación y mezclas convencionales	89
9. Microelementos y quelatos	93
10. Fertilizantes líquidos y principales variables de diseño y caracterización	95
11. Fabricación de formulaciones líquidas para fertirriego	98
12. Enmiendas y bioestimulantes	100

V	CALIDAD DEL AGUA DE RIEGO	111
	1. Antecedentes generales	111
	2. Muestreo de aguas de riego	113
	3. Evaluación de la calidad del agua de riego	113
	4. Efectos sobre el suelo	118
	5. Efectos sobre la planta	120
	6. Interpretación de análisis de aguas e índices de interés	121
	7. Ejemplo práctico de interpretación de análisis de agua	123
VI	DISEÑO DE PROGRAMAS DE FERTIRRIEGO	127
	1. Conceptos para realizar recomendaciones de fertilización	127
	2. Método del balance	128
	3. Método de la solución nutritiva óptima	134
	4. Monitoreo del fertirriego	140
VII	CULTIVOS SIN SUELOS E HIDROPÓNICOS	145
	1. Introducción	145
	2. La hidroponía en frutales establecidos en suelo	148
	3. Solución nutritiva	149
	4. Balance catiónico-aniónico	150
	5. Soluciones nutritivas recomendadas para algunos cultivos	153
	6. Monitoreo de la solución nutritiva	162
	7. Manejo del riego en cultivos sin suelo	163
VIII	RIEGO LOCALIZADO: PROGRAMACIÓN Y MANEJO	169
	1. Antecedentes generales	169
	2. Sistema radical de las plantas	170
	3. Necesidad de agua de los cultivos	172
	4. Cálculo de frecuencia de riego	178
	5. Cálculo de tiempo de riego	183
	6. Cintas de riego	185
IX	EQUIPOS DE INYECCIÓN DE FERTILIZANTES	189
	1. Antecedentes generales	189
	2. Estanque para preparar solución madre	190
	3. Tiempo de viaje de la solución fertilizante	192
	4. Inyectores de fertilizantes	193
X	MANTENCIÓN DEL SISTEMA DE RIEGO	205
	1. Revisión e inspección del sistema de riego	205
	2. Tratamiento de las obstrucciones	211
	3. Acidificación del agua de riego	215

XI	FERTIRRIEGO CON PIVOTE CENTRAL Y ASPERSIÓN CONVENCIONAL	221
	1. Pivote central	221
	2. Aplicación de fertilizantes con pivote central	222
	3. Cálculo de la tasa de inyección	223
	4. Cálculo de la concentración del fertilizante en el agua de riego	223
	5. Volumen de solución madre	224
	6. Planilla para realizar fertirrigación con pivote central	224
	7. Aplicación vía aspersión convencional	226
XII	SISTEMAS DE CONTROL DEL RIEGO: EMPLEO DE SONDAS DE MONITOREO DE HUMEDAD DE SUELO	233
	1. Antecedentes generales	233
	2. Control o ajuste del riego	234
	3. Estimación cualitativa de la humedad de suelo: uso de barreno y calicatas	234
	4. Determinación cuantitativa del contenido de humedad del suelo	235
	5. Empleo de sondas capacitivas fijas de medición continua para mejorar las estrategias de riego	237
XIII	HORMONAS VEGETALES Y CRECIMIENTO RADICAL	253
	1. Introducción	253
	2. Auxinas	253
	3. Citoquininas (CK)	256
	4. Giberelinas (GA)	260
	5. Brasinosteroides (BR)	261
	6. Acido abscisico (ABA)	261
	7. Etileno	263
	8. Jasmonatos (JA)	264
	9. Acido salicílico (SA)	265
	10. Estrigolactonas (SL)	265
	BIBLIOGRAFÍA	267
	ANEXOS	273

AUSPICIADORES

La publicación de este libro fue posible gracias al aporte de 12 empresas ligadas a la tecnología agrícola y oferta de insumos. Mi más sincero agradecimiento y reconocimiento para cada una de ellas:

AGROGESTION VITRA

AMINOCHEM

ANAGRA S.A.

CIVIL AGRO

CNA CHILE

COMPO EXPERT

FERTITEC PERU

IRRIFER

MARTINEZ & VALDIVIESO

SQM MEXICO

TRADECORP

WATER SOIL INGENIERIA





... A Gloria y a mis hijas Daniela, María José y Fernanda, por todo y por tanto.

El Dr. **Iván Vidal** obtuvo el título de Ingeniero Agrónomo con orientación en Suelos, en la Universidad de Concepción (Chile) en 1976, de Magister en Ciencias en la Pontificia Universidad Católica de Chile (1978) y el grado de Doctor en Ciencias en el Colegio de Postgraduados de México y CIMMYT (1996). Ha participado en cursos y estadias de capacitación en Viena, Austria, FAO.AIEA; Estación Experimental del Zaidin, CSIC, España; Universidad de Ciencias Agrícolas de Suecia, entre otras. Actualmente es Profesor Titular de la Facultad de Agronomía de la Universidad de Concepción y Director del Diplomado en Fertirrigación. Su especialidad primaria es la edafología con énfasis en química de suelos, nutrición vegetal y fertirrigación de cultivos y frutales. Ha participado en diversos proyectos con financiamiento internacional y nacional relacionados con manejo de suelos y fertirrigación. Durante su carrera ha sido autor y coautor de 60 artículos científicos, editor de 4 libros, autor de 10 capítulos de libros, profesor asesor de más de 65 tesis de grado. Participa activamente en asistencia técnica en Chile, México, Perú y Argentina y ha impartido conferencias y cursos en numerosos centros de Iberoamérica.



PRÓLOGO

El futuro de la agricultura es el presente del agua. Por lo que su adecuada gestión, resulta fundamental ya que es la mayor consumidora de agua dulce del planeta. La agricultura debe asegurar la producción de alimentos para las generaciones actuales y tener presente que habrá muchas futuras generaciones que obligadamente necesitarán acceder a sus bienes y servicios. Con el propósito de no interrumpir este ciclo histórico, es preciso realizar un manejo inteligente del recurso natural agua. El no cumplir con esta condición puede provocar una ruptura entre la demanda de alimentos y la oferta, que traería consecuencias graves no sólo en el abasto de éstos y su implicaciones sociales, sino que también alteraciones de precios de mercado, conflictos por la propiedad del agua, desavenencias entre regiones o países, o aun entre sectores económicos y la sociedad civil, cuyo desenlace es difícil de prever.

Como hemos dicho, la agricultura es la mayor consumidora de agua del planeta. Se estima que usa aproximadamente un 70% del agua dulce. Esta cifra puede ser mayor en zonas semiáridas y áridas o de agricultura intensiva. El crecimiento demográfico, los asentamientos humanos y el sector industrial demanda cada vez una mayor proporción de agua disponible y compiten con la agricultura, que históricamente ha hecho un uso ineficiente de este recurso. Por ello resulta fundamental la incorporación de conocimiento y tecnología modernas en su manejo, mismas que ofrecen la posibilidad de aumentar la eficiencia de su uso, sin afectar la productividad o aun incrementándola.

Este libro es un ejemplo de las posibilidades que ofrece la tecnificación del riego, una decisión, que aunada a la viabilidad de conjuntarlo con la aplicación de sustancias nutritivas o que controlan enfermedades, hace de él un instrumento que contribuirá a mejorar la eficiencia en el uso del agua, en un momento en que la humanidad se encuentra confrontada con una mayor demanda de alimentos y la reducción de los recursos naturales.

El presente libro cumple con un doble propósito. Por un lado, es una ayuda didáctica en la enseñanza de la fertirrigación, el incremento de la eficiencia de uso del agua de riego y la incorporación de tecnologías de punta en materia de riego, que podrá usarse en las escuelas de agronomía e instituciones de enseñanza agrícola de nivel medio. Por otro lado, los capítulos que aquí se desarrollan constituyen un manual de autoformación para aquellos productores deseosos de aprender más acerca de las innumerables posibilidades que les brinda los nuevos conocimientos para alcanzar un uso eficiente del agua y la aplicación simultánea de productos químicos (fertilizantes, reguladores del crecimiento y pesticidas).

De esta forma estaremos más próximos a conseguir el suministro de agua necesario para una agricultura segura y económicamente viable, aprovechando los nuevos enfoques para su gestión, particularmente en aquellas áreas donde el agua es escasa y se han hecho grandes inversiones en sistemas de acumulación y distribución. Adicionalmente, las propuestas que se hacen en este libro, nos conducen a mitigar los efectos ambientales indeseables de los sistemas tradicionales de regadío, como son el uso ineficiente del recurso, la erosión del suelo o su salinización, contribuyendo a mejorar la salud del suelo y la economía del uso de los insumos requeridos por la agricultura de regadío.

Dr. Jorge D. Etchevers
Colegio de Postgraduados de México

Marzo 2019, Chillán, Chile.

INTRODUCCIÓN

Con este libro, se pretende aportar información útil para asesores y productores, que en muchos casos disponen de antecedentes limitados sobre tópicos de fertirrigación, tema de gran actualidad y con una proyección tecnológica y económica de especial relevancia a nivel mundial. Nuestro objetivo, además, es colaborar en la formación de alumnos de universidades e institutos profesionales en que se imparten asignaturas relacionadas con fertilización de cultivos, nutrición vegetal y manejo de suelos y aguas.

Un libro sobre el sistema de fertirrigación debe comprender un amplio número de temas que requieren la participación de profesionales de diversa formación. Por lo tanto, para el texto que presentamos contamos con la participación de especialistas en algunos capítulos, cuya inestimable colaboración ha permitido lograr un excelente nivel en estos temas. Al respecto agradezco el aporte de los especialistas Jorge Jara de la Universidad de Concepción, Thomas Fichet de la Universidad de Chile y Raúl Ferreyra, del Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA).

La obra comprende los temas que permiten, en primer término, comprender el complejo proceso de la nutrición vegetal, conceptos básicos de fertirrigación, diagnóstico nutricional, diagnósticos de suelos, plantas y aguas, programación y control del riego, características de los fertilizantes solubles, recomendaciones de fertilización y diseño de disoluciones fertilizantes y manejo de cultivos en sustratos alternativos al suelo. Y en segundo lugar, mostrar el uso e interpretación de sensores de humedad por telemetría y papel de las hormonas en el crecimiento radical de las plantas. En general, se aportan suficientes datos a técnicos y productores agrícolas para poder realizar el proceso completo de fertirrigación.

La tendencia de la agricultura actual es aproximarnos lo más posible al rendimiento y calidad máximos posibles del cultivo, manteniendo en todo momento un equilibrio con el medio ambiente que evite la degradación de los recursos naturales. En los últimos años nos encontraremos con dos grandes vías de avance tecnológico: la expansión de la electrónica e informática aplicadas a la agricultura (equipos automáticos de fertirrigación, controladores climáticos, fitomonitores, sondas y sensores de múltiples parámetros de control), y creación o adaptación de nuevos genotipos de cultivos y técnicas que permiten un mejor aprovechamiento de los recursos y mejoramiento de la producción y calidad de las cosechas.

Consideramos que actualmente se ha producido un desfase entre la electrónica e informática y el lento incremento de conocimientos respecto a la aplicación óptima de fertilizantes por los sistemas de riego presurizados. Se sigue trabajando en muchos casos con sistemas tradicionales de fertilización, considerando kilos por hectárea y no las concentraciones optimizadas de nutrientes en las disoluciones para el objetivo que se persigue en cada etapa fenológica del cultivo.

El término fertirrigación, engloba la nutrición hídrica y mineral de los cultivos y sobre su concepto se concentra buena parte de los avances técnicos que sustentan el desarrollo de la agricultura intensiva. Fertirrigación significa literalmente, aplicación simultánea del agua de riego y los fertilizantes. Esta técnica, abre nuevas posibilidades para controlar el suministro hídrico y nutricional de los cultivos de tal forma de optimizar la distribución y concentración de los iones y agua en el suelo e impactar positivamente en el rendimiento y calidad.

En un sistema de fertirrigación se pueden controlar fácilmente la parcialización, la dosis, la concentración y la relación de los fertilizantes aplicados. Existen muchas evidencias experimentales acerca de las ventajas de la fertirrigación. Entre las variables más importantes de conocer y manejar adecuadamente en el fertirriego, es fundamental disponer de un buen diagnóstico y realizar monitoreo del estado nutrimental del suelo, del cultivo y de las aguas de riego. También es importante identificar las etapas fenológicas y objetivos a lograr con el cultivo, para luego definir un programa nutricional que implica la elección de los fertilizantes y concentración más adecuada para cada etapa fenológica. La información que entrega este libro está referida a todos los aspectos señalados precedentemente y que permiten diseñar un programa de fertirriego a la medida de las necesidades específicas de cada productor.

Prof. IVÁN VIDAL

Marzo 2019, Chillán, Chile.

Capítulo 1

Nutrición de las plantas



1. ROL DE LOS FERTILIZANTES

Producir alimentos es la más importante actividad humana y los fertilizantes son responsables del 40% de la producción mundial de alimentos. Es decir, para disponer de la cantidad de alimentos que actualmente se produce, sin fertilizantes, sería necesario el doble del área de suelos cultivados en la actualidad.

A nivel mundial no existe la capacidad de incorporar nuevos suelos a la agricultura, incluso su disponibilidad ha ido disminuyendo consecuencia de procesos de degradación, tales como erosión, salinización, desertificación y otros.

En consecuencia, sin el empleo de fertilizantes, se requeriría otro planeta tierra para suministrar los alimentos que el hombre requiere en la actualidad. Un esquema basado en el reciclaje, tal como la agricultura orgánica, no compensa adecuadamente la exportación de nutrientes y no constituye una solución a nivel global.

En los últimos 50 años, la utilización de fertilizantes se ha incrementado casi 10 veces, llegando actualmente a más de 180 millones de toneladas. La disyuntiva que se presenta para los próximos 20 años es: ¿Que hacer para reponer los requerimientos de los cultivos y mantener un balance de nutrientes?; ¿Cómo aprovechar el potencial genético de nuevas variedades?; ¿Cómo maximizar la utilidad y minimizar costos por tonelada producida?. La respuesta no es la utilización de más fertilizantes, sino que el empleo de fertilizantes más eficientes e incorporación de nuevas tecnologías que permitan la optimización de la nutrición de los cultivos tales como la fertirrigación.

2. NUTRIENTES VEGETALES

La productividad de los cultivos está determinada por muchos factores. Cuando un productor logra maximizar todos los factores de crecimiento, la planta manifestará el máximo de su potencial genético, obteniéndose una alta productividad. En la actual economía global, el conocimiento tecnológico agrícola, se torna cada vez más imprescindible para que los productos obtenidos sean competitivos en precio, calidad, inocuidad y su producción cumpla con las respectivas regulaciones ambientales. Las improvisaciones, que tienen como consecuencia pérdidas de rendimiento y menor rentabilidad, no pueden ser admitidas considerando la actual disponibilidad de información. En el caso de la nutrición mineral de las plantas, es posible prevenir excesos que causan salinización del suelo, o bien prevenir deficiencias de nutrientes, imposibilitando que la planta manifieste todo su potencial genético.

La nutrición vegetal tiene una importancia única en el ámbito de la vida en la tierra y en las actividades del género humano. Todos los seres vivos están compuestos por átomos de elementos químicos. El reservorio básico de estos elementos en la tierra son las rocas, los océanos y la atmósfera. Las rocas se desintegran formando suelo; los océanos suministran el agua, por medio del ciclo hidrológico a la atmósfera, a lagos, ríos y suelos. El mundo vivo explora en busca de estos elementos minerales que pasan a formar parte de bosques, cultivos, frutales y finalmente al hombre.

No todos los seres vivos participan en la utilización directa de los minerales- materia prima de la vida-. Solamente las plantas y ciertos microorganismos tienen la capacidad de extraer compuestos inorgánicos simples e iones del ambiente, sin tener que disponer de compuestos complejos ricos en energía, previamente sintetizados por otros organismos vivos. Estos organismos autosuficientes se conocen como autotrofos, a diferencia de los heterotrofos, que deben contar con metabolitos orgánicos “prefabricados” por autotrofos. Los agentes más relevantes en la adquisición de elementos químicos y energía primaria desde el ambiente externo son los organismos fotosintéticos: algas, algunas bacterias acuáticas y las plantas.

Por medio de la actividad de estas plantas, el nitrógeno, potasio, fósforo, azufre, calcio, magnesio y otros elementos esenciales, son inicialmente separados del suelo e incorporados a células y tejidos vivos. Después de esta absorción inicial, los nutrientes y otros elementos pueden encontrar su camino en dirección al interior de las células de organismos consumidores, como herbívoros, carnívoros, organismos descomponedores y, posteriormente, volver a constituir reservas no vivas en la materia orgánica del suelo.

En síntesis, con respecto a la importancia de la nutrición vegetal, Epstein y Bloom (2006), señalan lo siguiente:

- Todo el mundo vivo depende de las plantas y de su habilidad para asimilar sustancias inorgánicas del suelo.
- Toda la “carne es hierba”.
- “La cadena de la vida se teje en un telar del suelo”.
- La biblia señala, “polvo eres y en polvo te convertirás” (polvo = minerales).

Los vegetales absorben del suelo los elementos necesarios para completar su ciclo vital. Las plantas demandan nutrientes de la solución de suelo y, al ser cosechadas, exportan parte de estos nutrientes, empobreciéndolo.

Todos los elementos presentes en la solución del suelo, pueden estar presentes en los vegetales. El carbono, oxígeno, provenientes del anhídrido carbónico e hidrógeno provenientes del agua, son conocidos como constituyentes orgánicos. El resto son elementos minerales. Estos elementos presentes en la planta se clasifican en tres grupos.

2.1. Elemento esencial o nutriente

Sin ellos la planta no completa su ciclo vital. Para saber si un elemento es esencial, Arnon y Stout en 1939 establecieron los criterios de esencialidad. Un elemento es esencial cuando satisface los criterios directo e indirecto, en forma conjunta o no. Por criterio directo, corresponde a que el elemento debe ser parte de un compuesto o de una reacción relevante (enzimática o no) para el metabolismo y, por consiguiente, para la vida del vegetal. Si el criterio directo es satisfecho, el elemento es considerado esencial o nutriente. El criterio indirecto se cumple, cuando con la ausencia del elemento en la planta, ésta muere antes de completar su ciclo; el elemento no puede ser sustituido por ningún otro y, finalmente, los efectos no deben estar relacionado con el mejoramiento de condiciones físicas, químicas o biológicas desfavorables del medio. Para verificar que dicho elemento cumple con el criterio indirecto, se procede a cultivar la planta en una solución nutritiva con y sin la adición del elemento en estudio. En caso que la planta no complete su ciclo, se aplican otros elementos semejantes. Finalmente, se aplica en forma foliar y si la planta responde y consigue completar su ciclo vital, se trata de un elemento esencial para el vegetal.

La lista de nutrientes que satisface el criterio directo y/o indirecto, es la siguiente:

Macronutrientes: N, P, K, Ca, Mg, S

Micronutrientes: B, Cl, Co, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Se, Zn.

Dentro de los elementos indicados, los más recientes incluidos en la lista corresponden a cobalto, níquel y selenio. La esencialidad del cobalto es debido a que es un componente de la isomerasa de metil malonil-CoA, que está implicada en la biosíntesis del núcleo fisiológico de la clorofila, y también es un componente de la vitamina B₁₂ y derivados.

El níquel (Ni), satisface el criterio directo de esencialidad porque es un componente de la ureasa. En ausencia de Ni, la planta manifiesta síntomas de toxicidad de urea. El selenio participa en la composición del aminoácido selenocisteína.

Los nutrientes esenciales cumplen funciones muy específicas en la planta ya sea, como constituyente de la materia orgánica, como activador de reacciones enzimáticas o como transportador de carga u osmoregulador.

De esta manera, nitrógeno, azufre y fósforo forman parte de proteínas y ácidos nucleicos; magnesio y micronutrientes pueden ser constituyentes de materia orgánica principalmente enzimas o estar involucrados como catalizadores en reacciones enzimáticas; y potasio, mantiene el equilibrio electroquímico, actúa como osmoregulador y también tiene un importante rol en la activación de muchas enzimas. Además de la incidencia de factores externos en la absorción también hay factores intrínsecos del vegetal gobernados por el material genético; así los requerimientos de estos nutrientes minerales son específicos para cada especie y las concentraciones pueden variar considerablemente dependiendo de la edad de la planta y la concentración de otros elementos esenciales.

Se debe destacar que los estudios sobre nutrición mineral de las plantas han evidenciado que la respuesta de las mismas a las concentraciones de elementos esenciales (curva de crecimiento), está caracterizada inicialmente por un aumento en el crecimiento a medida que aumenta la concentración (rango deficiente), hasta llegar un rango óptimo donde el crecimiento se mantiene estableciéndose una meseta (rango adecuado), pero luego concentraciones mayores provocan efectos negativos en la planta y el crecimiento disminuye (rango de toxicidad). A través del análisis foliar es posible efectuar una evaluación del estado nutricional de las plantaciones.

En los Cuadros 1.1 y 1.2, se pueden observar los elementos esenciales, la forma en que son absorbidos, su función en los vegetales, movilidad dentro de la planta y síntomas de deficiencia.

No se puede decir que la lista esta completa, pues a medida que avanzan los conocimientos de bioquímica e instrumental analítico más precisos, otros elementos pueden pasar a ser parte de esta lista, pero será abligatoriamente un micronutriente.

Cuadro 1.1. Elementos esenciales, formas de absorción y función en la planta.

Nutriente	Forma de absorción	Función en la planta
C, H, O, N, S	HCO ₃ ⁻ , NO ₃ ⁻ , NH ₄ ⁺ , SO ₄ ²⁻ (solución de suelo) N ₂ , O ₂ , CO ₂ , SO ₂ (atmósfera)	Constituyentes de sustancias orgánicas
P B	H ₂ PO ₄ ⁻ H ₃ BO ₃	Reacciones de transferencia de energía y movimiento de carbohidratos
K, Mg, Ca, Cl	K ⁺ , Mg ²⁺ , Ca ²⁺ , Cl ⁻	Funciones no específicas, o componentes específicos de compuestos orgánicos o mantención del balance iónico y potencial osmótico. Controladores de la permeabilidad de las membranas y electropotenciales.
Co, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Se, Zn	Co ²⁺ , Cu ²⁺ , Fe ²⁺ , Mn ²⁺ , MoO ₄ ²⁻ SeO ₃ ²⁻ , SeO ₄ ²⁻ , Ni ²⁺ , Zn ²⁺ , Quelato	Transporte electrones y constituyente o activador enzimático

Cuadro 1.2. Contenido de nutriente en planta, función, movilidad dentro de la planta y síntomas de deficiencia.

Contenido en planta	Función	Movilidad en planta	Síntomas de deficiencia
N (1-5 %)	Constituyente de Proteínas (enzimas, nucleoproteínas), aminoácidos, clorofila	Muy móvil	Clorosis, amarillamiento en hojas viejas
P (0.1 - 0.4 %)	Almacenamiento y transferencia de energía (ATP, ADP). Constituyente de Ac. nucleicos, fitina, fosfolípidos.	Muy móvil	Color verde oscuro de follaje, rojo o púrpura en hojas viejas o peciolos
K (1-5 %)	Translocación, apertura de estomas, balance de cationes y aniones, relación hídrica energética. Activador de enzimas.	Móvil	Hojas viejas clorosis y necrosis cerca de márgenes, clorosis internerval
S (0.1 - 0.4 %)	Síntesis de aminoácido y proteínas. Constituyente de aminoácidos, proteínas, coenzimas, etc.	Variable movilidad	Clorosis general, 1° en hojas jóvenes
Ca (0.2 - 1 %)	Mantenimiento de la membrana, división y elongación celular, balance catiónico y aniónico, osmoregulación. Activador enzimático.	Inmóvil	Bitter pit en frutales, pudrición apical del tomate, puntas quemadas de hojas.
Mg (0.1 - 0.4 %)	Constituyente de la clorofila, sint. de proteínas, activa enzimas. Constituyente de clorofila, ribosomas.	Móvil	Clorosis intervenal en hojas viejas
B Monocotiledóneas: 6 - 18 ppm Dicotiledóneas: 20 - 60 ppm	Metabolismo de hidratos de C, RNA, DNA	Inmóvil	Muerte de puntos de crecimiento, hojas mal formadas, frutos deformes, peciolos débiles.
Fe (50 - 250 ppm)	Activa enzimas (citocromos). Producción de clorofila. Oxido-reducción en transporte electrónico.	Inmóvil	Clorosis internerval, 1° hojas jóvenes.
Mn (20 - 500 ppm)	Activa enzimas, metabolismo de COOH ⁻ , en reacciones de fosforilación, constituyente de cloroplastos	Inmóvil	Clorosis intervenal y necrosis en hojas jóvenes

Continuación Cuadro 1.2.

Contenido en planta	Función	Movilidad en planta	Síntomas de deficiencia
Cu (5 - 20 ppm)	Síntesis de lignina, reacciones redox, formación de polen y fecundación	Lenta movilidad	Muerte de hojas jóvenes, clorosis, fallas fertilización, lignificación irregular.
Zn (25 - 150 ppm)	Activa enzimas. Metabolismo de auxinas, sint. de nucleótidos. Constituyente de enzimas.	Lenta movilidad	Poco follaje, hojas arrossetadas, clorosis, moteado.
Mo (< de 1 ppm)	Fijación de N, reducción del NO_3^- absorbido. Activa nitrogenasa, nitrato reductasa.	Lenta movilidad	Amarillamiento.
Cl (0.02 -0.2 %)	Función no clara. Exceso perjudica a solanáceas	Móvil	
Ni (0,05-5 ppm)	Componente de enzimas, particularmente ureasa, que metaboliza el nitrógeno ureico para convertirlo en amonio utilizable dentro de la planta.	Móvil	Deficiencia de Ni causa toxicidad de urea. En leguminosas se presenta como clorosis en hoja completa y necrosis. En nogal los folíolos tienen puntas redondeadas y manchas necróticas en los bordes de las hojas. Síntomas "oreja de ratón".
Co (0.02 - 0.5 ppm)	Participa como catalizador de enzimas que ayudan a la fijación de nitrógeno en leguminosas. Inhibe síntesis de etileno. Participa en la leghemoglobina presentes en lo nódulos radiculares fijadores de nitrógeno de las leguminosas. Activa enzimas, forma parte vit B12		
Se (0.2 -0.3 ppm)	Forma parte de proteínas como selenometionina, selenocisteína		

2.2. Elemento benéfico

Sin el elemento la planta vive y completa su ciclo vital, sin embargo, en ciertas condiciones, su presencia puede ayudar al crecimiento y aumentar la producción. Sílice y Sodio son considerados como elementos benéficos.

En los últimos años, el sílice (Si) ha atraído la atención de los científicos y han informado de sus efectos benéficos en incrementar la resistencia y/o tolerancia de las plantas a estrés bióticos y abióticos. Se ha demostrado su efectividad para mitigar múltiples estrés abióticos como salinidad, sequía, anegamiento, heladas, altas temperaturas, radiación ultravioleta y estrés por deficiencia o toxicidad de nutrientes. La aplicación de Si como fertilizante también puede incrementar la resistencia de las plantas a plagas y enfermedades e incrementar su potencial productivo. No obstante, se requiere mayor investigación para entender los mecanismos involucrados en el rol del Si en la biología de las plantas, puesto que aún no son completamente entendidos.

Respecto al sodio (Na), para el ser humano y los animales, es un elemento fundamental para el mantenimiento del equilibrio iónico y la presión osmótica en las células y fluidos corporales, entre otras funciones; sin embargo, sorprende que no cumpla funciones tan vitales en las plantas y que sólo se haya reconocido como nutriente esencial en especies C4 y para la mayoría es considerado un elemento beneficioso. En funciones similares a las desempeñadas por el sodio —como electrolito— en los animales, la mayoría de las plantas prefieren el potasio.

2.3. Elemento tóxico

Tanto los elementos esenciales como benéficos pueden ser tóxicos para los vegetales cuando están presentes en concentraciones excesivas en el medio. Pero un elemento definido como tóxico no puede pertenecer a ninguno de los otros grupos. Estando presente sobre una determinada concentración tiene efectos negativos sobre el crecimiento del vegetal. Este puede ser natural, como el aluminio o adicionado al suelo por la actividad humana. Es numerosa la lista de los elementos tóxicos, los principales son: arsénico, cadmio, cromo, plomo, mercurio, estroncio y otros.

Existen otros elementos que comúnmente pueden generar toxicidad en las plantas, tales como cloro, sodio y boro. El cloruro es requerido por las plantas en cantidades mínimas y la mayoría de las fuentes de agua contienen la concentración de cloruro por encima y más allá de lo que las plantas requieren, por lo tanto, la deficiencia de este elemento es extremadamente rara. Entre los problemas relacionados con cloruro, son más comunes los de toxicidad más que deficiencias. Por lo tanto, el uso de fertilizantes que contienen cloruro es poco común en hidroponía y cultivos intensivos bajo invernadero.

También, el sodio puede ser muy perjudicial en sistemas de recirculación, ya que se acumula con el tiempo en la solución hidropónica.

Este tipo de toxicidad se presenta cuando el ion es asimilado y acumulado en los tejidos de la planta hasta niveles que puedan ocasionar daños o reducir su productividad. Cuando se utilizan aguas residuales para regar, los iones presentes que más preocupan son el sodio, los cloruros y el boro. De estos la toxicidad de mayor incidencia es la del boro y la de los cloruros.

Elevados contenidos en sodio pueden afectar a las plantas y también producir problemas de permeabilidad en los suelos. El efecto perjudicial del sodio se puede contrarrestar con elevados contenidos en calcio en el suelo. Algunos de los cultivos más sensibles al sodio son el almendro, el palto, los frutales de hueso y los cítricos. Contenidos foliares de sodio superiores a 0.3-0.5 % suelen indicar problemas de toxicidad en la mayoría de los frutales.

Respecto a los cloruros en general aguas con un contenido de cloruros inferior a 140 mg/l no presentan problemas, de 140 a 350 mg/l los problemas aumentan y los valores superiores a 350 mg/l pueden ocasionar toxicidad grave. Estos valores son orientativos y el problema se puede más o menos resolver impidiendo la acumulación de cloruros en el suelo y manteniendo una fracción de lavado adecuada.

El boro también puede causar síntomas de toxicidad en determinadas áreas provocando graves daños a las plantas, debido, por ejemplo, al uso de agua de riego contaminada con una alta concentración de este elemento. Dicha contaminación puede ser provocada por: vertidos urbanos (ricos en detergentes); vertidos industriales y productos químicos utilizados en la agricultura. Las concentraciones de boro en agua de riego menores de 0,70 mg/L B, suelen ser beneficiosas para la mayoría de las plantas y, sin embargo, los valores comprendidos entre 1,0 y 4,0 mg/L B producen necrosis celular siendo inadecuadas para los vegetales.

Los cultivos pueden clasificarse, atendiendo a la concentración máxima permitida de boro en el agua de riego, en tres categorías por orden de tolerancia creciente:

a) Cultivos sensibles (0,3-1,0 mg/L): nogal, manzano, cerezo, limonero, naranjo, peral, durazno, pomelo, palto, ciruelo, higuera y vid.

b) Cultivos semitolerantes (1,0-2,0 mg/L B): cebada, alfalfa, repollo, zanahoria, lechuga, cebolla, papas, calabaza, espinaca, tabaco, olivo, rosal, tomate y trigo.

c) Cultivos tolerantes (2,0-4,0 mg/L B): espárrago, arándano, algodón, pepino, gladiolo, sésamo, tulipán, remolacha, haba, pasto y menta.



Figura 1.1. Toxicidad de cloro en vid.



Figura 1.2. Toxicidad de sodio en vid.



Figura 1.3. Toxicidad de cloro en frambuesa.

Cuadro 1.3. Clasificación del riesgo de toxicidad por cloruro en agua de riego

Cloruro		Efecto sobre los cultivos
mg/L	meq/L	
<70	<2,0	Generalmente seguro para todas las plantas.
70-140	2,0-4,0	Las plantas sensibles muestran lesiones.
141-350	4,0-10,0	Plantas moderadamente tolerantes muestran lesiones.
>350	+10,0	Puede causar problemas graves.

3. ACCESO DE LOS NUTRIENTES A LAS RAÍCES

La proporción en que son absorbidos los elementos minerales es, en ocasiones, muy distinta a la existente en el medio. Algunos son acumulados en concentraciones varias veces superiores a las del medio, mientras que otros son prácticamente excluidos de la planta.

Los procesos y factores que contribuyen a la transferencia de los nutrientes del suelo a las plantas son variados, e involucran a la raíz, la concentración de los iones en la rizósfera, el ambiente y la actividad de los microorganismos del suelo.

Debido al continuo desarrollo del sistema radical para explorar nuevas zonas del suelo, las raíces son capaces de crecer, en proporciones mayores a las distancias que pueden difundir los iones a través del suelo. Es probable que las raíces jóvenes estén, generalmente rodeadas de mayores concentraciones de nutrientes que las raíces maduras, lo que favorece la absorción nutricional.

Las raíces que participan activamente de la absorción de agua y nutrientes, están permanentemente renovándose y tienen una vida de algunas pocas semanas. Ello se puede visualizar en la Figura 1.4, donde una raíz de manzano está completamente activa al día 1, a los 17 días esta madura y a los 50 días esta muerta.

Para que se lleve a cabo esta renovación natural del sistema radical, deben estar presentes óptimas condiciones físicas y químicas del suelo. Factores físicos de relevancia son la aireación, humedad y resistencia a la penetración. En tanto, en el aspecto químico, el nutriente de mayor incidencia en el desarrollo del sistema radical, corresponde al calcio (Figura 1.5).



Figura 1.4. Envejecimiento de una raíz de manzano. Día 1, 17 y 50 (Marangoni, 2006).



Figura 1.5. Efecto de la carencia de nutrientes sobre el crecimiento radical.

En el acceso de los nutrientes hacia la raíz, es decir, la forma en que llegan a ponerse en contacto con la superficie externa de la raíz (rizoplasma), se plantean tres rutas que son: Intercepción, Flujo de masas y Difusión. Cada una con características específicas. No confundir estos mecanismos con el proceso de absorción propiamente tal, que corresponde a la entrada de los iones al interior de las células del sistema radical, lo cual se explicará más adelante.

Intercepción por las raíces: Las raíces en crecimiento entran en contacto con los nutrientes disponibles. Este mecanismo presenta una contribución muy pequeña en un suelo, pero al aumentar la densidad de raíces, como ocurre en los cultivos en sustrato o en macetas, puede ser un mecanismo predominante.

Flujo de masas: Es un proceso pasivo, y la cantidad de iones que se acumulen en la raíz dependerá de la concentración de los nutrientes en la solución del suelo y de la tasa de evapotranspiración de la planta. La cantidad de un nutriente en la rizósfera puede incrementar, mantenerse constante o disminuir, dependiendo del balance entre el suministro a la raíz por flujo de masa y su tasa de absorción. Este mecanismo se produce cuando se desplaza la disolución acuosa para reemplazar la cantidad de agua absorbida por las raíces. NO_3 , SO_4 , K, Ca, Mg, B, Cl se mueven principalmente por flujo de masas, rápido y a larga distancia (20-30 cm/semana). El movimiento de agua aproxima estos nutrientes a las raíces.

Difusión: Es el movimiento de un nutriente de una región de mayor concentración a otra de menor concentración a través de un gradiente. Cuando la concentración de un nutriente en las superficies de las raíces es menor que en la disolución acuosa del medio de cultivo, los iones se desplazan hacia los puntos de baja concentración hasta alcanzar un equilibrio. En el caso del P, NH_4 , Zn, Mn, Cu, Fe y Ni, este mecanismo es el predominante en los suelos, debido a la baja concentración que alcanzan en la disolución de suelo. Corresponde a movimiento de corta distancia (mm/semana), lento, de baja movilidad en el suelo. Raíces y nutrientes deben estar prácticamente en el mismo lugar.

El Cuadro 1.4 muestra una estimación del acceso nutricional por intercepción, flujo de masas y difusión.

Cuadro 1.4. Porcentaje aproximado del acceso nutricional por intercepción, flujo de masas y difusión.

Nutriente	Intercepción	Flujo de masas	Difusión
Nitrógeno	1-2	80-98	0-20
Fósforo	2-3	5-6	90-92
Potasio	1-2	17-20	78-80
Calcio	28-30	70-72	-
Magnesio	13	87	-
Azufre	2-5	95-98	-
Boro	3	65	32
Cobre	70	20	10
Hierro	50	10	40
Manganeso	15	5	80
Molibdeno	5	95	-
Cinc	30	30	40

4. ABSORCIÓN Y TRANSPORTE MINERAL

La composición de una planta no refleja completamente su medio circundante. Por ejemplo, el potasio constituye cerca del 1% de la materia seca de un vegetal, siendo unos de los elementos más abundantes en el tejido vegetal, y la concentración en la solución de suelo frecuentemente es menor a 0,005% (50 mg/L o 1,28 mM) siendo superada normalmente por la concentración de calcio y magnesio. En suelos de regiones áridas y semiáridas, las concentraciones de sodio pueden superar con creces las concentraciones de potasio, no obstante, los tejidos vegetales contienen normalmente mucho más potasio que sodio.

La distancia entre una célula vegetal de la raíz y su medio externo, puede ser tan pequeña como una fracción de un micrón (una millonésima de un metro). Debido a estas cortas distancias, la agitación térmica del solvente (agua) y solutos (nutrientes) resultaría en una rápida mezcla de las dos soluciones, a menos que una barrera impermeable estuviese presente para impedir la libre difusión. Esta barrera se denomina membrana plasmática o plasmalema. Sin esta membrana plasmática, las células vegetales serían inundadas por su ambiente externo.

El agua en su recorrido a través de la planta, desde la raíz hasta la hoja, sigue un gradiente descendente de potencial hídrico. Primero el agua pasa a las células epidérmicas, generalmente a través de un pelo radical, después migra a través de tejido de la raíz (corteza) hasta el cilindro central de la raíz, donde penetra en el tejido vascular. Para desplazarse a través de la corteza de la raíz, el agua y los solutos pueden tomar uno de los dos caminos principales; vía apoplasto o vía simplasto (Figura 1.6).

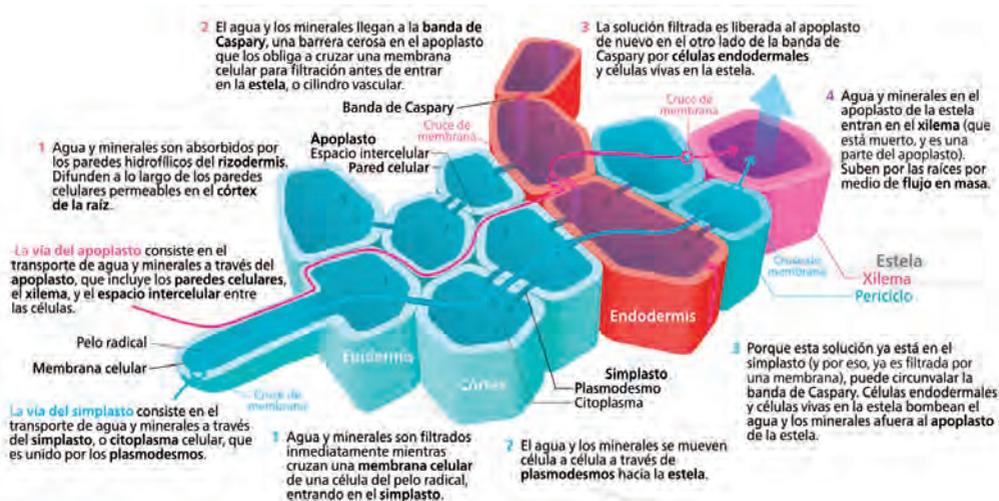


Figura 1.6. Rutas de acceso del agua y nutrientes via radical.

La absorción corresponde entonces a la actividad de adquisición o toma de iones a partir del suelo o de la solución nutritiva. El término absorción designa el paso de una sustancia del medio externo al interno de las células. Las membranas biológicas son totalmente permeables a pequeñas moléculas no cargadas como el agua y el oxígeno. Las moléculas grandes no cargadas, como la sacarosa, o moléculas cargadas, como los iones inorgánicos o los ácidos orgánicos, no pueden atravesar libremente las membranas celulares y su paso se produce por medio de canales o de transportadores, de los que cada ión posee su propio y único conjunto. La energía para realizar el transporte de solutos y mantener los gradientes electroquímicos las proporciona el ATP.

Se debe considerar que la absorción de determinados iones tiene una influencia directa sobre los iones de carácter recíproco. Así, si un ión determinado es absorbido intensamente en la célula radical, para mantener la neutralidad eléctrica, tienen que penetrar o salir de ella una cantidad equivalente de iones de carga contraria. El transporte siempre requiere energía y la fuente de energía es el metabolismo, que produce energía química y poder reductor.

Una vez que entran los iones a las células de la raíz, se lleva a cabo un transporte de solutos a larga distancia (raíces, tallos, hojas, frutos), que se rige por la transpiración. El agua es transpirada y reabastecida por la entrada de agua a la planta desde el suelo y como resultado, el agua fluye del suelo por las raíces, a través del tallo y llega a las hojas. Posteriormente, en la superficie de las células del mesófilo, el agua se evapora, o transpira y se difunde a la atmósfera a través de estomas.

Durante la vida de la planta la masa de agua que se mueve y se disipa a la atmósfera es muy grande. Muchos autores han medido esta "exigencia de agua" y la han situado entre 200 a 1000 litros por kilo de materia seca producida. Actualmente, es más común referirse

al recíproco de este valor que corresponde a “eficiencia de uso del agua”, y representa la cantidad de material vegetal producido por unidad de agua usada. Este valor corresponde a 0,005 a 0,001 o menos.

Estos números indican claramente que la transpiración es un proceso devastador y es el resultado de la evolución entre dos demandas contrapuestas: la necesidad de exposición de las células verdes a la luz y apertura de los estomas para permitir el ingreso de CO_2 a esas células.

Inevitablemente, al ser la humedad relativa dentro de la planta cercana al 100%, se genera una importante pérdida de agua por los estomas. Por otro lado, la transpiración sirve para facilitar el movimiento de nutrientes minerales desde las raíces a los tejidos de la parte aérea y para el enfriamiento de las plantas.

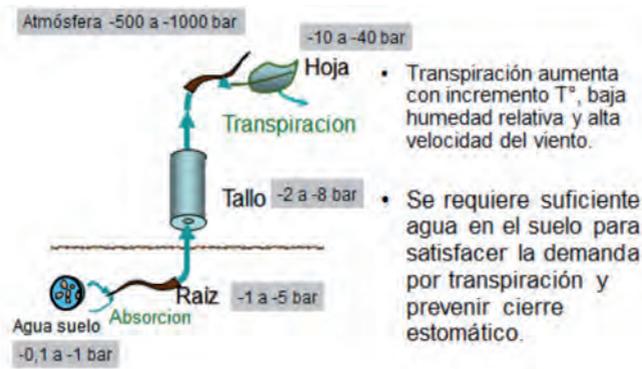


Figura 1.7. Movimiento de agua desde el suelo-planta-atmósfera en función del potencial hídrico.

5. MOVIMIENTO DESCENDENTE DE NUTRIENTES

Así como el movimiento ascendente de agua y solutos se lleva a cabo en el xilema, compuesto por traqueidas y vasos, células que han muerto y perdieron su contenido celular, por lo que están muy bien adaptadas al movimiento o transporte a larga distancia de una solución. Por el contrario, el movimiento descendente de sustancias producidas en las hojas es por medio de células alargadas en forma de tubos, llamados elementos tubulares crivados o elementos crivados, que son células vivas y contienen protoplasto y permiten el movimiento lateral.

La palabra empleada en el subtítulo, movimiento descendente, es estrictamente incorrecta. Ella es válida únicamente en el sentido que las raíces reciben los asimilados originados en las hojas. Este movimiento no aplica para los compuestos orgánicos que se pueden mover hacia arriba o lateralmente, dependiendo de la localización del órgano exportador o fuente, y del órgano receptor o demanda. Las hojas maduras son fuente primaria y los frutos son órganos de demanda.

Un órgano determinado, puede actuar como fuente o demanda en un momento dado, lo que dependerá de su contenido de material orgánico translocado, principalmente azúcares solubles. Los cambios en la dirección del movimiento en el floema ocurren naturalmente durante el crecimiento de la planta. Muchos factores determinan la dirección del transporte de asimilados por el floema. Por ejemplo, las hojas jóvenes en crecimiento, son órganos de demanda antes que maduren y, que ellas mismas, comiencen posteriormente a exportar asimilados. Los brotes nuevos y frutos, siendo no fotosintetizantes, caen en la misma categoría de todos los órganos inferiores de la planta como raíces, estolones y tubérculos.

Los principales solutos transportados por el floema corresponden a fotosintatos y otros metabolitos orgánicos. Respecto a los nutrientes inorgánicos, se ha demostrado que algunos elementos pueden ser retranslocados por el floema y otros no. La inmovilidad en el floema puede estar dada por la imposibilidad de esos elementos para penetrar los tubos crivados del floema. El Cuadro 1.5 aporta una idea general de los elementos que son catalogados como móviles, movilidad intermedia e inmóviles en el floema. Pero se debe entender que éstas no son categorías fijas, puesto que dependiendo del genotipo de la planta y muchos factores internos y externos, la movilidad de un elemento en el floema puede variar considerablemente (Cuadro 1.6). Especialmente aquellos catalogados como intermedios, en ciertas circunstancias podrían pertenecer a una categoría diferente.

Cuadro 1.5. Movilidad relativa de elementos minerales en el floema.

Elemento	Movilidad relativa	Categoría
Nitrógeno	100%	Móvil
Potasio	90%	Móvil
Fósforo	60-70%	Móvil
Magnesio	60%	Móvil
Azufre	50%	Intermedio
Manganeso	30-50%	Intermedio
Cinc	30-50%	Intermedio
Cobre	30-50%	Intermedio
Molibdeno	30-50%	Intermedio
Boro	20%	Inmóvil
Silice	10%	Inmóvil
Calcio	5%	Inmóvil

La movilidad de los nutrientes en el floema es consistente con la respuesta de la planta a las deficiencias. Como se observa en el Cuadro 1.5, el nitrógeno es altamente móvil en el floema. Cuando el suministro de este elemento es insuficiente, las hojas nuevas se transforman en un órgano de demanda y el nitrógeno es translocado vía floema desde las hojas maduras más viejas hacia las hojas jóvenes, que crecen vigorosamente. Como resultado, las hojas viejas muestran los síntomas de deficiencia de nitrógeno (aparición verde claro a amarillas), en tanto las hojas nuevas mantienen una apariencia normal. El potasio, fósforo y magnesio muestran un patrón similar y en menor medida el azufre.

Por el contrario, el calcio es inmóvil en el floema. Cuando el abastecimiento es bajo, la savia que asciende por el xilema liberará bajas cantidades a las hojas jóvenes, las que mostrarán síntomas de deficiencia de calcio (menor crecimiento y muerte de tejidos, especialmente en los puntos de crecimiento). Las hojas más viejas continúan sin síntomas, no siendo translocado el calcio via floema desde las hojas viejas a las jóvenes.

Cuadro 1.6. Concentraciones típicas de los componentes de la savia del xilema y del floema en plantas superiores (Epstein y Bloom, 2006).

Sustancia	Concentración (mg/L)	
	Xilema	Floema
Azúcares	Ausente	140.000-210.000
Aminoácidos	200-1.000	900-10.000
Fósforo	70-80	300-550
Potasio	200-800	2.800-4.400
Calcio	150-200	80-150
Magnesio	30-200	100-400
Manganeso	0,2-6,0	0,9-3,4
Zinc	1,5-7,0	8-23
Cobre	0,1-2,5	1-5
Boro	3-6	9-11
Nitrato	1.500-2.000	Ausente
Amonio	7-60	45-846

Podemos generalizar de la siguiente forma. Un elemento móvil cuando se torna limitante, resulta en síntomas en las hojas más viejas, al traslocarse el elemento por el floema hacia las hojas más jóvenes en desarrollo. Para un elemento inmóvil acontece lo inverso: cuando el abastecimiento es insuficiente los síntomas aparecen en las hojas jóvenes; las hojas más viejas retienen el nutriente, manteniendo una apariencia saludable.

Como conclusión, podemos señalar que, los elementos inmoviles (calcio, boro, cinc, manganeso y hierro) se mueven principalmente por el xilema en una sola dirección, son transportados por la corriente de transpiración, por consiguiente, los tejidos que pierden poca agua (frutos) son más sensibles a las deficiencias. Las implicancias de manejo son que deberíamos propender a un suministro permanente de estos elementos en toda la etapa de desarrollo y reproducción. Las aplicaciones foliares solamente tienen beneficio en tejido asperjado (Figura 1.8) y el crecimiento nuevo, posterior a aplicación no se beneficia y, por otro lado, estos elementos no pueden ser almacenados en la planta para uso posterior, es decir no constituyen reservas.

En tanto, los elementos móviles (nitrógeno, potasio, fósforo, magnesio, azufre) se mueven por el xilema y por floema (doble vía). Su movimiento en la planta esta determinado por la fotosíntesis y el crecimiento. La fertilización tiene un efecto más prolongado y pueden ser almacenados como reservas. Las hojas más viejas desarrollan primero la deficiencia.

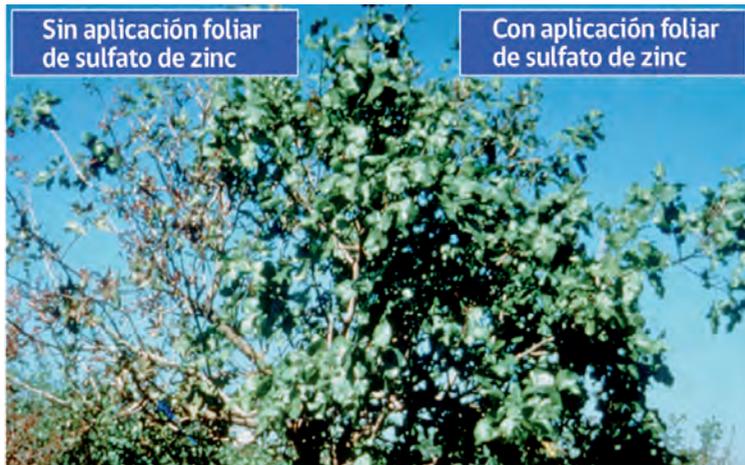


Figura 1.8. Efecto de la aplicación foliar de sulfato de zinc aspejado en la mitad de la planta. Se observa el efecto solamente en el tejido que recibió el producto. (P. Brown, U. California, Davis).

1. SITUACIÓN MUNDIAL DEL RECURSO HÍDRICO

Las áreas agrícolas bajo riego presurizado se están expandiendo a través del mundo. En China, India, Japón y Australia existe una expansión considerable de estos sistemas de riego. En algunos países, tal como Israel, donde la disponibilidad de agua es limitante para los cultivos, todo el riego es presurizado y más del 80% de la superficie regada usa el método de fertirriego. Estados Unidos es el país con mayor superficie fertirrigada y en la actualidad dispone de una superficie superior a 1.000.000 has, España es el segundo país con mayor superficie con esta técnica, y cuenta en la actualidad con una extensión superior a las 600.000 has de cultivo bajo fertirriego. Países como Australia, Sudáfrica, Israel, Italia, Egipto, México e India, también superan las 100.000 has con riego localizado. Actualmente, se estima una extensión aproximada de 8.000.000 has bajo fertirrigación y, la distribución mundial aproximada de la superficie bajo riego presurizado por cultivo es: frutales y viñas, 72%; Hortalizas, 16%; cultivos, 12% .

El área de riego mundial abarca cerca de 250 millones de hectáreas, equivalentes al 18% de la tierra cultivada, y produce cerca del 50% de los alimentos. Para el 2030 la producción de alimentos tendrá que duplicarse, según informes de la FAO, y es claro, que la agricultura de regadío deberá proveer el alimento adicional que demandará el planeta en las próximas décadas.



Figura 2.1. El recurso de tierras y aguas, base de nuestra producción alimentaria, son limitados.

Las proyecciones actuales indican que la población mundial pasará de los actuales 7.300 millones de personas a 8.500 millones en 2030. Además, el progreso económico, especialmente en los países emergentes, se traduce en un aumento de la demanda de alimentos y de dietas diversificadas. Por consiguiente, habrá un fuerte crecimiento de la demanda mundial de alimentos, y se prevé que la producción alimentaria deberá aumentar un 70 % en el mundo y un 100 % en los países en desarrollo. Sin embargo, los recursos de tierras y aguas, la base de nuestra producción alimentaria, son limitados y se encuentran ya sometidos a una gran presión, por lo que la futura producción agrícola tendrá que ser más productiva y, al mismo tiempo, más sostenible.

Actualmente, hay casi mil millones de personas con subnutrición. En los países en desarrollo, aún cuando se duplique la producción agrícola para el 2030, una persona de cada veinte seguiría corriendo el riesgo de sufrir subnutrición: una cifra equivalente a 370 millones de personas que padecerán hambre, la mayoría de las cuales se concentrarán en África y en Asia. Este aumento supondría que la agricultura sigue siendo un motor del crecimiento, vital para el desarrollo económico y fundamental para reducir la pobreza rural.

En el futuro la producción agrícola tendrá que crecer más de prisa que la población, para que mejore la nutrición y desaparezcan la inseguridad alimentaria y la subnutrición. Esto tendrá que producirse, en gran parte, en las tierras agrícolas actuales. Por lo tanto, las mejoras tendrán que provenir de una intensificación sostenible que haga un uso eficiente y no perjudicial de los recursos de tierras y aguas.

En relación a los recursos naturales, se han puesto de manifiesto problemas estructurales más profundos como la escasez de agua, la salinización y la contaminación de los cursos y masas de agua. En muchos grandes ríos solamente circula el 5 % de los antiguos caudales, y algunos, como el Huang He, ya no desembocan en el mar durante todo el año. Se ha reducido la extensión de los grandes lagos y los mares interiores, y la mitad de los humedales de Europa y América ya no existen. La escorrentía de los suelos erosionados causa colmatación en los embalses, lo que reduce el suministro de energía hidráulica y de agua. Las aguas subterráneas se están bombeando de forma intensiva, y los acuíferos están cada vez más contaminados y salinizados en algunas zonas costeras. Al mismo tiempo, el cambio climático aumenta los riesgos y la incertidumbre de los agricultores, por el calentamiento y la consiguiente aridez, por los cambios en los regímenes de precipitaciones y por la creciente incidencia de los fenómenos climatológicos extremos.

A lo referido con anterioridad, hay que agregar la creciente competencia por el agua. Alrededor de 500 millones de personas viven en regiones bajo estrés hídrico. El conflicto entre el campo y la ciudad se intensificará. Los agricultores pagan menos por el agua que los habitantes urbanos, y además el agua en la industria, genera un valor económico mucho más elevado, lo que traerá consigo, un aumento desmesurado de los precios de la misma.

Después de esta descripción del tema hídrico, basado fundamentalmente en informes de la FAO, queda perfectamente claro que el objetivo actual debe ser aumentar la productividad del agua, es decir, hacer más con el agua que tenemos a nuestra disposición. Para alimentar a la población en el 2030, debemos duplicar la productividad actual del agua.

Para lograr este propósito, ciertas tecnologías como el fertirriego, tienen un gran rol que cumplir, impulsando los sistemas de monitoreo, control y gestión del riego, incrementando la eficiencia de los cultivos, su nutrición e impulsar el riego por goteo y los sistemas de fertirrigación en general.

2. VENTAJAS Y DESVENTAJAS

La fertirrigación al aire libre o en invernadero ha propiciado un importante mejoramiento de los cultivos. Las principales ventajas de la fertirrigación se pueden resumir en lo siguiente:

- Reducida fluctuación de la concentración de nutrientes en el suelo a través de la estación de crecimiento.
- Facilidad de adaptar la cantidad y concentración de un nutriente específico respecto a los requerimientos del cultivo.
- Posibilidad de empleo de aguas y suelos de baja calidad: aguas y suelos salinos, suelos pedregosos, excesivamente permeables, etc.
- Posibilidad de aplicación de otros productos utilizando la infraestructura, como correctores, desinfectantes del suelo, herbicidas, nematocidas, fungicidas, reguladores del crecimiento, etc.
- Adecuado uso de mezclas de fertilizantes y/o fertilizantes líquidos balanceados con microelementos que son difíciles de distribuir en el terreno.
- Aplicación precisa de nutrientes de acuerdo a la demanda del cultivo por lo que se evita la concentración excesiva de fertilizante en el suelo y lixiviación fuera de la zona de humedecimiento.
- Aplicación de agua y fertilizantes solamente a un volumen determinado de suelo, donde las raíces están más activas, incrementándose la eficiencia del uso del fertilizante y reduciendo su impacto ambiental.
- Reducción en el tráfico de maquinaria agrícola en el campo.
- Fabricación “a la carta” de fertilizantes concentrados adaptados a un cultivo, agua de riego y condiciones climáticas durante todos y cada uno de los días del ciclo del cultivo.
- Fácil automatización de la fertilización.

Entre los posibles inconvenientes del sistema podemos citar:

- Costo inicial de la infraestructura. Sistema de inyección de fertilizantes, tanques y agitadores.
- Obturación de goteros y manejos inadecuados de otros elementos de la red de riego.
- Necesidad de manejo del sistema por personal especializado. Un mal manejo de la fertirrigación puede provocar daños como: acidificación, lavado de nutrientes y/o salinización del suelo.

Las grandes ventajas que aporta el sistema de fertirrigación compensan sobradamente los inconvenientes citados que, por otra parte, pueden tener una solución relativamente simple. El costo inicial se puede amortizar en poco tiempo y la obturación de goteros se puede evitar si se sigue una tecnología de fertirrigación adecuada. El problema de formación del personal se puede resolver mediante cursos de formación y obras de divulgación escritas por los especialistas que puedan informar de sus propias experiencias.



Figura 2.2. Componentes de un sistema de fertirrigación: Estanques, inyector de fertilizantes y agitador.

3. FERTILIZACIÓN CONVENCIONAL VERSUS FERTIRRIEGO

El enfoque nutricional para un cultivo de secano o bajo riego gravitacional, no es el mismo que para fertirriego. En los sistemas bajo fertirrigación interesa conocer la disponibilidad actual de cada nutriente. Estos sistemas ofrecen la posibilidad de reponer el agua y los nutrientes cada vez que se considere oportuno, por lo tanto, el rol del suelo como reserva de nutrientes y agua pasa a un segundo plano.

En los sistemas tradicionales, interesa conocer no solo la disponibilidad actual de los nutrientes, sino también, la disponibilidad que tendrán a través del ciclo del cultivo.

Este enfoque permite extraer una serie de conclusiones que se especifican en el Cuadro 2.1.

Cuadro 2.1. Diferencias en el enfoque nutricional entre fertilización convencional y fertirrigación.

Fertilización convencional	Fertirrigación
<p>No se puede sincronizar adecuadamente el aporte de fertilizantes con la demanda de la planta. Gran parte de la fertilización la recibe el cultivo al inicio del ciclo y existen dificultades operativas para aportar y localizar adecuadamente los fertilizantes. Se realizan 1 a 3 aplicaciones de fertilizante en la temporada.</p>	<p>Se tiene la posibilidad de poner directamente a disposición de la raíz una solución balanceada de nutrientes que se adapte a la demanda del cultivo. Esta solución interacciona con el suelo y se establece un equilibrio dinámico entre los nutrientes de la solución del suelo y el complejo de intercambio. Idealmente, la aplicación de fertilizantes se hace en cada riego.</p>
<p>Resulta imprescindible que el suelo sea más o menos fértil para aportar los nutrientes durante el ciclo del cultivo.</p>	<p>No es estrictamente necesario que el suelo tenga alta fertilidad, basta con que sea capaz de mantener adecuada oxigenación de la raíz. Por ejemplo, un suelo arenoso con un adecuado diseño de riego es perfectamente cultivable bajo fertirriego.</p>
<p>Interesa saber la disponibilidad de nutrientes que existirá durante el ciclo del cultivo. Por consiguiente, la evaluación analítica debe estar basado en extractantes que simulen el potencial de la raíz para ir extrayendo nutrientes del suelo.</p>	<p>Lo que interesa conocer es la disponibilidad actual de los nutrientes. Su seguimiento analítico debe estar basado en la determinación de los nutrientes en la solución de suelo, que son los que la planta puede absorber en forma inmediata.</p>
<p>La evaluación de la fertilidad del suelo se debe basar en análisis convencional de los nutrientes y su fracción intercambiable, en el caso de los cationes. Ello representa el “almacén” o reservas de nutrientes para el ciclo de cultivo.</p>	<p>El seguimiento analítico se debe basar en análisis de extracto 1:2, extracto saturado o sonda de succión.</p>
<p>Además de nutrientes disponibles, existen otros requisitos para captar estos nutrientes disponibles como: sanidad, adecuada temperatura y humedad, aireación del suelo, buena estructura del suelo y desarrollo de raíces.</p>	<p>Iguals requisitos para captar en forma óptima los nutrientes como son: sanidad, adecuada temperatura y humedad, aireación del suelo, buena estructura del suelo y desarrollo de raíces.</p>
<p>Los programas de fertilización se realizan en base a las extracciones que se estima va a tener el cultivo y reponerlas entre un ciclo y otro. Se fertiliza y riega en forma independiente.</p>	<p>El objetivo es tener un balance y concentraciones de nutrientes optimizados en la solución de suelo. Hay que elaborar soluciones nutritivas de concentración y equilibrios adaptados a los intereses del cultivo. No se fertiliza, no se riega, se fertirriega.</p>
<p>Aprovechamiento de los nutrientes muy inferior a sistema bajo fertirrigación.</p>	<p>Aprovechamiento de los nutrientes muy superior a sistema convencional y mayor impacto productivo y calidad de los productos.</p>

4. VOLUMEN DE SUELO EXPLORADO POR LAS RAÍCES

En general, en fertirriego el aporte del suelo se considera menor como consecuencia de que el volumen explorado por las raíces está circunscrito normalmente al bulbo de humedecimiento. Es importante destacar que la forma y dimensiones del patrón de humedecimiento es importante para determinar el volumen de suelo ocupado por las raíces y, a su vez, conocer su influencia sobre el suministro de agua y nutrientes para el cultivo.

Este patrón de humedecimiento depende básicamente de:

- La textura y estructura del suelo.
- El perfil físico del suelo y la estratificación.
- Topografía del terreno
- Tipo de emisor (forma de distribuir el agua y caudal unitario).
- Volumen de agua aplicada durante un riego.
- Estado de humedad del suelo.

La acción conjunta de estos factores, unos con mayor incidencia que otros según el caso, influirá en el desplazamiento del flujo de agua tanto en profundidad como en el plano horizontal. Una textura fina (franco arcillosa y/o arcillosa) generará un desplazamiento del flujo de agua más horizontal que vertical. El patrón de humedecimiento generado tendrá, por tanto, un mayor desarrollo superficial, en comparación con la profundidad.

Todo lo contrario se producirá en una textura gruesa (franco arenosa y/o, arenosa) donde el volumen húmedo adoptará una forma más vertical en detrimento de la superficie húmeda.

En consecuencia, según sea el perfil de suelo, el volumen húmedo que se genere puede adoptar formas variadas e irregulares.

El caudal de un emisor es directamente proporcional al desplazamiento horizontal del flujo e inversamente proporcional a la profundidad alcanzada. La razón de este comportamiento está en el estado de saturación que se produce en el suelo, con reducción de la velocidad de infiltración vertical del agua, la cual se ve obligada a desplazarse horizontalmente. Cuanto más caudal proporcione un emisor, mayor es la superficie húmeda y menor la profundidad en que llega el frente de humedad. Complementariamente, habría también una mayor profundización del frente húmedo cuando la textura sea más gruesa. A medida que aumenta el tiempo de riego y por tanto la cantidad de agua aplicada, aumenta también la superficie y la profundidad mojada del volumen húmedo.

Es de gran importancia mantener un volumen de suelo en la zona radicular de las plantas con un buen contenido de humedad. En general, numerosos estudios previos han establecido que un frutal bajo microrriego puede dar rendimientos óptimos con 30-50% del sistema radicular bien regado y fertilizado convenientemente. El diámetro humedecido por el gotero está asociado, como se señaló anteriormente, al tipo de suelo caudal del emisor y se puede determinar mediante el gráfico siguiente (Figura 2.3):

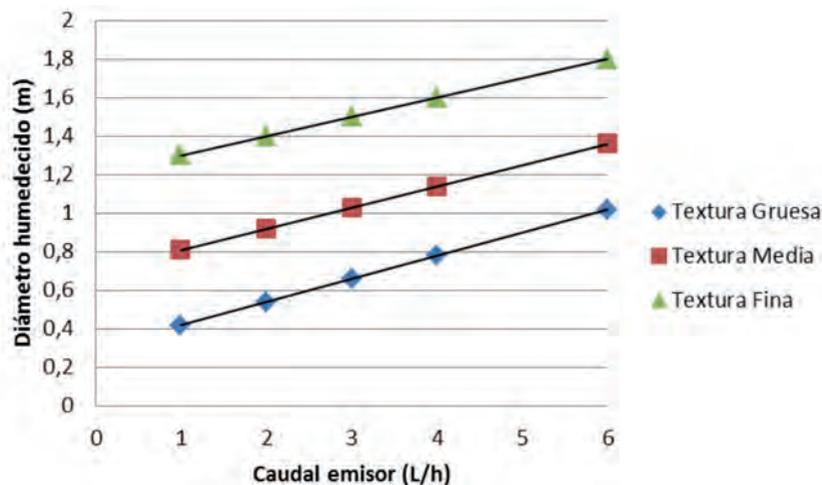


Figura 2.3. Estimación del diámetro humedecido en riego por goteo con emisores de diferentes caudales y en diferentes texturas de suelo.

Cabe señalar, que los patrones típicos de humedecimiento indicados en la Figura 3, pueden variar considerablemente, de acuerdo a la concentración salina del suelo y estratificación de éste.

5. USO DE COLORANTE PARA MOSTRAR EL MOVIMIENTO DEL AGUA DEL RIEGO POR GOTEO

El movimiento de agua en profundidad y las características del bulbo de humedad, se pueden determinar usando un equipo de monitoreo de la humedad del suelo o, agregando colorante al agua aportada por los emisores. Es fundamental ajustar el riego al tipo de suelo, etapa de crecimiento del cultivo y su profundidad radicular. Esto ayudará a maximizar la eficiencia del sistema de riego.

El riego debe cumplir con la capacidad de retención del suelo para la profundidad de enraizamiento del cultivo y, la lixiviación, sólo se utiliza cuando sea necesario evitar la acumulación de sal en la zona de raíces. El exceso de riego conduce al movimiento del agua más allá de la zona de la raíz, reduciendo la eficiencia y lixivando nutrientes.

A continuación se explica un método para evaluar el movimiento del agua del riego por goteo utilizando colorante y cómo se utiliza para ayudar a mejorar la programación del riego y conocer su patrón de humedecimiento.

La adición de colorante hace que el movimiento del agua sea más visible, especialmente en un suelo húmedo. Bloqueando el flujo como se desee, se pueden aplicar diferentes volúmenes de agua en la prueba, y se observa y registra la profundidad y la extensión de los patrones de humedecimiento.



Figura 2.4. Forma del bulbo húmedo en una instalación de riego por goteo. Foto cortesía UF/IFAS.

El volumen de agua aplicada depende del tipo de suelo, ya que su estructura y las proporciones de arena, limo y arcilla, afectan la capacidad de retención de agua. En suelos arenosos que tienen una capacidad de retención de agua extremadamente baja, los volúmenes de 0,3, 0,5, 1, 2 y 4 litros por emisor pueden alcanzar una profundidad adecuada en cultivos hortícolas para la demostración y comparación.

El colorante se puede aplicar al suelo directamente debajo del gotero a través de un aporte separado del agua o por un sistema de inyección. Dos a cinco mililitros por litro o 0.2-0.5% de colorante es visible en el suelo.

Utilice un colorante inerte, no tóxico, que no se una a la materia orgánica, como el colorante “azul brillante” que se usa en la industria pastelera.

El procedimiento consiste en seleccionar una sección de la línea de goteo que sea representativa del área que se está evaluando. El área debe estar con un contenido de agua similar a cuando el riego se aplica normalmente - no demasiado húmedo o seco.

Preparar un punto de inyección para el tinte y marcar las áreas de la cama en secciones de 5 metros para que pueda detener el flujo para probar los diferentes volúmenes aplicados.

No ejecute el ensayo de tinción al final de la línea porque la velocidad del movimiento del agua hacia el extremo es baja y el tinte puede tardar mucho tiempo en moverse a través de la línea.

Prepare un cuadro que muestre el tiempo requerido para entregar las cantidades deseadas para cada sección de la línea de goteo. Para ello, divida el volumen requerido por el caudal del gotero y multiplique por 60 para dar el tiempo de ejecución en minutos. Un ejemplo se

muestra en el Cuadro 2.2. Las celdas en las dos últimas columnas están en blanco para que los resultados puedan ser insertados.

Ejemplo de cálculo de tiempos de ejecución: La salida del goteo es de 1,05 L/h, goteros espaciados a 25 cm y el rango de volúmenes requeridos es de 0,3, 0,5, 1, 2 y 4 L por gotero.

Tiempo de ejecución = (Volumen requerido / volumen entregado) x 60 = (0,3 / 1,05) x 60 = 17 minutos

De forma similar, 4 L requeriría (4 / 1,05) x 60 = 229 minutos o 3 horas 49 minutos, y volúmenes intermedios en algún punto intermedio como se muestra en la Cuadro 2.2.

Cuadro 2.2. Prueba de tinción mostrando los tiempos de funcionamiento y apagado requeridos.

Volumen requerido (L)	Tiempo de ejecución requerido (minutos)	Tiempo Inicio	Tiempo final	Profundidad (cm)	Diámetro humedecido (cm)
0.5	29	8:00	8:29	—	—
1.0	57	8:00	8:57	—	—
2.0	114	8:00	9:54	—	—
4.0	229	8:00	11:49	—	—

Confirme en primer término el caudal de los goteros, probando dos goteros de cada sección de prueba para confirmar la tasa de aplicación por hora utilizada para calcular los tiempos de funcionamiento.

Cantidad de tinte requerida: Para calcular el agua o colorante requerido para la prueba, siga el procedimiento siguiente:

Longitud de la sección de ensayo x número de goteros por metro x volumen requerido:

- 5m x 4 goteros por metro x 0.3 = 6 litros
- 5m x 4 goteros por metro x 0,5 = 10 litros
- 5m x 4 goteros por metro x 1.0 = 20 litros
- 5 mx 4 goteros por metro x 2,0 = 40 litros
- 5m x 4 goteros por metro x 4.0 = 80 litros

Total = 6 + 10 + 20 + 40 + 80 = 156 litros de agua tratada con colorante.

Añadir el 10% de tinte extra en caso de que la presión en la línea aumenta y se aplica un poco más de agua. Entonces 170 l de agua requieren 2-5ml /l o 340-850 ml del tinte.

Antes de la prueba, prepare abrazaderas para cortar el suministro de agua durante la prueba.

Cortar con abrazadera las secciones de la cinta de goteo del extremo lejano a la entrada en los tiempos calculados. La sección de mayor duración estará más cerca de la entrada.

Apague el sistema y deje que el agua se expanda durante la noche. A la mañana siguiente, cavar una calicata en cada sección de prueba a lo largo de la línea de goteo, considerando el lado soleado de la línea de goteo, puesto que la luz del sol mejorará el color del tinte y se mostrarán los márgenes más claramente. Trabaje 20-30cm hacia fuera de la línea. Si es posible, la calicata debe extenderse sobre varios goteros para confirmar un movimiento similar de agua dentro del área de prueba. La profundidad de la calicata dependerá de la profundidad del movimiento del agua, pero considerar 10-20 cm más extra permitirá una visión clara del patrón.

Anote la profundidad media y la extensión de cada volumen entregado en el cuadro. Las fotografías pueden usarse como un recordatorio del patrón observado.

1. INTRODUCCIÓN

La ciencia agronómica dispone de una serie de herramientas que le permiten a los técnicos especialista en nutrición y fertilidad de suelos, realizar diagnósticos considerando los aspectos relacionados con problemas en la producción y carencias o excesos de elementos en los cultivos y frutales. El presente capítulo muestra una síntesis de las técnicas más usadas con dicho propósito. Explica cuales son las opciones disponibles, sus limitaciones y sus aciertos. Señala con claridad la información preliminar que se debe poseer para interpretar los resultados de los análisis químico de suelos y tejido vegetal, así también definen principios básicos que se deben poseer antes de intentar interpretar los resultados que le proporciona el laboratorio.

El diagnóstico agrícola desde el punto de vista nutricional consiste en una herramienta de trabajo que nos permite en base a análisis, ya sea de suelo/sustrato, material vegetal o agua, relacionar la nutrición de la planta y su respuesta a la aplicación de fertilizantes con el objetivo de optimizar los procesos fisiológicos de un cultivo. Para ello se proponen pautas a seguir, considerando cuadros de valores de referencia y gráficas que permiten interpretar, en forma general, los parámetros medidos.

El diagnóstico cobra especial relevancia, cuando se trata de agricultura intensiva, donde las inversiones son elevadas y debe existir un mayor control de los parámetros que inciden en la productividad del cultivo. De esta manera, es especialmente crítico cuando nos referimos a fertirrigación.

Los métodos clásicos de diagnóstico, válidos para su aplicación en cultivos convencionales de secano o riego gravitacional, presentan ciertas limitaciones en las modernas técnicas de fertirriego. Las técnicas de cultivo han avanzado de una forma mucho más rápida que las herramientas y técnicas de diagnóstico a aplicar. Por ejemplo, en análisis foliar se recomiendan ciertas fechas para la adquisición de las muestras y, en muchos casos, el resultado productivo ya está definido y es muy poco lo que se puede hacer en la práctica dentro del ciclo anual de crecimiento.

En el caso de análisis convencional de suelos, éste nos entrega información referente a las reservas de nutrientes para todo el ciclo del cultivo y, en fertirriego, nos interesa lo inmediatamente disponible para la planta, que corresponde a los nutrientes presentes en la solución del suelo y, las reservas de nutrientes a más largo plazo, pasan a un segundo plano.

El diagnóstico agrícola debe dar respuesta a una serie de preguntas, como son:

- ¿Están los nutrientes en su correcto equilibrio y cantidad?
- ¿Existen problemas de salinidad?

- ¿Existe alguna toxicidad?
- ¿El programa de fertirriego es el correcto?
- ¿Existe un correcto manejo y monitoreo del riego y la fertilización?
- ¿Qué acción se debe seguir para corregir los problemas detectados?

2. ANÁLISIS QUÍMICOS DE SUELOS

El empleo del análisis químico como instrumento de diagnóstico de la fertilidad del suelo y como base para la recomendación de fertilizantes, requiere de un entendimiento claro de sus posibilidades y limitaciones y de la manera como ciertos factores pueden afectar su calidad. La falta de comprensión del verdadero alcance de esta técnica ha contribuido a su mistificación y, en no pocos casos, a su descrédito.

La obtención de valores exactos y precisos ha sido una meta de los analistas de suelo de todos los tiempos. Continuamente se desarrollan, adaptan y mejoran técnicas de laboratorio para cumplir con estos propósitos. Sin embargo, las fases previas al análisis propiamente, tales como, la obtención de la muestra, el secado, la molienda y el submuestreo, han recibido, comparativamente, escasa atención. El estado actual del conocimiento sobre esta materia permite señalar que el control de las fases mencionadas, es de primordial importancia en la generación de resultados confiables.

Desde el punto de vista agronómico, los principales motivos para realizar análisis químicos de los suelos son:

- a) Satisfacer la demanda de información para la clasificación de suelos y su aptitud agrícola.
- b) Generar información para el manejo y mejoramiento de los suelos, particularmente de aquellas áreas afectadas por sales.
- c) Determinar el impacto ecológico de algunas prácticas agronómicas.
- d) Evitar toxicidad de nutrientes y no-nutrientes.
- e) Evaluar el estado de la fertilidad para recomendar fertilizantes y enmiendas. Nuestro interés principal se centra en este último objetivo.

El análisis de suelo tiene una base fundamentalmente empírica, debido a varias razones. En primer lugar, el análisis es generalmente realizado a la estrata arable del suelo (0-20 cm), donde sólo se desarrolla una fracción del sistema radicular de la planta. Normalmente, no se dispone de información del nivel de fertilidad de las estratas más profundas, las cuales pueden presentar una cantidad significativa de nutrientes disponibles o presencia de elementos tóxicos.

En segundo lugar, la muestra de suelo se procesa en el laboratorio con un extractante químico, donde se activan las reacciones de desorción/disolución, lo cual puede sobreestimar o subestimar la cantidad de nutrientes capaces de entrar en contacto con las raíces para ser absorbidos. Para los elementos inmóviles en el suelo, como fósforo, zinc, amonio, manganeso, cobre, hierro, la accesibilidad física puede ser un factor importante que controla la disponibilidad. Como resultado, pueden haber diferencias entre la cantidad del nutriente absorbido por la planta y la cantidad del nutriente extractable.

En tercer lugar, las plantas varían en sus requerimientos nutricionales y en su habilidad para solubilizar fuentes inmóviles o insolubles en el suelo. Nuevamente, para el caso de nutrientes inmóviles, esto puede ser particularmente importante debido a las diferencias en actividad y distribución radicular entre especies vegetales. Otros factores ambientales, tales como la disponibilidad de agua del suelo, también puede afectar el desarrollo radicular y limitar la absorción de nutrientes por la planta.

Por último, otras propiedades del suelo modifican la capacidad de liberación de nutrientes a la solución de suelo. Estas propiedades incluyen el pH del suelo, composición mineral y capacidad tampón. También, algunos suelos pueden tener impedimentos físicos o químicos para el crecimiento de las raíces (ej. duripan, horizonte acidificado, deficiencia de calcio en el subsuelo) lo cual afectaría la respuesta de la planta a los fertilizantes aplicados.

Las fracciones de nutrientes que más frecuentemente se analizan en estudios de fertilidad son la extractable y la intercambiable y cuando se realiza fertirrigación, interesa la fracción soluble. Existen otras fracciones de nutrientes, con un menor grado de relevancia, como la fracción total, fracción fijada y fracción mineralizable.

La estructuración de un programa de manejo nutricional debe comenzar por conocer, en profundidad el sistema de producción respectivo, lo cual incluye la planta y su manejo. Esto hace posible, entre otras cosas, que se pueda determinar el rendimiento máximo alcanzable bajo ciertas condiciones y, a partir de él, la demanda nutricional esperada.

El segundo aspecto del plan se refiere a la necesidad de contar con técnicas de diagnóstico aprobadas que permitan establecer el estado nutricional del sistema de producción en cuestión y la capacidad de abastecimiento del suelo. De la aplicación de las mismas a las plantas y al suelo, se derivará la respuesta a la pregunta ¿hay que fertilizar con nitrógeno, fósforo y potasio, u otro elemento? y ¿cuánto fertilizante hay que aplicar?

Atacar el problema de la nutrición de cultivos y frutales, comenzando por el dominio de los temas anteriores parece constituir el camino más lógico para acercarse a una solución óptima del problema. Sin embargo, cualquiera que sea el procedimiento adoptado éste debe ser compatible con la atención de la calidad del medio ambiente y los recursos naturales. El concepto de agricultura sostenible implícito en la aseveración anterior, debe constituirse en un objetivo importante de alcanzar para los especialistas en la nutrición de cultivos.

En la práctica, la nutrición de cultivos es una disciplina que aspira a proporcionar las condiciones necesarias para que el suministro de elementos esenciales sea el óptimo. Al mismo tiempo se preocupa de que la concentración en la planta no sea inferior a un nivel de suficiencia previamente establecido o que su relación con otro elemento no sea adecuada. Un suministro inadecuado de nutrientes provoca trastornos nutricionales que se traducen en una disminución de los rendimientos. Algo similar ocurre cuando las concentraciones nutricionales son muy elevadas, pero en este caso por efecto de toxicidad en las plantas, fenómeno que genera menor producción.

Normalmente, ha existido mucha controversia acerca de las ventajas del análisis de suelo comparado con el análisis foliar o de planta. La disponibilidad de un nutriente en el

suelo se determina mediante el uso de diferentes extractantes químicos, como se señaló anteriormente. Cada extractante puede entregar diferentes resultados, ninguno de los cuales puede estar estrechamente relacionado con el requerimiento de un nutriente o habilidad de la planta para extraer ese nutriente de la solución de suelo. La mayoría de los elementos químicos se encuentran en mayor concentración en la superficie (0 a 30 cm). Sin embargo, las raíces pueden explorar un gran volumen de suelo y absorber nutrientes desde otras zonas del perfil de suelo. La disponibilidad de agua del suelo tiene un efecto significativo sobre la extracción de nutrientes. Los nutrientes normalmente no se encuentran disponibles en suelos con exceso de humedad (mal drenaje) y/o en condiciones de sequía. En consecuencia, los estándares disponibles de análisis de suelo deben ser usados con precaución y el mejor resultado para llegar a una recomendación de fertilización se logra al disponer de resultados de suelo y foliar. En el caso de plantaciones o cultivos permanentes, por el hecho que reservan nutrientes de un año para otro y presentan mayor exploración radical, se estima que el análisis foliar es el indicador más útil de su estado nutricional, porque muestra más exactamente que nutrientes está extrayendo la planta desde el suelo.

Los análisis químicos de suelos que se emplean para el diagnóstico del estado nutrimental de los suelos son de dos tipos.

Los primeros miden una característica que se asocia con la fertilidad de los suelos (pH, conductividad eléctrica, materia orgánica, capacidad de intercambio de cationes, porcentaje de saturación de bases, relación de adsorción de sodio, aluminio intercambiable). La interpretación de estos análisis es directa, esto es, se cuenta con tablas que tienen una validez casi universal.

Los segundos miden lo que puede llamarse un índice de la disponibilidad de un nutriente en el suelo. Estos índices de disponibilidad pueden ser la fracción soluble, intercambiable y extraíble. Cabe aclarar que con la excepción de la fracción soluble, ninguna de las cantidades medidas por estos métodos es la que realmente la planta puede utilizar, sino que éstas son cantidades que se relacionan de una manera definida con la parte disponible en el suelo, que es la que la planta puede tener acceso. Información sobre estos valores de referencia se presentan en el Cuadro 3.1.

Se han usado dos conceptos para interpretar el estado nutricional del suelo. El primero, es llamado “**nivel de suficiencia de un nutriente**”, término que se refiere a la concentración de un nutriente cualquiera en el suelo, determinada por un método dado, que se asocia con el rendimiento máximo, se establecen diversas clases de disponibilidad, cuyos límites en términos de nutriente se asocian con porcentaje del rendimiento arbitrariamente determinados.

El segundo concepto se basa en la creencia de que existen algunas **relaciones óptimas** entre las bases intercambiables del suelo que son capaces de generar producciones máximas. Ambos conceptos deben ser complementados para realizar una adecuada interpretación de los resultados.

Un aspecto importante a decidir es el número de muestras simples (submuestras) que debe componer una muestra compuesta para su respectivo análisis. Las recomendaciones actuales varían entre 10 y 40, dependiendo de la heterogeneidad de la unidad productiva

y el tamaño, sin embargo, hay poca diferencia entre la heterogeneidad de una parcela pequeña y la de una unidad grande. Para el trabajo de diagnóstico de rutina, el número de submuestras pueden ser del orden de 10 a 15 por muestra compuesta, ya que un pequeño aumento en la variabilidad no provocará un cambio en la clase de fertilidad del suelo.

La profundidad de muestreo está definida por la profundidad de exploración radical del cultivo. En general, se acepta que la máxima actividad radical de las especies anuales, acontece en la capa arable (20 cm). Recientemente, se ha popularizado el empleo de profundidades de muestreo mayores que las indicadas (hasta 100 cm) para determinar el contenido de $N-NO_3$ acumulado en el suelo. Este índice se ha correlacionado bien con las necesidades de fertilizante nitrogenado de algunos cultivos. El principal obstáculo, es la necesidad de contar con el equipo de muestreo especial y su alto costo.

Para el caso de frutales, es decir cultivos de tipo permanente, es aconsejable obtener muestras en incrementos de 30 cm, hasta la profundidad de interés.

En el caso de suelos afectados por sales, la profundidad de muestreo se determina por la naturaleza del trabajo. Como norma de carácter general, se puede indicar que la costra de sales y la profundidad donde debe germinar la semilla (0 a 5 cm, en la mayoría de los casos) deben muestrearse separadamente.

En consecuencia, el éxito del análisis de suelo depende principalmente de la recolección de una muestra representativa, además de la exactitud en el análisis de laboratorio. Simplemente, un análisis de suelo es tan bueno como la calidad de la muestra obtenida. Esto queda de manifiesto al observar la diferencia entre la cantidad de suelo analizada y la cantidad de suelo presente en una unidad de muestreo. Un simple cálculo indica que 1 hectárea de suelo de 20 cm de profundidad pesa alrededor de 2000 toneladas y, por ejemplo, el análisis de fósforo requiere solamente 5 g de suelo.

Los siguientes factores deben considerarse en detalle para mejorar la exactitud y precisión del muestreo del suelo:

- Las variaciones de la concentración de un constituyente químico probablemente experimentan una variación con un cambio de tipo de suelo. El color del suelo, la textura y posición topográfica denotan tales cambios. Las variaciones se mantendrán a un mínimo si se muestrea separadamente cada uno de los diferentes tipos de suelo
- Los suelos manejados en forma distinta, también son fuente de variación y deben, por lo tanto, muestrearse separadamente.
- Los muestreos a lo largo de cercos, líneas eléctricas, caminos, drenajes, canales, etc. deben evitarse. Se presume que estos suelos pueden haber estado sujetos a remoción o contaminación.
- Al muestrear praderas, debe tenerse presente que generalmente éstas se fertilizan con fosfato aplicado al voleo. Consecuentemente, el fósforo va a estar concentrado, seguramente, en los primeros 2 a 3 cm de profundidad, ya que este elemento es inmóvil dentro del suelo.
- Los métodos de labranza pueden afectar la profundidad óptima de muestreo. Bajo sistema de cero labranza en cereales, los resultados para fósforo disponible se

incrementan considerablemente en superficie. El efecto de la labranza y el modo de aplicar fertilizantes sobre los valores del análisis de suelo requieren de mayor atención si es que se desea obtener muestras representativas del suelo.



Figura 3.1. Diversos equipamientos para muestreo de suelos.

En algunos casos, la época de muestreo es importante. La determinación de pH y, en general, los constituyentes solubles, como nitratos y potasio son diferentes para determinaciones hechas en la estación seca y húmeda.

Numerosas operaciones de laboratorio, que constituyen la rutina de la parte analítica, pueden afectar los resultados. La normalización de estas operaciones es un paso importante en la reproducibilidad y calidad de los resultados que se obtienen y es una preocupación constante en diversos países el alcanzar una estandarización de las metodologías a emplear (Cuadro 3.1). En general, los aparatos de laboratorio e instrumental deben tener la suficiente sensibilidad y funcionalidad para los análisis a ejecutar. La contaminación debe ser minimizada mediante el uso de aparatos limpios y agua de calidad apropiada.

En Chile, la Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo creó en 1997 la Comisión de Normalización y Acreditación (CNA), con la misión de realizar un Programa de Normalización de Técnicas y Acreditación de Laboratorios para los análisis de suelos y de tejidos vegetales. La metodología recomendada para los suelos chilenos se puede revisar en la publicación de Sadzawka y otros, (2000). Dicho programa contempla rondas anuales de acreditación orientados a diagnosticar problemas de fertilidad y unificar procedimientos analíticos de los diferentes laboratorios que operan en el país.

El mayor problema de los análisis de suelo convencionales (no en fertirrigación), es la calibración de los valores del análisis con los rendimientos de los cultivos. Las mejores y más apropiadas calibraciones se obtienen a partir de ensayos de campo y en buenas condiciones para el crecimiento de los cultivos.

Cuadro 3.1. Metodología de análisis convencional de suelos recomendadas para los suelos chilenos por la Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo.

Determinación	Extractantes	Relacion suelo/solución (Peso/volumen)	Referencia
P Olsen	0,5M NaHCO ₃ , pH 8,5	1:20	Kuo, 1996; NCh2058, 1999
Cationes: K, Ca, Mg, Na	Acetato de amonio 1M, pH 7,0	1:10	Wolf & Beegle, 1995; Saszawka y otros, 2006
Micros: Fe, Mn, Zn y Cu	DTPA	1:2	
Boro	CaCl ₂ 0,01M a ebullición	1:2	Sadzawka y otros, 2006
Azufre	Fosfato de Calcio 0,01M	1:2,5	Sing, Bhumbra & Keefer, 1995
Aluminio Intercambio	KCl 1M	1:5	Sadzawka y otros, 2006
Materia Orgánica	Oxidación con dicromato en medio ácido		Achulte, 1995

La calibración del análisis de suelo, para un cultivo y zona determinada, implica su interpretación en términos de la predicción de la respuesta a la fertilización. En general, se asume que el incremento de rendimiento será menor cuanto mayor sea el contenido original del elemento en el suelo, estimado por análisis químico. En la Figura 3.2, se presenta un ejemplo de la relación entre rendimiento relativo de trigo y concentración de cobre en el suelo.

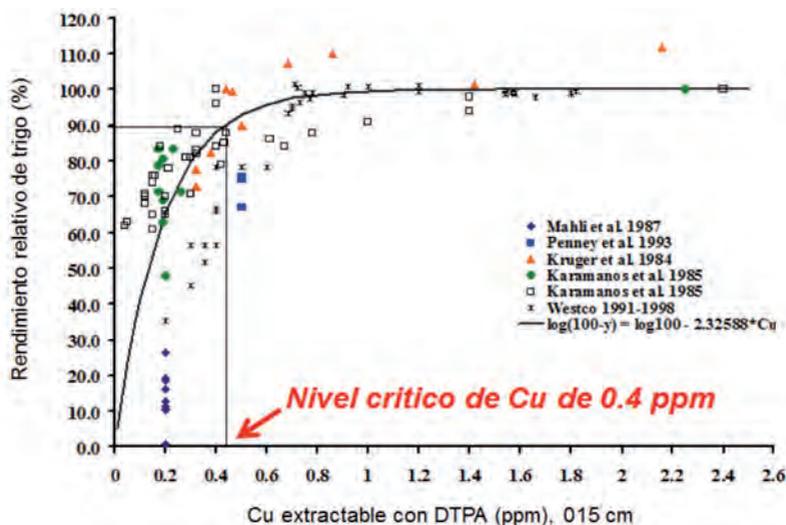


Figura 3.2. Relación entre cobre extractable con DTPA y rendimiento relativo de trigo.

Cuadro 3.2. Valores de referencia para análisis de suelos⁽¹⁾.

Análisis	Unidad	Categoría ⁽²⁾			
		Muy bajo	Bajo	Medio	Alto
pH		<5	5-6	6,0-7,0	+7,0
CE en extracto 1:5	dS/m	<0,20	0,20-0,35	0,35-0,65	+0,65
N disponible	mg/kg	<10	10-20	20-40	+40
Fósforo	mg/kg	<5	5-10	10-20	+20
Potasio	cmol/kg	<0,15	0,16-0,30	0,31-0,45	+0,45
Calcio	cmol/kg	<2,0	2,1-4,0	4,1-8,0	+8,0
Magnesio	cmol/kg	<0,4	0,4-0,8	0,8-1,5	+1,5
Sodio ⁽³⁾	cmol/kg	<0,2	0,2-0,5	0,5-1,0	+1,0
Azufre	mg/kg	<4	5-8	8-16	+16
Al Intercambio ⁽³⁾	cmol/kg	<0,05	0,05-0,15	0,15-0,50	+0,5
Hierro	mg/kg	<2,0	2-4	4-10	+10
Manganeso	mg/kg	<1,0	1-2	3-5	+5,0
Zinc	mg/kg	<0,5	0,5-1,0	1,0-2,0	+2,0
Cobre	mg/kg	<0,2	0,2-0,4	0,4-0,8	+0,8
Boro	mg/kg	<0,2	0,2-0,5	0,6-1,0	+1,0
Suma de Bases	cmol/kg	<3,0	3,0-4,9	5,0-7,4	+7,5
Saturación Ca	%	<60	60-65	65-75	+75
Saturación K	%	<3	3-5	5-10	+10
Saturación Mg	%	<8	8-10	10-15	+15
Saturación Al	%	<1	1-2	2-5	+5
K/Mg		<0,2	0,2-0,3	0,3-0,8	+0,8
Ca/Mg		<1	1-3	3-7	+7

⁽¹⁾ Metodología de análisis de acuerdo a Comisión de Normalización y Acreditación. Soc. Chilena de Ciencias del Suelo (Sadzawka y otros, 2004).

⁽²⁾ Para cultivos y frutales regados con riego localizado, donde se riega una fracción del suelo, considerar la última columna como un nivel de suficiencia de cada nutriente.

⁽³⁾ Elementos considerados tóxicos, mientras menos es mejor.

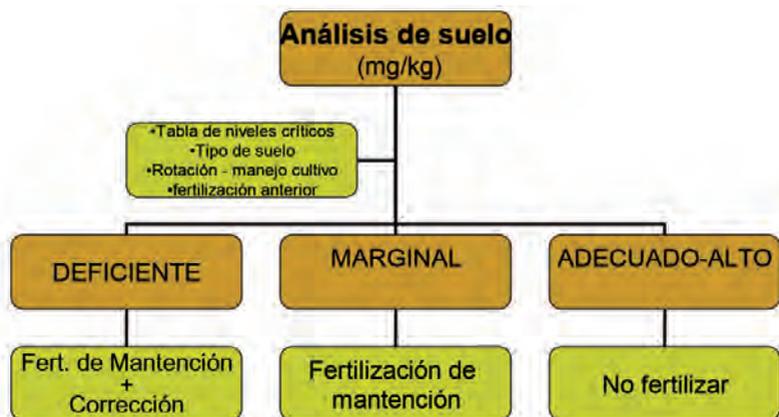


Figura 3.3. Guía para definir dosis de fertilizantes.

Para cultivos y/o huertos manejados en forma tradicional, el modelo adecuado de fertilización de cultivo se basa en un balance nutricional entre la demanda de la planta, los aportes del suelo y eficiencia de uso del fertilizante aplicado. En la Figura 3.3, se presenta una guía general para hacer recomendaciones de fertilización basado en este procedimiento.

Este sistema es plenamente aplicable en plantaciones y cultivos más o menos extensivos, donde las correcciones se suelen realizar para todo el ciclo de cultivo. En el caso de cultivos tradicionales, el modelo de balance de nutrientes es de mucha utilidad. La formula empleada es:

$$\text{Dosis a aplicar} = \frac{\text{Demanda del cultivo} - \text{Suministro del Suelo}}{\text{Eficiencia}}$$

Los factores de demanda nutricional de diferentes cultivos se muestran en el Cuadro 3.3. La dosis a aplicar debe además, contemplar los valores que aporta el suelo, para restarlos de esa demanda. Estos valores se estiman por el análisis de suelo. La eficiencia de las aplicaciones va a depender del nutriente en particular, tipo de fertilizante utilizado, la técnica y número de aplicaciones y características del suelo. En el Cuadro 3.4 se presenta una estimación de las eficiencias de acuerdo a la tecnología de aplicación y tipo de nutriente.

Cuadro 3.3. Demanda estimada de nutrientes expresadas en kilos por tonelada de producción para diferentes cultivos y frutales.

Nombre	Categoría	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	Rango Rendimiento (t/ha)	
Uva vinífera	Frutales	3.7	1.7	5.6	4.3	1.5	8	50
Uva de mesa	Frutales	4.0	1.7	5.6	2.2	1.2	25	40
Kiwi	Frutales	5.0	1.7	5.9	2.0	1.0	20	40
Manzano	Frutales	2.0	0.5	2.2	1.2	0.6	40	70
Peral	Frutales	2.2	0.7	2.0	1.1	0.6	50	60
Naranja	Frutales	2.7	0.6	4.2	1.1	0.6	40	70
Limón	Frutales	2.7	0.6	4.2	1.0	0.6	40	80
Cerezo	Frutales	6.4	1.7	5.0	4.8	2.5	10	15
Durazno	Frutales	5.1	1.4	5.2	2.2	1.0	15	40
Damasco	Frutales	4.6	4.5	4.3	2.0	1.0	20	40
Palto	Frutales	6.2	2.9	18.2	4.8	2.5	10	15
Olivos	Frutales	6.0	2.8	6.0	2.4	1.0	20	30
Nogal	Frutales	22.0	3.7	9.7	22.0	3.9	3	10
Ciruelo	Frutales	3.0	1.0	4.0	1.5	0.8	30	50
Avellano europeo	Frutales	25.0	5.3	14.3	13.5	3.5	2	7
Papayo	Frutales	6.0	2.3	7.0	3.0	1.5	15	25
Arándano	Berries	4.7	0.8	5.2	2.0	1.2	10	35
Frambuesa	Berries	16.9	3.6	10.4	8.0	3.7	8	20
Frutilla	Berries	2.5	1.3	4.5	1.6	0.9	25	60
Remolacha	Cultivos	2.5	0.8	3.2	0.8	0.4	70	135
Papas	Cultivos	3.8	1.0	4.0	1.6	0.9	25	50
Maíz grano	Cultivos	20.0	6.9	14.0	4.5	2.2	12	20
Maíz ensilaje	Cultivos	3.9	1.6	2.5	0.8	0.4	70	90
Trigo	Cultivos	24.3	7.3	24.0	7.0	4.3	5	9
Cebada	Cultivos	22.2	7.1	22.0	8.6	5.4	4	7
Avena	Cultivos	22.2	7.6	20.0	8.5	5.4	4	7
Raps	Cultivos	56.0	16.9	50.0	15.0	8.5	2.5	5.0
Arroz	Cultivos	21.4	7.1	27.0	6.6	4.0	6	9
Maravilla	Cultivos	34.5	11.0	37.4	15.0	8.0	3	4
Frejoles	Cultivos	20	13.7	40.0	15.0	10.0	2	4
Espárragos	Hortalizas	19.3	4.0	20	5.0	3.5	6	15
Tomate industrial	Hortalizas	3.3	0.8	5	0.8	0.6	45	80
Tomate invernadero	Hortalizas	3.3	0.8	5	0.4	0.4	80	200
Tomate campo	Hortalizas	3.3	0.8	5	1.2	0.6	45	80
Cebolla	Hortalizas	3.1	1.2	4	1.6	0.9	25	50
Coliflor	Hortalizas	4.5	1.4	5	2.7	1.5	15	30
Brócoli	Hortalizas	4.5	1.4	5	2.7	1.5	15	30
Repollo	Hortalizas	6.5	1.5	7.5	1.6	0.9	25	50
Repollo de Bruselas	Hortalizas	6.5	1.5	7.5	4.0	2.0	11	18
Sandía	Hortalizas	3.5	1.2	4.5	1.7	0.9	20	50
Melón	Hortalizas	4.5	1.6	6.5	1.3	0.7	25	70
Pepino ensalada	Hortalizas	1.3	0.8	2.8	0.6	0.3	40	300
Espinaca	Hortalizas	3.0	1.0	4.0	2.4	1.1	15	40
Lechugas	Hortalizas	2.7	0.9	4.5	1.7	1.0	18	50
Porotos verdes	Hortalizas	6.0	4.0	3.5	7.5	3.8	6	10
Porotos granados	Hortalizas	7.0	6.0	7.0	8.5	4.3	5	9
Arvejas	Hortalizas	8.0	4.2	8.0	7.5	3.8	6	10
Zanahoria	Hortalizas	4.0	1.4	6.5	2.0	1.0	25	35
Pimentón	Hortalizas	3.5	0.8	5.5	2.0	1.0	24	40
Alcachofas	Hortalizas	9.0	2.7	15.0	2.9	2.0	12	30

Cuadro 3.4. Eficiencia de utilización de nutrientes en sistemas de fertilización convencional y fertirrigación.

Nutrientes	Convencional (%)	Fertirriego (%)
N, B, S	40-60	70-85
P, Cu, Mn, Fe	10-30	30-45
K	60	80

Cuando se trata de sistemas más tecnificados, dotados de riego y fertirrigación, conviene establecer un seguimiento más específico de control, como por ejemplo el seguimiento del estatus nutricional del cultivo mediante análisis de la solución de suelo circundante al entorno radical (análisis de extracto saturado o extracto 1:2, o sondas de succión), que permite una detección oportuna y corrección de los desequilibrios detectados, justo cuando se producen y previo a que puedan afectar al cultivo. Una explicación más detallada de ambas metodologías se presenta en el capítulo 6 (Diseño de programas de fertirriego).

3. ANÁLISIS DE SOLUCIÓN DEL SUELO

Para las condiciones de cultivo intensivos bajo fertirrigación, se han desarrollado metodologías específicas para medir la disponibilidad de nutrientes y riesgos de salinidad del suelo. Generalmente, los análisis convencionales se han aplicado a los cultivos intensivos. No obstante, se debe mencionar que existen algunos aspectos específicos que diferencian un cultivo intensivo respecto al manejo convencional. Estos aspectos son:

- Para obtener un real provecho de la técnica de fertirriego y efectuar correcciones oportunas, se deben realizar análisis periódicos a través del desarrollo del cultivo, por lo cual no se requiere un método que estime las reservas nutricionales y disponibilidad de nutrientes para el ciclo total del cultivo.
- La planta obtiene sus nutrientes de la solución de suelo, que son los inmediatamente disponibles.
- La determinación de la concentración nutricional de la solución del suelo/sustrato tiene una importancia primordial, no sólo para prevenir una posible reducción en rendimiento y calidad del cultivo, por déficit y/o exceso de algún nutriente o como consecuencia de una alta salinidad en la zona radical.
- La absorción de nutrientes de muchos cultivos intensivos es tan alta que es difícil satisfacer la demanda total de nutrientes en forma convencional con aplicaciones en cobertera, puesto que se genera una alta concentración iónica en la zona radicular. Esto es especialmente válido en cultivos desarrollados en sustrato que tienen un sistema radicular pequeño y restringido.
- Las fertilizaciones frecuentes de los cultivos son mucho más eficientes y se pueden llevar a cabo fácilmente con cualquier sistema de fertirrigación.

En consideración a lo señalado, se entiende que la estimación de la composición de la solución de suelo, por extracción con agua, juega un importante rol para la producción de cultivos bajo invernaderos o cultivos intensivos. Por ello, que en Europa, principalmente en países tales como España y Holanda, se han promovido y desarrollado tales métodos de monitoreo para sus sistemas de producción. Es verdad que la extracción con agua solamente representa la actividad del elemento analizado (“intensidad”), pero considerando las frecuentes determinaciones y fertilizaciones que se realizan, no hay mucha necesidad de conocer el componente “capacidad” de los nutrientes.

Existen diferentes métodos de extracción con agua y su idoneidad se juzga con respecto a la capacidad del método para estimar la composición de la solución del suelo. El análisis de los elementos solubles en el suelo se puede realizar directamente en la solución de suelo, en el extracto obtenido a partir de la pasta saturada o extracto de saturación o en una solución equilibrada con el suelo en diversas relaciones suelo/agua.

La solución de suelo también puede ser extraída directamente, in situ, mediante tubos provistos de cápsulas porosas, los cuales son enterrados a la profundidad deseada (20, 40, 60 cm), generalmente considerando la zona de máxima desarrollo radicular y/o abastecimientos de agua y nutrientes. La cápsula porosa es colocada en la zona de suelo humedecida por el gotero o microaspersor. La solución que penetra al interior de la cápsula, se extrae por succión. En esta solución se pueden analizar las concentraciones de nutrientes del suelo, pH, conductividad eléctrica y a partir de estos valores establecer relaciones entre ellos.



Figura 3.4. Sondas de succión instalados en cultivo de fresas para extraer solución de suelo y, posteriormente, analizar las concentraciones de nutrientes del suelo, pH y CE.

3.1. Extracto de saturación

El extracto de saturación se prepara por filtración del suelo saturado con agua. El suelo se prepara adicionando agua destilada a una muestra de alrededor de 100 a 300 g en constante agitación con una espátula. La condición saturada se evalúa por el aspecto brillante de la pasta que refleja la luz y por la rápida desaparición de un surco diametral realizado con la espátula. Posteriormente, dicha muestra se somete a una succión para extraer el líquido, que es el que se analiza en el laboratorio.

El extracto saturado tiene la ventaja de que se emplea una baja proporción de agua respecto al suelo y se relaciona estrechamente con el contenido de humedad a capacidad de campo. Por lo tanto, los resultados son solo ligeramente afectados por sales poco solubles y permiten una adecuada interpretación para una amplia gama de suelos. El factor de dilución, que es el contenido de agua de la pasta saturada respecto al contenido de agua del suelo a capacidad de campo, varía entre 1,5 para suelos con un alto contenido de materia orgánica y 2,0 para suelos minerales (Van den Ende, 1988; Sonneveld et al., 1990).

El coeficiente de correlación lineal entre las concentraciones iónicas del extracto saturado y la solución de suelo es del orden del 0,95, del mismo orden que lo encontrado para el extracto 1:2 (Cuadro 3.6). Esto implica una gran ventaja, puesto que se simplifica la interpretación de los datos analíticos. Por ello, el extracto de saturación es usado ampliamente en todo el mundo para la determinación de la salinidad del suelo. Sin embargo, el inconveniente en las determinaciones de rutina es lo laborioso que significa la preparación de la pasta saturada de suelo.

En el Cuadro 3.5 se presentan valores de referencia propuestos por Alarcón (s/a) para la interpretación de análisis de pasta saturada o sonda de succión, ante una solución nutritiva específica y un objetivo de crecimiento del cultivo vegetativo o generativo. No obstante, el mismo autor recomienda realizar el diagnóstico mediante el seguimiento de la evolución de los valores y la respuesta de la planta, es decir, más que el valor absoluto de los parámetros medidos interesa cuál es la evolución de los mismos a lo largo del tiempo de desarrollo del cultivo, y relacionar esto con la respuesta o sintomatología del cultivo. En todo caso, de acuerdo a nuestra experiencia, principalmente en suelos y climas templados y con disponibilidad de agua de riego de muy bajo contenido salino, algunos de estos valores se consideran excesivos, especialmente en lo que respecta al calcio. Por consiguiente, se deben considerar los aspectos económicos, puesto que difícilmente se puede llegar a los niveles indicados si el agua no tiene calcio. Algo similar ocurre con la conductividad eléctrica.

Cuadro 3.5. Valores del referencia de la pasta saturada del suelo o sondas de succión para un tipo de crecimiento de la planta vegetativo o generativo. Adaptado de Alarcón, A. (s/a).

Parámetros	Unidad	Sonda de succión/Extracto saturado		% Respecto a Solución Nutritiva
		Optimo Vegetativo	Optimo Generativo	
pH	-	5,8- 6,8	5,8- 6,8	No aplica
Conductividad	dS/m	0,8-1,5	1,0-2,0	90-150
Calcio	mg/L	80-300	150-300	120-200
Magnesio	mg/L	30-200	30-140	120-200
Sodio	mg/L	Lo menor posible	Lo menor posible	100-300
Potasio	mg/L	20-120	40-230	30-70
Amonio (N-NH ₄)	mg/L	<3	-	0-25
Nitratos (N-NO ₃)	mg/L	50-150	14-80	40-100
Cloruros	mg/L	Lo menor posible	Lo menor posible	100-300
Sulfatos (S-SO ₄)	mg/L	20-300	20-300	100-200
Bicarbonatos	mg/L	50-200	50-200	100-300
Fósforo	mg/L	>2	>2	<20
Boro	mg/L	0,3-1,0	0,3-1,0	40-100
N/K	-	2-4	0,2-0,8	No aplica
Ca/Mg	-	1-3	1-3	No aplica

3.2. Método Holandés o relación suelo:agua 1:2

Un método fácil de implementar para trabajos de rutina corresponde al método extracto Suelo/Agua 1:2, el cual, al igual que la pasta saturada, presenta alta correlación con la concentración de nutrientes obtenida en la solución de suelo.

El extracto 1:2 se prepara por filtración de una suspensión obtenida por adición de un volumen de suelo a humedad de campo en dos volúmenes de agua, de tal forma que el volumen total se incremente en una parte. Por ejemplo, tal como se observa en la Figura 3.5, se emplea un matraz aforado y se adiciona 100 ml de agua, posteriormente, se agrega suelo a humedad de campo, de tal forma que el volumen total alcanzado sea de 150 ml. (Sonneveld et. al., 1990; De Kreijl et al., 2005). Esta suspensión se agita por 20 minutos, posteriormente, se filtra y en el filtrado se miden los diferentes nutrientes, pH y conductividad eléctrica.



Figura 3.5. Preparación de un extracto suelo:agua 1:2 (método holandés), por adición de un volumen de suelo a humedad de campo a dos volúmenes de agua, de tal forma que el volumen total se incremente en una parte.

La CE y concentración de la mayoría de los nutrientes determinados en el extracto 1:2 correlaciona estrechamente con la concentración de la solución de suelo (Sonneveld et al. 1990). Estas relaciones se presentan en el Cuadro 3.6.

Cuadro 3.6. Ecuación de regresión obtenida entre CE, concentración de iones en la solución de suelo y aquella presente en el extracto 1:2, para una serie de suelos holandeses. (CE está en dS m^{-1} y los iones en mmol L^{-1}). Sonneveld et al. 1990.

Determinación	Ecuación de Regresión	R
CE	$Y = 3,12 x + 0,84$	0,886
NH ₄	$Y = 3,23 x + 0,05$	0,782
K	$Y = 3,38 x - 0,80$	0,922
Na	$Y = 4,04 x - 1,12$	0,929
Ca	$Y = 2,53 x + 7,86$	0,811
Mg	$Y = 3,48 x + 1,86$	0,876
NO ₃	$Y = 5,09 x + 0,14$	0,899
Cl	$Y = 6,15 x - 2,04$	0,952
SO ₄	$Y = 1,47 x + 8,67$	0,779
P	$Y = 1,78 x - 0,09$	0,936

Este método, también es útil para estimar la cantidad de nutrientes solubles presentes en la zona radicular. Ello se debe al hecho que la cantidad de agua presente al preparar el extracto 1:2, es virtualmente independiente del tipo de suelo, como se muestra en los datos del Cuadro 3.7. A partir de las cuatro columnas de este cuadro se puede concluir que alrededor de 4.000 m³ de extracto se genera en una hectárea de cualquier suelo que presenta entre 5 a 30% de materia orgánica o diferentes valores de densidad aparente. Así, una concentración de 1 meq/L de cualquier elemento en el extracto 1:2, corresponde a una cantidad de 4000 equivalentes de ese elemento disponibles o solubles en 10.000 m² (una hectárea) a una profundidad de 25 cm. De igual forma, 1 mg/L (ppm) en el extracto 1:2, corresponde a una cantidad de 4 kg ha⁻¹ considerando una profundidad de 25 cm de suelo.

Cuadro 3.7. Cantidades de agua presente en la suspensión con la preparación del extracto 1:2 de diferentes suelos, expresados como m³ por hectárea a una profundidad de 25 cm (Adaptado de Sonneveld y Voogt, 2009).

% Materia Orgánica	Densidad aparente (kg/L)	Contenido de agua en extracto (g agua/g suelo seco)	Volumen de agua en extracto 1:2 (m ³ /ha/25 cm suelo)
5	1,08	1.40	3.780
10	0,86	1.82	3.913
20	0,62	2.64	4.092
30	0,48	3.46	4.152

La concentración en la solución de suelo mediante el método 1:2 es el más adecuado para propósitos de evaluar riesgo de salinidad, CE y concentración de Na y Cl. También, este método permite la evaluación de las cantidades de nutrientes realmente disponibles por unidad de superficie, como se señaló anteriormente. Pero, para efectuar

las transformaciones a kg/ha, se debe tener presente el área humedecida del sistema de riego, lo que corresponde básicamente a lo explorado por el sistema radicular de la planta y, posteriormente, proceder a efectuar la corrección respectiva. Por ejemplo, si estamos en presencia de un cultivo que tiene su sistema radicular restringido a un área de humedecimiento del sistema de riego del 30% del volumen de una hectárea de suelo, entonces existirán 1200 m³/ha de extracto (30% de 4.000 m³/ha). Una concentración de 1 meq/L de cualquier elemento se traduciría en 1200 equivalente de ese elemento disponibles por hectárea de cultivo. Una concentración de 1 mg/L de cualquier elementos se traduce en 1,2 kg/ha de ese elemento

El extracto 1:2 tiene la ventaja que es un método rápido y muy útil para análisis de rutina. Esta siendo usado hace muchos años en invernaderos y ha sido evaluado con éxito para una amplia gama de suelos en Europa. Como opción, en algunos casos se puede preferir realizar el extracto 1:2 con la misma agua de riego que se emplea en el cultivo, lo cual representaría una situación aún más real de lo que ocurre en el campo o invernadero.

A continuación se presenta un ejemplo de determinación y cálculo de concentración de nutrientes para un extracto 1:2 en un huerto de arándano bajo un sistema de riego por goteo que cubre un 30% del area de suelo.

Cuadro 3.8. Ejemplo de cálculo de la cantidad de nutrientes solubles a una profundidad de 25 cm de suelo para un huerto de arándanos regado por goteo con un área de humedecimiento del 30% del área total del suelo.

Determinación	Extracto 1:2 (mg/l) ⁽¹⁾	Nutrientes en solución (kg/ha)	Nutrientes en solución en un 30% del area humedecimiento (kg/ha)
N-NH ₄	4	16	5
K	40	160	49
Ca	35	140	42
Mg	16	64	19
N-NO ₃	45	180	54
S-SO ₄	14	56	17
P	3	12	4

⁽¹⁾ Determinación de la concentración de la solución de suelo en base a extracto 1:2.

Para la interpretación directa de análisis de solución de suelo mediante el método suelo/ agua 1:2, podemos usar la pauta indicada en el Cuadro 3.9.

Cuadro 3.9. Rango de referencia de análisis de solución de suelo determinada mediante el método extracto suelo/aagua 1:2 (método holandés). Adaptado de A. Alarcón (s/a) y elaboración propia.

Parametro	Unidad	Extracto 1:2 método Holandés		% Respecto a solución Nutritiva
		Optimo Vegetativo	Optimo Generativo	
pH		5,8- 6,8	5,8- 6,8	No aplica
CE	dS/m	0,5-1,2	0,8-1,5	90-150
N-NH ₄	mg/L	0-4	0	0-20
N-NO ₃	mg/L	30-80	10-35	40-80
K	mg/L	15-50	20-100	30-70
Ca	mg/L	30-180	30-180	120-200
Mg	mg/L	20-50	15-40	120-200
S-SO ₄	mg/L	10-90	10-90	120-200
Na	mg/L	lo menor posible	lo menor posible	100-300
Cl	mg/L	lo menor posible	lo menor posible	100-300

4. ANÁLISIS DE TEJIDO VEGETAL

Los análisis foliares o de tejidos vegetales son el complemento indispensable a los análisis de suelo. Ambos son necesarios para lograr un buen diagnóstico. Actualmente, con la posibilidad de suministrar nutrientes a través de sistemas de irrigación, los análisis de tejidos vegetales han venido adquiriendo una importancia cada vez mayor. Conforme avanzan los conocimientos sobre nutrición de la planta y sus requisitos nutrimentales en las diferentes etapas de crecimiento, el análisis foliar se ha convertido en una herramienta muy útil para lograr altos rendimientos.

El análisis químico de tejidos vegetales es una herramienta para evaluar directamente el estado nutricional de un cultivo e indirectamente la disponibilidad del nutriente en el suelo. Con esta técnica es posible medir la concentración total de un elemento en la planta o una fracción de ésta. El análisis de plantas se emplea principalmente para diagnosticar deficiencias nutricionales y como base para formular recomendaciones de fertilización.

El fundamento del análisis foliar es la relación que existe entre la concentración de un nutriente en un órgano específico de la planta, colectado en un momento dado de su desarrollo y el rendimiento de ésta. En la Figura 3.6 se muestra la naturaleza de esta relación y las distintas zonas en que se ha dividido la curva. De esta división se derivan los criterios interpretativos del análisis foliar.

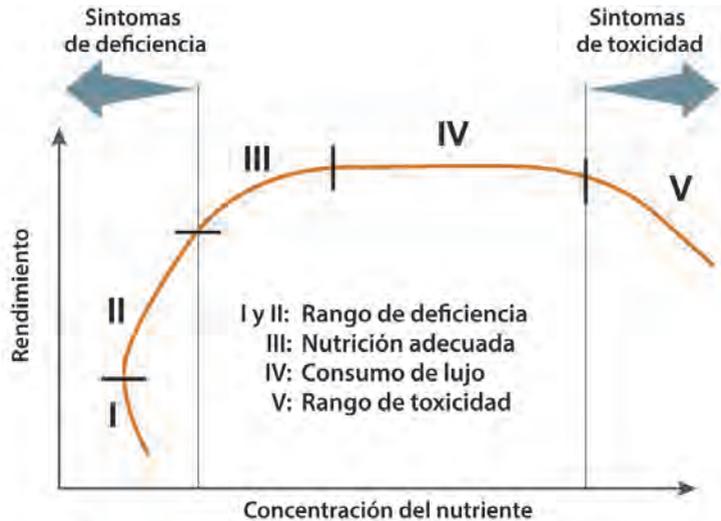


Figura 3.6. Curva teórica de relación entre crecimiento y la concentración nutricional de un cultivo.

Los principales criterios para interpretar los análisis de tejido vegetal son el **nivel crítico** y los **rangos de concentración**.

Se define como valor crítico, la concentración de un nutriente, determinada en condiciones experimentales, donde todos los factores de crecimiento se encuentran en un nivel óptimo, que se asocia con un valor predeterminado del rendimiento (o calidad) máximo.

Generalmente, este valor predeterminado, como se señaló con anterioridad, corresponde al 90 o 95% del rendimiento máximo. Este valor está comprendido sobre su rango bajo o marginal. La concentración nutricional de un cultivo siempre debería mantenerse ligeramente arriba del nivel crítico.

Los rangos de concentración se han dividido en deficiente, bajo o marginal, adecuado o suficiente, alto o tóxico o excesivo. A continuación se define cada uno de ellos.

Deficiente: Es el rango de concentración, en el tejido, que se asocia con síntomas visibles de deficiencia en plantas y con una severa reducción del crecimiento y la producción. Cada vez que se encuentren valores en este rango es preciso tomar medidas correctivas inmediatas.

Bajo o marginal: Este es el rango de concentraciones en el tejido que se asocia con una reducción del crecimiento o producción, pero en el cual la planta no muestra síntomas visibles de deficiencias. Cuando se observan niveles de este tipo es preciso efectuar algunos cambios en las prácticas de fertilización.

Adecuado o suficiente: Dentro de este rango de concentración, en la parte especificada, los cambios que ocurren no provocan aumentos o disminución del crecimiento o producción. Esta clase también se conoce como intermedia, normal, o satisfactoria. Si los valores de un análisis foliar caen en esta clase no es necesario realizar ningún cambio en las prácticas de fertilización.

Alto: Esta clase representa el rango de concentración entre el nivel adecuado y tóxico. Esta clase puede definirse objetivamente por su asociación con una tendencia hacia la producción de calidad y vigor indeseable. El uso de fertilizantes en los cultivos y frutales que muestren concentraciones nutricionales en este rango debe reducirse o suspenderse hasta que éstas caigan en el rango adecuado o suficiente.

Tóxico o excesivo: La presencia de concentraciones tóxicas de un nutriente, en la parte especificada, se asocian generalmente son síntomas de toxicidad y algunas veces con reducción y casi siempre con reducción de calidad y vigor excesivo. Cuando se encuentran valores en este rango, es preciso tomar medidas correctivas inmediatas.

En resumen, los análisis foliares se utilizan para:

- a. Confirmar un diagnóstico a partir de síntomas visibles.
- b. Identificar carencias ocultas que aun no producen síntomas.
- c. Ubicar áreas de suelo con deficiencias de nutrientes
- d. Determinar cuales nutrientes ha absorbido la planta
- e. Aprender sobre interacciones entre nutrientes
- f. Estudiar el funcionamiento de los nutrientes en las plantas
- g. Sugerir estudios o pruebas adicionales.

Las críticas que normalmente se presentan para el análisis de material vegetal son las siguientes:

- La concentración del nutriente varía con la especie, la parte analizada, el estado fenológico, abundancia y distribución de las raíces, las condiciones ambientales, etc.
- Los fenómenos de dilución y antagonismos pueden llevar a conclusiones erróneas.
- Proporciona información tardía para la corrección de alteraciones (deficiencias, excesos). Los análisis de hojas para cultivos anuales y en agricultura intensiva pueden tener limitaciones, ya que cuando aparece la deficiencia, ya es tarde para intervenir y probablemente se han causado importantes pérdidas económicas.
- Falta de estándares de referencia adecuados para muestreos efectuados fuera de las fechas recomendadas.

Obviamente, el mejor diagnóstico se puede lograr complementando el análisis de suelo con el análisis de tejido vegetal. En la Figura 3.7, se puede observar la interpretación de estos análisis en conjunto, de acuerdo al nivel nutricional que se encuentre en la hoja y en el suelo.

Análisis foliar BAJO Análisis de suelo ALTO <i>Problema radicular o de riego</i>	Análisis foliar ALTO Análisis de suelo ALTO <i>Exceso de fertilización</i>
Análisis foliar BAJO Análisis de suelo BAJO <i>Fertilización insuficiente, incrementar la dosis aplicada</i>	Análisis foliar ALTO Análisis de suelo BAJO <i>Nutriente agotado en el suelo, reponer mediante fertilización</i>

Figura 3.7. Interpretación en conjunto de análisis de tejido foliar y análisis de suelo.

Las instrucciones de muestreo son específicas en cuanto a la parte de la planta y la etapa de crecimiento ya que, para poder interpretar correctamente el resultado de un análisis, es necesario compararlo contra rangos de valores normales o “estándar”, que los debe establecer el laboratorio en el informe respectivo. Cuando no existen o no se tienen instrucciones precisas de muestreo, la regla general es la de seleccionar hojas recientemente maduras.

Cuadro 3.10. Pauta de muestreo para análisis foliar en algunos frutales.

Especie	Época	Tejido	Cantidad
Kiwi	Enero-Febrero	Hoja completa por encima del último fruto.	80
Vid	Floración y/o Pinta	Pecíolo opuesto al primer racimo del brote central del cargador. En pinta se muestrea hoja completa.	150
Duraznero y nectarín	Enero-Febrero	Hoja del tercio medio de la ramilla del año.	150
Manzano, Peral, Almendro, Damasco, Ciruelo, Cerezo	Enero-Febrero	Hoja del dardo nuevo de la periferia y sin fruto.	100
Nogal	Enero-Febrero	Hojuela terminal de la hoja compuesta del tercio medio de un brote.	100
Cítricos	Marzo-Abril	Hojas recientemente maduras del brote de primavera sin fruto.	100
Palto	Enero-Febrero	Hojas recientemente maduras del brote de primavera sin fruto.	100
Chirimoyo	Junio-Julio	Hojas recientemente maduras del brote anual. Sin fruto, cuya ubicación corresponda a la 4° o 5° hoja bajo el ápice de crecimiento.	100
Papayo	Floración	Pecíolo de la hoja recientemente madura.	100
Frambueso	Enero	Hojas recientemente madura del tercio medio de los brotes del año.	120
Arándano	Enero-Febrero	Hoja recientemente madura del tercio medio del brote anual.	150
Frutilla	Primavera	Hoja trifoliada recientemente madura sin pecíolo.	60

Cuadro 3.11. Pauta de muestreo para análisis foliar en algunos cultivos y hortalizas.

Cultivo de campo			
Cultivo	Cuando muestrear	Donde muestrear	No. plantas
Alfalfa	Etapa temprana	1/3 superior de la planta	12-30
Canola	Antes de formación de semilla	Hoja recientemente madura	60-70
Trébol	Antes de floración	1/3 superior de la planta	30-40
Maíz/maíz dulce	Plántula o antes de floración o Floración a formación de mazorca	Todo el follaje aéreo Hoja recientemente madura Hoja opuesta/debajo del jilote o mazorca	15-20 12-20 12-20
Algodón	Plena floración	Hoja recientemente madura	40-50
Pastos/forraje mixtos	Etapa de mejor calidad	4 hojas superiores	30-40
Granos pequeños (cebada, avena, trigo, centeno, arroz)	Etapa de plántula Antes del espigamiento	Todo el follaje aéreo 4 hojas superiores	25-40 25-40
Sorgo	Antes/y durante panoja	2da. Hoja desde arriba	20-30
Soya	Antes y/ durante floración	Hoja recientemente madura	20-30
Remolacha azucarera	A media estación	Hoja recientemente madura	20-30
Caña de azúcar	Sobre 4 meses de edad	4ta. Hoja desde arriba completamente desarrollada	15-20
HORTALIZAS			
Espárrago	Madurez	Follaje de 45 a 75cm	10-30
Frejol	Plántula o Antes/y en floración	Todo el follaje aéreo Hoja recientemente madura	20-30 20-30
Apio	Media estación	Pecíolo más externo de Hoja recientemente madura	12-20
Pepino	Antes de formación de fruto	Hoja recientemente madura	12-20
Cultivos de cabeza floral (Col, Coliflor)	Antes de formación de cabeza	Hoja recientemente madura hacia el centro	12-20
Cultivo de hoja (lechuga, espinaca)	Media estación	Hoja recientemente madura	12-20
Melón, sandía	Antes de formación de fruto	Hoja recientemente madura	12-20
Pimiento	Media estación	Hoja recientemente madura	25-50
Papa	Antes y/ durante floración	3ra. a 6ta. Hoja desde el punto de crecimiento	15-20
Raíz/cultivo de bulbo (zanahoria, remolacha, cebolla)	Antes del alargamiento de raíz o bulbo	Hoja recientemente madura	20-30
Tomate (campo)	A media floración	3ra. a 4ta. Hoja de el punto de crecimiento	15-20
Tomate (invernadero)	A mitad de floración desde el 1ro. A 6to. Racimo	Pecíolo de hoja abajo u opuesto al racimo superior	15-20

Cuadro 3.12. Valores de referencia para análisis foliar de arándanos, avellano europeo, banana, cerezos, chirimoyo y ciruelo.

Nutriente		Arandano Highbush	Avellano Europeo	Banana	Cerezos	Chirimoyo	Ciruelo
Nitrógeno (N)	%	1,40-2,00	2,20-2,80	2,6-4,0	1,7-3,0	2,20-3,00	2,40-3,00
Fósforo (P)	%	0,07-0,20	0,14-0,60	0,2-0,3	0,12-0,25	0,12-0,20	0,14-0,25
Potasio (K)	%	0,40-0,80	0,90-3,00	3,0-4,0	1,5-3,0	1,00-1,50	1,60-3,00
Calcio (Ca)	%	0,30-0,80	0,70-2,50	0,8-1,2	1,8-3,0	1,30-2,50	1,50-3,00
Magnesio (Mg)	%	0,12-0,25	0,20-1,00	0,3-0,46	0,3-0,8	0,25-0,50	0,30-0,80
Hierro (Fe)	ppm	60-200	50-400	70-200	60-250	40-200	60-250
Manganeso (Mn)	ppm	50-400	25-800	100-2200	40-200	50-150	40-160
Cinc (Zn)	ppm	7-25	16-80	18-35	15-50	20-40	20-50
Cobre (Cu)	ppm	3-15	3-50	7-20	4-30	8-22	6-16
Boro (B)	ppm	25-80	30-80	20-80	20-80	50-100	25-60

Cuadro 3.13. Valores de referencia para análisis foliar de damasco, espárrago, frambueso, frutilla, granado e higo.

Nutriente		Damasco	Espárrago	Frambueso	Frutilla	Granado	Higo
Nitrógeno (N)	%	1,8-3,0	2,95-4,9	2,00-3,50	2,60-3,50	1,30-2,00	2,00-3,50
Fósforo (P)	%	0,1-0,3	0,18-0,35	0,20-0,50	0,25-0,35	0,11-0,25	0,15-0,30
Potasio (K)	%	2,0-3,0	1,16-2,64	1,20-3,00	1,00-2,00	0,80-1,80	1,20-2,50
Calcio (Ca)	%	1,2-3,0	0,86-1,76	0,60-2,50	0,70-1,50	0,60-1,80	1,20-3,00
Magnesio (Mg)	%	0,3-0,6	0,27-0,7	0,30-1,00	0,25-0,40	0,15-0,40	0,38-0,60
Hierro (Fe)	ppm	100-200	40-250	50-150	100-200	50-250	50-250
Manganeso (Mn)	ppm	50-150	72-170	50-300	200-500	25-350	25-300
Cinc (Zn)	ppm	20-50	16-30	20-80	30-80	15-50	20-50
Cobre (Cu)	ppm	5-20	6-11	2-50	5-12	4-15	4-50
Boro (B)	ppm	40-80	25-200	25-80	30-100	25-80	45-100

Cuadro 3.14. Valores de referencia para análisis foliar de kiwi, limonero, mandarina, manzano, mora y naranjo.

Nutriente		Kiwi	Limonero	Mandarino	Manzano	Mora	Naranjo
Nitrógeno (N)	%	1,8-2,7	2,4-2,7	2,4-2,7	1,90-2,40	2,80-3,70	2,4-2,8
Fósforo (P)	%	0,15-0,25	0,14-0,25	0,12-0,25	0,14-0,20	0,17-0,34	0,12-0,16
Potasio (K)	%	1,6-3,0	1,5-2,0	0,7-1,0	1,10-1,50	1,40-1,90	0,7-1,1
Calcio (Ca)	%	2,5-4,0	3,0-5,0	3,0-5,0	1,00-2,00	0,65-1,40	3,0-5,0
Magnesio (Mg)	%	0,30-0,70	0,25-0,45	0,25-0,45	0,25-0,35	0,22-0,46	0,25-0,60
Hierro (Fe)	ppm	60-200	60-100	60-100	60-250	50-150	60-120
Manganeso (Mn)	ppm	50-300	25-60	25-60	50-160	130-300	25-200
Cinc (Zn)	ppm	12-45	25-70	26-70	20-50	28-60	25-100
Cobre (Cu)	ppm	5-15	6-14	6 14	5-20	8-29	5-16
Boro (B)	ppm	25-70	30-100	30-100	20-50	38-57	30-100

Cuadro 3.15. Valores de referencia para análisis foliar de nectarino, nogal, olivo, palto, papayo y peral.

Nutriente		Nectarino	Nogal	Olivo	Palto	Papayo	Peral
Nitrógeno (N)	%	2,5-4,0	2,2 -3,5	1,4-2,2	1,60-2,80	1,30-2,50	2,30-2,70
Fósforo (P)	%	0,14-0,35	0,1 -0,3	0,10-0,30	0,12-0,25	0,20-0,35	0,14-0,20
Potasio (K)	%	1,5-3,0	1,2-3,0	0,8-1,5	0,90-2,00	1,90-3,0	1,20-2,00
Calcio (Ca)	%	1,5-2,5	0,7- 2,0	1,0-2,0	1,00-3,00	1,50-2,5	1,50-2,10
Magnesio (Mg)	%	0,3-0,8	0,3-1,0	0,10-0,30	0,25-0,80	0,50-0,7	0,30-0,50
Hierro (Fe)	ppm	60-250	50-150	50-200	50-200	50-200	60-200
Manganeso (Mn)	ppm	40-160	30-300	20-200	30-500	25-150	60-120
Cinc (Zn)	ppm	20-50	20-100	10-30	20-200	20-50	20-50
Cobre (Cu)	ppm	5-20	3-20	4-25	4-20	4-15	9-20
Boro (B)	ppm	20-60	30-200	15-150	30-300	30-60	20-40

Cuadro 3.16. Valores de referencia para análisis foliar de pistachio, vid, eucaliptus y pino radiata.

Nutriente		Pistachio	Vid* vinifera	Vid** vinifera	Uva** mesa	Eucaliptus globulus	Pino radiata
Nitrógeno (N)	%	2,3-2,9	0,90-1,20	1,5-2,8	1,90-2,50	1,7-2,0	1,6-2,0
Fósforo (P)	%	0,14-0,20	0,30-0,49	0,16-0,25	0,15-0,35	0,12-0,26	0,11-0,25
Potasio (K)	%	1,0-2,0	1,30-3,00	1,00-1,80	1,00-1,80	0,8-1,2	0,7-1,3
Calcio (Ca)	%	1,3-4,0	1,00-2,50	1,8-3,5	1,80-3,50	0,4-1,3	1,1-1,5
Magnesio (Mg)	%	0,4-1,2	0,40-0,7	0,2-0,5	0,25-0,50	0,10-0,22	0,07-0,20
Hierro (Fe)	ppm	-	30-200	40-200	60-250	30-700	40-250
Manganeso (Mn)	ppm	30-80	25-500	40-200	30-250	100-2000	20-500
Cinc (Zn)	ppm	10-25	25-60	20-60	28-150	15-50	20-100
Cobre (Cu)	ppm	4-10	6-20	5-20	5-20	4-24	4-15
Boro (B)	ppm	90-250	30-70	30-80	30-80	12-50	12-70

*Análisis realizado en peciolo en plena floración.

** Análisis realizado en lámina en periodo de pinta.

Cuadro 3.17. Valores de referencia para análisis foliar de achicoria, arveja, avena, canola, cebada y frejol.

Nutriente		Achicoria	Arveja	Avena	Canola	Cebada	Frejol
Nitrógeno (N)	%	3,00-5,00	2,50-4,00	3,00-4,50	3,00-5,00	2,5 - 5,0	4,00-6,00
Fósforo (P)	%	0,20-0,50	0,25-0,33	0,25-0,40	0,35-0,60	0,35 - 0,60	0,35-0,50
Potasio (K)	%	3,50-7,00	1,80-2,80	2,50-3,00	2,50-5,00	3,0 - 5,5	1,80-4,00
Calcio (Ca)	%	0,80-2,00	1,50-2,70	0,20-0,50	1,00-2,00	0,30 - 1,0	1,00-3,00
Magnesio (Mg)	%	0,30-0,70	0,21-0,38	0,15-0,50	0,25-0,50	0,15-0,30	0,25-0,80
Hierro (Fe)	ppm	50-200	50-300	25-100	50-300	50 - 150	50-300
Manganeso (Mn)	ppm	40-200	35-100	25-100	30-250	20 - 60	50-400
Cinc (Zn)	ppm	20-80	25-50	15-70	25-80	20 - 60	30-100
Cobre (Cu)	ppm	4-15	5-10	4-20	3-15	6 -12	6-20
Boro (B)	ppm	25-100	20-60	6-10	25-70	6- 12	35-60
Estado fenológico		3 a 7 pares de hojas	1° flor visible	macolla a inicio encañado	en roseta	macolla	4 o más hojas trifoliadas desarrolladas

Cuadro 3.18. Valores de referencia para análisis foliar de girasol, maíz, papas, remolacha, soya y trigo.

Nutriente		Achicoria	Arveja	Avena	Canola	Cebada	Frejol
Nitrógeno (N)	%	3,50-5,80	2,50-4,00	3,1-3,4	4,00-5,00	3,50-4,70	3,00-4,50
Fósforo (P)	%	0,24-0,48	0,23-0,50	>0,22	0,20-0,55	0,22-0,46	0,25-0,40
Potasio (K)	%	3,50-5,50	1,75-3,00	>9	3,50-6,00	1,40-2,20	2,50-3,00
Calcio (Ca)	%	0,75-1,80	0,20-0,80	>0,6	0,65-1,50	0,40-2,20	0,20-0,50
Magnesio (Mg)	%	0,28-0,68	0,18-0,40	0,5-1,5	0,25-1,20	0,30-1,25	0,15-0,50
Hierro (Fe)	ppm	50-120	30-200	53-104	60-140	50-350	25-100
Manganeso (Mn)	ppm	25-100	20-200	>30	30-100	20-100	25-100
Cinc (Zn)	ppm	30-80	20-60	>20	10-80	21-50	15-70
Cobre (Cu)	ppm	4-28	7-20	>4	4-15	10-30	4-20
Boro (B)	ppm	35-100	5-30	>20	35-100	21-55	6-10
Estado fenológico		2 a 6 hojas	5 a 8 pares de hojas	40 a 60 dde	3 a 7 pares de hojas	50% floración	macolla a inicio encañado

Cuadro 3.19. Valores de referencia para análisis foliar de tomate, sandía, melón, brócoli, repollo, y capsicum.

Nutriente		Tomate	Sandía	Melón	Brocoli	Repollo	Capsicum
Nitrógeno (N)	%	3,7-4,5	2,5-4,5	2,0-5,0	3,2-5,5	2,3-3,4	3,0-4,5
Fósforo (P)	%	0,40-0,70	0,3-0,7	0,25-0,4	0,3-0,7	0,3-0,4	0,3-0,6
Potasio (K)	%	3,5-5,0	2,5-3,7	2,5-5,0	2,0-4,0	2,6-3,1	4,0-6,0
Calcio (Ca)	%	2,0-3,0	2,2-3,5	2,0-3,5	1,2-2,5	1,5-2,0	0,4-1,0
Magnesio (Mg)	%	0,4-0,7	0,4-1,2	0,5-1,0	0,23-0,4	0,25-0,5	0,3-0,8
Hierro (Fe)	ppm	80-150	120-300	60-120	-	50-200	60-300
Manganeso (Mn)	ppm	60-200	60-240	50-100	25-150	30-100	30-100
Cinc (Zn)	ppm	20-50	20-60	20-80	45-95	20-60	20-60
Cobre (Cu)	ppm	5-15	4-8	5-20	1-5	5-10	6-20
Boro (B)	ppm	30-60	30-80	25-75	30-200	20-60	40-100
Estado fenológico		15 a 45 días después trasplante	media estación	antes de formación de frutos	formación de cabeza	formación de cabeza	media estación

Cuadro 3.20. Valores de referencia para análisis foliar de zanahoria, coliflor, apio, lechuga, cebolla y zapallo.

Nutriente		Zanahoria	Coliflor	Apio	Lechuga	Cebolla	Zapallo
Nitrógeno (N)	%	2,5-4,0	3,0-4,5	2,5-3,5	4,0-5,5	4,4-5,0	4,0-6,0
Fósforo (P)	%	0,20-0,50	0,3-0,5	0,2-0,5	0,4-0,6	0,3-0,6	0,25-1,0
Potasio (K)	%	2,50-4,50	1,5-2,8	4,0-7,0	5,0-9,0	3,9-4,8	2,8-4,0
Calcio (Ca)	%	1,30-2,50	0,7-2,0	0,8-2,5	1,6-2,0	0,8-1,5	1,4-3,5
Magnesio (Mg)	%	0,18-0,48	0,15-0,3	0,25-0,5	0,3-0,6	0,15-0,25	0,3-1,0
Hierro (Fe)	ppm	50-350	-	80-200	60-200	50-300	50-300
Manganeso (Mn)	ppm	30-350	30-100	20-250	40-100	50-300	50-300
Cinc (Zn)	ppm	20-50	30-70	30-100	40-80	25-100	25-100
Cobre (Cu)	ppm	5-25	5-12	8-12	10-18	5-10	5-10
Boro (B)	ppm	30-60	30-80	30-60	5-40	30-100	30-100
Estado fenológico		2 a 4 pares de hojas	inicio cuaja	media estación	8 hojas	prebulbo	floración

5. ANÁLISIS DE SAVIA

Una variante del análisis foliar clásico, que se realiza en el laboratorio, es el análisis rápido que se practica en el campo sobre muestras frescas, que por lo común emplea la savia de las plantas. Esta técnica, cuando está bien empleada permite tomar decisiones rápidas, en el momento del diagnóstico, que contribuyen a aminorar las pérdidas de rendimiento causadas por concentraciones bajas de un elemento.

El **análisis de savia** consiste en extraer este líquido de toda la planta o algún órgano de referencia y determinar en él los elementos minerales de interés para la nutrición de la planta. El análisis de savia permite conocer la situación nutricional de una planta en un estado determinado de su desarrollo, son una medida de los elementos solubles que transporta la planta y disponibles para el metabolismo, y así es no sólo una indicación de nutrición instantánea, sino también puede ser usado como una medida de la tasa de metabolismo.

El análisis de savia ha sido usado principalmente como una evaluación rápida de los niveles de nitratos y, últimamente, existen equipos que permiten medir esta fracción de nitrógeno a nivel de campo. Ello da una idea diferente de la nutrición de la planta comparado con el análisis de tejido tradicional. Es más sensible y capaz de descubrir carencias menores o temporales más fácilmente. La limitación es que se dispone de escasa información sobre niveles de referencia, que permitan interpretar adecuadamente estos análisis. En el Cuadro 3.21, se presentan algunos valores de referencia de nitratos para análisis de savia en algunos cultivos.

Cuadro 3.21. Valores de nitratos en análisis de savia para algunos cultivos.

Cultivo	Epoca de Muestreo	Parte de la planta	Deficiente ppm N-NO ₃	Suficiente ppm N-NO ₃
Lechuga	Media estación	Sección media de la hoja recientemente desarrollada	<4.000	>8.000
Espárragos	Planta de desarrollo intermedio	10 cm superiores de la planta	100	500
Brocoli	Media estación	Sección media de la hoja recientemente desarrollada	7.000	10.000
Repollo de bruselas	Media estación	Sección media de la hoja recientemente desarrollada	5.000	9.000
Zanahoria	Media estación	Peciolo hojas	5.000	10.000
Coliflor	Formación	Sección media de la hoja recientemente desarrollada	5.000	9.000
Zapallo Italiano	Inicio desarrollo	Peciolo de la 6° hoja desde el ápice	5.000	9.000
Papas	Inicio estación	Peciolo de la 4° hoja desde ápice	8.000	12.000
Papas	Final estación de crecimiento	Peciolo de la 4° hoja desde ápice	3.000	6.000
Maíz dulce	Inicio formación Mazorca	1° hoja sobre mazorca	500	1.500
Espinaca	Media estación	Peciolo de hojas recientemente maduras	4.000	8.000
Tomate	Inicio floración	Peciolo de la 4° hoja desde ápice planta	8.000	12.000
Tomate	Fruto de 3 cm diámetro	Peciolo de la 4° hoja desde ápice planta	6.000	10.000
Tomate	1° Fruto con color	Peciolo de la 4° hoja desde ápice planta	2.000	4.000
Sandia	Inicio formación fruto	Peciolo de la 6° hoja desde ápice planta	5.000	9.000

6. ANÁLISIS DE FRUTOS

Los análisis mineralógicos no son nuevos. Comenzaron a utilizarse en la década del setenta en Inglaterra y hoy son una herramienta fundamental para los países productores de fruta fresca. En Chile, a menudo, son utilizados por grandes agricultores, especialmente exportadores, e incluso productores más pequeños. Es una evaluación importante para el diagnóstico nutricional de huertos frutales y para determinar la calidad y condición de los frutos en postcosecha.

Cuadro 3.22. Valores medios de nutrientes en frutos y vegetales de algunas especies. Valores en base a peso húmedo.

Especie	M.Seca g/100g	Azúcar g/100g	N mg/100g	P mg/100g	K mg/100g	Ca mg/100g	Mg mg/100g
Arándanos	14,3	9,1	140	16	66	10	5
Cebolla	10,9	6,2	160	23	138	30	8
Cerezos	18,9	14,6	195	26	238	12	9
Ciruela	12,9	9,8	100	17	187	7	7
Cítrico	14,2	9,6	120	15	128	25	9
Espárragos	7,6	1,6	464	66	283	23	12
Frambuesa	12,3	5,1	130	28	164	16	16
Frutilla	8,4	6,1	90	26	170	17	12
Kiwi	14,6	8,3	130	33	289	33	13
Mango	14,0	10,4	110	13	150	15	9
Manzano	16,0	11,6	30-45	6-12	90-150	4-6	4-7
Manzano 60ddpf ⁽¹⁾	14,7	-	48-72	7-16	117-195	6-10	5-11
Melón	9,0	6,8	80	6	180	6	6
Mora	12,5	5,6	176	24	154	24	18
Naranja	13,0	8,2	130	16	122	24	8
Nectarines	13,9	9,8	154	25	257	7	9
Palto	28,5	0,4	290	57	583	19	27
Papas	21,9	1,4	320	41	413	10	19
Papaya	12,4	9,5	120	9	215	21	17
Pera	14,8	10,9	50	9	105	7	5
Pimiento	7,1	4,2	130	23	216	7	11
Piña	13,6	11,4	84	6	121	14	11
Pomelo	11,4	6,9	140	18	129	23	8
Repollo	9,9	4,5	190-380	26	230	56	12
Tomates	6,0	3,2	80	21	216	9	8
Uva mesa	16-22	16,0	80-180	8-25	100-250	8-20	5-10
Zanahoria	11,0	7,2	70	16	178	26	7

Referencia: Roe y otros (2013) y Public Health England, 2017.

⁽¹⁾ 60 ddpf: 60 días después de plena flor.

7. DIAGNÓSTICO VISUAL

El diagnóstico visual de los síntomas de anormalidad nutricional tiene un fundamento fisiológico. Los niveles deficitarios o excesivos de un nutriente producen desarreglos en el metabolismo de la planta que se manifiestan como síntomas generales y específicos de deficiencia o exceso en algún órgano (particularmente las hojas).

Los síntomas visuales asociados a problemas nutricionales son: falta de crecimiento después de la germinación; enanismo severo; síntomas específicos; anormalidades internas (particularmente de los tejidos conductores); atraso en la madurez; disminución de rendimiento; calidad deficiente; o alteración del patrón de crecimiento de las raíces.

La posibilidad de detectar el origen de una deficiencia (o toxicidad) mediante la sintomatología visual se fundamenta en los siguientes hechos:

- Los síntomas presentan un patrón característico que depende de la función y metabolismo del nutriente en la planta.
- Los síntomas presentan una secuencia determinada en su desarrollo; y
- Los síntomas aparecen en órganos determinados que tienen una edad fisiológica dada, lo cual se asocia con la posición dentro de la planta y la movilidad de los nutrientes.

La técnica de diagnóstico visual sólo puede usarse cuando el cultivo está establecido y las plantas desarrollándose, por lo que tiene escaso valor preventivo. Los síntomas aparecen después que la planta ha sufrido los efectos de la deficiencia por algún tiempo, sin manifestarlo exteriormente. A la altura del desarrollo en que los síntomas se manifiestan ya se ha producido un daño irrecuperable en el rendimiento potencial. La técnica de diagnóstico visual es, además, poco específica y en el evento de ocurrir varias deficiencias simultáneas, no permite la separación de los síntomas.

Entre las ventajas más obvias están la rapidez, la no necesidad de contar con equipo y la posibilidad de usarse cada vez que se requiera.

A pesar de las limitantes señaladas el diagnóstico visual constituye una de las técnicas más efectivas para hacer diagnósticos preliminares en el campo. Su empleo requiere de cierta metodología que se inicia antes de hacer una visita al campo y durante la inspección ocular. Generalmente el diagnóstico visual tiene una perspectiva más amplia que el sólo diagnóstico de un problema nutrimental.

1. INTRODUCCIÓN

Los fertilizantes minerales aplicados racionalmente y de manera equilibrada permite obtener cosechas más abundantes y de mejor calidad. Una de las formas de lograr un equilibrio nutritivo en el suelo, es la aplicación de los fertilizantes minerales a través de los sistemas de fertirrigación. Al considerar las características químicas del suelo y el agua de riego y el comportamiento de los fertilizantes al incorporarlos al sistema, se está haciendo un uso racional, oportuno y equilibrado de los fertilizantes.

En el caso del uso de los fertilizantes, en un sistema de riego por goteo es importante considerar algunas características individuales de los mismos, que al usarse en el riego convencional no pudieran ser tan relevantes. Tal es el caso de la solubilidad en el agua de riego. Esta varía con la temperatura, ya que al disolverse algunos fertilizantes enfrían el agua y, en consecuencia, bajan la solubilidad del producto que se agrega o de otros ya existentes en la mezcla. Otro aspecto a considerar es la compatibilidad entre los productos que se incorporan en la solución madre, los cuales pueden reaccionar entre sí o con los elementos contenidos en el agua de riego y formar compuestos insolubles precipitados.

Otro de los aspectos a considerar es el carácter ácido o alcalino (básico) del fertilizante a disolver, ya que esta reacción tendrá influencia en la solubilización o insolubilización de los precipitados. Finalmente, tomar en cuenta que al disolver los fertilizantes en el agua se incrementa la conductividad eléctrica de la solución del suelo pudiendo sobrepasar los límites de tolerancia de las plantas.

2. DEFINICIÓN DE FERTILIZANTE

Se define como un producto químico, en este caso inorgánico, que aporta elementos nutritivos para las plantas, y que como producto químico es una sal inerte sin carga, que al mezclarse con el agua (ya sea del suelo o de una solución) se disocia dejando nutrientes en forma iónica, es decir elementos con carga negativa (aniones) o con carga positiva (cationes).

Cuadro 4.1. Ejemplo de disociación iónica de algunos fertilizantes de uso común.

Fertilizante	Iones cargados después de la hidrólisis	
NH ₄ NO ₃ (Nitrato de amonio)	NH ₄ ⁺ (Cation Amonio)	NO ₃ ⁻ (Anion Nitrato)
KH ₂ PO ₄ (Fosfato monopotásico)	K ⁺ (Cation Potasio)	H ₂ PO ₄ ⁻ (Anion Fosfato)
NH ₄ H ₂ PO ₄ (Fosfato monoamónico)	NH ₄ ⁺ (Cation Amonio)	H ₂ PO ₄ ⁻ (Anion Fosfato)
H ₃ PO ₄ (Acido Fosfórico)	H ⁺ (Cation Hidrógeno)	H ₂ PO ₄ ⁻ (Anion Fosfato)
KCl (Cloruro de Potasio)	K ⁺ (Cation Potasio)	Cl ⁻ (anion cloruro)
KNO ₃ (Nitrato de Potasio)	K ⁺ (Cation Potasio)	NO ₃ ⁻ (Anion Nitrato)
K ₂ SO ₄ (Sulfato de Potasio)	K ⁺ (Cation Potasio)	SO ₄ ⁻² (Anion Sulfato)

3. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS FERTILIZANTES PARA FERTIRRIEGO

En este aspecto se mencionan, entre otras, tres importantes características de los fertilizantes, que influyen en un adecuado manejo del fertirriego: La composición química, la pureza, la solubilidad, la salinidad y el pH.

3.1. Solubilidad y compatibilidad

La fertirrigación exige que los fertilizantes sean solubles, con solubilidad superior a 100 g/L, dejando un mínimo de impurezas (inferior a 0,5%); que sean compatibles entre ellos, para que no reaccionen formando precipitados que pudiesen obturar los emisores, y que sean compatibles con los iones contenidos en el agua de riego y con su pH. Como norma general, el ión sulfato es incompatible con el calcio, al igual que los fosfatos. En aguas calcáreas la aplicación de fosfatos y polifosfatos, se debe aplicar cuando se considere indispensable, y con extrema precaución. Para evitar precipitaciones en la preparación de las soluciones madres, se debe disponer a lo menos de dos estanques y seguir la siguiente recomendación: **En estanque A disolver los fertilizantes sin calcio y en estanque B, disolver aquellos fertilizantes sin fosfatos y sulfatos (Figura 4.1).**

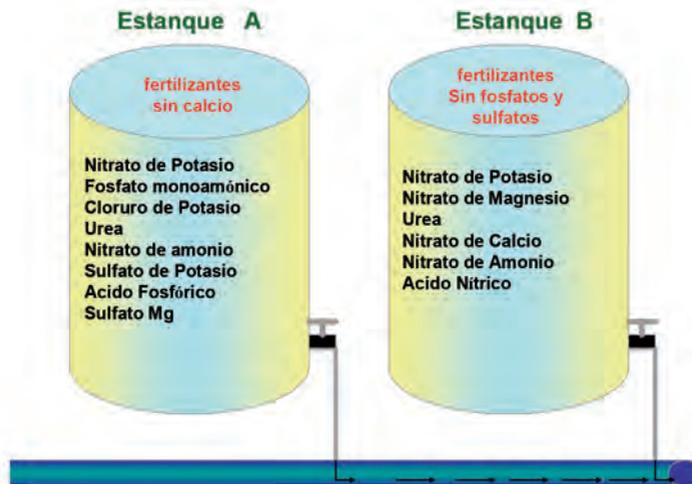


Figura 4.1. Compatibilidad de los fertilizantes.

La solubilidad de un fertilizante es la cantidad máxima del fertilizante que puede ser completamente disuelta en un volumen determinado de agua. La solubilidad de la mayoría de los fertilizantes aumenta con la temperatura del agua. Por ejemplo, el nitrato de potasio en el agua a 5°C permite disolver 133 gramos por litro, en tanto, si el agua tiene 20°C su disolución se incrementa a 209 gramos por litro.



Figura 4.2. Los Fertilizante para fertirriego deben ser completamente solubles.

Cuando se disuelve un fertilizante, no se debe exceder su solubilidad, ya que pueden formarse precipitados y se podría obstruir el sistema de riego. Además, los nutrientes que usted tenía la intención de proporcionar a través de la solución no serían completamente disponibles. El Cuadro 4.2 muestra valores para fertilizantes de uso más frecuente, pero deben tenerse presente las siguientes consideraciones al preparar las soluciones de fertilizante:

- a) Que se trata de valores para soluciones, en agua pura, saturadas a temperatura de alrededor de 20°C.
- b) Que al aumentar la concentración de iones diferentes a los del producto en cuestión aumenta la solubilidad.
- c) Que al aumentar la concentración de iones iguales a los del producto en cuestión disminuye la solubilidad (efecto del ión común).

Cuadro 4.2. Fertilizantes solubles con su respectiva concentración y disolución máxima aconsejables para la preparación de las soluciones madres.

Fertilización	Concentración de nutrientes (%)	Cantidad máxima a disolver en un estanque de 1000 Litros de capacidad
Acido fosfórico (85%)	61 P ₂ O ₅	100 Litros
Acido nítrico (15.5% N)	15,5 N	100 Litros
Cloruro de potasio	60 K ₂ O	250 kilos
Fosfato de urea	18 N - 44 P ₂ O ₅	200 kilos
Fosfato monoamónico	12 N - 61 P ₂ O ₅	200 kilos
Fosfato monopotásico	52 P ₂ O ₅ - 34 K ₂ O	200 kilos
Nitrato de amonio	33 N	350 kilos
Nitrato de calcio	15.5 N - 26 CaO	200 kilos
Nitrato de magnesio	11 N - 16 MgO	250 kilos
Nitrato de potasio	13,5 N - 46 K ₂ O	120 kilos
Sulfato de amonio	21 N - 22 S	120 kilos
Sulfato de magnesio	16 MgO - 13 S	100 kilos
Sulfato de Potasio	50 K ₂ O - 18 S	100 kilos
Urea	46 N	350 kilos

Se debe considerar que al disolver juntos dos o más fertilizantes que contienen un elemento común (por ejemplo, el nitrato de potasio junto con el sulfato de potasio) se disminuye la solubilidad de los fertilizantes. En tal caso, no puede referirse a los datos de la solubilidad solos. Lo mismo sucede cuando el agua utilizada para la disolución de los fertilizantes es muy rica en minerales, por ejemplo, en calcio, magnesio o sulfatos. En tales casos, las reacciones químicas adicionales entran en juego, y los cálculos se hacen más complejos. Generalmente, las prácticas de ensayo y error son comunes y la prueba del jarro es lo más recomendable.

Prueba del jarro: Hemos establecido que si se mezcla fertilizantes, hay que estar familiarizado con los datos de la solubilidad de los fertilizantes utilizados, así como con las reacciones químicas que pueden tener lugar. Para evitar los precipitados no deseados, la recomendación común es realizar una “prueba del jarro”. En esta prueba, los fertilizantes son inicialmente mezclados en un frasco que contiene la misma agua utilizada para el riego.

Los fertilizantes deben ser agregados exactamente en la misma concentración como en la solución madre. Si se forma un precipitado o si la solución tiene un aspecto “lechoso”, la prueba debe ser repetida con concentraciones más bajas de los fertilizantes.

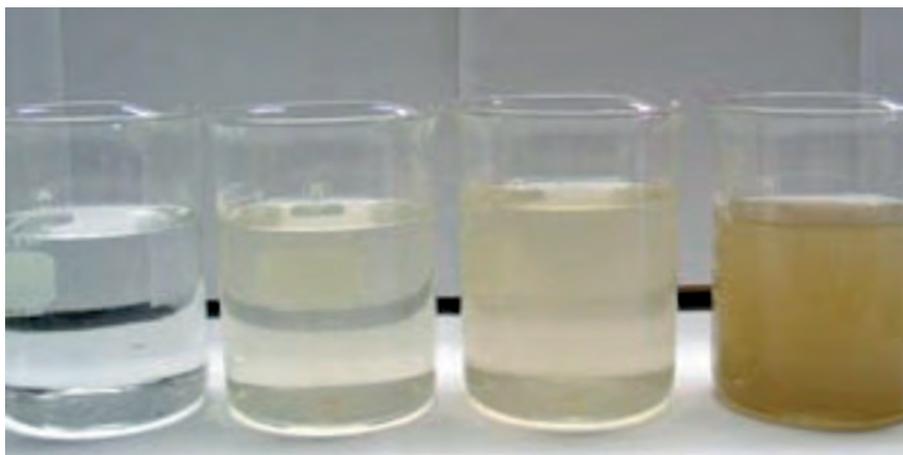


Figura 4.3. Imágenes de disolución de fertilizantes con diversos grados de turbidez o precipitados.

3.2. Efecto de los fertilizantes sobre el pH

Después de ser disueltos, los fertilizantes pueden alterar el pH de la solución en los estanques. Este efecto ocurre como consecuencia de la reacción del ión con el agua o debido a la presencia de ácidos en el proceso de fabricación del fertilizante (Cuadro 4.3).

Se debe tener presente y diferenciar el efecto sobre el pH al preparar la solución madre y, otro aspecto, es el carácter ácido o básico del fertilizante consecuencia de reacciones secundarias que ocurren en el suelo o con el sistema radicular al ser éstos absorbidos por la planta. En el Cuadro 4.4, se describe el efecto de la fertirrigación con varias fuentes de N, sobre el pH del suelo a diferentes distanciamientos bajo el emisor.

Cuadro 4.3. Efecto de diferentes concentraciones de fertilizantes sobre el pH de una solución madre.

Fertilizante	Concentración (%)			
	1	5	10	15
Acido fosfórico	1,9	1,5	1,4	1,0
Nitrato de Amonio	5,2	5,1	5,0	4,8
Sulfato de Amonio	5,6	5,6	5,7	5,8
UAN 32	7,6	7,8	8,9	8,1
Urea	7,3	9,0	9,2	9,6
Fosfato monoamónico	4,5	4,2	4,1	4,0
Fosfato de urea	1,9	1,6	1,4	
Nitrato de Potasio		7,0-10,0		
Sulfato de potasio		7,0-8,8		
Nitrato de Magnesio		5,5-7,0		
Nitrato de Calcio		6,0-7,0		

Cuadro 4.4. Efecto de la fertirrigación con varias fuentes de N, sobre el pH del suelo a diferentes distanciamientos bajo el emisor. (Haynes, 1990).

Profundidad (cm)	Testigo	Nitrato de Ca 2L/h	Sulfato de Amonio 2L/h	Urea 2L/h
0- 5	5,8 B ¹	6,3 C	4,8 A	5,0 A
5-10	5,9 B	5,8 B	4,9 A	5,1 A
10-20	5,8 B	5,9 B	5,2 A	5,3 A
20-30	5,7 B	5,7 B	5,6 B	5,3 A
30-40	5,7 B	5,8 B	5,7 AB	5,5 A
40-50	5,7 A	5,7 A	5,7 A	5,6 A

¹ Las letras comparan las diferencias estadísticas de pH entre los tratamientos a una misma profundidad.

Como se puede observar en los Cuadros 4.3 y 4.4, la urea da una solución alcalina al disolverse en agua, no obstante, al ser aplicada al suelo, ésta sufre un proceso de nitrificación que tiene como resultado una acidificación del suelo.

En consecuencia, los fertilizantes nitrogenados, en función de su forma química, presentan efectos diferentes en el pH del suelo. El nitrógeno amoniacal, después de ser absorbido por la raíz o sufrir oxidación biológica (nitrificación), tiene como resultado una acidificación del suelo. Por otro lado, la planta para mantener el equilibrio electroquímico al absorber nitrógeno en forma nítrica libera a la rizósfera hidroxilos (OH⁻) que promueven la alcalinización del suelo. La hidrólisis de la urea inicialmente, como se señaló, alcaliniza el suelo, formando NH₄⁺ y, posteriormente, lo acidifica a través de la nitrificación.

Se puede concluir que las fuentes de nitrógeno pueden tener un efecto ácido o alcalino, de acuerdo a lo siguiente:

NO₃⁻ = efecto alcalino
 NH₄⁺ = efecto ácido
 NO₃NH₄ = efecto ácido
 Urea = efecto ácido

También, se debe tener en consideración que cuando los fertilizantes amoniacales son aplicados vía fertirriego, principalmente en caso del riego por goteo, donde el área de humedecimiento del sistema es más restringido, el efecto de la acidificación puede ser muy intenso. Para dar cuenta de esta situación, consideremos un ejemplo en un huerto frutal.

Ejemplo de aplicación de urea por fertirriego y su efecto en el pH:

Si 100 kg de Nitrógeno aplicado como urea en forma convencional sobre la totalidad de la superficie del suelo, acidifica 0,1 unidad de pH, es decir baja el pH de 6,0 a 5,9. ¿Cuál sería el efecto sobre la acidificación del suelo si esta misma dosis se aplica por un sistema de riego por goteo en un huerto de cerezos donde se humedece el 20% del área total?.

La dosis aplicada es de 100 kg N-Urea/ha y el % de humedecimiento del riego por goteo es 20% del área total. Entonces 100 kg N-Urea se aplican en 2000 m² lo que es igual a 0,05 kg/m²

Si se considera el área de una hectárea (10.000 m²) la dosis aplicada sería equivalente a 0,05 kg/m² x 10.000 m²/ha = 500 kg N-Urea/ha.

Como resultado, el suelo en el área de humedecimiento quedaría cinco veces más acidificado, es decir bajaría del valor original de pH 6,0 a pH 5,5.

De lo anterior, se desprende que cuando se emplea la técnica de fertirriego, se debe ser cuidadoso con las fuentes fertilizantes empleadas, debiéndose emplear fuentes más balanceadas, de tal forma de evitar cambios drásticos en las condiciones químicas del suelo.

En la Figura 4.4 se presenta un ejemplo de los cambios de pH secuenciales desde el estanque donde se prepara la solución madre, salida de los emisores y solución de suelo, al inyectar una solución madre en una dosis de 10 litros por m³ de agua de riego.

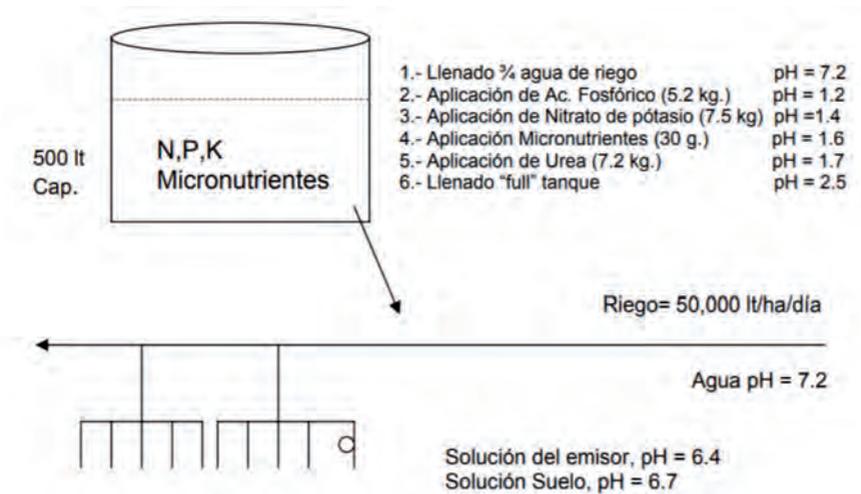


Figura 4.4. Ejemplo de cambios secuenciales generados en el pH desde la preparación de la solución madre, hasta la solución de suelo, empleando una inyección con factor de dilución 1:100 o 10 litros de solución madre por m³ agua de riego (pH agua = 7,2, pH suelo=7,3). Sanchez, J., 2016.

Cuadro 4.5. Conductividad eléctrica (CE), pH y concentración de nutrientes de algunas soluciones fertilizantes en concentración de 10 mM/L.

Fertilizante	Fórmula	Peso Mol. (g)	Nutriente	Concentración Nutriente mg/L	CE (dS/m)	pH
Acido Nítrico	HNO ₃	63	N	140	0.69	2.0
Nitrato de amonio	NH ₄ NO ₃	80	N	280	0.69	5.5
Nitrato de Ca	Ca(NO ₃) ₂	164	N	280	2.01	6.9
			Ca	400		
Sulfato de Amonio	(NH ₄) ₂ SO ₄	132	N	280	1.38	4.5
Urea	NH ₂ CONH ₂	60	N	280	2.70	7.0
Fosfato monoamónico	NH ₄ H ₂ PO ₄	115	N	140	0.35	4.7
			P	310		
Acido fosfórico	H ₃ PO ₄	98	P	310	0.39	2.3
Fosfato Monopotásico	KH ₂ PO ₄	136	P	310	0.69	4.6
			K	390		
Cloruro de Potasio	KCl	74	K	390	0.69	7.0
Nitrato de Potasio	KNO ₃	101	N	140	0.69	7.0
			K	390		
Sulfato de Potasio	K ₂ SO ₄	174	K	780	0.20	7.0

3.3. Efecto de los fertilizantes sobre la conductividad eléctrica (CE)

Después de conocer el programa de fertirriego a aplicar y los fertilizantes a emplear, resulta necesario el conocimiento de la CE generada con esa mezcla de fertilizantes y agua de riego. Lógicamente, lo más preciso es medir directamente la CE generada. Aunque esto raramente se realiza en el campo por la premura de tiempo y, en algunos casos, por no contar con el instrumento necesario, que por lo demás son de bajo costo.

Otra posibilidad es usar factores que de forma aproximada nos estiman la CE. El método más empleado, por su simpleza y buena aproximación, es el cálculo de la CE mediante la multiplicación de la suma de cationes (o aniones) en la solución nutritiva final en miliequivalentes por litro y multiplicarlos por 0,10.

$$CE \text{ (dS/m)} = \sum (Ca+Mg+Na+K) \times 0,10$$

Un tercer método establece el cálculo de la CE del agua de riego y la generada por los diferentes cantidades de fertilizantes a aportar (Cuadro 4.6). Cabe señalar, que estos valores están estimados en agua destilada y sin ninguna otra sustancia presente, por lo que la CE obtenida será siempre algo diferente a la real.

Los ácidos son compuestos que aportan o liberan protones (H⁺), y este ión es el que posee una mayor influencia sobre la CE, unas siete veces superior al ión sodio (Na⁺). Efectivamente, si observamos el Cuadro 4.6, donde se representa la variación de CE de

los principales ácidos empleados en la elaboración de soluciones nutritivas, al adicionarlos sobre agua pura (destilada), podemos ver los grandes incrementos de CE alcanzados. Con solo 1 ml/L de ácido fosfórico, se incrementa la CE en 2,5 dS/m. En el caso del ácido sulfúrico, con 1 ml/L, la CE se incrementa a 10 dS/m.

Uno de los mayores problemas, de muchas aguas de riego, es su alta CE debido a su elevado contenido de sales. Por lo tanto, resultaría inconveniente la acidificación de la solución nutritiva, a pesar de sus muchas ventajas, si esto supone un incremento de la CE. Pero al contrario de lo que cabría suponer, esto no es así, es más, tras el ajuste del pH de la solución nutritiva mediante la adición de ácidos, la CE no se incrementa o lo hace muy levemente, y en algunos casos hasta desciende con respecto a la solución inicial, como consecuencia de su neutralización con los bicarbonatos del agua de riego (Cuadro 7).

Cuadro 4.6. Conductividad eléctrica (dS/m a 25°C) generada por disolución en agua destilada de los principales fertilizantes empleados en fertirrigación a dosis normales de empleo (0,1, 0,5 y 1,0 g/L para fertilizantes sólidos y 0,1, 0,5 y 1,0 ml/L para los líquidos).

Fertilizantes Líquidos	Fórmula	0,1 ml/L	0,5 ml/L	1 ml/L
Ácido Nítrico (56%)	HNO ₃	0,477	2,290	4,571
Ácido Fosfórico (55%)	H ₃ PO ₄	0,263	1,080	1,861
Ácido Fosfórico (75%)	H ₃ PO ₄	0,405	1,538	2,523
Ácido Sulfúrico (55%)	H ₂ SO ₄	1,370	5,552	10,091
Fertilizantes Sólidos	Fórmula	0,1 g/L	0,5 g/L	1 g/L
Nitrato de Amonio	NH ₄ NO ₃	0,179	0,850	1,614
Nitrato de Ca	Ca(NO ₃) ₂	0,130	0,605	1,177
Sulfato de Amonio	(NH ₄) ₂ SO ₄	0,221	1,033	1,887
Urea	NH ₂ CONH ₂	0,001	0,001	0,002
Fosfato monoamónico	NH ₄ H ₂ PO ₄	0,096	0,455	0,889
Fosfato monopotásico	KH ₂ PO ₄	0,079	0,375	0,746
Cloruro de Potasio	KCl	0,194	0,948	1,880
Nitrato de Potasio	KNO ₃	0,144	0,693	1,364
Nitrato de Magnesio	Mg(KNO ₃) ₂	0,096	0,448	0,857
Sulfato de Magnesio	Mg SO ₄	0,099	0,410	0,753
Sulfato de Potasio	K ₂ SO ₄	0,188	0,880	1,694
Sal Cumún (referencia)	NaCl	0,211	1,003	1,937

Cuadro 4.7. Incrementos de conductividad eléctrica (CE) tras el ajuste a pH 5,5 de disoluciones de bicarbonato de concentraciones crecientes y volumen de ácido fosfórico (75%) necesario para ello.

Ácido Fosfórico (ml/m ³)	HCO ₃ ⁻ (meq/L)	CE (dS/m)
0	0	0
57	1	-0,001
114	2	-0,01
229	4	-0,016
343	6	-0,025
457	8	-0,04

4. FERTILIZANTES NITROGENADOS

Las soluciones de nitrógeno son una excelente fuente de nitrógeno, su utilización no presenta problemas dada su movilidad en el suelo y la buena solubilidad de los fertilizantes.

La presencia de nitrógeno en las líneas, después del riego, puede favorecer el desarrollo microbiano, que puede ser causa de obturaciones. En general, basta un lavado con la propia agua de riego, es decir, finalizar la aplicación de nitrógeno antes de la finalización del riego. Si el agua contiene nitratos este lavado no es eficaz y hay que recurrir a la aplicación de biocidas.

Al diseñar la fórmula fertilizante debe tenerse en cuenta el efecto del fertilizante sobre el pH. El nitrato de calcio y el nitrato de potasio tienen reacción alcalina, por lo que es aconsejable añadir ácido. El sulfato de amonio tiene reacción ácida y puede utilizarse para acidificar el agua de riego.

El sulfato de amonio (21-0-0) y el nitrato de amonio (33-0-0) son materiales fertilizantes muy comunes. En el primero, todo el nitrógeno está en forma de amonio, mientras que en el otro cerca del 26% del peso del fertilizante es nitrógeno amónico y el 8% es nitrógeno nítrico. La urea (46-0-0) es un fertilizante nitrogenado muy soluble, esto denota que no reacciona con el agua para formar iones y como tal es una molécula neutra. Mezclas de urea y nitrato de amonio, en agua, se hacen para dar una forma líquida y concentrada de estos compuestos. Todos estos fertilizantes nitrogenados pueden ser aplicados razonablemente sin tener efectos colaterales en el agua o en el sistema de riego.

5. FERTILIZANTES FOSFORADOS

El fósforo en algunos casos presenta ciertos inconvenientes:

- Muchos de los fertilizantes fosforados presentan baja solubilidad y las formas solubles tienen alto costo.
- Los fosfatos pueden precipitar con facilidad, causando obturaciones en la instalación de riego.
- La movilidad del fósforo en el suelo es en términos generales baja, por lo que sobre todo aplicado en suelos altamente fijadores de fósforo, se temía que el fósforo aplicado quedase retenido en los primeros centímetros del suelo, sin alcanzar la zona de mayor densidad de raíces. Sin embargo, los estudios realizados en riego por goteo muestran una movilidad del fósforo aplicado por fertirrigación muy superior a lo previsto y comparable a la que se consigue con la incorporación mediante laboreo del suelo. La explicación más general a este hecho es que al aplicar toda la dosis de fósforo en un volumen restringido del suelo, la capacidad fijadora del suelo bajo el gotero queda rápidamente saturada, produciéndose un avance subsiguiente del fósforo aplicado.

Si las aguas contienen calcio y el pH es superior a 6.5, existe un alto riesgo de precipitación de fosfatos, como fosfato tricálcico. Por lo tanto, debe hacerse una elección cuidadosa de los fertilizantes y sus concentraciones. Si el agua es ácida no hay limitaciones en el uso de fosfato, comprobando que el pH final esté próximo a 6. Si el agua contiene calcio y el pH es superior a 7 se utilizará fosfato monoamónico, que tiene efecto acidificante, pero debe comprobarse el pH final, y si es superior a 6 debe añadirse ácido nítrico o sulfúrico en la cantidad necesaria. El primero es de mayor precio, pero incorpora nitrógeno a la solución, con lo que se disminuyen las necesidades de fertilizante nitrogenado.

Cuando el agua de riego es dura (con altas concentraciones de calcio y magnesio), la adición de fosfato de amonio produce depósitos de ortofosfatos y pirofosfatos de calcio-magnesio.

Otra posibilidad para manejar el fósforo en el agua de riego es a través del uso de ácido fosfórico. La cantidad aplicada debe ser suficientemente alta como para producir un pH que evite la precipitación, pero que no produzca corrosión en las piezas metálicas de la red de riego.

Los fertilizantes fosforados solubles más comunes son: fosfato monoamónico (12-61-0), fosfato monopotásico (0-52-34) y fosfato de urea (18-44-0).

6. FERTILIZANTES POTÁSICOS

El cloruro de potasio es ampliamente usado como fuente de potasio. La presencia de cloro no presenta inconvenientes en la mayoría de los frutales. Su uso debe ser restringido en paltos y cultivos bajo invernadero o cuando se dispone de agua de riego con concentraciones excesivas de cloro.

El nitrato de potasio ha sido usado como una fuente de potasio y nitrógeno, el sulfato de potasio, como una fuente de potasio y azufre. Ambos materiales tienen menor solubilidad y mayor costo por unidad de potasio.

Aunque los fertilizantes potásicos tienen menor solubilidad que los nitrogenados, no existe, en general, problema para aplicar este elemento a través del agua de riego. La solubilidad del sulfato potásico en comparación con el resto de los fertilizantes, es la menor y para una mejor disolución de la solución madre se debe preparar en una concentración máxima de un 10%.

7. OTROS FERTILIZANTES

El azufre es un elemento que se aplica normalmente en fertilizantes potásicos y nitrogenados, por ejemplo, en el sulfato de amonio y el sulfato de potasio. Como aporte de magnesio el sulfato de magnesio es de uso común. También es adicionado con otros elementos tales como nitrógeno y potasio y, normalmente, no presentan problemas para aplicarse en el agua de riego.

La aplicación de calcio es peligrosa con aguas de riego de mala calidad, por el alto riesgo de que se produzcan precipitaciones. Es especialmente efectivo en casos de cultivos en sustrato, suelos muy ácidos y/o desequilibrados, así como en suelos y aguas con alto contenido en sodio. El nitrato de calcio es el fertilizante soluble más común que puede ser utilizado por fertirrigación como fuente de calcio; también, puede usarse el cloruro de calcio y formas quelatadas. En todos los casos debe comprobarse el pH, añadiendo ácido cuando sea necesario.

Varias fuentes de micronutrientes son usadas por fertirrigación. El sulfato de manganeso es una fuente común de manganeso; borax, solubor o ácido bórico como fuente de boro; los quelatos de zinc y las mezclas de zinc con nitrógeno son comúnmente aplicados como fuente de zinc; otros tantos micronutrientes frecuentemente son combinados con otros materiales fertilizantes.

No existe problema para la aplicación de micronutrientes, y su aplicación a través del agua de riego, mediante microirrigación puede hacerse de forma muy eficiente, lo que permite reducir cantidades de fertilizante y costos, como cuando se usan quelatos que tienen altos precios en el mercado.

La aplicación de micronutrientes es imprescindible en el caso que se presente una carencia definida o cuando las condiciones del suelo hagan prever una alta probabilidad que se genere un déficit (por ejemplo aplicaciones de Fe en suelos calizos). Sin embargo, se está popularizando el uso preventivo de pequeñas dosis de microelementos, donde, al explorar las raíces un menor volumen de suelo comparado con los sistemas de riego convencionales, es posible no encuentren en dicho volumen la cantidad necesaria para una correcta nutrición o que el contenido del suelo en formas asimilables de los diversos elementos decrezca rápidamente.

8. FERTILIZANTES COMÚNMENTE EMPLEADOS EN FERTIRRIGACIÓN Y MEZCLAS COMERCIALES

Cuadro 4.8. Formulas, solubilidad en agua, composición nutricional y peso de producto a disolver para preparación de soluciones nutritivas.

Compuesto	Fórmula	Solubilidad en agua (15°C g/L)	Porcentaje de nutrientes ⁽¹⁾	Preparación	
				Peso del producto a disolver (g m ⁻³) para preparar 1meq/L del nutriente	Peso del producto a disolver (g m ⁻³) para preparar 1mg/L del nutriente
Macroelementos					
Nitrato de amonio	NH ₄ NO ₃	1183	N-NH ₄ 16.5 N-NO ₃ 16.5	85 85	6.1 6.1
Nitrato de Calcio	5Ca(NO ₃) ₂ * NH ₄ NO ₃ *10H ₂ O	2660	Ca 18,5 N-NO ₃ 14 N-NH ₄ 1	100 100	5.3 6.9
Fosfato monopotásico	KH ₂ PO ₄	330	K 29 P 23	136 146	3.5 4.4
Nitrato de Magnesio	Mg(NO ₃) ₂ x 6 H ₂ O	1250	Mg 9 N-NO ₃ 11	128 128	11.1 9.1
Fosfato monoamónico	NH ₄ H ₂ PO ₄	227	N-NH ₄ 11 P 26	115 115	9.1 3.9
Ac. fosfórico	H ₃ PO ₄	5480	P 27	98	3.7 (2.2 ml)
Cloruro de potasio	KCl	238	K 52 Cl 47	74 74	1.9 2.1
Nitrato de Potasio	KNO ₃	133	K 36.5 N-NO ₃ 13	101 101	2.7 7.7
Sulfato de potasio	K ₂ SO ₄	120	K 41 S-SO ₄ 17	87 87	2.4 5.9
Urea	CO(NH ₂) ₂	1000	N-NH ₄ 46	31	2.2
Sulfato de magnesio	Mg SO ₄ x 7 H ₂ O	350	Mg 10	123	10.0

Continuación Cuadro 4.8.

Compuesto	Fórmula	Solubilidad en agua (15°C g/L)	Porcentaje de nutrientes ⁽¹⁾	Preparación
Micronutrientes				Peso del producto a disolver (g m ⁻³) para preparar 0.1mg/ L del nutriente
Quelatos de Hierro	FeEDTA		Fe 13	0.77
	FeEDDHA		Fe 6	1.67
	FeEDDHMA		Fe 6	1.67
	FeDTPA		Fe 11	0.91
Sulfato Ferroso	FeSO ₄ 7H ₂ O		Fe 19	0.53
Acido Bórico	H ₃ BO ₃		B 17	0.59
Borax	Na ₂ B ₄ O ₇ 10 H ₂ O		B 11	0.91
Sulfato de Cobre	CuSO ₄ 5 H ₂ O		Cu 23	0.43
Quelato de cobre	CuEDTA		Cu 14,5	0.69
Sulfato de Manganeso	MnSO ₄ 3 H ₂ O		Mn 26	0.38
Cloruro de Manganeso	MnCl ₂		Mn 17	0.58
Quelato de manganeso	MnEDTA		Mn 14	0.71
Sulfato de zinc (monoh.)	ZnSO ₄ H ₂ O		Zn 35	0.29
Sulfato de zinc (pentahidratado)	ZnSO ₄ 7H ₂ O		Zn 22	0.45
Cloruro de zinc	ZnCl		Zn 45	0.22
Quelato de Zinc	ZnEDTA		Zn 14	0.71
Molibdato de sodio	Na ₂ MoO ₄ 2H ₂ O		Mo 39	0.25
Molibdato de amonio	(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ 4H ₂ O		Mo 54	0.19

⁽¹⁾ Concentración expresada en forma de elemento.

Cuadro 4.9. Fertilizantes empleados para fertirriego y sus respectivas concentraciones.

Producto	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	S	MgO	Otros
Nitrogenados						
Urea	46					
Nitrato de Amonio	33					
Nitrato de Calcio	15.5					26 CaO
Nitrato de Potasio	13.5		46			
Fosfato de Urea	18	44				
Nitrato de Magnesio	11				16	
UAN 32	32					
Sulfato de Amonio	21			22		
Nitrato de Calcio y Magnesio	13.2				6.5	17.3 CaO
Ácido Nítrico	15.5					
Tiosulfato de amonio	12				26 S	
Fosfatados						
Fosfato Monoamónico	12	61		0.2		
Fosfato Monopotasio		52	34	0.6		
Fosfato de Urea	18	44				
Polifosfato de amonio	11	37				
Ácido Fosfórico		62				
Potásicos						
Cloruro de potasio			60			
Nitrato de Potasio	13.5		46			
Sulfato de potasio			50	18		
Tiosulfato de Potasio			25		17 S	
Magnésicos						
Sulfato de Magnesio				13	16	
Nitrato de Magnesio	11				16	
Micronutrientes						
Borax						10 B
Ácido Bórico						17B
Solubor						20 B
Sulfato de Cu (pentahidratado)						25 Cu
Sulfato de Cu (monohidratado)						35 Cu
Quelato de Cu EDTA						13 Cu
Quelato de Cu HEDTA						9 Cu
Sulfato ferroso						19 Fe
Sulfato férrico						23 Fe
Quelato Fe NaFeEDTA						5-14 Fe
Quelato Fe NaFeHEDTA						5-9 Fe
Quelato Fe NaFeEDDHA						6 Fe
Quelato Fe NaFeDTPA						10 Fe
Sulfato de Mn						26-28 Mn
Quelato Mn EDTA						12 Mn
Molibdato de sodio						39 Mo
Sulfato de Zinc (monohidratado)						35 Zn
Sulfato de Zinc (heptahidratado)						23 Zn
Quelato Zn EDTA						14 Zn
Quelato Zn HEDTA						9 Zn

Las empresas comercializadoras de fertilizantes ofrecen una amplia variedad de mezclas fertilizantes, algunas de éstas se presentan como ejemplo en el Cuadro 4.10. De acuerdo a la proporción que ocupa cada fertilizante en la mezcla total, se obtienen diferentes relaciones y concentraciones de nutrientes, pero las materias primas son los mismos fertilizantes simples indicados anteriormente. Algunos ejemplos de cómo se confeccionan estas mezclas se indican en el Cuadro 4.11.

Cuadro 4.10. Formulas de fertilizantes solubles comercializados por algunas empresas.

Producto	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	S	MgO	Otros	Empresa
Ultrasol inicial	15	30	15	0,7	0,5	B,Zn	SQM
Ultrasol desarrollo	18	6	18	6	1	Micros	SQM
Ultrasol crecimiento	25	10	10	0,8	0,5	Micros	SQM
Ultrasol producción	13	6	40		0,5		SQM
Ultrasol multipropósito	18	18	18	0,8	0,5	Micros	SQM
Ultrasol Fruta	9		47	5		Micros	SQM
Ultrasol Pinta		5	48	16		Micros	SQM
Ultrasol Calidad	15		18			15 CaO	SQM
Ultrasol Postcosecha	13	13	36			Micros	SQM
Novatec Solub	14	48				DMPP ⁽¹⁾	Compo
Novatec Solub	16	10	17			DMPP ⁽¹⁾	Compo
Novatec Solub	20	5	10			DMPP ⁽¹⁾	Compo
Novatec Solub	9	0	43			DMPP ⁽¹⁾	Compo
Novatec Solub	10	0	32			DMPP ⁽¹⁾	Compo
Poly.feed	19	19	19	1		Micros	Haifa
Poly.feed	20	20	20			Micros	Haifa
Poly.feed	20	9	20		2	Micros	Haifa
Poly.feed	17	10	27		1	Micros	Haifa
Poly.feed	16	8	32			Micros	Haifa
Nortrace	9	45	15			Micros	UAP
Nortrace	20	20	20			Micros	UAP
Nortrace	10	30	20			Micros	UAP
Nortrace	32	10	10			Micros	UAP
Nortrace	10	16	38			Micros	UAP
Nortrace	9	45	15			Micros	UAP
Nortrace	9	45	15			Micros	UAP
Nortrace	9	45	15			Micros	UAP
Nortrace	20	10	20			Micros	UAP
Vitra solubles starter	15	30	15			Micros	Vitra
Vitra solubles Desarrollo	18	6	18			Micros	Vitra
Vitra solubles Crece	25	10	10			Micros	Vitra
Vitra solubles Producción	13	6	40			Micros	Vitra
Vitra solubles Multipropósito	18	18	18			Micros	Vitra
Vitra solubles Post temprana	13	13	36			Micros	Vitra
Vitra solubles Postcosecha	5	15	35			Micros	Vitra
Vitra solubles Fruta (cuaja)	9	0	47			Micros	Vitra
Vitra solubles Pinta (envero)	1	5	48			Micros	Vitra

⁽¹⁾ Inhibidor de la nitrificación 3,4 dimetilpirazol fosfato (DMPP)

Cuadro 4.11. Componentes de algunas mezclas sólidas de fertilizantes para fertirrigación.

Componentes	N-P ₂ O ₅ -K ₂ O (%peso)	Otros	Empresa
KNO ₃ , NH ₄ H ₂ PO ₄ , Urea	20-20-20	Micronutrientes	Haifa Chemical Ltd.
KNO ₃ , NH ₄ H ₂ PO ₄ , NH ₄ NO ₃	23-7-23	Micronutrientes	Haifa Chemical Ltd
KNO ₃ , NH ₄ H ₂ PO ₄ , NH ₄ NO ₃	20-9-20	Micronutrientes	Haifa Chemical Ltd.
KNO ₃ , NH ₄ H ₂ PO ₄ , NH ₄ NO ₃ , MgSO ₄	18-6-18	MgO(2%) Micronutrientes	SQM
KNO ₃ , NH ₄ H ₂ PO ₄	13-6-40	Micronutrientes	SQM
KNO ₃ , NH ₄ H ₂ PO ₄ , K ₂ SO ₄	5-15-35	Micronutrientes	Vitra
KNO ₃ , NH ₄ H ₂ PO ₄ , NH ₄ NO ₃	25-10-10	Micronutrientes	Vitra

Las mezclas contienen microelementos en concentraciones variables de acuerdo a la empresa comercializadora:

Micronutriente	Haifa (mg/kg)	SQM# (mg/kg)	Vitra (mg/kg)
Fe*	1000*	300*	400*
Mn*	500*	200	300
Zn*	150*	700	200
Cu*	110*	200	50
B	70	200	100
Mo	200	100	10

* En la forma de quelatos.

Ejemplo de concentración para suelos neutros

9. MICROELEMENTOS Y QUELATOS

Cuando el medio de cultivo o agua de riego es de carácter alcalino, los microelementos de naturaleza metálica, Fe, Mn, Zn y Cu, precipitan hacia formas insolubles no asimilables por la planta.

Un quelato es un compuesto químico en el que una molécula orgánica rodea y se enlaza por varios puntos a un ion metálico, de manera que lo protege de cualquier acción desde el exterior evitando su hidrólisis y precipitación. Por tanto, químicamente hablando, los quelatos son moléculas muy estables.

Los quelatos son una excelente alternativa para adicionar metales al suelo o en forma foliar. Pueden ser aplicados teniendo siempre presentes las siguientes consideraciones: 1) incrementan la solubilización del metal hierro (Fe), zinc (Zn), manganeso (Mn); 2) transportan los micronutrientes hacia la raíz y/o hoja de la planta; 3) una vez ahí, ceden el metal (Fe, Zn, Mn), y 4) la parte orgánica del quelato puede volver a solubilizar más metal (Fe, Zn, Mn).

El término quelato (en inglés *chelate*) se deriva de la palabra griega *chela*, pinza, porque el anillo que se forma entre el quelante y el metal es similar en apariencia a los brazos de un cangrejo con el metal en sus pinzas.

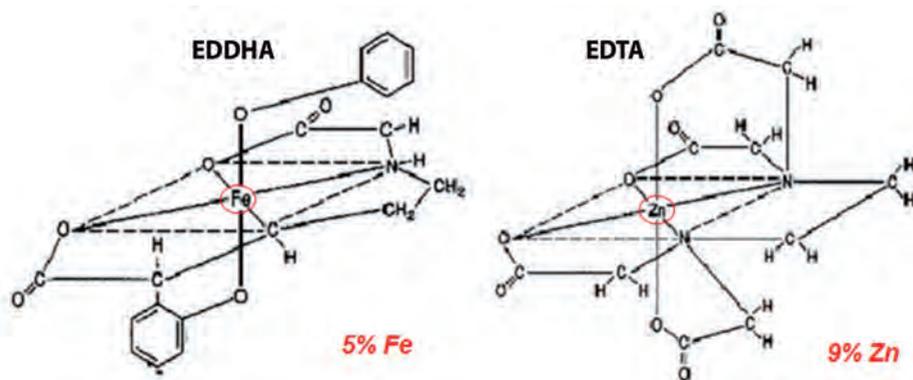


Figura 4.5. Formula química de dos quelatos de hierro y zinc (EDDHA-Fe y EDTA-Zn).

Los iones metálicos existen en solución en una forma altamente hidratada, esto es, rodeados por moléculas de agua, como los iones de Cu^{+2} , que están hidratados con cuatro moléculas de agua. Al reemplazo de estas moléculas de agua por una molécula de un agente quelante formando una estructura compleja en anillo se le llama quelatación, y a la molécula que reemplaza el agua se le llama ligando.

Hay muchos ligandos, pero los más importantes en agricultura son: EDTA (ácido etilen diamino tetraacético), DTPA (ácido dietilen-triamino-pentacético), EDDCHA (ácido etilen-diamino di-2-hidroxi-4-carboxi-fenil-acético), EDDHMA (ácido etilen-diamino di-orto-hidroxi-para-metil-fenil-acético) y el EDDHA (ácido etilen-diamino di-orto-hidroxi-fenil-acético).

Muchos otros compuestos químicos como el ácido cítrico, ácido málico, los ácidos húmicos, los ácidos lignosulfónicos, los poliflavonoides, algunos aminoácidos, algunos polisacáridos y algunos polialcoholes, tienen propiedades quelantes.

En el Cuadro 4.12, se presenta la importancia relativa (escala 0 a 10) de la quelación para la nutrición vegetal por vía suelo y foliar.

Cuadro 4.12. Importancia relativa (escala 0 a 10) de la quelación para la nutrición vegetal vía suelo y foliar.

Uso suelo	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	B
Uso suelo							
Para que el elemento no se precipite en el suelo	2	2	10	6	8	6	0
Para que el elemento sea más asimilable por la planta	1	1	8	4	8	6	0
Uso Foliar							
Para agregar una dosis importante sin que cause toxicidad	0	0	4	4	3	4	0
Para que no se precipite en el medio extracelular	0	0	8	6	3	2	0

La fuerza del enlace químico entre el ligando y el ión metálico depende del tipo de ligando, el tipo de iones y el pH. Cuanto más fuerte sea el enlace, más estable es el ión metálico y cada quelato presenta una característica definida denominada “diagrama de estabilidad”. En el Cuadro 4.13, se presentan los intervalos de pH al cual son estables algunos quelatos.

Cuadro 4.13. Intervalos de pH al cual son estables algunos quelatos.

	EDTA	EDDHA	Aminoácidos y ácidos orgánicos
Fe	1-6,5	3-10	1-6,5
Ca	6-10		1-6,5
Mg	6-10		1-6,5
Mn	4-10		1-6,5
Zn	5-10		1-6,5
Cu	1-10		1-6,5

10. FERTILIZANTES LÍQUIDOS Y PRINCIPALES VARIABLES DE DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN

En el mercado existen múltiples formulaciones de este tipo de fertilizantes, hay que tener especial cuidado a la hora de elegirlos porque en muchas ocasiones, productos con idéntica numeración N – P – K presentan formas de nitrógeno distintas y pueden contener cloruros sin especificarlos.

Las formulaciones y presentaciones son muy diversas. En este apartado, solo vamos a considerar las que se usan en fertirrigación de una manera habitual, sin incluir los que incorporan sustancias orgánicas como aminoácidos y materias orgánicas.

En general, la calidad de un fertilizante líquido se centra en dos aspectos fundamentales: El cumplimiento de la riqueza garantizada (calidad química) y la ausencia de material no disuelto en suspensión (calidad física). Esto último es especialmente importante para prevenir obstrucciones.

A la hora de valorar el uso de un fertilizante líquido, es importante conocer exactamente su composición y aspectos tales como densidad, estabilidad del producto y seguridad de que el fabricante cumple exactamente todas las especificaciones del producto en cada suministro, ya que al ser manipulados a granel, cabe la posibilidad de manipular el producto antes de entregarlo al usuario final. Algunos fabricantes para evitar esta posibilidad colorean sus productos de tal manera que, si se produce una contaminación en el transporte u otra manipulación, el producto vira de color.

Otra garantía de que el producto nos llega en perfectas condiciones es la comprobación de la densidad a la misma temperatura que nos indique el fabricante y por supuesto un análisis del producto debe recoger todas las concentraciones y especificaciones de la hoja del producto.

La riqueza debe aparecer en relación al peso del producto, no al volumen y debería especificar todos los iones presentes en el fertilizante, un producto con una riqueza del 10% p/p de potasio, efectivamente llevará esa cantidad de potasio como catión, pero como anión/es pueden aparecer nitratos, sulfatos y cloruros.

Las ventajas que presenta utilizar un sistema de fertilizantes líquidos son:

- Menor impacto ambiental: No se utilizan envases para su transporte y manipulación, por lo que tampoco hay restos de fertilizantes al retirar los envases, que ya de por sí son un grave problema, como ocurre con los sólidos.
- Eficiencia de los sistemas de inyección y de riego: Al estar totalmente diluidos, no se presentan los problemas de precipitados y suciedad que ocurren con los sólidos.
- Seguridad en la confección de soluciones nutritivas: Al trabajar con productos industriales puros o diluidos en cada estanque, no se producen errores en el pesado o en la ubicación del fertilizante en un estanque equivocado.
- Minimiza los riesgos laborales, ahorra tiempo y mano de obra: Nadie está en contacto directo con el fertilizante, ni tiene que manipularlo.

Las principales variables de diseño y caracterización de fertilizantes líquidos se refieren a: Equilibrio del fertilizantes, densidad, temperatura de cristalización, forma de nitrógeno, pH, además de algunas exigencias agronómicas específicas.

10.1. Equilibrio fertilizante

El equilibrio fertilizante propuesto, tras un estudio del sistema de solubilidad de las materias primas seleccionadas para satisfacer el conjunto de los requerimientos demandados, se traduce en una fórmula líquida concreta, químicamente estable, y con una temperatura de cristalización suficientemente baja para que, en condiciones normales, durante la época en la que se va a aplicar el producto, no se produzcan depósitos de cristales en el tanque de almacenamiento.

10.2. Densidad del fertilizante

El dato de densidad es imprescindible entre las especificaciones de un fertilizante líquido, ya que estos fertilizantes se compran por peso, pero en general, se dosifican por unidad de volumen. Por tanto, es preciso conocer su densidad para realizar las correspondientes transformaciones de masa a volumen.

10.3. Temperatura de cristalización

La temperatura de cristalización de un fertilizante líquido es aquella a la que se inicia la formación de cristales de las sales que lo componen, como consecuencia de una disminución de solubilidad de estas, por efecto de descensos de temperatura, y depende de la naturaleza y concentración de las mismas.

Todo fertilizante líquido “a medida” se formula, por tanto, manteniendo como premisa que su temperatura de cristalización sea suficientemente baja para que, en las condiciones ambientales de la época en la que se va a utilizar, no presente riesgo de cristalización. Esta sólo se producirá, inevitablemente, en caso de fríos excepcionales. En este sentido, en regiones de clima mediterráneo, los fertilizantes líquidos formulados para su uso durante el invierno presentan, como norma general, temperaturas de cristalización inferiores a los 4°C.

En cualquier caso, aunque la formación de cristales conlleva cierto riesgo de obstrucciones, no debe magnificarse como problema, ya que se trata de un proceso fácilmente reversible en la propia instalación a través de una dilución.

10.4. Formas de nitrógeno

Actualmente, las formas más comunes en las que se demanda la presencia de nitrógeno en los fertilizantes líquidos fabricados “a medida” son: Nítrica, amoniacal y ureica. Otras formas de nitrógeno como amínicas, amídicas y orgánicas en general, pueden ser consideradas también en algunas formulaciones para requerimientos y aplicaciones especiales.

En caso de fertilizantes destinados a pulverizaciones foliares suele ser recomendable, en general, que el nitrógeno se suministre básicamente en forma ureica, con el objeto de disminuir el riesgo de quemaduras en el follaje. En fertirriego, las formas básicas son la nítrica y la amoniacal, estando esta última bastante restringida en el caso de cultivos en sustratos inertes e hidroponía.

En general, a igualdad de características, en los fertilizantes líquidos del tipo NPK, la presencia de una mayor proporción de nitrógeno ureico frente a nitrógeno nítrico determina, en algunos casos, una menor temperatura de cristalización. Esto resulta determinante a la hora de diseñar fertilizantes para diferentes épocas del año y da lugar a una cierta contradicción ya que, si bien desde el punto de vista agronómico, para ciertos estados fenológicos de determinados cultivos, suele ser preferible en épocas invernales una mayor proporción de nitrógeno nítrico, desde el punto de vista químico, para disminuir la temperatura de cristalización, se requiere la presencia de una mayor proporción de nitrógeno ureico.

Es frecuente, por tanto, que para un mismo equilibrio NPK, el fabricante presente fórmulas alternativas para invierno y verano, de acuerdo con sus particularidades respecto a la temperatura de cristalización y la proporción relativa de formas nitrogenadas.

10.5. pH

El pH requerido por un fertilizante líquido viene determinado esencialmente por el sistema de aplicación utilizado y por las características del agua de riego. En el caso de sistemas de riego por goteo es recomendable el uso de fertilizantes de reacción ácida cuando las aguas son de pH elevado, duras y con altos contenidos de carbonatos y/o bicarbonatos. De esta forma, se disminuye el riesgo de precipitaciones, sobre todo de sales insolubles de calcio, en los emisores y demás elementos de la instalación.

Si bien desde el punto de vista de su manejo, en cuanto a la adecuación de los materiales que estén en contacto con el producto puro, el pH de los fertilizantes líquidos es un dato de importante consideración y, por tanto, debe estar incluido entre los parámetros especificados, el pH que tiene verdadero significado agronómico es el de la solución nutritiva resultante de la dilución del producto en el agua de riego.

10.6. Otros requerimientos agronómicos

En caso de cultivos muy sensibles al cloro y/o en condiciones de salinidad, así como en sistemas de cultivo sin suelo, se impone como limitación agronómica en el diseño de estos productos que su contenido de cloruros no sobrepase determinados niveles.

Los fertilizantes líquidos donde la presencia de cloruros es inferior al 2% Cl, pueden etiquetarse bajo la denominación “pobre en cloro” y con contenidos inferiores a 0,2% se opta por clasificarlos bajo la denominación “libre de cloruros”.

Por último, cabe mencionar que, a veces, es conveniente que el fertilizante empleado, fundamentalmente cuando este se diseña como solución nutritiva completa, se presente enriquecido en determinados elementos secundarios y/o microelementos.

11. FABRICACIÓN DE FORMULACIONES LÍQUIDAS PARA FERTIRRIEGO

El fertirriego es la aplicación de fertilizantes sólidos o líquidos por los sistemas de riego presurizados, creando un agua enriquecida con nutrientes. Los fertilizantes sólidos, simples o multinutrientes, tienen normalmente una concentración mayor que los líquidos, y pueden almacenarse y transportarse con mayor facilidad. Formulaciones especialmente preparadas para fertirriego, no obstante tienen la ventaja de su disolución más segura, granulometría más adecuada para garantizar un grado determinado, ventajas que no siempre implican un mayor costo.

En el Cuadro 4.14 se indica como fabricar grados determinados utilizando fertilizantes comunes disponibles en muchos comercios, factibles de prepararse directamente en el establecimiento donde se va a utilizar, con un mínimo de agitación. Se indican las cantidades necesarias de cada fertilizante para lograr un grado determinado, su contenido de nutrientes en porcentaje, el peso específico, el pH y la conductividad eléctrica resultantes de la solución.

La urea, el sulfato de amonio, el ácido fosfórico o fosfato monopotásico y el cloruro de potasio se proponen como fuentes de N, P, K, que sirven para preparar soluciones clarificadas y con una agitación mínima. Soluciones mas concentradas no pueden prepararse con sulfato de amonio y cloruro de potasio por la precipitación del sulfato de potasio. Cuando se usa ácido fosfórico en la formulación, este debe agregarse primero para aprovechar el calor de disolución. En cambio el calor de disolución del sulfato de amonio, la urea y el cloruro de potasio es negativo causando un considerable enfriamiento de la mezcla (reacción endotérmica). Si bien la concentración final no es afectada por el orden de agregado de los productos, el tiempo de agitación puede afectarse debido a las diferentes temperaturas de disoluciones de los fertilizantes, pero en todos los casos los tiempos oscilan entre 10 y 20 minutos como máximo, partiendo de una temperatura de 10 °C. Temperaturas mayores, desde ya, resultarán en menores tiempos de disolución.

Cuadro 4.14. Preparación de soluciones NPK en condiciones de campo (Lupin Magen & Gambach, 2002).

Relación			Composición			Cantidad agregada (Kg/100l)					Peso esp. g/cc	pH 1:1000	Cond. Elect. dS/m, 1:1000
N	P ₂ O ₅	K ₂ O ₅	(%Peso/peso)			Urea	Sulf. Amon.	FosfMonk	Ac. Fosfor.	Cl. Potas.			
1	1	1	3.3	3.3	3.3	7.2		5.3		5.4	1,080	3.3	0.300
1	1	1	4.4	4.6	4.9	9.6			8.8	3.0	1,110	5.7	0.122
1	1	1	2.7	2.8	3.1		12.9		5.4	2.0	1,100	5.3	0.340
1	1	3	2.4	2.4	7.3	5.2		3.9		12.0	1,110	3.6	0.360
1	1	3	1.5	1.5	4.7		7.1	2.4		7.7	1,080	3.7	0.380
1	1	3	3.1	2.9	9.3	6.7			5.6	12.1	1,120	5.7	0.273
1	2	3	1.5	1.4	4.4		7.1		2.7	5.7	1,080	5.6	0.285
1	2	4	2.2	4.8	8.9	4.8		7.7		14.6	1,140	4.3	0.490
1	2	4	1.1	2.0	4.1		5.2	3.2		6.7	1,060	3.5	0.360
1	2	4	2.4	4.2	8.8	5.2			8.1	9.9	1,130	5.6	0.273
1	1	4	1.0	2.1	4.0		4.8		4.0	4.3	1,060	5.7	0.224
3	1	1	6.9	2.3	4.3	15.0		3.7		7.0	1,070	4.3	0.200
3	1	1	3.0	0.9	1.2		14.3	1.5		2.0	1,070	3.9	0.340
3	1	1	10.5	3.2	3.3	22.8			6.2	1.9	1,090	5.7	0.096
3	1	1	4.1	1.4	1.3		19.5		2.7	0.6	1,100	6.2	0.469
3	1	3	4.7	1.6	4.7	10.2		2.6		7.7	1,080	3.7	0.220
3	1	3	2.9	0.9	3.0		13.8	1.5		4.9	1,090	4.0	0.410
3	1	3	6.4	2.1	6.4	13.9			4.0	8.2	1,170	5.7	0.203
3	1	3	2.9	1.0	3.0		13.8		1.9	3.8	1,100	6.2	0.393
1	2	1	2.5	5.0	2.5	5.4		8.1		4.1	1,080	3.1	0.380

■ Agregar primero.
 ■ Agregar después.
 ■ Agregar último.

12. ENMIENDAS Y BIOESTIMULANTES

Dentro de este grupo incluiremos los siguientes productos:

- Enmiendas: sulfato de calcio, carbonato de calcio, dolomita, ácidos húmicos, ácidos fulvicos, polisacáridos, péptidos, ácidos carboxílicos.
- Bioestimulantes: Aminoácidos, hormonas, enraizantes, extractos de alga, vitaminas

12.1. Enmiendas

Se conoce como enmienda aquellas sustancias que se incorporan a los suelos para mejorar ciertas características de éste, tales como: estructura, neutralizar acidez, mejorar suelos alcalinos y sódicos.

Estos productos están orientados a mejorar las propiedades físicas del suelo y en otros casos a corregir problemas de acidificación o salinización de los suelos. La estructura del suelo va a condicionar una serie de parámetros como aireación, movimiento de agua en el suelo, relación aire/agua, crecimiento de la raíz, etc.

Los productos de este grupo son fundamentalmente enmiendas químicas como el sulfato de calcio (yeso) y correctores orgánicos. En la Figura 4.6, se presenta el efecto de la aplicación de sulfato de calcio sobre el sistema radicular de una planta.

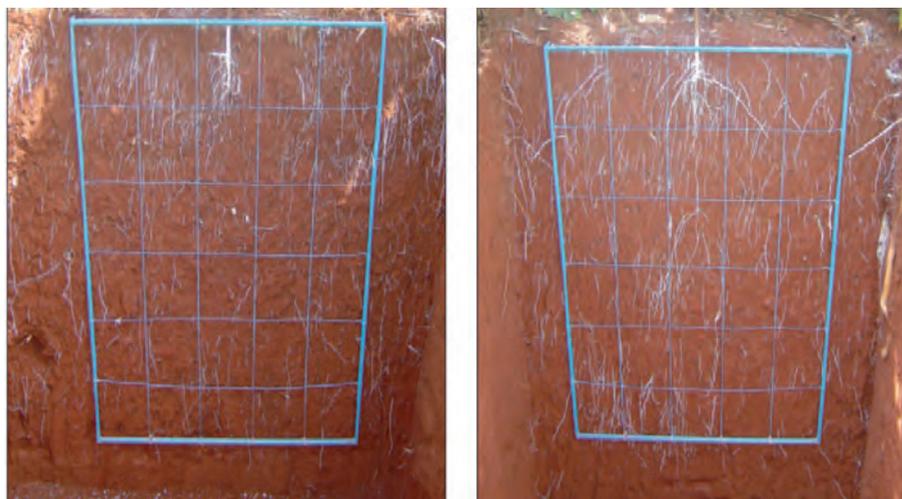


Figura 4.6. Efecto de la aplicación de sulfato de calcio (yeso) sobre la densidad radicular de un cultivo.

Existen ciertas situaciones problemáticas donde se justifica plenamente la aplicación de enmiendas. Por ejemplo:

Suelos arcillosos con tendencia a compactarse: La aplicación de sulfato de calcio o materiales orgánicos fácilmente degradables tienen un efecto positivo, tales como polisacáridos, péptidos, ácidos carboxílicos, ácido fúlvicos, etc.

Suelos arenosos con baja materia orgánica: aplicación de productos a base de materiales orgánicos que dejen residuo húmico importante, como ácidos húmicos. El aporte de guano de origen animal, también tienen un efecto importante.

12.2. Bioestimulantes

Este tipo de productos pueden ser totalmente diferentes entre sí, tanto en enfoque como en estrategia de aplicación. Se debe tener en consideración que normalmente falta regulación en la comercialización de la mayoría de estos productos, no reemplazan a los fertilizantes en su aporte de nutrientes y, en algunos casos, se presta para fraudes por los llamados productos “milagrosos”. Por ello, se recomienda que al hacer uso de ellos, dejar un sector control sin aplicación, con el propósito de detectar el verdadero efecto de su aplicación.

En cuanto al aporte de nutrientes, una planta en buen equilibrio, con un adecuado sistema de raíces tiene la capacidad para absorber la totalidad de nutrientes que la planta demanda, no deben ser necesarios aportes de nutrientes foliares extras, a no ser que la raíz tenga impedimentos para funcionar correctamente, como en el caso de suelo muy frío, suelo anegado, daños en raíz por plaga o enfermedad.

En condiciones normales, las hojas están para llevar a cabo el proceso fotosintético y transpirar, y la raíz para absorber agua, nutrientes y respirar (entre otras funciones).

El aporte de bioestimulantes (aminoácidos, hormonas, extractos de algas, etc.), no debe confundirse con nutrición. Son estimulantes o complementos de la nutrición. La planta es un ser vivo con una fisiología compleja, basada en miles de reacciones químicas, con síntesis y transformación de innumerables compuestos. Cada uno de esos procesos en situación de equilibrio en la planta está autorregulado, y se potencian unos u otros en función de la concentración relativa de cada una de las sustancias y la demanda que la planta tenga de ellas en cada momento.

La planta es “una fábrica” de aminoácidos, hormonas, vitaminas y otros compuestos esenciales del metabolismo, y que en condiciones normales se autorregula para que todos los procesos de esa “fábrica” se encuentren correctamente balanceados.

En una situación de equilibrio y correcto funcionamiento de la planta, la aplicación de este tipo de productos es un contrasentido, no van a lograr ningún beneficio adicional, y lo único que puede lograr es un desbalance en un sistema fisiológico plenamente equilibrado. Esto en modo alguno quiere decir que no sean productos útiles y necesarios en determinadas condiciones.

12.3. Aminoácidos

Los aminoácidos son formados por grupos carboxílicos (COO^-), amina (NH_2) y por una cadena lateral (R) unida por átomos de carbono.

Existen cerca de 300 aminoácidos que pueden encontrarse en animales y plantas, pero solamente 20 de éstos son considerados esenciales por formar parte de proteínas. Estos aminoácidos pueden ser clasificados en ácidos, básicos y neutros. Los aminoácidos ácidos son aquellos que poseen dos carboxilos y un grupo amino con carga negativa; en este grupo están aspartato y glutamato. Los aminoácidos básicos poseen carga positiva y dos grupos aminos y un grupo carboxilo, ejemplo lisina, arginina e histidina. Por último, los aminoácidos neutros, que presentan un grupo amino y uno carboxilo, como la glicina, fenilalanina, asparagina, glutamina, triptófano, prolina, cisteína, metionina, serina, tirosina, alanina, valina, leucina e isoleucina (Fagan y otros, 2016).

También, los aminoácidos pueden ser clasificados de acuerdo a su estructura, siendo divididos en aromáticos o que poseen un anillo aromático (triptófano, fenilalanina y tirosina) y alifáticos, que corresponden a los demás aminoácidos. Otra clasificación puede ser realizada de acuerdo a su polaridad, pudiendo ser apolares o hidrofóbicos, aquellos que no son solubles en agua (glicina, alanina, valina, leucina, isoleucina, metionina, prolina, fenilalanina y triptófano) y los polares o hidrofílicos, que son solubles en agua (serina, treonina, asparagina, glutamina, tirosina, cisteína, lisina, arginina, histidina, aspartato y glutamato).

Estudios de las últimas décadas han informado que los aminoácidos pueden encontrarse en el suelo de tres formas. La primera de ellas, disueltos en la solución de suelo, denominados aminoácidos libres, y están disponibles para ser absorbidos por las raíces de las plantas. Otra forma encontrada es la intercambiable, adsorbidos a las arcillas o materia orgánica del suelo. También, los pueden ser encontrados como moléculas de proteína; esta forma es de reducida disponibilidad para las plantas, pero responsable de reabastecer el stock de aminoácidos libres del suelo.

Las primeras evidencias, de que las plantas pueden absorber aminoácidos es de Hutckinson y Miller, (1911). La utilización de aminoácidos por las plantas es más ventajosa energéticamente que la absorción de NO_3^- y NH_4^+ . Los aminoácidos son moléculas orgánicas esenciales para el metabolismo vegetal. Algunos sirven para asimilar y transportar N de órganos fuentes, otros son precursores para la síntesis de metabolitos secundarios, como hormonas vegetales y moléculas de defensa.

Los aminoácidos de uso comercial pueden tener 3 orígenes: hidrólisis proteica ácida o enzimática (partiendo de proteínas animales o vegetales), síntesis microbiana (con levaduras mediante fermentación enzimática) y síntesis química o ingeniería biológica.

Los últimos son los más puros, los más efectivos y, por supuesto, los más caros. Pero la inmensa mayoría de los productos comerciales pertenecen al primer grupo y, está claro, que dependiendo de la materia orgánica de partida y del proceso seguido tendremos un material de mayor o menor calidad, y teniendo en cuenta que realmente no son aminoácidos libres puros, sino una mezcla de péptidos, polipéptidos, cadenas aminoacídicas rotas,

aminoácidos libres y otra serie de compuestos, con lo que dos productos con la misma riqueza de aminoácidos pueden tener una calidad totalmente distinta y un comportamiento agronómico totalmente diferente.

Los aminoácidos libres y péptidos de muy bajo peso molecular son sustancias nutritivas de fácil absorción y asimilación tanto por vía foliar como radical, transportándose a los órganos del vegetal, como brotes, flores y frutos, en los que existe una mayor demanda debido a su actividad, donde son utilizados como eslabones con los que la planta sintetiza sus propias proteínas, ahorrándose una serie de procesos metabólicos consumidores de energía que serían necesarios para la elaboración de los aminoácidos a partir del nitrógeno amoniacal o nítrico.

Existen muchos trabajos que demuestran el papel de los aminoácidos en atenuar varios tipos de estrés abióticos. Es interesante la aplicación de aminoácidos cuando la planta ha soportado condiciones adversas severas y, por tanto, está utilizando la mayor parte de su energía fundamentalmente en sobrevivir, con lo que la aplicación de aminoácidos puede ahorrar energía y ayudar a la planta. La aplicación de este tipo de productos puede incidir positivamente frente a las siguientes situaciones:

- Daños físicos de la planta con pérdida o deterioro de la masa foliar por viento, granizo, lluvia intensa, congelación, ataque fúngico o bacteriano intenso, etc.
- Situaciones de temperaturas extremas que detienen por completo el desarrollo de la planta, fundamentalmente frío muy intenso, o también cambios bruscos de temperatura.
- Situaciones de escasez de luz prolongada, donde la planta detiene prácticamente por completo su desarrollo por muy baja actividad fotosintética.
- Daños causados por fitotoxicidades generadas por tratamientos fitosanitarios, herbicidas o metales pesados.
- Situaciones de estrés hídrico o salino.
- También puede ser interesante su aplicación en momentos críticos del cultivo cuando se sospeche o haya condicionantes adversos en periodos de floración, cuajado primeros frutos, engorde primeros frutos, maduración, etc.

12.4. Hormonas

En el capítulo 13, se discute en detalle la acción de este tipo de productos. La aplicación de hormonas quizá sea el tema más conflictivo de entre todos los aportes. Según momento de aplicación, dosis, condiciones climáticas, variedades, etc., podemos tener desde los efectos deseados hasta los totalmente contrarios, pasando por efectos nulos. Por esa razón se recomienda que su aplicación se efectúe siempre ante situaciones críticas donde se conozcan plenamente los efectos y siempre efectuando una pequeña prueba de comprobación.

Se entiende por hormonas vegetales aquellas sustancias que son sintetizadas en un determinado lugar de la planta y se translocan a otro, donde actúan a muy bajas concentraciones, regulando el crecimiento, desarrollo o metabolismo del vegetal. El término fitorreguladores es más general y abarca a las sustancias, tanto de origen natural como sintetizadas en laboratorio, que determinan respuestas a nivel de crecimiento, metabolismo o desarrollo en la planta.

Las hormonas vegetales están presentes en casi todas las células, existiendo una variación cuali y cuantitativa según órganos.

Se conocen cinco grupos principales de hormonas vegetales o fitohormonas: Auxinas, citoquininas, giberelinas, etileno y ácido abscísico. Todas ellas actúan coordinadamente para regular el crecimiento en las diferentes partes de una planta. Otras sustancias que eventualmente pueden clasificarse como fitohormonas son: Poliaminas, jasmonatos, ácido salicílico, brasinosteroides y sistemina.

Auxinas, giberelinas, citoquininas, etileno y otros son promotores de respuestas. El ácido abscísico y otros (como los reguladores o retardantes del crecimiento) son inhibidores de respuestas.

En el Cuadro 4.15, se presenta una síntesis de los efectos fisiológicos producidos por este tipo de productos y sus respectivos nombres comerciales según Alarcón, s/a.

Cuadro 4.15. Efectos fisiológicos de las hormonas y nombres comerciales.

HORMONA	EFFECTOS FISIOLÓGICOS	NOMBRES COMERCIALES
Auxinas	Estimula la elongación celular, estimula el enraizamiento en esquejes de tallo y el desarrollo de raíces laterales en cultivo de tejidos, media en la respuesta fototrópica y geotrópica de las plantas, inhibe el desarrollo de las yemas laterales, dominancia apical, retrasa la senescencia de las hojas, puede inducir la formación del fruto y su crecimiento en algunas plantas, retrasa la maduración de los frutos, estimula la producción de etileno a altas concentraciones.	Ácido indolacético (AIA); ácido naftilacético (ANA); ácido indolbutírico (AIB); APA (ácido fenilacético); 2,4-D; 2,4,5-T; CPA (ácido p-cloro fenoxiacético). Como inhibidores de las auxinas tenemos TIBA, NPA, PCIB, Riboflavina.
Citoquininas	Estimulan la división celular. Estimulan el desarrollo de las yemas laterales. Contrarresta la dominancia apical. Inhiben el desarrollo de raíces laterales. Estimulan la expansión foliar debido al alargamiento celular. Retrasan la senescencia foliar al estimular la movilización de nutrientes y la síntesis de clorofila. También retrasan la senescencia en otros órganos vegetales. Eliminación de la dormancia que presentan las yemas y semillas de algunas especies.	Zeatina, kinetina, zeatinribósido, isopentenil adenina, isopentenil adenosina, 6-bencilamino purina (BAP), thidiazurón (TDZ), CPPU

Continuación Cuadro 4.15.

Cuadro 4.15. Efectos fisiológicos de las hormonas y nombres comerciales.

HORMONA	EFFECTOS FISIOLÓGICOS	NOMBRES COMERCIALES
Giberelinas	Inducción del alargamiento de entrenudos en tallos al estimular la división y la elongación celular. Sustitución de las necesidades de frío o de día largo requeridas por muchas especies para la floración. Inducción de la partenocarpia en algunas especies frutales. Eliminación de la dormancia que presentan las yemas y semillas de numerosas especies. Retraso en la maduración de los frutos. Pueden retrasar la senescencia en hojas y frutos de cítricos.	Actualmente hay más de 90 giberelinas aisladas de tejidos vegetales. Varían algo en estructura, y también en actividad. La mejor conocida del grupo es la GA3 (ácido giberélico). Todas las giberelinas conocidas son terpenoides.
Etileno	Es una hormona de estrés y sus efectos pueden ser apreciados particularmente durante períodos críticos (maduración de los frutos, abscisión de frutos y hojas, y la senescencia). Estimula la maduración de los frutos, estimula la abscisión de hojas y frutos. Estimula la senescencia floral y foliar, induce epinastía en hojas.	Ethephon o ácido 2-cloroetilfosfónico (nombre comercial Ethrel). También su precursor el ACC. El etileno se contrarresta siendo absorbido por permanganato potásico. También se bloquea con AVG (aminoetoxivinilglicina) o STS (tiosulfato de plata).
Ácido abscísico	Hormona de estrés. Estimula el cierre estomático (el estrés hídrico dispara la síntesis de ABA). Inhibe el crecimiento del tallo, inhibe la división celular. Induce la senescencia en hojas.	Inhibidores del ácido abscísico son la fluridona y el paclobutrazol.
Poliaminas: Putrescina, espermidina y espermina.	Pueden regenerar raíces, brotes, retrasar o prevenir la senescencia y regular la floración.	
Jasmonatos	Activan la síntesis de proteínas del estrés. Promueven la senescencia de hojas, inducen maduración del fruto y formación de tubérculos y bulbos. También promueven la regeneración de brotes y raíces.	

Según Alarcón (s/a), existen usos hormonales recomendados, bien reconocidos como los que se especifican a continuación:

- Uso de auxinas para frenar aborto de flores y frutos ante situaciones de escasez de luz o elevada temperatura (efectivo en pimiento, no tanto en pepino). Ejemplo: Aplicación de ANA una vez por semana mientras exista el problema.
- Uso de auxinas para inducir cuajado de tomate (frutos partenocárpicos) ante temperaturas extremas o baja viabilidad del polen. BNA y/o 4 CPA.
- Uso de auxinas como el ácido indolbutírico (IBA) y el ácido naftalénacético (NAA), para el enraizamiento de estaquillas o la inducción de crecimiento radicular.
- Reguladores de crecimiento para evitar plántulas etioladas o reducir la tendidura de cereales. Ejemplo: Paclobutrazol, CCC.
- Uso de giberelinas (AG3) para romper la dormancia de los tubérculos de papas recién cosechadas y conseguir así una brotación rápida y uniforme.
- Control de la brotación de yemas, por ejemplo NAA previene la brotación de las yemas de tubérculos de papas almacenadas. MENA (éster metílico del ácido naftalenacético) y la MH (hidracida maleica) también inhiben la brotación de yemas. El primero en tubérculos de papas y el segundo en bulbos de cebolla, en zanahoria y en remolacha.
- Aplicaciones exógenas de NAA inducen la floración de numerosas especies frutales (floración sincronizada y fructificación uniforme). Otras sustancias como el Ethephon, CCC, Phosphon-D, también inducen la floración.
- Raleo químico: El IAA se emplea en el aclareo químico de flores y frutos de diversas especies frutales (manzano, peral, duraznero).
- Aplicaciones de etileno (Ethephon) aceleran la maduración de algunas especies hortícolas cultivadas en invernadero (tomate, pimiento, melón).
- La bencilaminopurina (BAP), el 2,4-D, el CCC, etc. Retrasan la senescencia de especies hortícolas como la coliflor, col, lechuga.
- Alteraciones del tamaño, color y forma de los frutos: Las giberelinas, la BAP, el 2,4-D, etc. Alargan los racimos de uvas.
- Las auxinas y citoquininas se emplean en el cultivo de tejidos vegetales in vitro.
- Auxinas sintéticas 2,4-D; 2,4,5-T; etc., se usan como herbicidas.
- Frenar la proliferación de flores masculinas en cucurbitáceas en condiciones de días largos y altas temperaturas. Ejemplo: Aplicación de Ethephon con planta pequeña.

12.5. Enraizantes

Existen dos tipos de enraizantes, aquellos que no tienen hormonas y que simplemente son una mezcla de NPK más aminoácidos y micronutrientes y aquellos que aportan auxinas (además de lo anterior en la mayoría de los casos). Los primeros no son demasiado interesantes en una agricultura intensiva, salvo por el aporte de aminoácidos, ya que tenemos la capacidad de dotar a la planta nutricionalmente de forma correcta. Los segundos promueven la síntesis de raíces adventicias, que deben ser consolidadas mediante un buen manejo del riego y la nutrición, si no, igual que se inducen su síntesis, las raicillas no se consolidan y mueren.

Si necesitamos que la raíz crezca y colonice volumen de suelo, lo único efectivo es mantener una adecuada estructura de suelo y tener un perfecto manejo del riego y la nutrición. También destacar que esto último, en la mayoría de los casos, es mucho más efectivo que la utilización de enraizantes.

La utilización de enraizantes (mejor con hormona auxínica) es interesante en los estados iniciales tras el trasplante, si la raíz no viene demasiado bien del vivero, o en los últimos estados del cultivo, si pretendemos alargar el ciclo, ya que, a pesar de mantener un buen manejo del riego y la nutrición, el cultivo va perdiendo raíz a medida que la cosecha va progresando.

Interesa que además de la hormona, el producto enraizante venga con otras sustancias que tengan una acción complementaria en la estimulación de las raíces, tales como aminoácidos, vitaminas, protectores fitosanitarios de la raíz (fosfitos).

12.6. Extractos de algas

Son productos que suelen contener proteínas sencillas, aminoácidos, polisacáridos, fitohormonas promotores del crecimiento (citoquininas, auxinas y giberelinas), inductores de defensas (betalainas, fitoalexinas, terpenos y fenoles aromáticos con actividad fungistática) y nutrientes en proporciones más o menos constantes. Fundamentalmente son vigorizantes del desarrollo vegetal y mejoradores de la movilización de las reservas nutritivas de la planta.

Se ha reportado una gama amplia de los efectos beneficiosos al usar los extractos de algas marinas, incluyendo un aumento en los rendimientos de la cosecha, mayor resistencia a condiciones de estrés, aumento en la asimilación de los constituyentes útiles del suelo, incidencia reducida de los ataques por hongos e insectos, aumento en la resistencia de las plantas a las heladas, reducción de pérdidas en el almacenaje de frutas y mejoramiento en la germinación de las semillas. Se pueden aplicar en momentos donde sea necesario una gran activación del crecimiento, como una planta detenida por exceso de carga de fruta o cuando se pretende una prolongación bastante mayor del ciclo de cultivo.

12.7. Vitaminas

Productos esenciales para muchas reacciones bioquímicas, así por ejemplo la tiamina es esencial para el crecimiento. Otras vitaminas de aplicación interesante: Inositol, riboflavina, piridoxina, menadiona, ácido ascórbico, etc. Una aplicación de una mezcla de azúcar y un complejo vitamínico, suele tener un efecto muy positivo ante plantas fuertemente estresadas.

1. ANTECEDENTES GENERALES

Un agua será de buena calidad para el riego agrícola cuando, cumpliendo con sus funciones básicas hacia la planta, garantice un rendimiento óptimo y no produzca efectos perjudiciales al suelo. La calidad del agua es un antecedente fundamental a tener en cuenta en el rubro agrícola, puesto que determina el éxito o fracaso de una inversión. El suelo, normalmente lo podemos corregir cuando presenta exceso de sales, pero eliminar las sales del agua, si bien es factible técnicamente, todavía implica costos que no se pagan normalmente con la rentabilidad del rubro agrícola. No obstante, en cultivos intensivos de alta rentabilidad, se justifica la instalación de plantas desalinizadoras cuando el agua es de mala calidad. El costo de esta operación se estima entre 0,5 a 1 dólar por metro cúbico de agua de riego.



Figura 5.1. Cultivo de arándano en Baja California, México, regados con agua desalinizada. Conductividad eléctrica inicial 3,5 dS/m y final después de la desalinización 0,8 dS/m.

La calidad del agua para el riego por tanto está ligada a la terna suelo-agua-planta, porque, además de considerar el efecto sobre la nutrición de la planta, se debe considerar el efecto que la calidad del agua produce en el equilibrio químico del suelo.

La evaluación de la calidad de un agua para riego se basa inicialmente en su composición química. Esta información, que se puede referir como la calidad química del agua, si bien es de utilidad, resulta incompleta para asesorar sobre el uso y precauciones que se debe dar a un agua en relación con el riego. Por ello se hace necesario introducir el concepto de calidad agronómica del agua, que tiene en cuenta las interacciones agua-suelo-planta (Cuadro 5.1).

Cuadro 5.1. Consideraciones para realizar una evaluación del agua de riego.

Calidad química del agua	<ul style="list-style-type: none"> • Conductividad eléctrica (CE), pH • Contenido de cationes: Ca^{+2}, Mg^{+2}, K^+, Na^+, RAS (Relación de Adsorción de Sodio) • Contenido de aniones: Cl^-, SO_4^{-2}, HCO_3^-, CO_3^{-2} • Contenido de elementos tóxicos y contaminantes
Características químicas y físicas del suelo a regar	<ul style="list-style-type: none"> • pH, textura, materia orgánica, RAS • Velocidad de infiltración, conductividad hidráulica • Morfología del perfil • Drenaje
Cultivo	<ul style="list-style-type: none"> • Tolerancia a la salinidad, al sodio y elementos tóxicos como cloro y boro.
Clima	<ul style="list-style-type: none"> • Precipitación, evapotranspiración
Método de riego	<ul style="list-style-type: none"> • Empleo de una fracción para lavado de sales

Los parámetros que un agua debe reunir y los valores normales que debe tener, se obtienen de los numerosos estudios FAO sobre riego y drenaje, estudios que por otra parte están en continua revisión.

Los efectos en el suelo más comunes, según los cuales se evalúa la calidad del agua empleada, son los relacionados con la salinidad, la velocidad de infiltración del agua en el suelo, la toxicidad debida a iones específicos y otros problemas menos habituales.

- La concentración salina total puede estimarse indirectamente mediante la medida de conductividad eléctrica (CE). Un valor elevado de esta, induce a su vez, una serie de efectos indirectos de los cuales los más importantes son:
- La disminución de absorción de agua por las raíces debida al aumento de la presión osmótica en la disolución del suelo.
- El posible deterioro de las características físico-químicas de los suelos como consecuencia de una adsorción excesiva del ión sodio en el complejo coloidal y/o una acumulación de sales solubles en el perfil del suelo.
- La toxicidad específica para las plantas de algunos constituyentes tales como cloruros, sodio y boro.

2. MUESTREO DE AGUAS DE RIEGO

Se debe tomar una muestra representativa del agua a analizar para poder determinar a partir de ella sus características físicas y químicas.

Los recipientes en que se recojan las muestras han de tener unas características determinadas: estar limpios para no contaminar la muestra y que puedan cerrarse herméticamente. El recipiente se enjuagará varias veces con el agua objeto del muestreo.

El volumen de la muestra estará en función del número y tipo de determinaciones que se pretenden realizar, en principio con 0,5-1 litro bastará. Se debe considerar que después de tomada la muestra los procesos químicos y biológicos continúan, por ello cuanto menor sea el intervalo entre la toma de muestra y análisis, es mejor. Si ello, no es posible, conviene guardarla en refrigerador mientras no se lleve a laboratorio, ya que el frío ralentiza las reacciones en el seno de la disolución y además se ofrece protección ante la luz, que podría alterar el valor de algunos parámetros.

Obtenidas las muestras se cerrarán convenientemente y se etiquetan para su perfecta identificación: procedencia, cultivo, tipo de riego, fecha de muestreo y otros datos de interés.

3. EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DE RIEGO

Los componentes más abundantes de las aguas de riego y que determinan en gran parte su calidad, son los cationes calcio, magnesio, sodio y potasio, y los aniones cloruro, sulfato y bicarbonato. Si el pH es inferior a 8,3, las concentraciones de carbonatos no son significativas.

Entre los componentes menores de las aguas de riego, merece especial atención el boro. Este elemento, es benéfico para el desarrollo vegetal entre el rango 0,1 a 0,4 mg/L, pero resulta tóxico para cultivos sensibles en cantidades sólo ligeramente superiores al óptimo.

Dentro de este grupo de componentes menores, se incluyen también sílice, nitrato, amonio, fosfato, hierro, aluminio, manganeso, cinc, metales pesados, etc. En las zonas en las que se sospeche la existencia significativa de alguno de estos constituyentes, estos deben ser incluidos en el análisis del agua.

En los análisis ordinarios del agua de riego se determinan, además de los componentes mayoritarios, la CE y el pH. En ciertos casos, también se determina la presencia de partículas sólidas en suspensión, evaluada usualmente como turbidez, que puede crear problemas en los sistemas de distribución de agua en las técnicas de riego por aspersión o por goteo.

3.1. Conductividad eléctrica (CE)

El grado de concentración salina se mide indirectamente basándonos en el hecho de que conforme aumenta la concentración de sales solubles ionizadas en una disolución, esta conduce mejor la electricidad, luego la medida de la CE nos informa sobre la concentración de sales existente.

De este modo se puede conocer la cantidad aproximada de sales (en g/L) que tenemos en disolución midiendo la CE (dS/m) y multiplicándola por un factor que suele variar entre 0,60 y 0,85 en función del tipo de sales que predominen. Normalmente el factor de mayor uso corresponde a 0,64.

$$\text{Concentración de sales (g/L)} = \text{CE (dS/m)} \times 0,64$$

La unidad de conductividad más usada en análisis de aguas era el mmho/cm (milimho por centímetro); sin embargo, por acuerdo general pasó a denominarse Siemens (S) en el sistema internacional de unidades de medida. La equivalencia entre ambas es:

$$1 \text{ mmho/cm} = 1 \text{ dS/m (un milimho por centímetro equivale a un deciSiemens por metro)}$$

Las directrices para valorar la utilización de un agua para el riego pretenden dar tan solo una primera orientación, habiendo de observar los síntomas que en las plantas nos indiquen una determinada reacción ante las sales. Con respecto al suelo, habrá que realizar análisis periódicos que nos permitan controlar la evolución del contenido en sales en el tiempo.

En el Cuadro 5.2 se dan una serie de restricciones del agua de riego según la concentración de algunos de sus componentes.

Las sales presentes en el agua o en el suelo reducen la disponibilidad de agua para el cultivo, provocan un estado de marchitamiento y afectan por tanto a los rendimientos.

A partir de 0,7 dS/m de CEa se produce riesgo para los cultivos más sensibles a las sales.

Respecto al Total de Sólidos Disueltos (TDS) o sales totales, comentar que este parámetro se utiliza para estimar la concentración de sales disueltas en el agua. La concentración de sales en la mayor parte de las aguas de riego es menor de 0,2 g/L, si bien en aguas subterráneas este valor puede ser más alto.

Cuadro 5.2. Severidad de problemas potenciales relacionados con la calidad del agua.

Determinación	Ninguna	Moderada	Alta
pH	5.5 – 7.0	< 5.5 o > 7.0	<4.5 o > 8.0
CE (dS/m) ^a	0.5 – 0.75	0.75 – 3.0	> 3.0
Sólidos totales (g/l)	0.32 – 0.48	0,48 – 1,92	>1,92
Bicarbonatos (ppm)	< 40	40 – 180	> 180
Sodio (ppm)	< 70	70 – 180b	> 180
Calcio (ppm)	20 – 100	100 – 200	> 200c
Magnesio (ppm)	< 63	> 63c	
RASd	< 3.0	3 – 6	> 6.0
Boro (ppm)	< 0.5	0.5 – 2.0	> 2.0
Cloro (ppm)	< 70	70 – 300	> 300
Fluor (ppm) ^e	< 0.25	0.25 – 1.0	> 1.0
Fierro (ppm) ^f	< 0.2	0.2 – 0.4	> 0.4
Nitrogeno (ppm) ^g	< 5.0	5.0 – 30	> 30

^a Valores menores de 0.5 son satisfactorios si el agua contiene suficiente Ca. Agua muy baja en Ca puede incrementar los problemas de permeabilidad en ciertos suelos.

^b Es menor severa si el K se encuentra presente en iguales cantidades o si las plantas son tolerantes al Na.

^c Grandes cantidades de Ca y Mg incrementan la precipitación de P. No inyectar P en las líneas de riego si el agua tiene más de 120 ppm de Ca, a menos que el agua tenga un pH < 4.5.

^d Relación de absorción de Sodio calculada a partir de la siguiente fórmula:

$$RAS = \frac{Na}{(Ca + Mg)/2}$$

El Na, Ca y Mg están expresados en meq/lt.

^e Estos valores son significativos para plantas sensibles a Fluor.

^f Valores > 0.2 ppm pueden manchar las plantas. Si se usa Cl forma sedimentos.

^g Suma total de N-NH₄ y N-NO₃. Valores > 5 ppm pueden estimular el crecimiento de algas en los tanques. Valores > 30 ppm pueden retardar la madurez y disminuir el azúcar en plantas sensibles. Para plantas no sensibles, el contenido de N puede ser benéfico, pero debe ser considerado en el programa de fertilización.

Cuadro 5.3. Incidencia de la calidad el agua sobre la infiltración. La reducción de la velocidad de infiltración se evalúa con la CEa y RAS.

RAS (meq/L)	Grado de restricción en la Velocidad de infiltración		
	Ninguno	Moderado	Alto
Conductividad agua de riego, CEa (dS/m)			
0-3	>0,7	0,7-0,2	<0,2
3-6	>1,2	1,2-0,3	<0,3
6-12	>1,9	1,9-0,5	<0,5
12-20	>2,9	2,9-1,3	<1,3
20-40	>5,0	5,0-2,9	<2,9

Con estas directrices se pretende cubrir la mayor parte de las condiciones que se suelen presentar en la agricultura de regadío. Se presentan tres grados de restricciones: ninguna, ligera o moderada y alta. Interpretemos a continuación las deficiencias en relación con el Cuadro 5.2 y 5.3.

3.2. Infiltración

Un contenido relativamente alto de sodio o relativamente bajo de calcio en el agua o en el suelo reduce la velocidad a la cual el agua de riego se infiltra, hasta el extremo que en situaciones graves, no poder abastecer al cultivo de manera adecuada.

Los problemas más frecuentes relacionados con una baja infiltración suelen producirse cuando el sodio se incorpora al suelo y deteriora su estructura. Los agregados del suelo se dispersan en partículas pequeñas que taponan o sellan los poros y evitan que el agua pueda circular e infiltrarse con facilidad. El suelo adquiere un aspecto pulverulento y disgregado, perdiendo rápidamente su permeabilidad. El efecto contrario lo produce el calcio y el magnesio, por lo que para evaluar realmente el problema que puede generar un exceso de sodio hay que conocer también la cantidad de calcio y magnesio que hay en el suelo.

El parámetro utilizado para determinar el riesgo que supone el sodio es el RAS (Relación de Adsorción de Sodio). Esta medida indica la cantidad de sodio en el agua de riego en relación con los cationes calcio y magnesio. El calcio y el magnesio tienden a contrarrestar como hemos comentado el efecto negativo de sodio.

Se considera que cuando el sodio de intercambio del suelo alcanza el 10% de la capacidad de intercambio catiónica (CIC), el deterioro de la características físicas es importante, tanto más cuanto más elevado sea el contenido de arcilla. Como el proceso es lento, en suelos que superen el 5% de sodio de intercambio, conviene tomar medidas para frenar su incremento.

La combinación de la salinidad (CEa) y la alcalinidad o sodicidad (RAS) del agua de riego determina la estabilidad estructural de los suelos.

Las aguas de salinidad muy baja (<0,5 dS/m) también pueden provocar problemas de infiltración, ya que tienden a lixiviar las sales y minerales solubles, incluyendo el calcio, reduciendo así la influencia de este elemento sobre la estabilidad de los agregados y la estructura del suelos. Las partículas finas quedan libres, obstruyendo los poros, creando capas impermeables y compactas, lo que origina una falta de infiltración del agua, encharcamiento, lo que afecta la respiración de las raíces. A menudo, la adición de yeso (CaSO_4) al suelo mejora la infiltración del mismo.

3.3. Toxicidad de iones específicos

Algunas sales, cuando se acumulan en cantidad suficiente, resultan tóxicas para los cultivos u ocasionan desequilibrios en la absorción de nutrientes. Veamos a continuación las principales.

Sodio: Para la mayoría de las plantas cultivadas no se ha demostrado que el sodio (Na^+) sea esencial. Los síntomas de toxicidad del sodio en las hojas son manchas necróticas de color pardo. El efecto perjudicial del sodio sobre los cultivos es, en la mayoría de los casos,

indirecto, debido a la influencia negativa que tiene este catión sobre la estructura del suelo como ya ha sido comentado.

Cloro: El cloro es uno de los elementos que más abundan en el agua de riego. Éste aparece como anión cloruro (Cl^-). El cloruro es indispensable para el desarrollo de la planta, pero cuando su concentración es muy alta, el cloruro puede convertirse en un elemento tóxico.

El cloruro se concentra sobre todo en las hojas. Los daños por exceso de concentración de cloro producen principalmente necrosis en la punta de las hojas, caída de flores, frutos y hojas y reducción del crecimiento de la planta.

Boro: El boro es un elemento esencial para el desarrollo de las plantas. Sin embargo la diferencia entre la concentración requerida por la planta (0,3-0,5 ppm) y la toxicidad (0,6-1,0 ppm en la mayoría de las plantas cultivadas) es muy pequeña, por lo que se debe tener especial cuidado con este elemento. Los síntomas de toxicidad se presentan generalmente como zonas amarillentas en las hojas, parecidas a quemaduras, partiendo de las puntas y difundiéndose hacia la base.

pH y bicarbonatos: Los pH que menos problemas dan para los cultivos son los valores de pH comprendido entre 6,0 y 6,5, ya que los nutrientes de las plantas en general presentan su máxima solubilidad en este intervalo. A medida que el valor del pH se aparta de dicho intervalo pueden presentarse los problemas de asimilación de nutrientes.

El pH del agua de riego es un parámetro adecuado para medir el riesgo de precipitación química. Valores de pH entre 7.4 y 8.5 son indicadores de alta concentración de bicarbonatos y alto riesgo de precipitación por carbonatos. Agua con pH de 6.5 no corroe tuberías metálicas o diques de concreto y reduce la precipitación de Ca. Valores de pH debajo de 4.0 controlan las ferrobacterias y a pH de 2.0 se usa para limpiar las salidas de los emisores tapados por precipitación química y/o elementos biológicos. La cantidad de ácido requerido para obtener estos valores de pH bajos puede ser determinado por un análisis de laboratorio.

Otro problema que es común en el agua de riego es la concentración de bicarbonatos que por una parte confiere el pH alcalino al agua y, por otra, es la causa principal de la precipitación del carbonato de Calcio. Esta característica es de particular importancia en los sistemas de riego por goteo, ya que el reducido tamaño de los emisores es altamente sensible a las obstrucciones causadas por precipitación química. En estos casos, la alternativa es acidificar el agua. El agua de riego puede ser acidificada con varios ácidos no sólo para reducir el taponamiento debido a la precipitación química de carbonatos de Ca, sino también el taponamiento por ortofosfatos de Ca-Mg, pirofosfatos de Ca-Mg y/o limo microbiano. Para sistemas cerrados como el caso de los sistemas de riego a presión, de 20 a 50 g/m³ de ácido sulfúrico son suficientes para evitar los problemas de precipitación química.

Los ácidos fosfórico y nítrico, o combinaciones de ellos, también han sido usados para disminuir el pH del agua. Dichos ácidos tienen la ventaja de adicionar los nutrientes

P y N que frecuentemente son necesarios en grandes cantidades, sin embargo, el ácido sulfúrico es el ácido comúnmente usado para disminuir el pH debido a su bajo costo y disponibilidad en el mercado. En el Capítulo 10 se entregan mayores antecedentes de como calcular los requerimientos de ácidos para regular el pH del agua de riego.

Calcio y Magnesio. El agua de riego que contiene altas concentraciones de Ca y Mg se considera agua dura. Lo cual implica un elevado riesgo de precipitaciones. Cuando se adicionan soluciones de fosfato de amonio a sistema con agua dura, se presentan problemas de depósitos de precipitados de ortofosfatos de Ca-Mg o pirofosfatos de Ca-Mg. En estos casos el precipitado que se forma depende de la composición química del fertilizante. Los problemas con el agua dura a altas tasas de dilución es que la mayoría de los iones Ca y Mg están disponibles para reaccionar con el fósforo.

Para catalogar la dureza del agua se usa expresa normalmente en grados higrométricos franceses (°HF).

$$^{\circ}\text{HF} = \frac{(2,5 \times \text{Ca}^{+2}) + (4,12 \times \text{Mg}^{+2})}{10}$$

Donde Ca^{+2} y Mg^{+2} corresponde a la concentración de ión Ca^{+2} y Mg^{+2} expresado en ppm o mg/L. Los coeficientes se obtienen de las proporciones entre la masa molecular del CaCO_3 y las masas atómicas respectivas: 100/40 (para el Ca^{+2}) y 100/24,3 (para el Mg^{+2}).

Cuadro 5.4. Calificación de la dureza del agua en grados higrométricos franceses (°HF).

Calificación	°HF
Agua muy blanda	<7
Agua blanda	7-14
Agua dureza media	14-32
Agua dura	32-54
Agua muy dura	>54

4. EFECTOS SOBRE EL SUELO

Quando se aplican aguas de riego a un suelo, una parte se infiltra y otra es retenida en el propio suelo. Esta fracción retenida es la que aporta sales al suelo. La acumulación se produce en determinados puntos del perfil. Bajo riego por goteo, se concentran las sales en la superficie del suelo y periferia del bulbo de humedad.



Figura 5.2. Acumulación de sales en el suelo por un elevado contenido salino de las aguas. Ica, Perú.

Bajo climas áridos con ausencia de lluvias que permitan un lavado de las sales del suelo en profundidad, y en cultivos protegidos, se favorece la acumulación de sales en el suelo, más aún si se emplean aguas de elevado contenido salino y/o existe un uso inadecuado de fertilizantes (Figura 5.2). Es por esto, que es necesaria una correcta dosificación del abonado y el uso de aguas de riego de buena calidad o al menos, acordes con el cultivo establecido. Por esta razón resulta imprescindible el control de la CE en el suelo.

Los suelos arenosos tendrán una débil capacidad de retención de agua, y por ser muy permeables, drenarán más fácilmente y su salinización será más difícil. Aquellos suelos que tengan una textura muy fina (arcillosos), tendrán una mayor capacidad de retención, su lixiviación es menor, sobre todo si en su complejo de intercambio predominan el ion sodio. En este caso, el riesgo de salinización será máximo.

De este modo, las aguas de riego y fertilización incorporan sales al suelo. Cuando la cantidad de sales aportadas supera a la cantidad eliminada mediante drenaje, el suelo sufre un proceso de salinización. Un suelo ya puede empezar a generar problemas de salinidad en cultivos sensibles con una CE superior a 2 dS/m en el extracto saturado.

La recuperación de los suelos salinos es muy complicada y costosa. En primer lugar hay que establecer un sistema de drenaje que permita el lavado de sales en exceso, después hay que efectuar este lavado mediante riego, el problema se agrava cuando el riego se realiza también con aguas salinas, lo que exige un control riguroso del contenido de sales del agua y del extracto del suelo mediante medidas de CE.

Para efectuar el control de la salinidad del suelo se aconseja:

- Agua de riego adecuada.
- Adecuado sistema de drenaje
- Sistema de riego apropiado (preferiblemente goteo).
- Camas de cultivo elevadas.
- Mejora y mantenimiento de la estructura del suelo.
- Adición de enmiendas químicas como yeso para mantener la floculación de los coloides del suelo y controlar el sodio de intercambio.
- Acolchados plásticos o mulch para evitar encostramiento superficial.
- Riegos adecuados y de alta frecuencia.
- Fertilización en cantidades pequeñas y frecuentes.
- Control exhaustivo de la CE del medio.

5. EFECTO SOBRE LA PLANTA

Cada planta tiene unos límites de tolerancia a la salinidad, si bien estos son mayores en invierno y en estado adulto que en verano y plantas jóvenes. En cualquier cultivo, su rendimiento no se ve afectado conforme aumenta la salinidad, hasta alcanzar un nivel (valor umbral) a partir del cual el incremento salino conlleva una progresiva disminución, más o menos rápida de la producción.

En el Cuadro 5.5 se indican los valores umbrales de CE para diferentes cultivos referidos a plantas adultas. En germinación y en estado de plántulas, estos valores generalmente son menores. Valores mayores de los indicados pueden suponer pérdidas de rendimiento superiores al 10%, aunque se debe tener en cuenta que la climatología de la zona, la variedad, el portainjerto, las propiedades y el tipo de suelo, la composición iónica que genera la CE, el manejo del cultivo, etc., pueden hacer variar notablemente los datos expuestos, que deben tomarse exclusivamente como referencia.

Realmente las sales que afectan al cultivo no son las contenidas en el agua de riego, si no las presentes en la solución del suelo. El Cuadro 5.5 refleja unas estimaciones de CE en el extracto saturado del suelo (CEs) con un manejo adecuado del agua de riego, pero lógicamente, existen otros factores influyentes en este valor como son tipo de suelo, clima, capacidad de extracción del cultivo, manejo y sistema de riego, etc. Los valores máximos de CE y su variabilidad en el entorno radicular son más bajos en riego por goteo que en otro tipo de sistema de riego, siempre considerando un correcto manejo del proceso de irrigación.

Al contenido salino del agua de riego hay que añadir el que aportan los distintos fertilizantes, todos (excepto la urea y otros de más escaso uso) son sales que se disocian en sus iones correspondientes en el agua, aumentando la CE de la misma. Además, hay que tener en cuenta factores como la propia salinidad del suelo, las lluvias, la frecuencia de riego, etc., que van a influir en la CE de la disolución del suelo.

Cuadro 5.5. CE umbral (dS/m a 25°C) del extracto de saturación del suelo (CEs) y del agua de riego (CEa) estimadas para distintos cultivos en estado adulto.

CULTIVOS HORTÍCOLAS	CE umbral		CULTIVOS FRUTALES	CE umbral		CULTIVOS EXTENSIVOS	CE umbral	
	CEs	CEa		CEs	CEa		CEs	CEa
Frutilla	1,3	0,9	Arándano	1,3	0,9	Frejol	1,5	1,0
Zanahoria	1,7	1,1	Frambuesa	1,3	0,9	Alfalfa	3,4	2,2
Cebolla	1,8	1,2	Palto	1,8	1,2	Mani	3,5	2,4
Lechuga	2,0	1,3	Banana	2,0	1,3	Habas	3,7	2,9
Rábano	2,0	1,3	Almendro	2,2	1,5	Caña de azúcar	4,4	3,0
Pepino	2,1	1,4	Ciruelo	2,2	1,5	Lenteja	4,6	3,0
Berenjena	2,5	1,7	Durazno	2,2	1,5	Arroz	4,8	3,1
Pimiento	2,5	1,7	Manzano	2,3	1,5	Maíz	5,7	3,5
Papas	2,5	1,7	Naranja	2,4	1,6	Soya	6,0	3,7
Col	2,8	1,9	Limonero	2,4	1,6	Avena	6,0	3,8
Sandía	3,3	2,2	Peral	2,4	1,6	Trigo	6,4	4,0
Melón	3,5	2,4	Nogal	2,4	1,6	Sorgo	6,4	4,0
Tomate	3,8	2,5	Pomelo	2,5	1,6	Girasol	7,0	4,0
Brócoli	3,8	2,6	Vid	3,5	2,2	Raps	9,5	5,5
Apio	4,0	2,8	Granado	3,8	3,0	Remolacha az.	10,0	6,5
Espinaca	4,2	2,9	Higuera	4,0	3,2	Algodón	10,0	6,7
Espárrago	4,5	3,2	Olivo	4,3	3,5	Cebada	11,0	7,5

En condiciones de salinidad existe un desequilibrio en la dinámica del agua en la planta. Se dificulta su capacidad de absorción hídrica al aumentar la presión osmótica de la solución del suelo, por tanto ofrece mayor resistencia a la pérdida de agua por la hoja al incrementarse el nivel salino. Se estima que el aumento de la presión osmótica en el medio radicular (en atm) se calcula multiplicando la CE (en dS/m) por el factor 0,36.

$$\text{Presión osmótica (atm)} = \text{CE (dS/m)} \times 0,36$$

En condiciones de salinidad, el nivel de quinetina, que controla la apertura estomática, es bajo, mientras que el ácido abscísico aumenta. Este último es responsable del cierre de los estomas. Disminuye de esta forma el rendimiento fotosintético, obligando a la planta a un mayor gasto de energía para la absorción de agua.

6. INTERPRETACIÓN DE ANÁLISIS DE AGUA E ÍNDICES DE INTERÉS

Comprobaciones. Para detectar posibles errores en los resultados analíticos se debe cumplir que:

- La sumatoria de cationes sea igual a la sumatoria de aniones con una variación admisibles de $\pm 5\%$, expresadas en meq/L.
- La CE del agua debe ser el resultado de dividir la sumatoria de cationes medido en meq/L entre un factor que suele ser 10, pero que debe estar siempre comprendido entre 8 y 11.

Cloruros: A partir de 4 meq/L (140 mg/L) los problemas son crecientes. Más de 10 meq/L, los problemas son graves.

Sodio: Con valores superiores a 4 meq/L (90 mg/L) nos encontraremos con aguas que generan problemas en algunos cultivos.

Boro: Los intervalos de referencia para boro varían mucho de una especie a otra. A continuación se presentan datos relativos este elemento.

- Cultivos sensibles (0,3-1,0 mg/L): nogal, manzano, cerezo, limonero, naranjo, peral, durazno, pomelo, palto, ciruelo, higuera y vid.
- Cultivos semitolerantes (1,0-2,0 mg/L B): cebada, alfalfa, repollo, zanahoria, lechuga, cebolla, papas, calabaza, espinaca, tabaco, olivo, rosal, tomate y trigo.
- Cultivos tolerantes (2,0-4,0 mg/L B): espárrago, arándano, algodón, pepino, gladiolo, sésamo, tulipán, remolacha, haba, pasto y menta.

Presión osmótica en atm = CE (dS/m) x 0,36

Sólidos disueltos en g/L = CE (dS/m) x 0,64

Relación de adsorción de sodio (RAS), su expresión numérica es la siguiente:

$$\text{RAS} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{(\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2})/2}} \text{ los iones expresados en meq/L.}$$

Índice de Eaton o del carbonato sódico residual (CSR). Iones expresados en meq/L. Indica la acción degradante o corrosiva del agua, considerando la proporción de aniones carbonato y bicarbonato frente a los cationes calcio y magnesio.

$$\text{CSR} = (\text{CO}_3^{-2} + \text{HCO}_3^-) - (\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2})$$

El criterio de caracterización:

>2,5 meq/L: agua no apta

1,25 a 2,5 meq/L: aguas de dudosa calidad

<1,25 meq/L: aguas buenas

Índice de Kelly (IK):

$$\text{IK} = \frac{\text{Ca}^{+2}}{\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2} + \text{Na}^+} \times 100$$

La calidad del agua según este índice es:

Agua buena si el índice es superior a 35%.

Agua mala si es inferior a 35%.

7. EJEMPLO PRÁCTICO DE INTERPRETACIÓN DE ANÁLISIS DE AGUA

Un laboratorio nos suministra los datos de una muestra de agua mandada a analizar, que entrega los siguientes resultados:

Cuadro 5.6. Ejemplo de un análisis químico de agua de riego.

Parámetro	Agua Pozo 1	
CE dS/m	2,15	
pH	7,87	
Cationes	meq/L	mg/L
Calcio (Ca ⁺²)	15,5	310
Magnesio (Mg ⁺²)	2,06	26
Potasio (K ⁺)	0,56	22
Sodio (Na ⁺)	3,85	89
Aniones	meq/L	mg/L
Cloruros (Cl ⁻)	12,4	440
Sulfatos (SO ₄ ⁻²)	5,6	269
Nitratos (NO ₃ ⁻)	1,0	62
Bicarbonatos (HCO ₃ ⁻)	4,0	244
Carbonatos (CO ₃ ⁻²)	0	0
Boro (B)		1,3

Comprobación de los datos analíticos para descartar errores

Se ha de cumplir que la sumatoria de cationes sea igual a la sumatoria de aniones con una variación admisible $\pm 5\%$.

$$\sum \text{cationes} = 21,97 \text{ meq/L} \quad \sum \text{aniones} = 23,0 \text{ meq/L}$$

$$23,00 - 21,97 = 1,03; \quad 5\% \text{ de } 23,00 = 2,9$$

$$2,9 > 1,03 \quad \text{ANÁLISIS VALIDO}$$

Se ha de cumplir que la CE del agua debe ser el resultado de dividir la sumatoria de cationes medido en meq/L entre un factor de 10, pero que debe estar siempre comprendido entre 8 y 11.

$\sum \text{cationes} = 21,97 \text{ meq/L}/10 = 2,2 \text{ dS/m}$ Valor muy próximo al realmente medido en el laboratorio que es 2,15 dS/m. Entonces **ANÁLISIS VALIDO**.

RAS (Relación de adsorción de sodio)

$$\text{RAS} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{(\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2})/2}} = \frac{3,85}{\sqrt{(15,5 + 2,06)/2}} = 1,3$$

AGUA SIN PROBLEMA Y AL ASOCIARLO CON SU CONDUCTIVIDAD ELECTRICA PODEMOS INFERIR QUE EL AGUA NO GENERA RESTRICCIÓN EN VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN Y PERMEABILIDAD

Dureza

$$^{\circ}\text{HF} = \frac{(2,5 \times \text{Ca}^{+2}) + (4,12 \times \text{Mg}^{+2})}{10} = \frac{(2,5 \times 310) + (4,12 \times 26)}{10} = 88$$

AGUA MUY DURA, con alto riesgo de tapar emisores, por lo cual debe ser acidificada.

Presión osmótica en atm = CE (dS/m) x 0,36 = 2,15 x 0,36 = 0,77 atm

Sólidos disueltos en g/L = CE (dS/m) x 0,64 = 2,15 x 0,64 = 1,38 g/L de sales o sólidos disueltos.

Índice de Eaton o del carbonato sódico residual (CSR). Iones expresados en meq/L.

$$\text{CSR} = (\text{CO}_3^{-2} + \text{HCO}_3^{-}) - (\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2}) = 4 - (15,5 + 2,06) = -13,56 \text{ meq/L}$$

AGUA BUENA, desde el punto de vista de la alcalinidad, sin acción degradante o corrosiva.

Índice de Kelly (IK):

$$\text{IK} = \frac{\text{Ca}^{+2}}{\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2} + \text{Na}^+} \times 100 = \frac{15,5}{15,5 + 2,06 + 3,85} \times 100 = 72 \%$$

AGUA BUENA, desde el punto de vista de la alcalinidad

Toxicidad específica

Se presenta una alta probabilidad de toxicidad de cloro en los cultivos. Una baja probabilidad de toxicidad de sodio y un nivel tóxico de boro para especies sensibles como nogal, manzano, cerezo, limonero, naranjo, peral, durazno, pomelo, palto, ciruelo, higuera y vid.

1. CONCEPTOS PARA REALIZAR RECOMENDACIONES DE FERTILIZACIÓN

El éxito de la producción de un cultivo depende sólo en parte del abastecimiento nutrimental y para alcanzar el éxito completo debemos identificar los factores de cualquier naturaleza que restringen la producción, y en muchos casos resultan ser los determinantes. En este punto necesariamente tenemos que recordar las dos leyes fundamentales de la Agronomía que son la Ley del Mínimo y la Ley de los Rendimientos Decrecientes, cuyo entendimiento y manejo ayudan a tomar mejores decisiones. Según Etchevers (2014), los pasos a seguir para este propósito son los siguientes:

El **primer paso** en la estructuración de un plan de manejo nutricional debe comenzar por conocer, en profundidad, el sistema de producción respectivo, lo cual incluye la planta y su manejo, el suelo/sustrato y el clima. Lo anteriormente señalado es el paso principal del proceso hacia al éxito: Comprender el sistema de producción. Cuando se refiere exclusivamente a los aspectos nutrimentales lo que se debe entender bien es, además, los aspectos fisiológicos envueltos en la nutrición: Cuáles son los elementos esenciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas, cómo son adquiridos por éstas, cómo son transportados en su interior, en qué concentraciones deben estar en los tejidos de los cultivos, para que no restrinjan su crecimiento, etc.

El **segundo paso** en un plan para obtener el mayor éxito posible en la producción, es conocer las técnicas de diagnóstico apropiadas para diagnosticar la intensidad de los factores no controlables y de los controlables; entre ellos el estado nutricional del sistema de producción. Este último comprende entender cómo el suelo proporciona nutrientes a las plantas y la cantidad de éstos que se encuentran en los tejidos vegetales de las mismas; esto es, la capacidad de abastecimiento nutrimental del suelo y la capacidad de la planta para hacer uso de ese recurso. De aquí se derivará si hay que aplicar algún elemento o realizar alguna práctica para eliminar factores limitativos o para llevar a un nivel adecuado un factor de crecimiento que se encuentre por debajo de lo deseado. De este planteamiento se deduce que es preciso conocer de antemano los umbrales de estos factores que provocan disminuciones en la producción de los cultivos. Sin ellos es imposible tomar medidas correctivas.

El **tercer componente** se refiere a entender la dinámica, esto es los cambios que experimentan los factores de crecimiento. Hay algunos que se pueden corregir rápidamente (como podría ser la presencia de un pie de arado, que limita el crecimiento de la raíces y, consecuentemente, la exploración de un cierto volumen de suelo) u otras que requerirán de siglos para modificarse (como puede ser la textura del suelo). Si nos referimos específicamente al caso de la nutrición se debe conocer la química que existe detrás de la disponibilidad de un elemento en el suelo (fijación, desnitrificación, volatilización,

lixiviación, etc.) y su forma de acción dentro de la planta (translocación, uso, etc.) para poder diseñar prácticas de ajuste necesarias. Es decir, los aspectos cuantitativos del plan nutricional; o en otras palabras: ¿Cuánto fertilizante hay que aplicar?

El **cuarto punto** en un plan de manejo nutricional es el entendimiento de las tecnologías de uso de los fertilizantes. De aquí se deducirá el cuándo, cómo y qué forma de fertilizante debe aplicarse y la relación entre éstas y la eficiencia de los fertilizantes. Con la técnica de fertirrigación, tal como se ha discutido anteriormente podemos incrementar considerablemente la eficiencia de la fertilización, si hacemos este aporte en forma permanente en el agua de riego, ajustándonos a los requerimientos de cada etapa fenológica del cultivo.

Finalmente el **quinto componente** del plan se refiere a los aspectos económicos de la fertilización: ¿Es rentable la recomendación técnica que se ha hecho?.

El dominio de los temas anteriores constituye el camino más lógico para acercarse a una solución óptima del problema de la nutrición de los cultivos. Cualquiera que sea el plan adoptado éste debe ser compatible con la mantención de la calidad del medio ambiente y con el mantenimiento del recurso para las generaciones futuras. El concepto de agricultura sostenible implícito en la aseveración anterior debe constituirse en un norte de los especialistas en nutrición de cultivos.

Existen dos enfoques básicos para realizar recomendación de fertilización para una agricultura intensiva:

- Método del balance
- Método de la solución nutritiva óptima

2. MÉTODO DEL BALANCE

Este enfoque es plenamente aplicable a plantaciones más extensivas o tradicionales, donde las correcciones se suelen llevar a cabo de una cosecha a la otra, sin llevar a cabo alguna técnica de monitoreo más o menos intensiva en el ciclo del cultivo.

La nutrición de cultivos es una disciplina de la agronomía que aspira a proporcionar todas las condiciones necesarias para que los factores de crecimiento del ámbito nutricional (los llamados elementos esenciales) se encuentren en los cultivos en cantidades y concentraciones suficientes para no lleguen a transformarse en factores limitantes del desarrollo de la planta. Cuando la concentración de alguno de éstos en la planta, es inferior a ese nivel de suficiencia (o su relación con otro elemento no es adecuada), se observan trastornos nutricionales que se traducen en disminución de los rendimientos; es decir, funciona la ley del mínimo. Algo similar ocurre cuando las concentraciones nutricionales son muy elevadas; entonces se producen toxicidades, con la consecuente caída del crecimiento y de la producción de un cultivo.

La nutrición de cultivos es la disciplina responsable de vigilar que la planta posea esas concentraciones apropiadas de los elementos esenciales que le permita crecer o producir el máximo rendimiento, en las condiciones medio ambientales en que se desarrolla. De ahí la importancia del diagnóstico, asociado al debido conocimiento del cómo funciona el sistema.

Conocer cuál es la demanda nutricional en un cultivo, es una tarea esencial del especialista en nutrición y fertilidad de suelos, ya que la demanda nutricional se relaciona directamente con el rendimiento máximo alcanzable y éste, a su vez, depende del efecto restrictivo que pudiese tener alguna característica del suelo y el clima sobre el rendimiento máximo alcanzable en el agroecosistema. Se entiende que las características restrictivas influyen directamente en la disponibilidad de los elementos esenciales, sin descartar que pudiese haber restricciones que no se refieren a esta última y que obviamente afectarán los rendimientos (condiciones físicas, plagas enfermedades, etc.).

De lo anterior se deduce que el primer paso en el diseño de un plan de manejo nutricional de un cultivo, sea definir cuáles son los rendimientos máximos alcanzables en una condición dada. Es obvio desde un punto de vista agronómico que la demanda nutricional de un huerto de cerezos que sólo produce 8 ton/ha de fruta será menor que la de un huerto que rinda 15 ton/ha. Datos de demanda nutricional de acuerdo al rendimiento esperado, se presentan en el capítulo 3, Cuadro 3.3.

El segundo aspecto que debe ser dilucidado es conocer qué proporción de dicha demanda puede ser cubierta por el suelo; es decir, el suministro nutrimental natural o nativo.

De todos es conocido que la demanda de muchos de los elementos esenciales puede ser satisfecha por la fertilidad intrínseca de los suelos. En general, es el caso de la mayoría de los micronutrientes, el calcio o el magnesio en suelos que no presentan características especiales. No obstante, en ambientes ácidos, el calcio es normalmente deficiente. También, en muchos casos, el abastecimiento de otros de estos elementos esenciales no es suficiente, tal y como sucede con el nitrógeno, fósforo y potasio.

Si el diagnóstico señala que el abastecimiento nutrimental de un suelo es deficiente, es necesario suplementar la capacidad de abastecimiento de éste mediante la aplicación de fertilizantes. Las relaciones entre producción (calidad) y fertilizante aplicado son parte del dominio de la Fertilidad Cuantitativa. Así, en el caso específico de los frutales (además de los aspectos de cantidad relacionados con la nutrición) se debe considerar también el efecto de éstos en la calidad.

Las aplicaciones de fertilizantes no son cien por ciento efectivas. De aquí que haya la necesidad de conocer la eficiencia de los distintos fertilizantes. Estos dependen de la naturaleza de los fertilizantes, del tipo de cultivo, del suelo y de la tecnología de aplicación.

En resumen, se puede establecer que el manejo nutrimental de un cultivo depende de la demanda nutricional de éste, del suministro que pueda hacer el suelo y de la eficiencia del fertilizante que hubiese necesidad de aplicar. Todo lo cual se puede expresar en un modelo simplificado que dice:

$$\text{Dosis de fertilizante} = \frac{\text{Demanda} - \text{Suministro del suelo}}{\text{Eficiencia del fertilizante}}$$

Si la demanda del cultivo es menor que el suministro, la dosis de fertilizante a aplicar será cero (ya que no puede ser negativa), aunque agronómicamente es aconsejable en estos casos aplicar una fertilización de mantención equivalente a la exportación de nutrientes por el producto de la cosecha. Si la demanda nutrimental es mayor que el suministro que ofrece el suelo será necesario fertilizar. La dosis de fertilizante a aplicar será proporcional a la magnitud del déficit encontrada. La estrategia aquí es aplicar más nutrientes que los que extrae el cultivo, para que el nivel de nutrientes en el suelo no esté limitando el rendimiento.

La recomendación de fertilización se realiza para aplicar un nivel suficiente de fertilizantes para satisfacer las necesidades nutricionales del cultivo y aumentar el nivel de nutrientes en el suelo a un nivel crítico, durante un período de tiempo determinado. El nivel de los nutrientes en el suelo se mantiene en, o por encima, del nivel crítico mediante aplicaciones de dosis de fertilizantes que reponen al suelo los nutrientes extraídos por la cosecha.

El nivel crítico del suelo es el valor de análisis de suelo por encima del cual no se aumenta el rendimiento por un aumento de la fertilización. Se basa en las curvas de respuesta del cultivo, que son el resultado de años de estudio y pruebas. Este concepto debe ser utilizado con precaución, ya que los resultados de análisis de suelo son en su mayoría empíricos y no describen la cantidad real de nutrientes disponibles. Sin embargo, este enfoque es muy fácil de entender y poner en práctica y, por tanto, es comúnmente utilizado por muchos consultores profesionales y agrónomos.

El software OPTIFER[®] desarrollado por el autor del presente texto, le permite utilizar cualquiera de estos conceptos para sus recomendaciones de fertilización.

2.1. Ejemplo de diseño de un programa de fertirriego mediante el método del balance

Uva de mesa variedad *Sweet Celebration* con una profundidad de enraizamiento de 45 cm. Los goteros humedecen un 40% del suelo. El análisis de suelo indica una densidad aparente de 1,2 g/cm³, ausencia de N disponible, 24 ppm P y 200 ppm de K. Los valores de márgenes de reserva para P y K son 20 y 175 ppm, respectivamente. Determinar la dosis de N, P, K requerido para un rendimiento de 40 ton/ha. La eficiencia de uso de N, P y K en el sistema es 75, 40 y 75%, respectivamente.

- Cálculo del peso de una hectárea de suelo de una profundidad de 45 cm.

$$\begin{aligned} \text{Peso Suelo (ton/ha/0,45m)} &= 10.000 \text{ (m}^2\text{)} \times 0,45 \text{ (m)} \times Da \text{ (ton/m}^3\text{)} \\ &= 4.500 \text{ m}^3 \times 1,2 \text{ ton/m}^3 \\ &= 5.400 \text{ ton/ha} \end{aligned}$$

- Cálculo del P y K disponible sobre el margen de reserva.

$$\begin{aligned} P \text{ (kg/ha)} &= (24-20 \text{ g/ton}) \times 5.400 \text{ ton/ha} = 21.600 \text{ g/ha} = 22 \text{ kg/ha} \\ K \text{ (kg/ha)} &= (200-175 \text{ g/ton}) \times 5.400 \text{ ton/ha} = 135.000 \text{ g/ha} = 135 \text{ kg/ha} \end{aligned}$$

- Nivel de disponibilidad de P y K en un volumen de 40% ocupado por raíces.

$$\begin{aligned} P &= 22 \times 40/100 = 8,8 \text{ kg P/ha} \times 2,29 = 20 \text{ kg P}_2\text{O}_5\text{/ha} \\ K &= 135 \times 40/100 = 54 \text{ kg K/ha} \times 1,2 = 65 \text{ kg K}_2\text{O/ha} \end{aligned}$$

- Demanda de N, P y K para un rendimiento de 40 ton/ha (Cuadro 3.3, Capítulo 3)

$$\begin{aligned} 4 \text{ kg N/ton fruta} \times 40 \text{ ton/ha} &= 160 \text{ kg N/ha} \\ 1,7 \text{ kg P}_2\text{O}_5\text{/ton fruta} \times 40 \text{ ton/ha} &= 68 \text{ kg P}_2\text{O}_5\text{/ha} \\ 5,6 \text{ kg K}_2\text{O/ha} \times 40 \text{ ton/ha} &= 224 \text{ kg K}_2\text{O/ha} \end{aligned}$$

- Necesidad de N, P, K (demanda menos suministro del suelo).

$$\begin{aligned} 160 \text{ kg N/ha} - 0 &= 160 \text{ kg N/ha} \\ 68 \text{ kg P}_2\text{O}_5\text{/ha} - 20 \text{ kg P}_2\text{O}_5\text{/ha} &= 48 \text{ kg P}_2\text{O}_5\text{/ha} \\ 224 \text{ kg K}_2\text{O/ha} - 65 \text{ kg K}_2\text{O/ha} &= 159 \text{ kg K}_2\text{O/ha} \end{aligned}$$

- Dosis total a aplicar considerando eficiencia de N, P, K en el sistema de riego por goteo de 75%, 40% y 75%, respectivamente.

$$\begin{aligned} N &= 160 \times 100/75 = 213 \text{ kg N/ha} \\ P_2O_5 &= 48 \times 100/40 = 120 \text{ kg P}_2\text{O}_5\text{/ha} \\ K_2O &= 159 \times 100/75 = 212 \text{ kg K}_2\text{O/ha} \end{aligned}$$

- Distribución porcentual de la fertilización por fase fenológica.

Cuadro 6.1. Distribución porcentual de la fertilización por fase fenológica.

Fase	Días	Riego (m ³ /ha)	Distribución nutrientes (%)		
			N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Brotación a Cuaja	45	1.000	40	10	10
Cuaja a Pinta	60	2.500	20	40	40
Pinta a cosecha	30	1.400	10	30	30
Postcosecha	30	1.200	30	20	20
Total	165	6.100	100	100	100

- Distribución de la fertilización por fase fenológica expresado en kg/ha.

Se multiplica la dosis total a aplicar de cada nutriente en la temporada por el porcentaje correspondiente a cada fase fenológica.

Cuadro 6.2. Distribución de la fertilización por fase fenológica expresado en kg/ha.

Fase	Días	Riego (m ³ /ha)	Distribución nutrientes (kg/ha)		
			N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Brotación a Cuaja	45	1.000	85	12	21
Cuaja a Pinta	60	2.500	43	48	85
Pinta a cosecha	30	1.400	21	36	64
Postcosecha	30	1.200	64	24	42
Total	165	6.100	213	120	212

- Concentración óptima a aportar de nutrientes en el agua de riego (ppm o g/m³).

El fertilizante será aplicado mediante todo el tiempo de riego. Para determinar la concentración de nutrientes a aportar en el agua de riego, debemos hacer una estimación de los requerimientos de riego de la temporada. Las ppm se obtienen al dividir la dosis del nutriente en gramos en cada fase fenológica por los m³ de agua de riego aplicados.

Cuadro 6.3. Concentración óptima a aportar de nutrientes en el agua de riego.

Fase	Días	Riego (m ³ /ha)	Concentración de nutrientes en agua de riego (ppm o mg/l o g/m ³)		
			N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Brotación a Cuaja	45	1.000	85	12	21
Cuaja a Pinta	60	2.500	17	19	34
Pinta a cosecha	30	1.400	15	26	46
Postcosecha	30	1.200	64	20	35

- Cálculo para preparar solución madre y selección de fertilizantes.

La solución madre puede ser calculada haciendo uso de la siguiente ecuación:

$$C = \frac{F \times FD \times N}{A \times 10}$$

Donde:

C = Peso del fertilizante en kg en la solución madre

F = Concentración deseada del nutriente en el agua de riego (ppm)

N = Volumen del estanque de la solución madre (m³)

A = % del nutriente en el fertilizante

FD = Factor de dilución

10 = Factor de unificación de unidades

$$\text{Factor de Dilución (FD)} = \frac{\text{Caudal del sistema de riego}}{\text{Caudal del inyector}}$$

Características del sistema de fertirrigación disponible. Como ejemplo, consideraremos los siguientes datos:

Caudal del sistema de riego es 30.000 L/h

Tasa de inyección es 100 L/h

Capacidad del estanque para preparar la solución madres es 1000 litros

$$\text{Factor de dilución (FD)} = \frac{30.000 \text{ L/h}}{100 \text{ L/h}} = 300$$

Para aportar los nutrientes se seleccionarán los fertilizantes: Nitrato de amonio, Acido fósforo y Sulfato de Potasio.

- Cantidad de fertilizantes a disolver en el estanque

De acuerdo al cuadro anterior, la concentración deseada a la salida del gotero de N-P₂O₅ y K₂O, en la primera fase del cultivo es 85-12 y 21 ppm, respectivamente.

Entonces aplicando la ecuación 1:

Cálculo para nitrato de amonio:

$$C = \frac{85 \times 300 \times 1}{33 \times 10} = 77,3 \text{ kg/estanque}$$

- Cálculo para ácido fosfórico:

$$C = \frac{12 \times 300 \times 1}{62 \times 10} = 5,8 \text{ kg/estanque}$$

- Cálculo para sulfato de potasio:

$$C = \frac{21 \times 300 \times 1}{50 \times 10} = 12,6 \text{ kg/estanque}$$

- *Para las etapas siguientes se procede de la misma forma. En consecuencia, el requerimiento de fertilizantes para todo el ciclo de la planta se presenta a continuación:*

Cuadro 6.4. Requerimiento de fertilizantes para preparar 1000 litros de solución madre en cada etapa fenológica de la uva de mesa.

Fase	Días	Riego (m ³ /ha)	Fertilizante (kg/estanque)		
			Nitrato de Amonio	Acido fosfórico	Sulfato de Potasio
Brotación a Cuaja	45	1.000	77,3	5,8	12,6
Cuaja a Pinta	60	2.500	15,5	9,2	20,4
Pinta a cosecha	30	1.400	13,6	12,6	27,6
Postcosecha	30	1.200	58,2	9,7	21,0

El cálculo anterior, es bajo el supuesto de preparar 1000 litros de solución madre e inyectarla durante todo el tiempo de riego con un caudal de inyección de 100 l/h. Si se opta por inyectar solamente en un 50% del tiempo de riego se tienen dos alternativas: 1) Inyectar el doble de caudal (200 l/h) o 2) Incrementar la dosis de fertilizantes al doble. Siempre se debe tener la precaución de no superar la solubilidad del fertilizante empleado. Nótese que el procedimiento anterior, no toma en consideración la superficie del sector de riego que se está fertilizando, solamente se debe tener la precaución de volver a preparar el estanque de solución madre cada vez que se termine.

3. MÉTODO DE LA SOLUCIÓN NUTRITIVA OPTIMA

Este enfoque se propone para cultivos y frutales manejados en forma intensiva bajo fertirrigación, en donde el monitoreo permanente del sistema suelo-planta es fundamental. En los sistemas bajo fertirrigación interesa conocer la fertilidad actual de cada nutriente. Estos sistemas, tal como se ha señalado en otro capítulo de este mismo texto, ofrecen la oportunidad de reponer el agua y los nutrientes cada vez que se estime oportuno, por lo tanto el papel del suelo como despensa o almacén de nutriente, pasa a un segundo plano (Alarcon, s/a).

El seguimiento analítico en estos sistemas debe estar basado en la fracción soluble del nutriente (solución de suelo), que son los elementos que verdaderamente están a disposición para ser absorbidos y asimilados por la planta. Resulta básico el análisis de agua de riego para elaborar adecuadamente las soluciones nutritivas (SN) que aportamos al cultivo con el fin de tener un balance y concentración de nutrientes optimizados en la solución de suelo.

En fertirriego hay que elaborar soluciones nutritivas de concentración y equilibrios adaptados a los requerimientos del cultivo, con el objetivo de mantener un estricto control nutricional en todo momento.

3.1. Balance vegetativo/generativo

Según Alarcón (s.a.), el objetivo en el manejo del cultivo es mantener el balance vegetativo/generativo que interese en cada momento, con ello podemos ejercer un control exhaustivo de su nutrición.

Una planta generativa es aquella en la que prevalece el desarrollo de procesos reproductivos, tales como floración, fructificación, maduración de frutos, detención crecimiento vegetativo. Mientras, que una planta vegetativa, es la que muestra una sintomatología contraria, predominando fundamentalmente división celular y crecimiento.

Una planta vegetativa, se caracteriza por tener hojas grandes y suculentas, escasa carga de flores y/o frutos, entrenudos largos, flexibilidad en la estructura, brotes vigorosos.

Una planta generativa (reproductiva), por el contrario, se caracteriza por entrenudos cortos, crecimiento vegetativo detenido, hojas pequeñas, quebradizas, estructuras lignificadas, aceleramiento de los procesos reproductivos (floración, maduración).

Existen muchos factores que pueden hacer la planta más vegetativa o generativa de lo previsto (Cuadro 6.5).

Cuadro 6.5. Factores influyentes en el balance vegetativo/generativo de una planta. (Alarcón s.a).

Parámetro	Planta Generativa (reproductiva)	Planta Vegetativa
Temperatura	Alta	Suave
Humedad relativa	Baja	Alta
Déficit presión de vapor	Alto	Bajo
Radiación	Intensa	Baja
Vientos	Fuertes y secos	Nulos
Riego	Deficiente	Abundante
Salinidad	Elevada	Baja
Edad planta	Adulta	Juvenil
Densidad	Baja	Alta
Relación N/K	Baja	Alta
Relación $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$	Alta	Baja

Una planta tiene tendencia generativa ante situaciones de estrés, como temperaturas elevadas, humedad relativa baja, radiación intensa, escasez de agua, alta salinidad. La planta como cualquier ser vivo, cuando siente estrés que pone en compromiso su vida, acelera los mecanismos reproductivos como medio de supervivencia de la especie.

Ante situaciones ambientales de confort, la planta tiende a ser vegetativa. Temperaturas suaves, óptima humedad de suelo, baja salinidad, humedad relativa media-alta, etc. Ante estas situaciones, la planta se ve con la capacidad de tener un mayor desarrollo, e invierte su energía y fotosintatos en desarrollar estructuras celulares y crecer, a su vez, retrasa los procesos reproductivos induciendo un mayor desarrollo vegetativo que permita en su momento una mayor producción.

A nivel de fertilización, la herramienta que tenemos para manejar el balance vegetativo/generativo de un cultivo, es la relación N/K y, respecto a la fuente de N, la proporción de N amoniacal. El correcto manejo de esta relación nos permitirá adaptar el cultivo a nuestros intereses de acuerdo a la etapa fenológica en la que nos encontremos, sin que tengamos que inducir situaciones de estrés superfluas en la plantación.

La explicación de la incidencia de la relación N/K sobre el balance vegetativo/generativo radica en el rol fisiológico de cada elemento. Una planta tiene un determinado rendimiento fotosintético, es decir, tiene una capacidad de generar glucosa (azúcares, esqueletos carbonados). Estos azúcares son consumidos en el proceso de respiración para generar energía que es almacenada y transportada como ATP.

Los azúcares que no son consumidos en el proceso de respiración, sirven de unidades estructurales (esqueletos carbonados) para los procesos de crecimiento y reserva de la planta. El rol del N es utilizar estos azúcares para fabricar aminoácidos y proteínas, que constituyen la base de la formación de nuevas células, es decir, crecimiento y desarrollo del vegetal.

El rol fisiológico del K es actuar como transportador para que estos azúcares se acumulen como reserva y los frutos incrementen sus grados Brix, reservas en almidón, etc. Al promover esta acumulación de azúcares como reservas, con el incremento de K, se ve detenido el crecimiento vegetativo de la planta, y se inducen los procesos reproductivos o generativos.

También tiene relevancia la proporción $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$. La asimilación de NH_4^+ se realiza a nivel radicular combinándose con esqueletos carbonados (azúcares) procedentes de la fotosíntesis para producir aminoácidos. Si el suministro de azúcares a la raíz se afecta por menor fotosíntesis, una fracción de este NH_4^+ pasa a NH_3 (amoníaco) que es muy tóxico para la planta. De este modo todo ión NH_4^+ absorbido debe ser inmediatamente asimilado para inducir crecimiento vegetativo.

3.2. Elección del balance vegetativo/generativo adecuado

En primer lugar debemos conocer con precisión el objetivo que se persigue para cada una de las etapas fenológicas de la especie con la cual se está trabajando. Por ejemplo, en las etapas iniciales puede interesar una planta vegetativa, o en las etapas finales una planta generativa o simplemente balanceada para cultivos en producción que deben mantener un buen desarrollo vegetativo para un ciclo de cultivo más prolongado.

De acuerdo a lo anterior, es importante definir con claridad que etapas fenológicas distinguimos en nuestro cultivo para darle una manejo nutricional diferente. En estas decisiones inciden aspectos climáticos, sanitarios, culturales e incluso de mercado para adaptarse a criterios de calidad exigidos o porque los precios aconsejen un aceleramiento de la producción.

Es evidente que existen cultivos con necesidades más vegetativas que otros. Por ejemplo, no es lo mismo un cultivo donde el producto recolectado es la planta total (lechuga, apio, flores), en comparación con otro que sean frutos inmaduros (pimiento, pepino) o frutos maduros durante un ciclo largo de producción (tomate) o frutos maduros (cerezos, manzanos, berries, vid, sandía, melón). Para los ejemplos dados, en el orden de mención de estos cultivos, deben tener una relación N/K decreciente en la etapa cosecha.

Se han de diferenciar especies con etapas fisiológicas claramente definidas, y otras con etapas fisiológicas solapadas, donde se alcanza un periodo en que la fisiología de la planta está completamente traslapada y coexisten frutos en maduración, frutos en desarrollo, frutos cuajando, flores, desarrollo vegetativo. Es el caso de tomates, pimiento, pepino y otros cultivos de invernadero.

3.3. Definición de la fenología del frutal

Se debe conocer cronológicamente cada una de las etapas fenológicas del frutal y estimar la duración que tienen en la zona, para saber en qué periodos corresponderá cambiar las soluciones nutritivas. La precisión en la fertilización de los frutales se basa, en gran medida, en el conocimiento de cada una de las etapas del ciclo de desarrollo de la planta, información que es clave para planificar la fertirrigación. A continuación se señalan las principales etapas:

Latencia. El frutal se encuentra en receso metabólico; termina después de una cierta cantidad de horas de frío. No existe consumo ni transporte interno de agua ni nutrientes. Los nutrientes y carbohidratos están formando parte de compuestos químicos de reserva.

Activación. Termina la latencia. Se genera una transformación interna de los almidones a azúcares. Se inicia la movilización de nutrientes desde las raíces y madera a los puntos de brotación. La planta se abastece de sus propias reservas. Se inicia la etapa de yema hinchada.

Brotación. Aparecen las primeras hojas. La planta empieza a acelerar lentamente su velocidad de absorción de agua y nutrientes del medio externo.

Desarrollo. Se produce una gran actividad celular orientada a la formación de órganos especializados en distintas funciones de la planta (hojas, tallos, raíces, flores y frutos). Todavía el consumo de agua y nutrientes es bajo. Comienza la aparición de raicillas; ocurre unos 25-35 días post-brotación.

Crecimiento. Viene un gran aumento en el tamaño de los órganos y se produce un aumento importante en la demanda diaria de agua y nutrientes, especialmente nitrógeno (N). Existe una alta dependencia del suministro externo de nutrientes. Se requiere una solución nutritiva vegetativa.

Floración-cuaja. Los nutrientes, azúcares y agua se movilizan de preferencia hacia los órganos reproductivos. La absorción por parte de las raíces llega a ser máxima. En esta etapa el papel del potasio (K) es fundamental, debido a su rol en el transporte de carbohidratos, que conforman el 90% del peso seco del fruto. Se requiere una solución nutritiva intermedia.

Llenado de fruta. Es el proceso de mayor actividad en la translocación interna de nutrientes y azúcares y absorción externa de agua y nutrientes. En esta etapa se llega a la demanda máxima de nutrientes, especialmente K. Se requiere solución nutritiva generativa.

Pinta. En esta etapa la fruta ha llegado a su calibre máximo y comienza a cambiar de color. Es necesario disminuir considerablemente el aporte de N para evitar la inducción de nuevos brotes y desordenes fisiológicos en el flujo de carbohidratos que van a la fruta. La tasa de absorción es alta, pero menor que en llenado de fruta. En esta etapa el fruto constituye el principal órgano de demanda y los fotosintatos se movilizan hacia este órgano. Se recomienda una solución nutritiva generativa.

Cosecha. En esta etapa comienza la senescencia de los tejidos; normalmente se reduce la aplicación de fertilizantes.

Postcosecha. La planta presenta una nueva actividad radical y se genera un reflujó de nutrientes desde las hojas hacia la madera y raíces. Este momento es clave como oportunidad para aplicar nutrientes y aumentar las reservas para el inicio del crecimiento de la próxima temporada. Se recomienda una solución nutritiva intermedia.

Estas etapas características pueden variar para cada proyecto y lo que resulta decisivo es definir la estrategia nutricional a seguir.

Por ejemplo, para el caso de los manzanos de la zona centro-sur de Chile, se podrían definir 3 soluciones nutritivas.

- I. Brotación a fin periodo de división celular (40-50 días después de plena flor). Solución nutritiva Vegetativa.
- II. Fin de división celular a cosecha. Solución nutritiva Generativa.
- III. Postcosecha. Solución nutritiva Intermedia.

Aunque se trate de especies distintas, la misma estrategia nutricional se puede definir para cerezos, cítricos, uva de mesa, nectarines, duraznos, ciruelos, paltos, etc.

3.4. Diseño y uso de la Solución Nutritiva

Las concentraciones de nutrientes en la solución nutritiva la podemos expresar de varias formas:

- ✓ **mmol/L**: cantidad de átomos en un litro de agua.
- ✓ **meq/L** : carga total del ion en un litro de agua.
- ✓ **ppm, gramos/m³, mg/L**: peso total del ion en un litro o un m³ de agua.

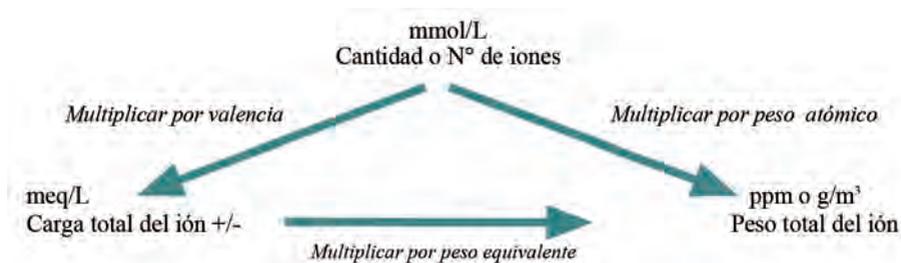


Figura 6.1. Formas de expresar la concentración del ión.

Por ejemplo, 2 mmol/L de calcio corresponde a 4 meq/L (se multiplica por su valencia que es +2) y 80 ppm (se multiplica por su peso atómico que es 40). En el anexo del texto se encuentran las respectivas valencias y pesos atómicos de cada uno de los iones. Para mayores antecedentes de lo que significa cada unidad de expresión revisar capítulo 7.

Las concentraciones de nitrógeno y potasio a utilizar dependen del potencial productivo del cultivo, como de las condiciones de manejo de la especie, ya sea en suelo al aire libre, suelo en invernadero o hidroponía.

En hidroponía se usan concentraciones altas, pero para especies creciendo en suelo, al ser inferior el potencial del cultivo y superior el aporte de riego por producto cosechado respecto a cultivos hidropónicos, se deben considerar concentraciones considerablemente más bajas.

Para poder ejercer el control del balance vegetativo/generativo, la mejor herramienta para conseguirlo es cambiar la relación N/K. En el Cuadro 6.6, se indican algunos valores de referencia de relación N/K basados en información de Alarcón, (s.a.).

Cuadro 6.6. Valores de referencia para relaciones N/K en la solución nutritiva considerando un 100% de tiempo de inyección respecto al total del riego.

Tipo cultivo	Sistema	Solución Nutritiva	N		K	
			meq/L	mg/L	meq/L	mg/L
Hortícola	Hidroponía	Vegetativa	14	196	5	195
		Intermedia	13	182	7	273
		Generativa	11	154	8	312
Hortícola	Suelo/invernadero	Vegetativa	9	126	3	117
		Intermedia	7,5	105	3,8	146
		Generativa	6,8	95	4,5	176
Hortícola	Suelo campo abierto	Vegetativa	5,0	70	1,5	59
		Intermedia	4,5	63	2,0	78
		Generativa	3,0	42	2,5	98
Frutal	Suelo campo abierto	Vegetativa	2,0	28	0,6	25
		Intermedia	1,8	25	0,9	34
		Generativa	1,0	14	1,5	59

Una vez que se tengan definidos los valores de N y K, el resto de los iones que conforman la solución nutritiva se balancean de acuerdo a la composición del agua de riego. Para ello se sigue el mismo procedimiento indicado en capítulo 7.

K-Ca-Mg, deben guardar unas relaciones más o menos definidas (1-2-1) en miliequivalente por litro. Cuando el agua de riego posea muy poco Ca, difícilmente será rentable mantener más de 4 meq/L de este elemento.

El $S-SO_4^{-2}$ se puede presentar en un amplio rango y es el elemento que se utiliza como “comodín” para preparar la solución nutritiva.

Cuadro 6.7. Valores de referencia para nutrientes P, Ca, Mg, S en la solución nutritiva considerando un 100% de tiempo de inyección respecto al total del riego.

Tipo cultivo	Sistema	P		Ca		Mg		S-SO ₄	
		meq/L	mg/L	meq/L	mg/L	meq/L	mg/L	meq/L	mg/L
Hortícola	Hidroponia	1,0-1,5	31-47	8-10	160-200	3-5	36-60	2-5	32-80
Hortícola	Suelo/invernadero	0,75	23	4,5-6,0	90-120	1,5-3	18-36	1,5-3	24-48
Hortícola	Suelo campo abierto	0,15-0,4	5-12	2-3	40-60	1-1,5	12-18	1-2	16-32
Frutal	Suelo campo abierto	0,1-0,2	3-6	1-1,5	20-30	0,5-0,75	6-9	0,5-1	8-16

Respecto a la concentración de microelementos, las concentraciones óptimas se presentan en el Cuadro 7.5. En el caso de cultivos y frutales en suelo, se debe evaluar los niveles de microelementos asimilables en el suelo y en función de eso aportar de forma individual aquél que interese en su debida concentración. Generalmente son cantidades inferiores a la tercera parte de lo mencionado para hidroponía.

Los pasos a seguir para el cálculo de las soluciones nutritivas y definición de cantidad de fertilizantes a disolver para la preparación de las soluciones madres, se explican en detalle en el capítulo 7, producción de cultivos sin suelo.

4. MONITOREO DEL FERTIRRIEGO

No podemos enfatizar la importancia del control del riego por sobre el monitoreo de la solución de suelo. El riego y el manejo de sales y nutrientes están completamente interrelacionados.

Algunas veces el monitoreo de la conductividad eléctrica o de los niveles de nitratos y otros elementos puede entregarnos más información sobre como estamos regando que la medición de la cantidad de agua en la zona de raíces. Por ejemplo, los niveles de nitratos descenderán abruptamente si se riega en exceso. Dependiendo de la calidad del agua de riego, los niveles de conductividad eléctrica aumentarán gradualmente en periodo de riegos deficientes.

El procedimiento de monitoreo nutricional se fundamenta en el control continuo del sistema suelo-agua-planta. El objetivo es optimizar la solución fertilizante y los aportes de agua, para así incrementar la rentabilidad y minimizar el impacto ambiental, obteniendo producciones de calidad.

El procedimiento consiste en el muestreo y análisis de la solución de suelo, mediante las metodología indicadas en el capítulo 3, además del muestreo de la solución fertilizante (agua de riego más fertilizantes) que llega a la planta. Esto permite tener

en todo momento, con gran facilidad y ahorro de tiempo, la estimación adecuada de la conductividad eléctrica, el pH y la concentración de nutrientes de la solución, como también, las sales nocivas para el cultivo tales como cloruros y sodio.

Resulta ser un apoyo fundamental a la gestión de la fertirrigación y su uso nos permite establecer:

- Control de programa de fertirriego (verificar las dosis de aplicación).
- Contenidos de nutrientes en el bulbo de riego.
- Necesidades reales de la planta en cada momento a lo largo del ciclo.
- Tipo y cantidad de fertilizantes más adecuados a utilizar.
- La forma de evitar y corregir antagonismos y desequilibrios.
- Evitar lavado de fertilizantes en el perfil.
- Detectar déficit hídricos o excesos de riego y/o fertilización innecesaria.
- Necesidades de acidificación agua de riego para evitar precipitaciones y obstrucciones de goteros.
- Efectuar las modificaciones necesarias para optimizar la nutrición de la planta en periodos menores a 10 días después del muestreo.

Existen empresas que prestan este servicio de muestreo, análisis, interpretación y recomendación de fertilización, basados en análisis de solución de suelo, mayores antecedentes al respecto se pueden encontrar en el sitio www.irrifer.cl.

1. INTRODUCCIÓN

El desafío de producir más alimentos con menor superficie ha incentivado la adopción de la agricultura protegida en muchas regiones del mundo. Este sistema permite cultivar en ambientes protegidos donde se puede manejar factores ambientales como la luz, temperatura, precipitación, viento, plagas y enfermedades, con la finalidad de incrementar los rendimientos por superficie.

Dentro de los cultivos protegidos, conviene especificar la terminología empleada:

Cultivo sin suelo: el sistema radicular está confinado en un contenedor y se emplean sustratos que aseguren la disponibilidad de agua y oxígeno a las raíces, lo que favorece el desarrollo del cultivo ya que se obtiene una óptima relación aire-agua. La nutrición está mucho más controlada, los sustratos inertes se encuentran libres de plagas y enfermedades.

Cultivo hidropónico: Sin sustrato y las raíces de las plantas son bañadas en una solución nutriente circulante.

Cultivo aeropónico: Sin sustrato y las raíces de la planta toman sus nutrientes por medio de un rociado frecuente o bruma.



Figura 7.1. Cultivos sin suelo.



Figura 7.2. Cultivos hidropónicos.



Figura 7.3. Cultivo aeropónico.

Particularmente, la producción de cultivos y frutales en ambientes protegidos ha crecido y las principales especies cultivadas en estos sistemas son: tomate, pimiento, pepino, lechuga, fresa, espinaca, especias y plantas medicinales y también frutales como arándanos, uva de mesa y otras especies. Este tipo de agricultura ha crecido relativamente rápido en los últimos años, resultado de los problemas relacionados al cultivo en suelo como: problemas físicos de suelo (reducida profundidad efectiva, compactación, mal drenaje, texturas pesadas), presencia de plagas como artrópodos y nematodos, escasez de agua y tierras degradadas, así como las condiciones climáticas.

Corresponde a un sistema altamente atractivo para el productor que tiene dificultades para cultivar en suelo. Además es un sistema que alcanza altos rendimientos, sin embargo requiere de capacitación especializada del personal de campo y técnico encargado. Por otra parte, es un sistema dinámico que permite establecer distintos cultivos para diferentes necesidades.

El éxito de los cultivos sin suelo e hidropónicos se debe a las ventajas del sistema, entre las cuales destacan:

Clima. Al producir bajo ambientes protegidos la incidencia del clima es mínima, por lo que es posible producir fuera de la temporada típica de producción, incluso tener cosechas todo el año mediante la producción escalonada.

Valor. La sanidad con la que son producidas las hortalizas en hidroponía es más alta, ya que no existe contacto directo de los vegetales con el suelo, disminuyen las aplicaciones de plaguicidas y productos foliares, y de esta manera se evita que los frutos o las hojas entren en contacto con sustancias que puedan dejar residuos.

Ambiente. El uso de una solución nutritiva es la manera más eficiente de usar fertilizantes. Sin embargo, la hidroponía con sistema de circulación cerrada es la más sostenible, ya que se evita la pérdida por lixiviación, volatilización y los programas de nutrición se elaboran de acuerdo a la demanda del cultivo.

Rentabilidad. Se ha demostrado que la producción hidropónica es más eficiente que la tradicional en cuanto a aprovechamiento de recursos y capacidad de producción por unidad de superficie. El aumento en los rendimientos obtenidos es muy notorio para todos los cultivos que se pueden adaptar a esta técnica en comparación con el establecimiento de los cultivos en suelo, lo que se traduce en un mejor costo-beneficio.

Superficie. La salinidad y acidez de suelos, y la presencia de plagas y enfermedades en los mismos, principalmente nematodos, ha provocado que la superficie agrícola apta para los cultivos disminuya drásticamente. Además, el crecimiento demográfico acelerado y la demanda de alimentos han aumentado. Lo anterior pone a la hidroponía como una técnica alternativa, ya que es posible producir más en menor superficie.

Versatilidad. Se pueden cultivar no solo hortalizas comunes, también especias y flores de corte, incluso frutales. Otra ventaja sobre el sistema tradicional es que no son obligadamente horizontales, puesto que hay estructuras en forma vertical que aprovechan mejor el espacio disponible. Lo anterior representa una alternativa para la agricultura urbana.

Sin embargo, es un sistema que también presenta desventajas, entre las cuales destaca:

Inversión inicial. Al ser parte de cultivos protegidos requiere instalaciones adecuadas como son: estructuras de protección, sistemas de riego tecnificado, fertilizantes solubles y de alta pureza, cadena de empaque, medio de distribución, automatización, mantenimiento, etc.

Capacitación. Las nuevas tecnologías requieren de gente capacitada y con experiencia en el tema. Este es uno de los principales puntos débiles, ya que es difícil encontrar gente con amplia experiencia en estos sistemas. Además, los trabajadores tienen que ser capacitados en temas de inocuidad, manejo del cultivo, empaque, entre otras.

Personal. La mano de obra es indispensable para las labores culturales, ya que por el crecimiento vigoroso e intensivo de los cultivos se requiere alta inversión en mano de obra.

Mercado. Ofrecer un buen producto requiere recuperar su costo, por eso algunas de los productos que se producen usando esta técnica tienen mayor valor que en algunos casos las personas no están dispuestos a pagar.

2. LA HIDROPONÍA EN FRUTALES ESTABLECIDOS EN SUELOS

La idea de aplicar los principios de la hidroponía al cultivo de frutales se ha desarrollado con el fin de cultivar en suelos con ciertas limitaciones (pedregosos-arenosos) o usar aguas de baja calidad (por ejemplo, salinas).

La técnica se denominó Hidroponía Abierta (OHS- *Open Hydroponics Systems*). Entre sus otras denominaciones Figuran la IFP (*Intensive Fertirrigation Program*) y la HTFP (*High Tech Fertirrigation Program*).

El objetivo de la OHS es incrementar la productividad por la aplicación continua de una solución nutritiva, electroquímicamente balanceada, a través de un sistema de riego por goteo que limita el volumen radicular, restringiendo el número de gotero por árbol y manteniendo la humedad en valores cercanos a la Capacidad de Campo, disminuyendo la capacidad amortiguadora (*buffer*) del suelo cuando se aplican las soluciones nutritivas al regar un volumen menor de suelo.

El riego se realiza por pulsos cortos durante las horas del día con luz, mientras los estomas están abiertos, por eso también se lo denomina “riego a estoma abierto”. Para decidir la frecuencia del riego se determinan la evapotranspiración y la humedad en el perfil del suelo, y se cuida que el bulbo regado no pase de los 40 a 50 cm de profundidad.

La OHS supone regar un menor volumen de suelo, aproximadamente la mitad del volumen regado con un gotero convencional. Algunos sistemas proponen regar ligeramente por encima de la capacidad de campo (anegamiento controlado), mientras que otros lo aconsejan cuando se consumió del 5 % al 10% del agua útil.

La combinación de los nutrientes varía a lo largo del año, dependiendo de los estados fenológicos de los diferentes cultivos. Así, por ejemplo, para frutales de pepita se pueden reconocer los siguientes momentos:

- Reposo a Yema Hinchada
- Yema Hinchada a Caída de Pétalos
- Caída de Pétalos a fin del Período de División celular
- Fin de la División Celular a Precosecha
- Precosecha a Cosecha
- Poscosecha

Como en otros sistemas de fertirriego, se utilizan dos o tres estanques para disolver los nutrientes y se regula el pH de la solución alrededor de 6. Es muy importante controlar la salinidad del agua y de la solución nutritiva. En resumen, los principios de la OHS están basados en la interacción de suelo, agua, nutrientes y fisiología del cultivo.

La hidroponía abierta puede incrementar la productividad de los frutales, pero también aumenta los riesgos en el manejo. Para evitarlos, es necesario mantener la provisión constante de agua, el equilibrio de agua y nutrientes en los distintos estados fenológicos del frutal, altos niveles de calidad y automatismo en el manejo del sistema y un muy buen asesoramiento técnico y supervisión estricta de los programas de fertirriego.

Es preciso tener en cuenta que al desarrollar un sistema radicular muy limitado, cualquier error en los puntos mencionados puede tener un impacto negativo muy importante.

3. SOLUCIÓN NUTRITIVA

La solución nutritiva es el medio acuoso en el cual se encuentran disueltos los nutrientes esenciales para el adecuado crecimiento y desarrollo de las plantas, y es la vía principal de nutrición de cultivos en hidroponía y sustratos. Una solución nutritiva completa debe tener: nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio, azufre, hierro, molibdeno, manganeso, boro, zinc, cobre y níquel. En la solución nutritiva estos elementos están en forma de iones para que las plantas puedan tomarlos, ya que no puede absorberlos en su forma simple. Es importante aclarar que los cultivos difieren en sus demandas nutricionales, lo que significa que requieren de soluciones nutritivas distintas, y para cada cultivo soluciones nutritivas según sus etapas fenológicas. En la actualidad, las soluciones nutritivas pueden ser tan específicas al nivel de variedades. Las condiciones climáticas y métodos de cultivos también son variables que influyen en la formulación de soluciones nutritivas y deben indiscutiblemente ser considerados. En definitiva, las variables son muchas y, por tanto, las soluciones nutritivas optimizadas podrían ser infinitas.

Existen tres formas de expresar las concentraciones de los elementos en la solución nutritiva: a) partes por millón (ppm) o miligramos por litro (mg/L), que es esencialmente lo mismo; b) concentración basada en molaridad (moles/ L); y c) concentración basada en normalidad (meq/L). A continuación se explica en qué consiste cada una de ellas y cómo se calculan.

Concentración en ppm o mg/L

La concentración en ppm, como su nombre lo indica, expresa los mg de elemento que existe en una muestra de un millón de mg. Normalmente se usa para expresar la relación de masa/masa, pero en solución se expresa la relación de masa/volumen. Por ello, es más conveniente usar las unidades mg/L, pero la costumbre ha sido expresarlo en ppm y así se ha mantenido.

Concentración molar y milimolar

La concentración molar (M) es el peso atómico, cuando se trata de un elemento o peso molecular, cuando se trata de una molécula o compuesto, expresado en gramos, disueltos en un litro de solución. Así, por ejemplo el peso atómico del N es 14, por lo tanto una concentración de 1 mol/L de N contiene 14 g de este elemento en un litro de solución. Si se trata del ión nitrato (NO_3^-), cuyo peso molecular es 62 g [$14 + (16 \times 3)$], entonces, una concentración de 1 mol/L contiene 62 g de NO_3^- en cada litro de solución. Si se trata del fertilizante sulfato de potasio (K_2SO_4), cuyo peso molecular es 174 [$(39 \times 2) + 32 + (16 \times 4)$], entonces una concentración de 1 mol/L contiene 174 g del fertilizante por litro de solución. Dado que las concentraciones molares son muy altas para la solución nutritiva, convencionalmente se usa la concentración milimolar (mmolar o mM). Esto equivale a la milésima parte de una concentración molar. En comparación con los casos de iones y compuestos arriba descritos, una concentración de 1 mM/L de N contiene 14 mg del elemento por litro de solución, una de 1 mM/L de NO_3^- contiene 62 mg/L de solución y una de 1 mM/L de K_2SO_4 , contiene 174 mg de fertilizante por litro de solución.

Concentración Normal (equivalentes/L)

La concentración normal contempla además del peso atómico, la valencia del ión. Una solución normal (N) se expresa en la forma de peso equivalente por litro de solución. El peso equivalente es la fórmula gramo o el peso atómico o molecular, dividido entre la valencia. Un equivalente/L de NO_3^- contiene 62 g del anión/L de solución, debido a que la valencia del NO_3^- es uno. Por lo tanto, todos aquellos iones que tengan una valencia de 1 ya sea negativa o positiva, la concentración en moles/L es igual a equivalentes/L. Pero para aquellos que tengan una valencia de 2, entonces el número de equivalentes es igual al doble del número de moles/L. Como en el caso de la molaridad, en lugar de expresarse en equivalentes/L (eq/L) se expresa en miliequivalentes/L (meq/L), por lo tanto, una solución de 1 meq/L de NO_3^- , contiene 62 mg del anión/L de solución. En el caso del ión sulfato que tiene dos valencias negativas, su peso miliequivalente es de $96 \text{ mg}/2 = 48 \text{ mg/L}$. Así un meq de SO_4^{2-} /L contiene 48 mg/L y un mM de SO_4^{2-} /L contiene 96 mg/L. Por otro lado, una solución de K_2SO_4 con 1 meq/L = peso molecular/valencia = $174 \text{ mg}/2 = 87 \text{ mg/L}$.

En el anexo del texto, se presentan los pesos atómicos de los elementos nutritivos de las plantas, útiles para realizar los cálculos y conversiones.

4. BALANCE CATIÓNICO-ANIÓNICO

Las plantas absorben los nutrientes minerales de soluciones acuosas, ya sea una solución nutritiva hidropónica o la solución del suelo. Los nutrientes minerales están presentes en la solución en forma de iones disueltos, lo que significa que llevan carga eléctrica.

Aquellos nutrientes con carga positiva son los cationes y los con carga negativa, los aniones.

La planta absorbe los nutrientes en formas iónicas específicas. Por ejemplo, nitrógeno es absorbido en forma de NO_3^- o como NH_4^+ . El fósforo como H_2PO_4^- , el potasio como K^+ , calcio como Ca^{+2} , azufre como SO_4^{-2} , etc.

Para calcular el balance catiónico-aniónico, debemos medir el número de cargas. Para hacer eso, se debe utilizar una unidad única que integra tanto el peso molecular del ion y su carga eléctrica. Esta unidad se denomina equivalente.

Como se explicó anteriormente, el equivalente se calcula dividiendo el peso atómico por su valencia o por la carga eléctrica que lleva.

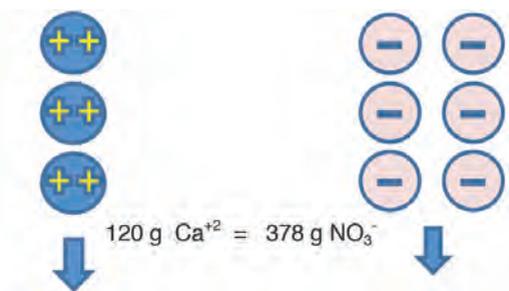
Por ejemplo, ¿Cuántos equivalentes hay en 120 gramos de calcio (Ca^{+2})?

El peso molecular del calcio es 40 g y lleva una carga positiva de +2. Por tanto, el peso de un equivalente es $40/2 = 20$ g.

Por lo tanto, 120 gramos de calcio son 6 equivalentes.

De la misma manera, también 378 gramos de NO_3^- son 6 equivalentes, debido a que el peso de un equivalente de NO_3^- es $62/1 = 62$ g. Entonces $378/62 = 6$ equivalentes.

Eso significa que 120 gramos de Ca^{+2} llevan la misma cantidad de cargas eléctricas que 378 gramos de NO_3^- .



El balance catiónico-aniónico se calcula comparando el número de equivalentes de cationes con el número de equivalentes de aniones.

Para hacer el balance catiónico-aniónico, tomemos como ejemplo el análisis de agua del Cuadro 7.1.

Cuadro 7.1. Análisis de agua de riego. Resultados expresados en mg/L o ppm.

Catión	Concentración (mg/L)	Anión	Concentración (mg/L)
Ca ⁺²	174	NO ₃ ⁻	46
Mg ⁺²	63	SO ₄ ⁻²	167
K ⁺	6	Cl ⁻	401
Na ⁺	104	HCO ₃ ⁻	195
NH ₄ ⁺	0	CO ₃ ⁻²	0
TOTAL	347		809

Si calculamos los aniones y cationes totales en unidades de mg/L o ppm, obtenemos 347 mg/L de cationes y 809 mg/L de aniones.

Cuadro 7.2. Análisis de agua de riego. Resultado expresado en meq/L.

Catión	Concentración (meq/L)	Anión	Concentración (meq/L)
Ca ⁺²	8,7	NO ₃ ⁻	0,74
Mg ⁺²	5,2	SO ₄ ⁻²	3,5
K ⁺	0,16	Cl ⁻	11,3
Na ⁺	4,4	HCO ₃ ⁻	3,2
NH ₄ ⁺	0	CO ₃ ⁻²	0
TOTAL	18,5		18,7

Sin embargo, cuando convertimos la concentración de cada ion a meq/L y hacemos el balance, el resultado es 18,5 meq/L de cationes y 18,7 meq/L de aniones (Cuadro 7.2). Muy cerca de un equilibrio completo. La diferencia está dentro del rango aceptable de error en la medición.

¿Hemos conseguido este resultado por casualidad?. De hecho, no ...**De acuerdo con la ley de neutralidad eléctrica, la carga total de una solución acuosa debe ser cero.**

$$\Sigma \text{ iones cargados negativamente} = \Sigma \text{ iones cargados positivamente}$$

Esta es una ley de la naturaleza. El agua es siempre equilibrada, con respecto al balance catiónico-aniónico. También, la solución de suelo y solución fertilizante.

¿Puede el balance catiónico-aniónico verse afectado por la adición de fertilizantes?

Para encontrar una respuesta a esta pregunta, primero vamos a ver la composición de los fertilizantes.

Usaremos cloruro de potasio (KCl) como ejemplo (Cuadro 7.3).

Cuadro 7.3. Composición del cloruro de potasio.

Composición		En 100 gramos de fertilizante	Peso 1 equivalente (g)	En meq/L
Cl ⁻	45 %	45 g	35	1,3
K ⁺	51 %	51 g	39	1,3

Podemos ver que el fertilizante es equilibrado con respecto al balance catiónico-aniónico.

¿Una sorpresa? No... Al ser una sal, cualquier fertilizante siempre contendrá un número igual de cationes y aniones, medidos en miliequivalentes (la suma de las cargas eléctricas es cero).

Así que cuando disolvemos fertilizantes en el agua, no importa que fertilizantes disolvemos y en qué cantidad. La solución de nutrientes siempre será equilibrada, con respecto al balance catiónico-aniónico.

Así que podemos influir en la concentración total y la composición interna de los cationes y los aniones, pero siempre se mantendrá un balance entre los cationes y los aniones.

5. SOLUCIONES NUTRITIVAS RECOMENDADAS PARA ALGUNOS CULTIVOS

Una solución nutritiva (SN) es una mezcla de elementos químicos en solución, a una concentración y relación entre nutrientes óptima, de tal forma que favorezca la absorción de nutrientes por el cultivo.

Están presentes prácticamente todos los nutrientes esenciales, de tal forma que el cultivo no tiene ninguna restricción desde el punto de vista de su nutrición. En el Cuadro 7.4 se presentan algunas soluciones nutritivas “ideales” para algunos cultivos.

Cuadro 7.4. Soluciones nutritivas “ideales” para algunas hortalizas (meq/L).

Especie	NO ₃ ⁻	H ₂ PO ₄ ⁻	K ⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²	SO ₄ ⁻²
Tomate	12	1,5	8,5	9	4	3-5
Pimiento	12	1,5	6,0	10	4	3-5
Pepino	13	1,5	6,0	10	5	3-5
Melón	12	1,5	7,5	12	4	3-5
Sandía	12	1,5	7,5	10	4	3-5
Berenjena	13	1,5	7,5	10	4	3-5
Frutilla	7	1,0	4,5	7	2	3-5
Lechuga	16	2,0	10,0	9	2	3-5
Rosas	12	1,5	7,0	10	3	3-5

Varios autores.

Para los microelementos, normalmente se trabaja en concentraciones expresadas en mg/L o ppm e independientes de la especie. Las concentraciones óptimas son:

Cuadro 7.5. Concentraciones óptimas de microelementos en la solución nutritiva.

Microelemento	Concentración (mg/L)
Mn	0,8
Cu	0,05
B	0,4
Fe	1,5-2,0
Zn	0,15-0,30
Mo	0,05

Información más detallada relacionada con soluciones nutritivas propuestas para diversas etapas fenológicas de algunos cultivos, se presentan en los Cuadros 7.6 al 7.9.

Cuadro 7.6. Soluciones nutritivas en función del estado de desarrollo para tomates (meq/L).

Etapas	NO ₃ ⁻	H ₂ PO ₄ ⁻	K ⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²	SO ₄ ⁻²
Transplante a floración 2° racimo	8	2,5	5	8	4	2-5
De 2° racimo a 5° racimo	11	2,0	7,5	12	4	3-5
De 5° a 10° racimo	14	1,5	8,5	10	4	3-5
Ultimo racimo cuajado hasta final del cultivo	14	1,5	7	8	4	3-5

Fernández y Camacho, 2018.

Cuadro 7.7. Soluciones nutritivas en función del estado de desarrollo para melón (meq/L).

Etapas	NO ₃ ⁻	H ₂ PO ₄ ⁻	K ⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²	SO ₄ ⁻²
Hasta aparición primeras flores	8	2,5	5	8	4	2-5
Fecundación	10	2,0	7	12	4	3-5
Engrosamiento de frutos	13	1,5	8,5	12	4	3-5
Maduración	11	1,0	7	8	4	3-5

Fernández y Camacho, 2018.

Cuadro 7.8. Soluciones nutritivas en función del estado de desarrollo para sandía (meq/L).

Etapas	NO ₃ ⁻	H ₂ PO ₄ ⁻	K ⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²	SO ₄ ⁻²
Hasta 10-11 entrenudos en brazo principal	10	2,5	5	8	4	2-5
Floración	10	2,5	7	12	4	3-5
Cuajado y engorde	15	1,5	8,5	12	4	3-5
Maduración	11	1,0	8	8	4	3-5

Fernández y Camacho, 2018.

Cuadro 7.9. Soluciones nutritivas en función del estado de desarrollo para arándanos en macetas con sustrato de fibra de coco (meq/L).

Etapa	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	H ₂ PO ₄ ⁻	K ⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²	SO ₄ ⁻²
Desarrollo vegetativo	4	4	1	3	3	1,5	2-5
Fructificación	4	3,5	1	4,5	4	1,5	2-5
Postcosecha	4	3	1,2	2,5	3	1,5	2-5

Elaboración propia.

Los pasos a seguir para el cálculo de soluciones nutritivas son los siguientes:

1. Ordenar cationes y aniones por su importancia en la nutrición
2. Destruir bicarbonatos (HCO₃⁻) hasta dejarlos en 1,0 meq/L.
3. Ajustar el calcio
4. Completar los macroelementos comenzando con el N
5. Dejar los ajustes del sulfato (SO₄⁻²) para el final
6. Determinar cantidad de fertilizantes a disolver en los estanques y su distribución
7. Ajustar los microelementos
8. Distribuir los fertilizantes en los estanques y programar el riego

Partimos de una solución nutritiva conocida final, que utilizaremos como guía, solución que saldrá al final por los emisores o goteros. La conocemos por nuestra experiencia o por bibliografía, expresada en meq/L, los macroelementos y en mg/L, los micros.

La siguiente solución nutritiva nos sirve como referencia (pimiento, Cuadro 7.4):

NO ₃ ⁻ meq/l	H ₂ PO ₄ ⁻ meq/l	K ⁺ meq/l	Ca ⁺² meq/l	Mg ⁺² meq/l	SO ₄ ⁻² meq/l
12	1,5	6,0	10	4	3

Además, se necesita un análisis del agua de riego para conocer su composición. A la solución nutritiva conocida final (la que queremos que salga por el gotero) le restamos los nutrientes aportados por el agua de riego. El agua de riego que disponemos presenta la siguiente concentración:

NO ₃ ⁻ meq/l	H ₂ PO ₄ ⁻ meq/l	K ⁺ meq/l	HCO ₃ ⁻ meq/l	Cl ⁻ meq/l	Na ⁺ meq/l	Ca ⁺² meq/l	Mg ⁺² meq/l	SO ₄ ⁻² meq/l
0,7	0	0,2	3,2	4,3	3,4	5,7	2,2	3,5

Paso 1. Ordenar cationes y aniones por su importancia en la nutrición

		NO_3^-	$H_2PO_4^-$	SO_4^{2-}	HCO_3^-	Cl	NH_4^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+
Sol. Nutritiva		12	1,5	3	1			6	10	4	
Agua		0,7	0	3,5	3,2	4,3	0	0,2	5,7	2,2	3,4
Aportes	me L⁻¹	11,3	1,5	-0,5	-2,2	-4,3	0	5,8	4,3	1,8	-3,4
Ca(NO ₃) ₂ ·H ₂ O											
CaCl ₂											
H ₃ PO ₄											
HNO ₃											
H ₂ SO ₄											
KNO ₃											
K ₂ SO ₄											
MgSO ₄ ·7H ₂ O											
NH ₄ NO ₃											
KH ₂ PO ₄											
NH ₄ H ₂ PO ₄											
Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O											
KCl											
Aportes me L⁻¹											

Paso 2. Destruir bicarbonatos (HCO₃⁻) hasta dejarlos en 1,0 meq/L

Primero se neutralizan los bicarbonatos (HCO₃⁻) con ácido, dejando 1,0 meq/L (empíricamente se sabe que con esta concentración la SN alcanza un pH óptimo en el rango 5,5-6,0), además permite mantener los iones en solución y evitar la formación de precipitados en el sistema de riego. En nuestro caso usaremos ácido fosfórico. Un meq de ácido neutraliza un meq de bicarbonato.

Si el aporte de ácido fosfórico (meq/L) necesario para neutralizar los bicarbonatos es mayor a los fosfatos que queremos aportar en la solución final, se siguen neutralizando los bicarbonatos utilizando ácido nítrico (no siempre es necesario).

Si se añade Ac. nítrico hay que tenerlo en cuenta a la hora de ajustar los nitratos.

En este caso se tienen que neutralizar 2,2 meq/L de bicarbonatos, por lo que se necesitarían 2,2 meq/L de Ac. Fosfórico. Como se exceden las necesidades de fosfatos, es necesario aportar Ac. Nítrico. Se aporta 1,5 meq/L de Ac. Fosfórico y 0,7 meq/L de Ac. Nítrico.

		NO_3^-	$H_2PO_4^-$	SO_4^{2-}	HCO_3^-	Cl^-	NH_4^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+
Sol. Nutritiva		12	1,5	3	1			6	10	4	
Agua		0,7	0	3,5	3,2	4,3	0	0,2	5,7	2,2	3,4
Aportes	me L⁻¹	11,3	1,5	-0,5	-2,2	-4,3	0	5,8	4,3	1,8	-3,4
$Ca(NO_3)_2 \cdot H_2O$											
$CaCl_2$											
H_3PO_4	1,5		1,5		1,5						
HNO_3	0,7	0,7			0,7						
H_2SO_4											
KNO_3											
K_2SO_4											
$MgSO_4 \cdot 7H_2O$											
NH_4NO_3											
KH_2PO_4											
$NH_4H_2PO_4$											
$Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$											
KCl											
Aportes me L⁻¹		0,7	1,5		2,2						

Paso 3. Ajustar el calcio

Emplearemos nitrato de calcio. Para 4,3 meq/L de calcio se añaden 4,3 meq/L de nitrato de calcio, con lo que también se está agregando 4,3 meq/L de nitratos.

		NO_3^-	$H_2PO_4^-$	SO_4^{2-}	HCO_3^-	Cl^-	NH_4^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+
Sol. Nutritiva		12	1,5	3	1			6	10	4	
Agua		0,7	0	3,5	3,2	4,3	0	0,2	5,7	2,2	3,4
Aportes	me L⁻¹	11,3	1,5	-0,5	-2,2	-4,3	0	5,8	4,3	1,8	-3,4
$Ca(NO_3)_2 \cdot H_2O$	4,3	4,3							4,3		
$CaCl_2$											
H_3PO_4	1,5		1,5		1,5						
HNO_3	0,7	0,7			0,7						
H_2SO_4											
KNO_3											
K_2SO_4											
$MgSO_4 \cdot 7H_2O$											
NH_4NO_3											
KH_2PO_4											
$NH_4H_2PO_4$											
$Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$											
KCl											
Aportes me L⁻¹		5,0	1,5		2,2				4,3		

Paso 4. Completar los macroelementos comenzando con el N

Se ajusta el nitrógeno añadiendo nitrato de potasio, teniendo en cuenta de no exceder la cantidad de potasio que necesitamos para la solución final. Estamos llegando a 10,8 meq/L de nitratos, más el amonio que aportó el nitrato de calcio (0,3 meq/L) estaríamos aportando 11,1 meq de nitrógeno, lo cual está muy próximo a nuestro objetivo. Así también, estamos cumpliendo con los requerimientos de potasio, que son 5,8 meq/L.

		NO_3^-	$H_2PO_4^-$	SO_4^{2-}	HCO_3^-	Cl^-	NH_4^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+
Sol. Nutritiva		12	1,5	3	1			6	10	4	
Agua		0,7	0	3,5	3,2	4,3	0	0,2	5,7	2,2	3,4
Aportes	<i>me L⁻¹</i>	11,3	1,5	-0,5	-2,2	-4,3	0	5,8	4,3	1,8	-3,4
$Ca(NO_3)_2 \cdot H_2O$	4,3	4,3					0,3		4,3		
$CaCl_2$											
H_3PO_4	1,5		1,5		1,5						
HNO_3	0,7	0,7			0,7						
H_2SO_4											
KNO_3	5,8	5,8					5,8				
K_2SO_4											
$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	1,8		1,8							1,8	
NH_4NO_3											
KH_2PO_4											
$NH_4H_2PO_4$											
$Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$											
KCl											
Aportes me L⁻¹		10,8	1,5	1,8	2,2	0	0,3	5,8	4,3	1,8	

Para efectuar el ajuste del magnesio, seleccionamos el fertilizante sulfato de magnesio adicionando 1,8 meq/L. Nótese que al adicionar sulfato de magnesio, también estamos agregando 1,8 meq/L de sulfatos. El agua nos aporta adicionalmente 3,5 meq/L, por lo cual estamos sobrepasando considerablemente los requerimientos del cultivo. El exceso de este nutriente no constituye problema para los cultivos, y se pueden manejar rangos amplios. Este elemento se debe considerar que actúa como “comodín” al momento de realizar los cálculos.

Por otro lado, no tenemos porqué llegar a ajustar totalmente la solución ideal. Esta nos sirve de referencia. En todo caso, es muy importante no salirnos de los valores mínimos y máximos admisibles para la planta de cada macroelemento.

Paso 5. Determinar cantidad de fertilizantes a disolver en los estanques y su distribución

Para ello, se requiere saber el peso de cada meq/L de fertilizante. Lo cual se presenta en el siguiente Cuadro.

Cuadro 7.10. Peso equivalente de los diferentes fertilizantes empleados en fertirrigación y concentración requerida para preparar la solución nutritiva empleada en el ejemplo.

Fertilizante	Fórmula	meq L ⁻¹	Peq mg/meq	g/m ³	Factor dilución	g/estanque
Acido nítrico	HNO ₃	0,70	63*	31	200	6.200
Acido fosfórico	H ₃ PO ₄	1,50	98*	110	200	22.000
Acido sulfúrico	H ₂ SO ₄	0,00	49*			
Nitrato de calcio	Ca(NO ₃) ₂	4,3	100	430	200	86.000
Cloruro de calcio	CaCl ₂	0,00	56			
Nitrato de potasio	KNO ₃	5,8	101	586	200	117.200
Sulfato de potasio	K ₂ SO ₄	0,00	87			
Sulfato de magnesio	MgSO ₄ 7H ₂ O	1,80	123	221	200	44.300
Nitrato de amonio	NH ₄ NO ₃	0,00	80			
Fosfato monopotásico	KH ₂ PO ₄	0,00	136			
Fosfato monoamónico	NH ₄ H ₂ PO ₄	0,00	115			
Nitrato de magnesio	Mg(NO ₃) ₂ 6H ₂ O	0,00	128			
Cloruro de potasio	KCl	0,00	75			

(*) Para el caso de los ácidos se debe ajustar por la concentración que se comercializa el producto. Normalmente, Ac. Nítrico al 70%, Ac. fosfórico al 75% y Ac. Sulfúrico al 98%. Nótese que los ácidos al igual que el resto de los fertilizantes están expresados en base a peso.

Vamos a suponer que disponemos de 3 estanques de 1000 L cada uno para preparar la solución madre y ésta la vamos a concentrar 200 veces. También debemos considerar la compatibilidad de estos productos, por lo cual en el Cuadro 7.11 se indican en color rojo, aquellos fertilizantes que no se pueden mezclar en el mismo estanque.

El criterio a seguir para producir la solución nutritiva concentrada y que no se generen precipitados en el estanque, es no superar una concentración final del 20% de la mezcla total. Para el caso del ejemplo, la cantidad máxima a disolver es del orden del 200 kg de la mezcla de fertilizantes en cada estanque de 1000 L. En consecuencia, no estamos superando dicha concentración, por lo cual no tenemos riesgos de formar precipitados.

Cuadro 7.11. Peso de fertilizante a disolver para preparar 1000 L de solución madre en cada estanque.

Fertilizante	Fórmula	Añadir kg	Estanques		
			T - 1	T - 2	T - 3
Acido nítrico	HNO ₃	6,2	6,2		
Acido fosfórico	H ₃ PO ₄	22,0		22,0	
Acido sulfúrico	H ₂ SO ₄	0,00			
Nitrato de calcio	Ca(NO ₃) ₂	8,6	8,6		
Cloruro de calcio	CaCl ₂	0,00			
Nitrato de potasio	KNO ₃	117,2		117,2	
Sulfato de potasio	K ₂ SO ₄	0			
Sulfato de magnesio	MgSO ₄ 7H ₂ O	44,3		44,3	
Nitrato de amonio	NH ₄ NO ₃	0,00			
Fosfato monopotásico	KH ₂ PO ₄	0,00			
Fosfato monoamónico	NH ₄ H ₂ PO ₄	0			
Nitrato de magnesio	Mg(NO ₃) ₂ 6H ₂ O	0,00			
Cloruro de potasio	KCl	0,00			
Total			92,2	183,5	0

Paso 6. Ajustar los microelementos

De acuerdo a lo señalado precedentemente, independiente del cultivo vamos a manejar una concentración ideal de microelementos en la solución nutritiva.

Cuadro 7.12. Concentración ideal de microelementos, aporte del agua de riego y diferencia a aplicar mediante fertilizantes.

Microelemento	Solución ideal (mg/L)	Aporte agua riego (mg/L)	Aporte real (mg/L)
Mn	0,8	0,3	0,5
Cu	0,05	0	0,05
B	0,4	0,1	0,3
Fe	1,5	0,7	0,8
Zn	0,2	0	0,2
Mo	0,05	0	0,05

Debemos hacer un aporte de acuerdo a la última columna del Cuadro 7.12. Para ello disponemos de varias alternativas de fertilizantes que aportan microelementos, los cuales se detallan en el Cuadro 7.13.

Cuadro 7.13. Fuentes de microelementos y concentraciones respectivas.

Microelemento	Fertilizante	Tipo quelato o fertilizante	Concentración % p/p
Fe	Quelato de hierro (EDDHA)	EDDHA Fe	6
Fe	Quelato de hierro (DTPA)	DTPA Fe	9
Fe	Quelato de hierro (EDTA)	EDTA Fe	13
Mn	Quelato de manganeso	EDTA Mn	15
Cu	Quelato de cobre	EDTA Cu	14
Zn	Quelato de cinc	EDTA Zn	14
Mn	Sulfato de manganeso	MnSO ₄ 2H ₂ O	32
Cu	Sulfato de cobre	CuSO ₄ 5H ₂ O	25,5
Zn	Sulfato de cinc monohidratado	ZnSO ₄ H ₂ O	34,5
Zn	Sulfato de cinc heptahidratado	ZnSO ₄ 7H ₂ O	22,5
B	Acido bórico	H ₃ BO ₃	17,5
B	Borax	Na ₂ B ₄ O ₇ 10H ₂ O	11,3
B	Solubor		21
Mo	Molibdato de amonio	(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ 4H ₂ O	54
Mo	Molibdato de sodio	Na ₂ MoO ₄ 2H ₂ O	39,6

Para aportar los microelementos, vamos a seleccionar los fertilizantes EDDHA Fe, EDTA Mn, CuSO₄ x 5H₂O, ZnSO₄ x H₂O, H₃BO₃ y Na₂MoO₄ x 2H₂O. Los resultados de los cálculos respectivos para preparar 1000 L de solución madre 200 veces concentrada se presentan el en Cuadro 7.14.

Cuadro 7.14. Fuentes de microelementos seleccionados y cantidad respectiva para preparar 1000 L de solución madre.

Micro	Fertilizante	(A) Concentración fertilizante % p/p	(B) Concentración deseada mg/L	(C) 100/A	(BxC) Dosis Producto g/m3	(CxFD) Añadir g/estanque
Fe	EDDHA Fe	6	0,8	16,67	13,3	2660
Mn	EDTA Mn	15	0,5	6,67	3,3	660
Cu	CuSO ₄ 5H ₂ O	25,5	0,05	3,92	0,2	40
Zn	ZnSO ₄ H ₂ O	34,5	0,2	2,90	0,6	120
B	H ₃ BO ₃	17,5	0,3	5,71	1,8	360
Mo	Na ₂ MoO ₄ 2H ₂ O	39,6	0,05	2,53	0,12	24

La mezcla de microelementos se puede aplicar junto a los resto de los fertilizantes o preferiblemente, en un tercer estanque.

Finalmente, se dispone de la preparación de las soluciones madres que aportan los macro y microelementos deseados. Esta solución madre, como se señaló anteriormente, para el ejemplo la preparamos 200 veces concentrada, por consiguiente, el caudal del inyector de fertilizantes debe ser 200 veces inferior al caudal de riego, para que de esta forma la concentración a la salida de los goteros corresponda a la solución ideal calculada.

Por ejemplo, si el sistema de riego está diseñado para entregar un caudal de 10.000 L/h, el inyector de fertilizantes se debe regular a $(10.000/200) = 50$ L/h. De esta forma el agua que llega a las plantas, tendrá la concentración deseada desde la primera gota hasta la última gota del riego. Si se desea inyectar solamente en un periodo correspondiente al 50% del tiempo de riego, para dejar un tiempo inicio con agua pura y posterior lavado del sistema, se debe proceder a incrementar al doble el caudal de inyección, es decir a 100 L/h.

6. MONITOREO DE LA SOLUCIÓN NUTRITIVA

El monitoreo de la solución nutritiva es clave para el correcto manejo nutricional de los cultivos. La calidad de las soluciones nutritivas está determinada entonces, por la constitución de dicha solución, la relación existente entre los diferentes iones minerales, la conductividad eléctrica y el pH.

El análisis químico del agua es pieza fundamental para la formulación de soluciones nutritivas. Preparar soluciones sin un estudio previo de las características del agua es demasiado riesgoso, donde los problemas pueden llegar al punto de perder el 100 % de la producción por algún detalle del agua que pudo manejarse o corregirse previamente. El análisis químico del agua permite identificar diferentes aspectos como la concentración de nutrientes, presencia de iones específicos tóxicos, dureza, pH y CE del agua, entre otros. Estos factores permiten ajustar las soluciones nutritivas según sea necesario, por ejemplo, en muchas regiones el agua utilizada contiene niveles elevados de calcio y magnesio, donde el aporte de estos elementos en la solución nutritiva es más que suficiente con el agua, permitiendo un ahorro importante en fertilizantes. Otro ejemplo, es el relacionado con la alcalinidad del agua, o sea la concentración de bicarbonato (HCO_3^-), lo cual es importante para determinar la resistencia del agua a la acidificación, ya que en varios casos es necesario agregar ácidos para reducir el pH de la solución.

La concentración de nutrientes al ponerse en contacto con el sistema radical de las plantas es sumamente dinámica y debe de ajustarse con frecuencia. Un técnico experimentado conoce la forma de mantener las concentraciones ideales de los iones mediante un correcto manejo nutricional. Dicha tecnología obliga a analizar periódicamente la concentración de macro y micronutrientes, tanto en gotero como en el sustrato y en las aguas de drenaje, durante toda la temporada con una periodicidad consistente. Es recomendable analizar muestras de solución nutritiva y drenaje cada dos a tres semanas, y en caso de situaciones particulares tales como cambios bruscos en el cultivo, errores en los cálculos o en las mezclas, el análisis se debe realizar de manera inmediata. Esto permite ejecutar un programa nutricional óptimo y eficiente.

Todo cultivo, tanto en suelo como en sustrato, requiere el monitoreo de los niveles nutricionales de la solución nutritiva. Hay múltiples motivos por los que los niveles nutricionales pueden variar, tales como desperfecto en el sistema de inyección, cambios en las concentraciones de los fertilizantes comerciales, errores de cálculo en la formulación, equivocaciones al momento del mezclado de los fertilizantes, entre otras. El análisis nutricional frecuente y consistente del gotero, sustrato y el drenaje nos permite reducir riesgos, afinar los programas nutricionales y manejar eficientemente estos sistemas de producción

Una solución nutritiva adecuadamente formulada se inicia siempre con el análisis de agua. El pH tiene un efecto directo sobre la absorción iónica. Como regla general, la mayoría de los cultivos crecen adecuadamente en un rango de pH de 5.8 – 6.5. Cuando el pH se sale de valores recomendados, pueden ocurrir precipitados de algunos elementos (ej, hierro), toxicidad, deficiencias, etc. La evaluación de la interacción nutrimental es también fundamental, como en el caso de la proporción amonio/nitrato que es uno de los principales factores que afectan el pH de la solución nutritiva, donde las cantidades estándar de NH_4^+ incorporadas en las soluciones nutritivas están entre 5 a 10 % del total de N y difícilmente excederá 15 %. Otra de las interacciones, en el caso de competencia en el mecanismo de absorción, es el exceso de K, que puede provocar dificultades para absorber Mg y/o Ca, causando deficiencias de éstos. Como estas, pueden ocurrir muchas interacciones y complicaciones durante la nutrición de los cultivos, esto hace totalmente necesario un monitoreo continuo de la solución para hacer ajustes. Otro factor a monitorear en las soluciones nutritivas son los contenidos de elementos nocivos, como los iones sodio y cloruro, que influyen de manera directa en la absorción de nutrientes. El sodio provoca una competencia directa en la absorción de K y el ion cloruro en la de NO_3^- . Dichos incrementos salinos originan aumentos en la presión osmótica de la solución, frenando la absorción de agua e iones minerales que generan un desbalance hídrico en la planta. La conductividad eléctrica nos da una idea de la cantidad de sales disueltas en la solución. La misma se debe mantener en un rango adecuado según la especie cultivada y su etapa fenológica. Si no se mantiene este balance puede afectar la disponibilidad de los nutrientes.

7. MANEJO DEL RIEGO EN CULTIVOS SIN SUELO

El análisis frecuente del agua de riego y de drenaje es indispensable para controlar el crecimiento normal de plantas de contenedor. Las medidas necesarias para la planificación y el seguimiento de riego debe dar respuesta a dos interrogantes: Cuando regar (intervalo o frecuencia de riego) y cuanto regar (tiempo de riego o cantidad de agua).

La frecuencia de riego es determinada en base al consumo de agua de la planta, el volumen del contenedor y en las propiedades del sustrato del cultivo, teniendo en cuenta la sensibilidad de la planta a la humedad en el sustrato del cultivo. El agua fácilmente aprovechable o agua a consumir antes del siguiente riego se estima en un 5 a 10% del agua total retenida por el sustrato.

Para evitar la acumulación de salinidad en el sustrato, es muy importante permitir el drenaje de agua de la parte inferior del contenedor. Un drenaje no adecuado causará aumento de

la salinidad en el sustrato, mientras que drenaje excesivo puede causar la lixiviación de nutrientes del sustrato y el agotamiento de los nutrientes.

Por razones prácticas, el drenaje se expresa como porcentaje del volumen del agua aplicado al contenedor. Por ejemplo, si se aplica 1 litro de agua y el drenaje es de 300ml de volumen, el porcentaje de drenaje es del 30%.

Entre el 10-30% del volumen de riego es una gama aceptable de drenaje en la mayoría de sustratos de cultivo, el porcentaje apropiado del drenaje es determinado según la tolerancia de la planta a las sales, las propiedades del medio de cultivo, el programa de fertilización y la experiencia del productor.

Prácticamente, el porcentaje de drenaje está determinado por simples pruebas en el campo, tales como pruebas de la CE, el pH, los nitratos y cloruros en el agua de riego y en el agua de drenaje.

Una vez que el porcentaje de drenaje está determinado, puede ser utilizado como una premisa de trabajo. La cantidad de agua que debe ser aplicada en cada riego, es la cantidad de agua que tendrá como resultado este porcentaje de drenaje.

Los parámetros mencionados anteriormente deben ser probados al menos una vez a la semana, para conseguir indicaciones de los procesos que tienen lugar en el sustrato, como cambios en el pH, aumento de salinidad, deficiencias etc.

A continuación se presentan dos ejemplos de cálculo:

Ejemplo A: el volumen del contenedor es de 27 litros y el sustrato de fibra de coco puede retener un 38% de agua en base a volumen y se disponen de 3 goteros por planta. La planta consume 2,5 litros por día.

El volumen de riego = volumen consumido + volumen de drenaje.

El volumen consumido o agua fácilmente aprovechable por la planta se estima en un 5 a 10% del agua total retenida y el volumen de drenaje en un 10 a 30% del volumen de riego.

Agua total retenida (ATR) = $38/100 \times 27 \text{ L} \times 1000 = 10.260 \text{ ml}$.

Volumen consumido = $5/100 \times 10.260 \text{ ml} = 513 \text{ ml}$

Volumen de Riego = $513 \text{ ml} + (30/100 \times \text{Volumen de Riego})$

Volumen de Riego = $513/0,7 = 733 \text{ ml}$

Volumen de riego = $733 \text{ ml} / 3 \text{ goteros} = 244 \text{ ml/gotero}$

Como los goteros son de 2 L/h o 33 ml/min, el tiempo de riego es igual a:

$244 \text{ ml/gotero} / 33 \text{ ml/min} = 7 \text{ minutos}$.

Como la planta consume 2500 ml/día, entonces se debe regar en 5 oportunidades durante el día (2.500 ml/513 ml) considerando 7 minutos en cada riego.

Ejemplo B: el volumen del contenedor es de 10 litros y el sustrato de perlita puede retener un 55% de agua en base a volumen y se disponen de 2 goteros por planta. La planta consume 0,85 litros por día.

El volumen de riego = volumen consumido + volumen de drenaje

Tal como se señaló anteriormente, el volumen consumido o agua fácilmente aprovechable por la planta se estima en un 5 a 10% del agua total retenida y el volumen de drenaje en un 10 a 30% del volumen de riego. Entonces:

Agua total retenida (ATR) = $55/100 \times 10 \text{ L} \times 1000 = 5.500 \text{ ml}$.

Volumen consumido = $5/100 \times 5.500 \text{ ml} = 275 \text{ ml}$

Volumen de Riego = $275 \text{ ml} + (30/100 \times \text{Volumen de Riego})$

Volumen de Riego = $275/0,7 = 393 \text{ ml}$

Volumen de riego = $393 \text{ ml} / 2 \text{ goteros} = 197 \text{ ml/gotero}$

Como los goteros son de 2 L/h o 33 ml/min, el tiempo de riego es igual a:
 $197 \text{ ml/got} / 33 \text{ ml/min} = 6 \text{ minutos}$.

Como la planta consume 850 ml/día, entonces se debe regar en 3 oportunidades durante el día (850 ml/275 ml) considerando 6 minutos en cada riego.



Figura 7.4. Control del volumen aplicado de agua de riego y aguas de drenaje en arándanos desarrollados en macetas con sustrato de fibra de coco.

Riego localizado: Programación y manejo⁽¹⁾



1. ANTECEDENTES GENERALES

Para la producción de un kilogramo de materia vegetal seca, la planta debe absorber mediante su sistema radical entre 200 a 800 litros de agua. El 98 a 99% del agua que absorbe la planta se pierde en el proceso transpirativo, mayoritariamente a través de los estomas, que es también la vía por donde ingresa el CO₂ a la planta. Cuando ocurre el cierre estomático no solo disminuye el traspaso de agua a la atmósfera, sino que se produce una disminución en la tasa de fotosíntesis y la consecuente caída en producción y, posiblemente, calidad.

Las necesidades de la agricultura moderna requieren de una planificación adecuada en términos de cantidad, oportunidad y calidad. Para evaluar las necesidades de riego, hay que considerar no solo el agua perdida por evapotranspiración - es decir, el agua transpirada por las plantas más el agua evaporada directamente desde el suelo -, sino que la eficiencia con la que el agua aplicada al suelo es utilizada por la planta.

El volumen de agua de riego a aplicar viene dado, fundamentalmente, por la capacidad de retención de agua útil o aprovechable del suelo/sustrato. Tiempos o volúmenes de riego superiores a esta capacidad implican un drenaje excesivo, lavado de nutrientes y, en ocasiones, un riesgo de asfixia radical.

La oportunidad del riego considera el evitar un agotamiento o disminución excesiva del agua aprovechable para la planta en el suelo, lo que puede gatillar los mecanismos de respuesta de la planta al estrés hídrico, y se expresa en el concepto de frecuencia de riego, que puede ser fijo o variable. Para un buen manejo del agua, la frecuencia de riego fija implica necesariamente tiempos de riego variables, lo que modifica la dosis de agua a aplicar, especialmente en períodos climáticos cambiantes día a día o con cultivos en activa etapa de aumento de área foliar. A pesar de ser la frecuencia de riego fija una práctica común en la administración de los predios, no necesariamente optimiza el manejo del agua, por ser complejo a nivel de campo el variar los tiempos de riego para períodos menores a una semana, especialmente por el uso del fertirriego. En la práctica, por facilidad operativa, la cantidad de agua de riego a aplicar para un cultivo que ya alcanzó pleno crecimiento y máxima cobertura vegetal debería mantenerse constante, si las condiciones climáticas se mantienen relativamente estables.

Por otra parte, la frecuencia de riego variable considera el reponer cantidades de agua fijas cada vez que se riega. De esta forma, el agua penetra en el suelo siempre hasta la misma profundidad, idealmente donde se desarrolla la mayor parte del sistema radical. Si a esto

⁽¹⁾Autor: Jorge Jara R. Departamento de Recursos Hídricos, Facultad de Ingeniería Agrícola. Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería (CRHIAM), Universidad de Concepción.

se suma la facilidad de implementar y manejar el fertirriego, las ventajas de la frecuencia de riego variable y tiempos de riego constantes lo hacen altamente recomendable. Por lo tanto, para optimizar y facilitar el manejo hídrico, la dosis de riego podría considerarse un parámetro constante y la frecuencia de riego debería ser variable. En todo caso, ambos criterios de manejo de la frecuencia de riego requieren disponer de una buena aproximación de la evapotranspiración diaria del cultivo.

Un sistema de riego bien dimensionado, operado y mantenido, proporciona una gran uniformidad y eficiencia en la aplicación del agua. En consecuencia, con el propósito de mantener esa alta eficiencia en el uso del agua por el cultivo, se debe diseñar un cronograma de riego basado en datos científicos y no en criterios subjetivos. Por lo tanto, los dos principales parámetros a considerar para hacer un riego/fertirriego adecuado y seguro corresponden a: i) determinar la necesidad de agua del cultivo y, ii) definir el tipo de frecuencia de riego a emplear que mejor se acomode a la administración del cultivo.

2. SISTEMA RADICAL DE LAS PLANTAS

Las plantas absorben agua y nutrientes mediante su sistema radical, que explora el suelo adyacente y permite obtener los nutrientes que necesita para su desarrollo y crecimiento. Las raíces finas están directamente involucradas en la absorción de agua. Sin embargo, su capacidad de absorción o permeabilidad al agua disminuye rápidamente en cuestión de días, por lo que es necesario procurar un ambiente que permita la generación continua de raíces nuevas. Dado que las raíces son sensibles a condiciones adversas, resulta necesario manejar el suelo para que proporcione las condiciones adecuadas que favorezcan el desarrollo de nuevas raíces. Para ello se debe considerar aspectos físicos, químicos y biológicos, tales como la profundidad y textura del suelo, grado de compactación, presencia de un nivel freático o estratas impermeables, disponibilidad de oxígeno en la zona de raíces, actividad biológica, humedad disponible, temperatura, salinidad, pH y otros.

Considerando que el nivel de actividad metabólica de las raíces cambia con el estado de desarrollo y edad de la planta, es necesario conocer cuando y como crecen las raíces, y su distribución en el perfil de suelo en la zona humedecida por el riego. Las diferencias entre especies anuales y frutales deben ser consideradas en este análisis. En cultivos anuales, la profundidad de exploración radical cambia rápidamente en el tiempo desde emergencia a cobertura vegetal completa (tiempo equivalente aproximadamente a un 50% - 60 % del total de desarrollo fenológico), en donde se alcanza un 80 a 90% del total de profundidad radical efectiva (Figura 8.1). Un criterio similar es posible aplicar para frutales antes de que alcancen un desarrollo completo en plena producción, por lo que la escala de tiempo correspondería a años. Una adecuada programación del riego requiere, para cada etapa de desarrollo del cultivo o edad del frutal, conocer la profundidad efectiva de las raíces, su distribución en el perfil de suelo y, en el caso de riego localizado, la fracción de volumen de suelo susceptible de ser explorado por las raíces y que se corresponde con el volumen de suelo que es efectivamente humedecido por los emisores de agua.

Las plantas tienen diferentes sensibilidades al estrés hídrico, lo cual se conoce como criterio de riego (CR), cuyo valor mientras más cercano sea a la unidad (1,0) indica una tolerancia relativa mayor a la disminución de agua en el suelo. Estos valores constituyen una guía

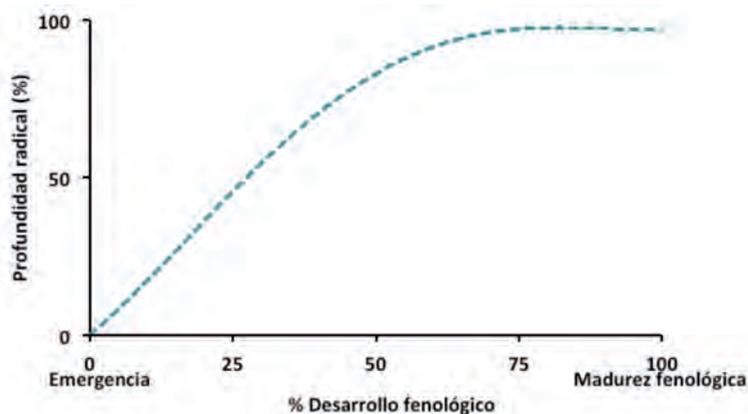


Figura 8.1. Evolución de la profundidad de raíces en cultivos anuales según desarrollo fenológico.

indicativa, ya que existen variaciones debido al mejoramiento genético u otras condiciones particulares, tales como la ocurrencia de un periodo fenológico determinado, en donde un activo crecimiento y/o división celular aumenta el grado específico de sensibilidad al déficit hídrico de dicha especie vegetal. En general, en riego localizado el criterio de riego más aceptado para tomar la decisión de regar es un CR de 0,3 a 0,4. Es decir, cuando se haya agotado el 30 a 40% de la humedad aprovechable del suelo.

En general, la densidad de raíces de frutales es menor que la de cultivos anuales. La proliferación de raíces en las estratas superficiales de suelo es común, tanto para cultivos anuales como para muchas especies frutales, siempre que dicho suelo no tenga limitaciones de humedad. La forma que adopta el sistema radical, en condiciones normales no restrictivas de suelo, guarda cierta relación con la estructura aérea. Sin embargo, se debe tener presente que, por lo general, las raíces solo crecen de buena manera en un suelo con grados adecuados de humedad, existiendo crecimientos compensatorios en ambientes más favorables como el que ocurre bajo los emisores, en la zona del bulbo húmedo de un huerto regado por goteo, cinta o microjet. Así, una raíz que se encuentre en una zona abundante en elementos nutritivos y adecuadas condiciones de humedad y aireación, se ramificará de manera activa aumentando su densidad radical en dicha zona. Los sistemas radicales de los frutales tienen diferentes grados de adaptabilidad a los excesos de humedad del suelo, siendo el pecano uno de los más tolerantes a la anaerobiosis, seguido de membrillo, peral, manzano y cítricos. Por otra parte, el ciruelo, cerezo, damasco, duraznero, palto, almendro y olivo, son muy sensibles al exceso de humedad, especialmente durante el crecimiento activo de las raíces (salida de invierno-comienzos de primavera), siendo estos últimos cuatro frutales extremadamente sensibles a problemas de mal drenaje de los suelos. Además, bajo condiciones de déficit de humedad del suelo, las raíces de los frutales tienden a detener su crecimiento y a suberizar los extremos, no recuperando de manera expedita su capacidad de absorber agua cuando el suelo vuelve a humedecerse.

Algunas especies como el kiwi, tienen raíces que se desarrollan generalmente en las estratas más superficiales de suelo, alcanzando los 40 a 60 cm de profundidad en terrenos bien drenados, y lateralmente hasta 2,4 m desde el tronco. Sin embargo, dadas las altas necesidades de oxígeno de estas raíces, en terrenos arcillosos y/o mal drenados las raíces tienden a desarrollarse sólo en la superficie, siendo posible observarlas a simple vista.

Otras especies como la vid, tienen un sistema radical que alcanza una gran extensión en superficie y en profundidad, pudiendo explorar un gran volumen de suelo. Las raíces superficiales que se desarrollan entre los 10 y 30 cm de profundidad están muy ramificadas, pudiendo alcanzar longitudes laterales mayores a los 3 m, mientras que la raíz pivotante principal puede alcanzar profundidades de hasta 6 m, con escasas ramificaciones.

El efecto del tipo de patrón de injerto utilizado en la exploración del suelo debe ser analizado cuidadosamente, por lo que se recomienda confeccionar calicatas para una adecuada determinación del esquema de distribución radical. Además de las características del suelo, se debe tener en cuenta que la disposición de las raíces en los frutales es afectada por la frecuencia de riego y tiempo de aplicación del agua, por la pauta de suministro del agua en el patrón de humedecimiento del suelo (método de riego y/o número de emisores), por el uso de riego deficitario controlado (se concentran los déficits en periodos fenológicos de la planta menos sensibles al estrés hídrico) o riego deficitario sostenido (se aplica permanente una fracción constante de la evapotranspiración del cultivo a través de todo el desarrollo de la planta). Las raíces no exploran aquellas estratas de suelo que permanecen saturadas - el crecimiento radical requiere de condiciones de aireación -, así como tampoco exploran un volumen de suelo que no es regado y mantiene bajos contenidos de humedad. Finalmente, se debe considerar el grado de compactación que puede tener el suelo – habida consideración del tráfico de personas y maquinaria- y que puede restringir considerablemente la profundidad de exploración de las raíces.

3. NECESIDAD DE AGUA DE LOS CULTIVOS

La cantidad de agua removida desde el suelo en presencia de vegetación se denomina evapotranspiración. Esta agua debe reponerse periódicamente al suelo para no dañar el potencial productivo de la planta. Diversas metodologías se han propuesto para su determinación, debiendo considerarse que la evapotranspiración depende, entre otros aspectos, de las condiciones climáticas, tipo y estado de desarrollo del cultivo, y de la disponibilidad de agua del suelo.

Existen varias aproximaciones para determinar los requerimientos de riego de huertos frutales, hortalizas, u otros cultivos regados por goteo o cinta. La siguiente relación es comúnmente utilizada, para predecir la evapotranspiración diaria del cultivo:

$$ETc = ET_o Kc \quad \text{Ec. 1}$$

donde:

ETc = Evapotranspiración del cultivo (mm/día).

ET_o = Evapotranspiración de referencia (mm/día).

Kc = Coeficiente de cultivo, adimensional, que varía con el cultivo y su desarrollo vegetativo.

La evapotranspiración de referencia ha sido estimada para diversas localidades del país. En el Cuadro 8.1 se entrega la ET_o promedio diaria en el mes para algunas localidades, valores que son promedios de varias temporadas y deben, por lo tanto, ser utilizadas en ese contexto. Así, en condiciones de manejo y programación del día a día, para un periodo determinado del mes que está presentando condiciones meteorológicas de mayor (o menor) radiación y/o temperatura o velocidad de viento que lo habitual, por ejemplo, aumentos (o disminuciones) de un 10 a 15% del valor promedio deberían considerarse en la toma de decisiones.

Cuadro 8.1. Evapotranspiración de referencia diaria promedio para cada mes (mm día⁻¹) y anual (mm año⁻¹) para diversas localidades de Chile⁽¹⁾.

Localidad	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Arica	5,0	4,7	4,0	3,3	2,6	2,3	2,2	2,5	3,1	3,8	4,5	4,9	1301
Camarones	5,9	5,6	5,2	4,5	4,1	3,8	3,8	4,1	4,6	5,2	5,6	5,9	1771
Pica	7,2	6,9	6,3	5,7	5,1	4,7	4,9	5,1	5,6	6,2	6,9	7,1	2178
Copiapó	6,3	5,8	5,1	4,1	3,4	2,9	2,9	3,3	4,0	4,9	5,7	6,2	1660
Tierra Amarilla	6,8	6,3	5,5	4,4	3,7	3,2	3,2	3,7	4,3	5,3	6,1	6,7	1794
Huasco	4,8	4,4	3,7	2,9	2,2	1,8	1,8	2,1	2,7	3,5	4,2	4,7	1176
Vallenar	6,0	5,5	4,7	3,7	2,9	2,4	2,4	2,8	3,6	4,5	5,4	5,9	1510
La Serena	4,6	4,2	3,5	2,7	2,1	1,7	1,7	2,0	2,6	3,4	4,1	4,6	1128
Vicuña	7,9	7,2	5,6	4,0	2,7	2,0	2,2	3,0	4,2	5,6	6,9	8,0	1800
Monte Patria	6,7	6,1	5,0	3,9	2,8	2,4	2,3	2,7	3,6	4,7	5,9	6,6	1600
Ovalle	6,1	5,6	4,6	3,5	2,7	2,2	2,0	2,5	3,3	4,3	5,3	6,0	1465
Illapel	5,8	5,3	4,4	3,5	2,5	2,2	2,1	2,4	3,2	4,2	5,1	5,7	1408
San Felipe	6,1	5,3	4,4	3,3	2,3	1,8	1,7	2,1	3,0	4,1	5,2	5,9	1378
Los Andes	6,1	5,6	4,5	3,3	2,3	1,8	1,7	2,1	3,0	4,1	5,2	6,0	1385
Casablanca	4,9	4,4	3,6	2,6	1,8	1,4	1,4	1,8	2,5	3,4	4,2	4,8	1121
Quillota	4,9	4,5	3,6	2,7	1,9	1,5	1,4	1,8	2,5	3,4	4,2	4,8	1129
Melipilla	5,5	5,0	4,0	2,9	2,1	1,6	1,5	1,9	2,7	3,7	4,7	5,4	1246
Pirque	6,1	5,5	4,4	3,1	2,2	1,6	1,6	2,0	2,8	4,0	5,1	5,9	1342
Buin	5,8	5,2	4,2	3,0	2,1	1,6	1,5	1,9	2,8	3,8	4,9	5,7	1294
Rancagua	5,9	5,4	4,3	3,1	2,2	1,7	1,6	2,0	2,8	3,9	5,0	5,8	1322
Peumo	6,0	5,4	4,3	3,1	2,2	1,7	1,6	2,0	2,8	3,9	5,0	5,8	1328
San Fernando	6,1	5,5	4,4	3,1	2,1	1,6	1,5	1,9	2,7	3,9	5,1	5,9	1335
Santa Cruz	6,0	5,4	4,3	3,1	2,1	1,7	1,5	1,9	2,7	3,9	5,0	5,8	1322
Curicó	5,9	5,3	4,2	3,0	2,0	1,5	1,4	1,8	2,6	3,8	4,9	5,8	1283
San Clemente	6,2	5,6	4,4	3,1	2,1	1,5	1,4	1,8	2,6	3,8	5,1	6,0	1326
Cauquenes	5,7	5,1	4,0	2,9	1,9	1,4	1,4	1,7	2,5	3,5	4,7	5,5	1219
Parral	6,2	5,5	4,3	3,1	2,0	1,5	1,4	1,8	2,6	3,8	5,0	5,9	1313
San Carlos	6,1	5,4	4,2	2,9	1,9	1,4	1,3	1,7	2,5	3,7	5,0	5,9	1277
Chillán	6,0	5,4	4,2	2,9	1,9	1,4	1,4	1,7	2,6	3,7	5,0	5,8	1271
Los Ángeles	5,4	4,8	3,8	2,6	1,7	1,3	1,2	1,5	2,3	3,3	4,4	5,2	1139
Nacimiento	5,4	4,8	3,7	2,6	1,6	1,2	1,1	1,5	2,3	3,3	4,4	5,2	1127
Angol	5,1	4,6	3,6	2,5	1,6	1,1	1,1	1,4	2,2	3,2	4,2	5,0	1077
Mulchén	5,2	4,6	3,5	2,4	1,5	1,1	1,1	1,4	2,1	3,1	4,2	5,0	1069
Victoria	4,8	4,3	3,4	2,3	1,5	1,1	1,1	1,4	2,0	3,0	4,0	4,7	1018
Temuco	4,7	4,2	3,3	2,2	1,4	1,0	1,0	1,3	2,0	2,9	3,9	4,6	981
Villarrica	4,4	4,0	3,1	2,2	1,5	1,2	1,2	1,5	1,9	2,8	3,7	4,3	966
Osorno	4,0	3,6	2,8	1,9	1,2	0,9	0,9	1,2	1,7	2,6	3,4	3,9	855
Frutillar	3,8	3,5	2,7	1,9	1,2	1,0	0,9	1,2	1,7	2,4	3,2	3,7	825
Puerto Montt	3,8	3,4	2,6	1,9	1,2	0,9	0,9	1,1	1,6	2,4	3,1	3,7	809

⁽¹⁾ Valores derivados del Sistema Nacional de Referencia Demandas de Agua por la Agricultura. AGRIMED. Corfo-U. de Chile-CNR. 2016. http://repositoriodigital.corfo.cl/bitstream/handle/11373/9473/Informe_final_4.pdf?sequence=4
https://esiir.cnr.gob.cl/tmp/obj_257728/2613_sistema_referencia_demandas_de_agua_agricultura_chile_Evapotranspiracion.pdf

Una segunda alternativa de estimación diaria de ET_o es utilizar el modelo de Hargreaves y Samani (H-S), que permite predicciones confiables a partir de datos de temperatura del aire y latitud del lugar (Samani, 2000):

$$ET_o = \beta \times R_s (T_p + 17,8) \quad \text{Ec. 2}$$

donde ET_o se expresa en mm/día, β es un coeficiente empírico de ajuste, R_s es la radiación solar al tope del cultivo, expresada en mm/día de evaporación y T_p es la temperatura promedio del día ($^{\circ}\text{C}$). En caso de no disponer de datos diarios de radiación solar, los autores sugieren la siguiente expresión:

$$R_s = \alpha R_A \sqrt{TD} \quad \text{Ec. 3}$$

siendo R_A la radiación extraterrestre al tope de la atmósfera, conocida como radiación de Angot, y expresa el potencial evaporativo de la radiación solar en mm día^{-1} de evaporación (Cuadro 8.2), TD es la diferencia entre la temperatura máxima y mínima del día ($^{\circ}\text{C}$) y α es un coeficiente empírico del ajuste.

Tanto α como β debieran calibrarse localmente. Si no se dispone de datos para una localidad específica, los autores sugieren asumir $\alpha = 0,15$ y $\beta = 0,0135$.

Además de la simplicidad de su uso, una de las grandes ventajas del modelo de H-S es la posibilidad de hacer proyecciones futuras de ET_o si se dispone de datos confiables de temperaturas máximas y mínimas del aire de los días venideros. Los actuales pronósticos meteorológicos permiten predecir temperaturas diarias de 5 a 7 días, con un margen de error mínimo. Considerando que la base física de este modelo permite estimar con buena aproximación la radiación solar a nivel de cultivo (Ec. 3) - a partir de datos de temperatura máxima y mínima diaria del aire - y dado que, finalmente, el gran responsable y motor que impulsa la evapotranspiración es la radiación solar, una buena determinación de esta variable incide en la calidad de la información de ET_o obtenida.

Cuadro 8.2. Potencial evaporativo de la radiación solar diaria recibida en una superficie horizontal al tope de la atmósfera, R_A (Jensen et al., 1990).

Latitud	R_A (mm d ⁻¹)							
	Marzo 21	Abril 13	Mayo 6	Mayo 29	Junio 22	Julio 15	Agosto 8	Agosto 31
70°N	5,3	9,1	12,9	16,0	17,5	16,1	12,8	9,0
60	7,7	11,0	14,0	16,1	16,9	16,0	13,8	10,9
50	9,9	12,6	15,0	16,5	17,1	16,5	14,8	12,5
40	11,8	13,9	15,7	16,8	17,1	16,7	15,5	13,8
30	13,4	14,9	16,0	16,7	16,8	16,6	15,9	14,8
20	14,5	15,4	15,9	16,1	16,1	16,0	15,8	15,3
10	15,2	15,5	15,4	15,2	15,1	15,1	15,3	15,3
0	15,4	15,1	14,4	13,9	13,6	13,8	14,3	14,9
-10°S	15,2	14,2	13,1	12,2	11,9	12,1	13,0	14,0
-20	14,5	12,9	11,4	10,2	9,8	10,2	11,3	12,8
-30	13,4	11,3	9,4	8,0	7,5	8,0	9,3	11,1
-40	11,8	9,3	7,1	5,7	5,1	5,7	7,1	9,2
-50	9,9	7,0	4,8	3,3	2,8	3,3	4,7	7,0
-60	7,7	4,6	2,4	1,2	0,8	1,2	2,4	4,6
-70	5,3	2,2	0,4	-	-	-	0,4	2,2

Latitud	Septiembre 23	Octubre 16	Noviembre 8	Noviembre 30	Diciembre 22	Enero 13	Febrero 4	Febrero 26
70°N	5,2	2,2	0,4	-	-	-	0,4	2,3
60	7,6	4,7	2,5	1,2	0,8	1,3	2,5	4,8
50	9,8	7,1	4,9	3,5	3,0	3,5	5,0	7,2
40	11,7	9,4	7,4	6,0	5,5	6,0	7,5	9,5
30	13,2	11,4	9,7	8,5	8,0	8,5	9,8	11,6
20	14,3	13,1	11,8	10,8	10,4	10,9	11,9	13,3
10	15,0	14,4	13,6	12,9	12,6	13,0	13,7	14,6
0	15,3	15,3	15,0	14,7	14,5	14,8	15,2	15,5
-10°S	15,0	15,3	16,0	16,1	16,1	16,2	16,2	15,9
-20	14,3	15,7	16,5	17,0	17,2	17,1	16,7	15,8
-30	13,2	15,1	16,6	17,6	18,0	17,7	16,8	15,3
-40	11,7	14,1	16,3	17,7	18,3	17,8	16,4	14,3
-50	9,8	12,8	15,5	17,5	18,2	17,6	15,7	13,0
-60	7,6	11,1	14,5	17,0	18,0	17,1	14,6	11,3
-70	5,2	9,2	13,4	17,1	18,7	17,2	13,5	9,3

Para el caso específico de estimación de ET_c en frutales, resulta conveniente introducir un factor que considere la cobertura vegetal o área foliar, ya que ésta puede variar fuertemente durante los primeros 3 a 5 años desde plantación. Así, la expresión recomendada corresponde a:

$$ETc = ETo \times Kc \times Fc \quad \text{Ec. 4}$$

siendo

$$Fc = F_1 \times Pc + F_2 \quad \text{Ec. 5}$$

y

$$Pc = \frac{\pi \times Ds^2}{4 \times Eeh \times Esh} \quad \text{Ec. 6}$$

donde Fc es la estimación de un factor de cobertura del cultivo adimensional ($0 < Fc < 1$) asociado con Pc , que corresponde a la fracción de sombreado del árbol al medio día solar ($0,1 < Pc < 0,7$), y F_1 y F_2 son factores de cobertura asociados al cultivo (Cuadro 8.3); Ds es el diámetro de sombra de la vegetación al mediodía (m) determinada a partir de mediciones de la proyección de la sombra de la planta en el suelo, y puede requerir varias mediciones para obtener un valor promedio representativo de la plantación en un momento dado (Figura 8.2); Eeh y Esh corresponde a la distancia de plantas entre hileras (m) y sobre la hilera (m), respectivamente.

Cuadro 8.3. Factores de cobertura F_1 y F_2 asociados a frutales y periodo fenológico (Jara, 2010).

Frutal	Período fenológico	F_1	F_2
Arándanos	Total	1,28	0,11
Manzanos	Total	1,54	0,11
Naranjos	Total	0,77	0,11
Paltos	Total	1,30	0,11
Parronales	Total	1,30	0,11
Vides	Hasta pinta	1.02	0,11
Vides	Después de pinta	0,60	0,11

Pc representa el efecto de la proyección de la sombra de la cubierta vegetal en el suelo en relación al espacio que ocupa el árbol, y puede ser necesario realizar varias mediciones a lo largo de la temporada. La hora de medición en nuestro país va desde las 12:00 a las 15:00 horas desde octubre a marzo. De este modo, el factor de cobertura (Fc) representa el grado de intercepción de la radiación solar por parte de las hojas, mientras que el coeficiente de cultivo, Kc , da cuenta del estado de desarrollo fenológico del árbol durante la temporada de riego o estación de crecimiento del fruto. Así, valores de Pc iguales o superiores a 0,7 (Ec. 6) implican que el valor de Fc en la Ec. 5 es igual a 1, lo cual indicaría una cobertura vegetal equivalente a un 100% ($Fc = 1$). Del mismo modo, cuando el valor de Pc sea inferior a 0,1, y con el propósito de considerar el efecto de micro advección producido en el entorno de la planta, se recomienda de todos modos utilizar $Pc = 0,1$.



Figura 8.2. Esquema representativo de la medición de diámetro de sombra (D_s) producida por la vegetación en el suelo al medio día.

Una manera simplificada de obtener FC sería observar el porcentaje de cobertura o cubrimiento del suelo por parte de la vegetación. Esto se puede realizar mediante una vista aérea, tratando de visualizar la fracción de suelo y fracción de vegetación de la plantación, siendo la sumatoria de ambas igual a la unidad. Así, si se observa un 40% de suelo y un 60% de vegetación, entonces $FC \approx 0,6$. Para valores de cobertura vegetal mayor al 80%, o índice de área foliar superior a 3, entonces FC se puede aproximar a valores de 0,9 a 1,0. Para frutales no mencionados en la Cuadro 8.3, FC podría obtenerse asociando F_1 a algunas de las especies indicadas, ya sea por características de manejo, crecimiento vegetativo, poda, conducción o tipo de vegetación. En el caso de los parronales (posiblemente también válido para kiwis), el valor de Pc debe obtenerse de modo distinto al planteado en la Ec. 6. Para parronales adultos (a partir del cuarto año), Pc se aproxima a 0,7, mientras que para plantaciones jóvenes, debería escogerse un valor Pc igual a 0,1 o superior, dependiendo del vigor y edad de la planta. Así, en función de la edad del parronal, es posible sugerir para el primer año un valor de $Pc \approx 0,1$, el segundo año $Pc \approx 0,2$ y el tercer año $Pc \approx 0,4$, considerando el número de yemas que posee la planta al comienzo de brotación y su incidencia posterior en el área foliar del parronal.

Los valores de Kc que se muestran en la Cuadro 8.4 son una recopilación de diferentes fuentes bibliográficas. En general, dichos valores han sido obtenidos para condiciones de no restricción de humedad en el suelo y para cultivos sin problemas nutricionales o fitosanitarios. El rango de valores de Kc es efecto de la variabilidad inherente a cada especie y a la metodología de obtención por parte de los autores. Adicionalmente, se debe considerar el porcentaje de suelo superficial que permanece humedecido por el riego, lo que incide en la pérdida de agua hacia la atmósfera (evaporación) y puede afectar de manera significativa el valor de Kc , sobre todo al inicio de la temporada de crecimiento. Así, un cultivo a inicios de emergencia y que en sus primeros estados de desarrollo, con un índice de área foliar inferior a 1 ($IAF < 1,0$) y regado frecuentemente (una a dos veces a la semana) por aspersión, el valor de Kc será más cercano a 1,0. Lo anterior se explica por el hecho de que mientras los primeros 10 cm de suelo permanezcan con un contenido de humedad sobre Punto de Marchitez Permanente, no hay restricciones para que la tasa de pérdida de agua del suelo sea máxima. Del mismo modo, si el método de riego es localizado, en donde sólo se humedece un porcentaje menor de la superficie de suelo, entonces el valor de Kc se aproxima al mostrado en la Cuadro 8.4. Mayor información de valores de Kc se puede consultar en la publicación de FAO 56 (Allen et al., 1998).

Cuadro 8.4. Coeficientes de cultivo *Kc* para diversas especies vegetales y diferentes estados de desarrollo.

Cultivo	Porcentaje de la estación de crecimiento									
	0	20%	20	40%	40	60%	60	80%	80	100%
	Establecimiento /inicio		Rápido crecimiento		Media estación		Inicio madurez		Madurez fisiológica	
Papas	0,40 - 0,50		0,70 - 0,80		1,00 - 1,20		0,95 - 1,00		0,65 - 0,75	
Vid	0,30 - 0,50		0,60 - 0,80		0,80 - 0,90		0,60 - 0,80		0,50 - 0,70	
Frutales hoja caduca	0,40 - 0,50		0,75 - 0,85		1,10 - 1,20		1,10 - 1,20		0,70 - 0,90	
Cítricos y paltos	0,60 - 0,70		0,60 - 0,70		0,80 - 0,90		0,80 - 0,90		0,60 - 0,70	
Frutales con cubierta verde	1,00		1,00		1,00		1,00		1,00	
Tomates	0,30 - 0,40		0,60 - 0,80		1,10 - 1,25		0,80 - 1,00		0,60 - 0,80	
Sandía	0,40 - 0,50		0,70 - 0,80		0,95 - 1,05		0,80 - 0,95		0,65 - 0,75	
Melón, zapallo	0,40 - 0,50		0,60 - 0,75		0,95 - 1,05		0,70 - 0,80		0,60 - 0,70	
Hortalizas arraigamiento superficial	0,30 - 0,40		0,60 - 0,75		0,90 - 1,10		0,90 - 1,10		0,80 - 0,90	
Arándano	0,30 - 0,60		0,8 - 1,10		1,10 - 1,00		1,00 - 0,90		0,90 - 0,80	

4. CÁLCULO DE FRECUENCIA DE RIEGO

La programación del riego permite determinar cada cuántos días u horas se debe regar y por cuanto tiempo aplicar el agua, de modo de optimizar el uso del agua y fertilizantes para maximizar la producción y calidad. Además de las características de la planta y condiciones ambientales, la frecuencia de riego depende de las propiedades hidráulicas del suelo, método de riego y capacidad de retención de agua del perfil de suelo donde crecen las raíces, mientras que el tiempo de aplicación del riego depende del método de riego empleado y el volumen de agua y caudal a aplicar.

Para calcular la humedad aprovechable de un suelo, en términos de altura de agua, se puede utilizar la siguiente expresión:

$$HA = (CC - PMP) Dap \times Prof \quad \text{Ec. 7}$$

donde:

HA = Altura de agua aprovechable para el cultivo (mm). Un milímetro de altura corresponde a un litro de agua por metro cuadrado de terreno.

CC = Contenido de humedad de suelo, expresado en base peso seco (g agua/g suelo seco), a una energía de retención que oscila entre 1/10 a 1/3 de bar (10 a 33 J/kg) Indica el límite superior o máximo de agua útil para la planta que queda retenida en el suelo contra la fuerza de gravedad. Se conoce como Capacidad de Campo.

PMP = Contenido de humedad del suelo, expresado en base peso seco (g agua/g suelo seco), a una energía de retención que oscila entre 10 y 15 bar (1000 a 1500 J/kg). Indica el límite inferior o mínimo de agua útil para la planta. Se conoce como Punto de Marchitez Permanente.

Dap = Densidad aparente del suelo (g/cm³).

Prof = Profundidad o espesor representativo de la muestra de suelo analizada (mm).

Se debe tener en cuenta que los suelos rara vez son homogéneos en profundidad, por lo que será necesario determinar los valores de contenido de humedad a Capacidad de Campo (*CC*) y Punto de Marchitez Permanente (*PMP*) para las diferentes estratas de suelo en donde crezcan las raíces. Así, para un suelo tomado como ejemplo, plantado con manzanos regados con 2 goteros de 4 L/h por árbol y distanciamiento entre y sobre hilera de 4,0 por 1,5 m, se determinaron las siguientes propiedades hídricas:

Capacidad de Campo (g/g)	0,233
Punto de Marchitez Permanente (g/g)	0,133
Densidad aparente (g cm ⁻³)	1,20
Profundidad de suelo (mm)	500
* <i>HA</i> en estrata de 50 cm de suelo (mm)	60

* *Humedad aprovechable expresada en mm de altura de agua, considerando una profundidad de enraizamiento del árbol de 50 cm.*

El valor total de 60 mm de agua útil aprovechable para la planta indica que, en los 50 cm de profundidad de suelo donde están creciendo las raíces, la planta puede llegar a disponer de 60 litros de agua por metro cuadrado de terreno o, que es lo mismo, de 600 m³/ha. Sin embargo, cuando se utilizan técnicas de microirrigación o riego localizado, se debe tener en consideración que el sistema radical de los cultivos estará restringido al bulbo de humedecimiento. El volumen humedecido de suelo (*Vs*) es dependiente de la descarga del emisor, textura del suelo y distancia entre y sobre hilera de los emisores. En este caso particular del ejemplo anterior, si se humedece el 40% del volumen total del suelo en cada riego (*Vs* = 0.4), significa que la planta dispone efectivamente de solo 240 m³/ha (que corresponde a 600 m³/ha · 0,40 = 240 m³/ha), equivalente a 24 mm de altura de agua.

Otro aspecto que debe considerarse, consiste en determinar un criterio de riego (*CR*) el cual señala el porcentaje tolerable de disminución del agua aprovechable del suelo para la planta (*HA*). En general, en microirrigación se sugiere un valor entre treinta a cincuenta por ciento (*CR* = 0,3 a 0,5) asignándose valores de *CR* del treinta por ciento (*CR* = 0,3) para cultivos sensibles a un déficit de agua y valores de *CR* = 0,5 para cultivos que soportan de mejor manera un estrés hídrico.

En relación a la profundidad de raíces de la planta, en cultivos anuales dicha profundidad cambia rápidamente con el tiempo a partir de emergencia a pleno desarrollo. Por lo tanto, una adecuada programación del riego requiere el conocimiento de la profundidad efectiva de raíces en cada período de tiempo analizado. Así, este valor determinará la profundidad del suelo desde donde se extrae agua. En otras palabras, si el suelo tiene 1,80 m de profundidad, pero el cultivo está en una etapa temprana de desarrollo (30 cm de profundidad de raíces, por ejemplo), el valor a considerar debe ser de 30 cm. Un criterio similar de determinación de profundidad de raíces debe mantenerse para frutales, antes de que alcancen un desarrollo completo de plena producción.

Cuando se considera el suelo como un reservorio de agua, la programación del riego debe tener en cuenta tanto aspectos del suelo como de la planta y el ambiente. Así, si se registra una *ETo* de 4,0 mm/día, y se riegan manzanos de 4 años, en un marco de plantación de

4,0 · 1,5 m, con un diámetro de sombreado D_s de 2,02 m, implicaría un valor de P_c (Ec. 6) de 0,534. Entonces, considerando el factor de cobertura FC con $F_1 = 1,54$ y $F_2 = 0,11$ (Cuadro 8.3) y un coeficiente de cultivo de $K_c = 0,8$ (Cuadro 8.4), se obtiene desde Ec. 4 y 5:

$$\begin{aligned} ETc &= 4,0 \times 0,8 (1,54 \times 0,534 + 0,11) \\ ETc &= 3,0 \text{ mm/día} \end{aligned}$$

La frecuencia de riego (FR) o cada cuantos días debiera regarse nuevamente para optimizar el rendimiento del cultivo, se determinará por la relación entre el agua efectivamente útil para la planta ($HA \cdot VS \cdot CR$) y la evapotranspiración del cultivo:

$$FR = \frac{HA \times VS \times CR}{ETc} \quad \text{Ec. 8}$$

donde:

HA = Altura de agua aprovechable para el cultivo (mm), Ec.7.

VS = Fracción del volumen de suelo a humedecer por el riego ($0 < VS < 1$).

CR = Criterio de riego (0 a 1).

ETc = Evapotranspiración del cultivo (mm/día), Ec. 1 o Ec.4.

El valor de VS cobra especial significancia en la programación del riego localizado. El tamaño del bulbo de humedecimiento está condicionado por las características físicas del suelo, siendo el movimiento lateral mayor en suelos de textura fina y menor lateralmente - pero más profundo - en suelos arenosos. Si se desea incrementar VS debe aumentarse el número de goteros por árbol, por ejemplo, o bien cambiar de goteo a microjet si el número de laterales a implementar resulta excesivo. En algunas especies, como vid vinífera, se recomienda un valor de VS de 0,30 a 0,35; sin embargo, para un gran número de frutales valores VS de 0,4 a 0,6 serían adecuados para permitir un buen desarrollo de las raíces. Así, del ejemplo anterior, con $HA = 60$ mm, en donde se mojará el 40 % del volumen de suelo ($VS = 0,40$), con un $CR = 0,5$ y $ETc = 3,0$ mm día⁻¹, la frecuencia de riego sería (Ec. 8):

$$FR = \frac{60\text{mm} \times 0,40 \times 0,5}{3,0 \text{ mm/día}} = 4 \text{ días}$$

El resultado anterior indica que, con dicha capacidad efectiva de almacenamiento de agua en el suelo y sensibilidad a la sequía de la planta, sólo se dispone de 12,0 mm, y considerando la demanda evapotranspirativa de 3,0 mm/día, la plantación debiera regarse cada cuatro días para que no se produzcan problemas de disponibilidad de agua para el árbol, ya que los 12,0 mm de altura de agua equivalen a la evapotranspiración de cuatro días. Por otra parte, si la ETc se aproximara a los 6 mm/día, entonces lo recomendable sería regar cada dos días. Con este criterio de manejo, las frecuencias de riego cambian en la temporada porque la ETc diaria cambia, pero cuando se riegue se repondrá siempre la misma cantidad de agua. Es decir, cuando la ETc acumulada de dos o más días iguale la capacidad de almacenamiento de agua efectivamente útil para la planta, entonces se regará siempre con el mismo tiempo de aplicación.

Cuando se decide utilizar una frecuencia de riego fija, entonces los tiempos de aplicación debieran ser esencialmente variables, ya que dependerán de la ET_c en el periodo entre riegos. Sin embargo, es necesario verificar que la disponibilidad efectiva de agua en el suelo para la planta ($HA \times VS \times CR$) sea suficiente para cubrir el consumo de la planta en el intervalo de riego elegido; es decir que: $HA \times VS \times CR < \sum ET_c$

Una de las ventajas de la microirrigación es que se puede programar el riego desde uno de alta frecuencia (varias aplicaciones en el día) hasta frecuencias diarias, o día por medio o cada dos días, etc. Consideraciones de aireación de las raíces y de almacenamiento de agua del suelo son determinantes en esta decisión. Así, por ejemplo, un suelo arenoso puede soportar riegos de alta frecuencia, mientras que en suelos arcillosos dicha práctica no es recomendada, optándose por riegos más espaciados en el tiempo.

Cuando se decide regar con frecuencias fijas (todos los días, día por medio, etc.) los tiempos de riego debieran cambiar a través de la temporada, acorde a las variaciones de la evapotranspiración del cultivo. Así, a comienzos de la temporada los tiempos de aplicación pueden ser de unos cuantos minutos, mientras que en plena estación pueden alcanzar valores de varias horas.

Una alternativa de manejo cada vez más popular entre agricultores -y que se puede aplicar a frutales adultos-, consiste en fertilizar cada vez que se riega. Esta alternativa se facilita si se aplican tiempos de riego iguales en toda la temporada, variando la frecuencia de riego. De este modo, si se sabe que el suelo, en la zona del bulbo húmedo, almacena una determinada cantidad o altura de agua útil efectiva para la planta ($HA \times VS \times CR$) entonces bastaría sumar el consumo diario de agua de la planta (evapotranspiración diaria del cultivo, ET_c), y una vez alcanzado dicho valor, proceder a regar. Esta alternativa tiene la ventaja de que cada vez que se riega se aplica el mismo volumen de agua (el mismo tiempo de riego), por lo que la solución nutritiva madre que se utiliza no sufre cambios de concentración, lo que facilita el manejo nutricional de la planta. De este modo, para un periodo determinado es posible y deseable que en cada riego se aplique la misma dosis de fertilizante, lo que permite un mejor aprovechamiento de éste.

Dada la importancia de la determinación de V_s , dos metodologías son frecuentemente utilizadas ya sea en la etapa de diseño o bien en el manejo en terreno. Cuando se diseña es posible hacer una estimación del diámetro de humedecimiento del suelo a partir de la expresión:

$$DH = FH_0 + CH_0 \times q_e \quad \text{Ec. 9}$$

en donde DH es el diámetro de humedecimiento del emisor o gotero (m), FH_0 y CH_0 son constantes dependientes de la textura de suelo (Cuadro 8.5), y q_e es el caudal del gotero (L/h).

Cuadro 8.5. Constantes FH_0 y CH_0 que permiten estimar el diámetro de humedecimiento de un gotero.

Tipo de suelo	FH_0	CH_0
Arenoso	0,3	0,12
Franco	0,7	0,11
Arcilloso	1,2	0,10

Se asume que el área humedecida por cada emisor y multiplicada por el número de emisores que le corresponden a cada planta o árbol representa una fracción del marco de plantación. Así mismo, resulta necesario en la etapa de diseño visualizar el posible efecto de traslape de las áreas de humedecimiento de cada emisor, lo que podría afectar el cálculo. En efecto, goteros espaciados a 0,3 m en el lateral tienen una alta probabilidad de traslape sobre la hilera. Por lo tanto, se debe tener claridad respecto a la disposición de las líneas de riego y distribución de los emisores alrededor de la planta. Esta metodología asume que se riega hasta la profundidad efectiva de raíces y que la fracción de volumen de suelo humedecido (V_s) se puede “aproximar” por la relación de área superficial humedecida de suelo en relación al marco de plantación; es decir:

$$V_s = \frac{\text{Área superficial humedecida por árbol en m}^2}{\text{Marco de plantación}} \quad \text{Ec. 10}$$

La expresión es válida si el riego alcanza a mojar la totalidad de la profundidad efectiva de raíces.

La comprobación del área humedecida en terreno se realiza midiendo directamente el área humedecida con una huincha y relacionándola con el marco de plantación (Figura 8.3). Varias mediciones de DH deben efectuarse para obtener resultados confiables. Ambas metodologías requieren comprobar la profundidad de mojamiento y el patrón de humedecimiento del riego para una mejor aproximación de V_s , por lo que es necesario confeccionar calicatas y examinar directamente la forma del bulbo de humedecimiento y la distribución de raíces.



Figura 8.3. Determinación del diámetro de humedecimiento (DH) de un emisor alrededor de una planta.

5. CÁLCULO DE TIEMPO DE RIEGO

El conocer el volumen de agua a aplicar se relaciona directamente con el tiempo de riego. En general, el riego busca reponer el agua extraída por las raíces y la evaporada directamente desde el suelo. En consecuencia, se debe tener en cuenta los días transcurridos desde el último riego y la evapotranspiración acumulada en el intervalo entre riegos. De este modo, si se utiliza una frecuencia de riego fija lo más probable es que se debiera cambiar el volumen de agua a aplicar y, por tanto, el tiempo de riego variará si cambia la evapotranspiración en el periodo entre riegos. Si se opta por una frecuencia variable, entonces el volumen de agua y el tiempo de riego podrán ser constantes, habida consideración del balance entre la disponibilidad efectiva de agua en el suelo para la planta ($HA \times VS \times CR$) y la sumatoria diaria de la evapotranspiración del cultivo (ETc).

Sabiendo que un mm de altura de agua es equivalente al volumen de un litro por metro cuadrado ($1 \text{ mm} = 1 \text{ L/m}^2$), los valores de evapotranspiración del cultivo, ETc , en mm/día, se transforman en L/planta/día considerando el marco de plantación, lo que corresponde al volumen de agua requerido por árbol y por día, Var , en donde:

$$V_{ar} = ETc \times E_{eh} \times E_{sh} \quad \text{Ec.11}$$

siendo:

V_{ar} = Volumen de agua diario requerido por árbol o planta (L/día/planta).

E_{sh} = Espaciamiento de los árboles o cultivo en la hilera (m).

E_{eh} = Espaciamiento entre hileras (m).

Así, del ejemplo anterior, si la evapotranspiración actual es de 3,0 mm/día en un huerto de manzano (ETc) plantados a 4 por 1,5 m, y mediante la Ec. 11:

$$Var = 3,0 \text{ mm/día} \times 4 \text{ m} \times 1,5 \text{ m}$$

$$Var = 18,0 \text{ L/día/planta}$$

Considerando que los métodos de riego no permiten aplicar el agua con una eficiencia del 100%, el volumen total de riego diario requerido a aplicar por árbol (Vt) será:

$$Vt = \frac{Var}{Ef_a} \quad \text{Ec.12}$$

donde Ef_a es la eficiencia de aplicación del agua de riego ($0 < Ef_a < 1$).

Así, para el ejemplo anterior y asumiendo una eficiencia del 90% ($Ef_a = 0.9$).

$$Vt = \frac{18,0}{0,9} = 20,0 \text{ L/día/planta}$$

Si cada árbol es regado con dos goteros de un caudal de 4 L/h por gotero, entonces será necesario un funcionamiento del equipo de 150 minutos por día (2,5 horas) para suplir los requerimientos hídricos diarios del manzano. Si se regara cada cuatro días ($FR = 4$ días), entonces se requerirán 600 minutos (10,0 horas) para reponer el agua extraída por árbol en esos cuatro días. Así, el tiempo de riego se puede estimar a partir de:

$$TR = \frac{V_t \times FR}{q_e \times N_e} \quad \text{Ec.13}$$

donde:

TR = Tiempo de riego o de aplicación del agua para reponer el déficit (h).

V_t = Volumen total de riego diario de agua de riego a aplicar por árbol (L/h/planta).

FR = Frecuencia de riego, desde Ec. 8, en días, (1 = riego todos los días; 2 = riego día por medio, etc.).

q_e = Caudal de cada emisor o gotero (L/h).

N_e = Número de emisores o goteros por árbol.

Si se elige regar cada dos o tres días ($FR = 2$ o $FR = 3$), V_t debe representar el promedio diario del período de frecuencia de riego seleccionada.

El cálculo de tiempo de riego para frecuencias de riego variable, pero donde se desea reponer siempre el mismo volumen de agua – lo que implica tiempos de riego fijos -, se puede realizar a partir de la expresión:

$$TR = \frac{HA \times VS \times CR}{E_{f_a} \times q_e \times N_e} \times E_{eh} \times E_{sh} \quad \text{Ec. 14}$$

donde cada término y unidad de medida fue definida previamente. Así, para el ejemplo ya seleccionado de dos goteros por árbol de manzano:

$$TR = \frac{60 \text{ mm} \times 0,4 \times 0,5}{0,9 \times 4 \text{ L/h} \times 2 \text{ emisores/planta}} \times 4 \text{ m} \times 1,5 \text{ m} \approx 10 \text{ horas}$$

El uso de la Ec. 14 implica la necesidad de estimar o disponer de la evapotranspiración diaria del cultivo (ET_c), y cuando dicho valor acumulado se aproxime o iguale al valor de la disponibilidad efectiva de agua en el suelo para la planta ($\sum ET_c \approx HA \times VS \times CR$), entonces correspondería regar. A manera de ejemplo con el caso analizado ($HA= 60$ mm, $Vs= 0,4$ y $CR=0,5$), entonces se dispondría efectivamente de 12 mm de agua a extraer por la planta antes de que fuese necesario regar. Así, cuando la sumatoria acumulada de la ET_c diaria se aproxime en $\pm 1,0$ mm, entonces correspondería aplicar un volumen de agua constante correspondiente por un tiempo de riego de 10 horas.

6. CINTAS DE RIEGO

Si el cultivo analizado fuese una hortaliza regada por cinta (Figura 8.4), con un marco de plantación de 0,40 por 0,70 m, un coeficiente de cultivo $Kc = 0,8$ (Cuadro 8.4, hortalizas de arraigamiento superficial), y una ET_0 de 2,1 mm/día (Cuadro 8.1, localidad de San Felipe) para el mes de agosto, entonces de acuerdo a la Ec. 1:

$$ET_c = 2,1 \text{ mm/día} \times 0,8$$

$$ET_c = 1,7 \text{ mm/día}$$

y el volumen de agua requerido (Var) por planta es (Ec.11):

$$Var = 1,7 \frac{\text{mm}}{\text{día}} \times 0,4 \text{ m} \times 0,7 \text{ m} \approx 0,48 \frac{\text{L}}{\text{día/planta}}$$

Considerando una eficiencia de aplicación del 80% ($Ef_a = 0,8$), entonces el volumen total de riego diario requerido a aplicar a la planta sería (Ec.12):

$$Vt = \frac{0,48}{0,8} \approx 0,6 \text{ L/día/planta}$$

Si en 10 metros de longitud hay 25 plantas (en 1 m habrían 2,5 plantas), entonces una cinta que arroje un caudal de 5 L/h por metro deberá funcionar 18 minutos para arrojar un volumen de agua de 1,5 L por metro lineal que requieren las plantas para un día de consumo de agua. Este valor de 1,5 L se obtiene a partir de:

$$V_{cm} = Vt \times N^{\circ}pl/m \quad \text{Ec. 15}$$

en donde:

V_{cm} = Volumen de agua diario que se debe entregar por metro lineal de cinta (L/día/m).

Vt = Volumen total de riego requerido a aplicar por planta (L/día/planta).

$N^{\circ}pl/m$ = Número de plantas por metro lineal.

entonces:

$$V_{cm} = 0,6 \text{ L/día/planta} \times 2,5 \text{ plantas/m}$$

$$V_{cm} = 1,5 \text{ L/día/m}$$

El tiempo de riego diario (TR_d) con cinta se puede determinar a partir de:

$$TR_d = \frac{V_{cm}}{Q_{cm}} \quad \text{Ec. 16}$$

donde:

TR_d = Tiempo de riego diario con cinta (h).

V_{cm} = Volumen de agua diario que se debe entregar por metro lineal de cinta (L/día/m).

Q_{cm} = Caudal que entrega la cinta por metro lineal (L/h/m).

Así, del ejemplo anterior:

$$TRd = \frac{1,5 \text{ L/día/m}}{5,0 \text{ L/h/m}} \approx 0,3 \text{ h} \approx 18 \text{ min de riego diario}$$

Si se decidiera regar día por medio – siempre y cuando lo permita el balance entre la disponibilidad efectiva de agua en el suelo para la planta ($HA \times VS \times CR$) y la sumatoria diaria de la evapotranspiración del cultivo (ETc), entonces el tiempo de riego sería de 36 minutos, lo que permitiría reponer el consumo de agua de dos días. Especial cuidado se debe tener en la determinación de la fracción del volumen de suelo humedecido en el riego por cinta (Vs), dada escasa profundidad radical de las hortalizas y las características de su manejo (Figura 8.4). Así, además de la profundidad de mojado por riego, la formación de un área húmeda individual alrededor de la planta - o una franja continua a lo largo de la línea de riego - se debe relacionar con el espaciamiento entre hileras de plantación, para una correcta determinación de Vs .

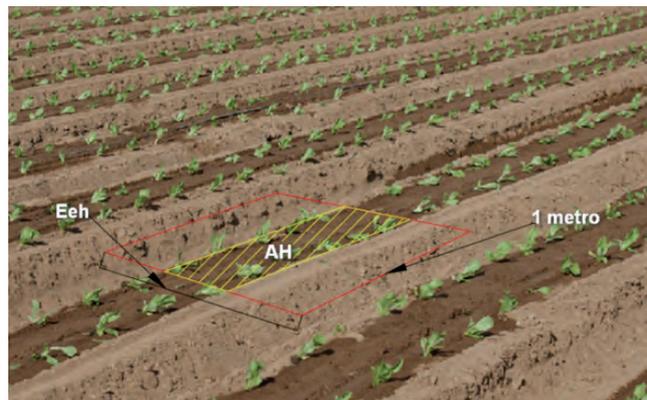


Figura 8.4. Área humedecida (AH) en relación al espaciamiento entre hileras (Eeh) y espaciamiento sobre la hilera (Esh) en riego por cinta en hortalizas.

La frecuencia de riego utilizando cinta se puede determinar mediante la Ec. 8, lo que exige conocer las características de retención de agua del suelo (HA), la fracción de volumen de suelo humedecido por el riego (Vs), el asignar un criterio de riego (CR) y la evapotranspiración diaria del cultivo (ETc).

Para uso de profesionales, están disponibles en Internet programas para el cálculo de necesidades de riego y calendario de riego. Uno de ellos es el software Cropwat, que puede bajarse gratuitamente del sitio de la FAO: (www.fao.org/ag/AGL/AGLW/cropwat.htm).

Finalmente, de todos modos es necesario realizar observaciones periódicas del contenido de humedad del suelo en la zona del bulbo húmedo a la profundidad de mayor desarrollo radical y extracción de agua. Valores conocidos de contenido de humedad de suelo a CC y PMP, muestreos de humedad momentos antes del inicio y posterior al término del riego, y su evolución a través del tiempo, nos indicará si las estimaciones de evapotranspiración del cultivo, la disponibilidad efectiva de agua en el suelo para la planta, la eficiencia de aplicación o el funcionamiento de los emisores son los adecuados o deben corregirse.

Equipos de inyección de fertilizantes



1. ANTECEDENTES GENERALES

Existen en el mercado gran variedad de equipos que se diferencian en las cualidades, posibilidades y limitaciones, y por supuesto en el precio. Por lo tanto, las condiciones y necesidades son diferentes en cada caso, y deben considerarse minuciosamente todos los factores para adoptar la decisión correcta. Las consideraciones más importantes son:

Volumen y capacidad del equipo: Tomar en cuenta la cantidad de solución que el tanque del equipo puede contener y el caudal proporcional y total que puede introducir en la red de riego. Estos valores se determinan de acuerdo con los turnos de riego y dosis de fertilización, condiciones de abastecimiento del agua (presión, caudal - tiempo), red de agua, etc.

Automatización: La posibilidad debe considerarse para el presente o un futuro. Actualmente hay gran diversidad de estos equipos automáticos en serie, hidráulicos o eléctricos. De acuerdo a las posibilidades es posible automatizar la inyección en base a programadores de riego y electroválvulas. También existen equipos sofisticados que permiten llevar un control exhaustivo de las concentraciones de fertilizantes, pH, conductividad del agua de riego, tiempos de agitación, tiempos de lavado, etc.

Servicio y costo: Todo elemento mecánico o eléctrico se desgasta con el uso y el servicio que suministra el fabricante o el agente debe considerarse con suma atención. El costo anual debe incluir el precio de compra, la vida útil del equipo y su mantenimiento.

Los sistemas de fertilización modernos incluyen inyectores de fertilizantes que pertenecen a uno de los siguientes tipos: de corriente eléctrica (independiente o con un regulador) o de potencia mecánica a través de la presión del agua.

Los inyectores de fertilizantes inyectan las soluciones de fertilizantes en el agua de riego. La proporción en la cual se inyectan las soluciones se denomina “proporción de inyección” y se expresa en porcentaje o unidades v/v.

Por ejemplo: una proporción de 4 litros/m³ significa que se inyectaron 4 litros de solución por cada m³ de agua de riego. El mismo rango de inyección puede expresarse en porcentaje como 0,4 % (4 litros/1000 litros) o como 1:250. Un rango de inyección más alto significa que se inyectó más solución en el agua de riego.

El rango de inyección más usual de funcionamiento de los inyectores corresponde a una proporción 1:200 a 1:500, respecto al caudal del sistema de riego. Por ejemplo, si el caudal del sistema de riego corresponde a 40.000 l/h, entonces el rango de trabajo ideal del inyector debería ser $(40.000/200) = 200$ l/h a $(40.000/500) = 80$ l/h. En consecuencia, para el caudal de riego indicado, el rango de trabajo del inyector debería estar en el rango de 80 a 200 l/h.

Las condiciones para la selección del inyector deben considerarse minuciosamente para adoptar la decisión correcta. Pueden utilizarse equipos altamente sofisticados y automatizados o un simple estanque de derivación de flujo. Sus mecanismos de aplicación son variados: por succión o aspiración de una solución madre (inyector tipo Venturi o Dosatron), otros en que la mezcla es inyectada a presión (bombas auxiliares centrifugas o de pistón) y por último en los que la mezcla es incorporada por arrastre (estanques herméticos a presión).

Cuadro 9.1. Características generales de los sistemas de inyección.

Característica	Sistema de fertilización		
	Arrastre	Venturi	Bomba dosificadora
Facilidad de manejo	Alta	Media	Bajo
Uso de fertilizante sólidos	+	-	-
Uso de fertilizantes líquidos	+	+	+
Velocidad de descarga	Alta	Baja	Alta
Control de la concentración	Ninguna	Media	Buena
Control del volumen	Bueno	Medio	Bueno
Pérdida de presión	Alta	Muy Alta	Ninguna
Automatización	Baja	Media	Alta
Precio	Bajo	Medio	Alto

2. ESTANQUE PARA PREPARAR SOLUCIÓN MADRE

Cualquier sistema que se elija para la inyección requiere de un estanque, de construcción y calidad adecuada para contener productos químicos y con un sistema de agitación. Estos deben resistir la presión y corrosión y con capacidades de 100 a 20000 litros. La mínima capacidad del estanque debe ser suficiente para la fertilización de una subunidad sin que se requiera su relleno. El volumen del estanque se calcula de la siguiente forma:

$$V = (n \times Q \times A)/C$$

donde V = Volumen adecuado del estanque, m³

n = N° de aplicaciones entre recargas

Q = Cantidad de fertilizante, kg/ha

A = Area a fertilizar, has

C = Concentración de la mezcla fertilizante en solución madre, kg/m.

Se recomienda no superar 200 kg/m³, para evitar formación de precipitados.

Por el ejemplo,

Nº aplicaciones entre recarga (n) o Nº cuarteles de riego = 10

Superficie cuartel de riego (A) = 2,8 ha

Cantidad de fertilizante (Q) = 35 kg ha⁻¹

Concentración mezcla fertilizante (C) = 200 kg/m³

Volumen adecuado de estanque (m³) = (10 × 35 kg/ha × 2,8 ha) / 200 kg/m = 4,9 m³

La inyección de fertilizantes se realiza en el cabezal de riego, antes de los filtros de malla o después de la electroválvula de la subunidad. Si el agua de riego contiene materiales de otro tipo como arena y materia orgánica, se recomienda instalar filtros de arena después del punto de inyección.

Antes de iniciar la aplicación se debe agitar la solución madre para que se homogenice y evitar que el chupador aspire las impurezas del fondo del estanque. La agitación debe permanecer durante todo el proceso de aplicación.

La aplicación se recomienda comenzarla cuando la presión del sistema de riego se estabilice y debe terminar, al menos, 15 minutos antes que el agua deje de salir por el emisor más alejado de la inyección, con el propósito de lavar los productos químicos y evitar su precipitación. En todo caso, para programar el tiempo de lavado, se debe conocer el tiempo que toma el recorrido de la solución fertilizante hasta al cuartel de riego más distante de la instalación.



Figura 9.1. Estanques para almacenar las soluciones madres.

3. TIEMPO DE VIAJE DE LA SOLUCIÓN FERTILIZANTE

Es importante recordar que una vez que comienza la inyección, el fertilizante no comienza a salir inmediatamente en todos los emisores. Toma un cierto tiempo para que salga el fertilizante a través de los emisores, lo cual se denomina tiempo de viaje.

Para lograr uniformidad en la fertirrigación, se requiere un período de inyección suficiente para lograr mover los fertilizantes a través de todo el sistema de riego y se necesita un periodo de post-inyección con agua limpia. En el Cuadro 9.2, se detalla la incidencia del tiempo de lavado y tiempo de inyección sobre la uniformidad de la fertilización.

Cuadro 9.2. Uniformidad de la fertirrigación en un lateral de 150 m, goteros distanciados a 1,5 m de 4 l/h. Tiempo de viaje del fertilizante 25 min.

Tiempo inyección (min)	Tiempo lavado (min)	Uniformidad relativa (%)
50	50	100
25	25	95
13	25	81
50	0	25
25	0	11

Para lograr la máxima uniformidad en la inyección de fertilizantes, **se debe cumplir que el periodo de inyección debe ser al menos el mismo que el tiempo de viaje**, que corresponde al tiempo que demora el fertilizante para pasar de la cabeza a la cola del sistema de riego. **El periodo de lavado, debe ser igual al tiempo de viaje o más.**

La longitud de la tubería, diámetro y caudal del sistema de riego determina el tiempo de viaje de la solución fertilizante.

Por ejemplo: supongamos que la longitud de la línea principal desde el punto de inyección hasta la última parcela de riego es de 500 metros, el diámetro de la tubería es de 8 pulgadas (20,32 cm). El volumen de la tubería es entonces:

$$\text{Volumen tubería} = L \times r^2 \times \pi$$

L = longitud tubería (m)

r = radio de la tubería

$\pi = 3,1416$

$$L = 500 \text{ m} \times 0,102^2 \times 3,1416 = 16,2 \text{ m}^3.$$

Si el caudal de riego es de 30 m³/h, tomaría al agua con los fertilizantes 32 minutos en llegar a la parcela.

Esto significa que el fertilizante llegará a la parcela sólo 32 minutos y 16 m³ después que comenzó el riego. Y si por ejemplo, la cantidad total de agua aplicada era de 60 m³, esto

significa que aproximadamente el 27% de la cantidad de fertilizante se mantuvo en la tubería y nunca llegó a la parcela.

La mejor práctica sería inyectar los fertilizantes de manera uniforme a lo largo del riego. El lavado de la tubería en el extremo de riego también es una buena práctica. Sin embargo, la longitud de la tubería y su volumen deben ser considerados.

4. EQUIPOS INYECTORES DE FERTILIZANTES

A continuación se explican las características, ventajas y desventajas de diferentes equipos de inyección de fertilizantes.

4.1 Estanque de fertilización

Es de los sistemas más sencillos, baratos y fáciles de usar. No requieren fuente de energía, es transportable. Son depósitos herméticamente cerrados, metálicos o de plástico reforzado con fibra de vidrio, en los que se introduce el fertilizante. El depósito se conecta en paralelo a la red de riego, de manera que por él circula una parte del caudal. Debido a sus desventajas, este tipo de equipos prácticamente están fuera de uso. Sus principales desventajas son:

- El estanque debe resistir la presión de la red de riego.
- La pérdida de presión que se genera puede ser alta.
- Falta de precisión en las cantidades de aplicación. Las diferencias de presión en la red provocan diferencias en las proporciones de dilución.
- Después de cada aplicación debe vaciarse el estanque y rellenarlo.
- La concentración del fertilizante en el agua de riego es variable en el tiempo, lo cual no es deseable.

4.2. Inyectores tipo Venturi

Los inyectores tipo Venturi son muy populares y sencillos en su instalación. Son operados por la presión del agua del sistema, no necesiéndose fuentes externas de energía. Sin embargo provocan una gran pérdida de carga. La capacidad de succión varía entre 40 y 100 L/h, según la presión de entrada y el flujo motriz disponible.

El principio de funcionamiento se basa en la transformación de la energía de la presión del agua en la tubería en energía cinética, cuando el agua pasa por la sección estrangulada del Venturi, que nuevamente se transforma en energía de presión cuando vuelve a la tubería principal. Bien dimensionado provoca la succión del fertilizante colocado en un estanque abierto y su distribución en la red de riego.

El Venturi consiste en un estrechamiento en la corriente de agua, de modo tal de causar cambios en la velocidad de la corriente y la presión. El cambio brusco de velocidad genera una presión negativa que es la encargada de aspirar la solución madre (Figura 9.2).

La ventaja de este equipo es su construcción sencilla, sin piezas móviles. No se necesita una fuente de energía especial y es relativamente barato. El uso de un estanque abierto permite elasticidad y comodidad. Cuando se trabaja con condiciones definidas de presión y caudal, se obtiene una proporción de dilución constante.

Como desventaja, puede presentarse una fuerte disminución de la presión provocada por el equipo de entre 15 y 20 mca (hasta el 30% de la presión de entrada). El margen de operación es muy limitado, es decir una pequeña diferencia en la presión o el caudal de operación complica el funcionamiento, provocando una variación en el caudal de inyección.

Selección del modelo adecuado.

Existen en el mercado diversos tipos de inyectores tipo Venturi, pero de acuerdo a las necesidades, el modelo a utilizar esta en función de:

- Caudal de succión deseado (L/h)
- Caudal que pasa por el inyector o caudal motriz (l/min)
- Pérdida de carga que produce el sistema (m.c.a.)
- Forma o modalidad de instalación.

Con esta información y las tablas proporcionadas por los fabricantes se procede a seleccionar el modelo adecuado. El Cuadro 9.3 muestra el caudal de succión y pasante o secundario para algunos modelos fabricados.



Figura 9.2. Ejemplo de un modelo de venturi.

Cuadro 9.3. Información de flujo de succión de Venturi para diferentes rangos de presiones (Sistema Métrico).

Presión Entrada		Modelo 484		Modelo 584		Modelo 878	
(m.c.a)	SALIDA (m.c.a)	FLUJO (L/min)	SUCCIÓN (L/h)	FLUJO (L/min)	SUCCIÓN (L/h)	FLUJO (L/min)	SUCCIÓN (L/h)
21.1	0.0	10.2	68.1	19.7	106.0	36.7	227.1
	3.5	10.2	68.1	19.7	98.4	36.7	227.1
	7.0	10.2	68.1	18.9	87.1	36.7	227.1
	10.5	9.8	49.2	18.2	68.1	36.0	196.8
	14.1	9.7	26.5	17.4	34.1	34.8	113.6
	17.6	s/i	s/i	17.0	0.0	34.1	0.0
28.1	0.0	11.7	68.1	22.0	94.6	40.9	227.1
	3.5	11.7	68.1	22.0	94.6	40.9	227.1
	7.0	11.7	68.1	22.0	94.6	40.9	227.1
	10.5	11.7	68.1	21.6	94.6	40.9	227.1
	14.1	11.4	68.1	20.8	75.7	40.9	227.1
	17.6	11.2	41.6	20.4	49.2	39.7	170.3
	21.1	10.8	11.4	20.1	18.9	39.4	75.7
35.2	0.0	12.9	64.3	24.2	94.6	45.4	227.1
	7.0	12.9	64.3	24.2	94.6	45.4	227.1
	10.5	12.9	64.3	24.2	94.6	45.4	227.1
	14.1	12.9	64.3	23.8	94.6	45.4	227.1
	17.6	12.9	56.8	23.5	90.8	45.0	227.1
	21.1	12.1	56.8	23.1	71.9	44.7	208.2
	24.6	12.3	30.3	22.7	41.6	44.3	132.5
	28.1	11.9	3.8	18.9	7.6	43.5	45.4
42.2	0.0	14.0	64.3	26.1	94.6	49.2	227.1
	7.0	14.0	64.3	26.1	94.6	49.2	227.1
	14.1	14.0	64.3	26.1	94.6	49.2	227.1
	17.6	14.0	64.3	26.1	94.6	49.2	227.1
	21.1	14.0	64.3	26.1	94.6	49.2	227.1
	24.6	13.8	60.6	25.4	75.7	49.2	227.1
	28.1	13.6	45.4	25.0	56.8	48.8	196.8
	31.6	13.2	18.9	24.6	26.5	47.7	102.2

El caudal para cada modelo es solo una referencia y dependerá de la diferencia de presión que exista entre la entrada y la salida del inyector. Como la tasa de succión es relativamente baja en comparación al caudal principal, el inyector se debe instalar en una desviación lateral de la tubería matriz.

No se recomienda su instalación en forma directa a la tubería matriz por el exceso de pérdida de carga que produce. Esto obligaría a sobre-dimensionar la bomba ya que la pérdida de presión es permanente.

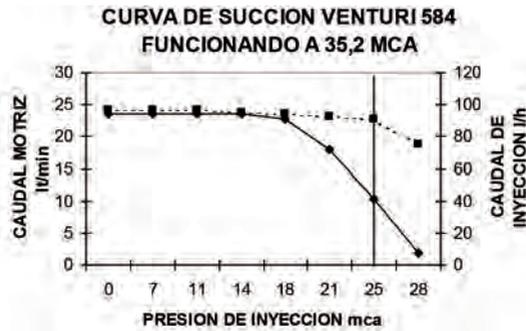


Figura 9.3. Curva de succión de un inyector tipo Venturi.

En la Figura 9.3, se presenta un gráfico con la información del Cuadro 9.3 para un inyector modelo 584 (3/4") y con una presión de entrada de 35.2 m.c.a.. En ella se observa que el caudal de succión es máximo cuando la diferencia de presión entre la entrada y la salida es de 20 m.c.a, es decir, presión de salida igual a 15 m.c.a. Para este punto de trabajo, el caudal de succión es de 90 l/h. El caudal de succión se mantiene constante aunque la diferencia de presión aumente.

Con presiones de salida entre 15 y 25 m.c.a. el caudal que pasa por el inyector se mantiene constante, pero el caudal de succión baja considerablemente a menos de la mitad (40 lt/h).

Con presión de salida de 29 m.c.a la succión se detiene completamente, es decir el sistema ha perdido 6 m.c.a y no hay succión.

Instalación

En general el venturi se instala en una tubería secundaria utilizando una válvula de tipo compuerta o mariposa. En otras instalaciones, esta puede ser reemplazada por un filtro de malla o una válvula reguladora de presión.

Si no se desea alterar significativamente la presión de todo el sistema de riego se puede utilizar una bomba centrífuga auxiliar para generar la diferencia de presión y se instala en la tubería secundaria.

El flujo principal debe dividirse en dos, pasando uno de ellos por el inyector (flujo secundario). La diferencia de presión entre la entrada y salida del inyector determina el flujo a través de este dispositivo y el caudal de succión.

Cuando la válvula reguladora esta completamente cerrada, todo el flujo se conduce a través del inyector y en este caso la succión es máxima. El problema asociado a esta situación es la enorme pérdida de carga inducida al sistema, lo que hace imposible el buen funcionamiento del riego. Si la válvula esta completamente abierta, la diferencia de presión entre los dos puntos es mínima, por lo tanto el flujo secundario es muy bajo y el flujo de succión es cero.

Consideraciones:

El Venturi es un inyector que produce una pérdida de carga importante y debe ser considerada en el momento de diseñar el sistema.

En el rango de poca pérdida de presión 6 a 10 m.c.a., el caudal de inyección es muy bajo.

Para trabajar con el caudal nominal del inyector (caudal máximo), la diferencia de presión entra la entrada y la salida debe ser muy grande. En la práctica esto se consigue colocando una bomba auxiliar.

La instalación de un venturi debe estar contemplado en el proceso de diseño del riego y requerimiento de la bomba.

No se recomienda implementar este sistema en sistemas de riego que funcionan con presiones inferiores a 30 m.c.a. a la entrada del sistema de filtros o riegan áreas ubicadas sobre la cota del cabezal de riego.

4.3. Inyectores proporcionales

Los inyectores proporcionales son inyectores de fertilizantes y productos químicos accionados mediante el flujo del agua. El pistón de estos inyectores de fertilizante se mueve por la acción del agua. Los productos y soluciones son inyectadas por este sistema de manera constante y proporcional al flujo de agua que tenemos (de ahí su nombre: Inyectores proporcionales).

Estos inyectores proporcionales se utilizan para la fertirrigación, para controlar y dosificar el cloro, para el tratamiento de aguas, desinfección y limpieza de líneas e instalaciones de control y ajuste de pH y CE.

El dosificador proporcional trabaja siendo instalado directamente en la línea de agua, y este flujo de agua es el que mueve al pistón dentro del dosificador. No requiere de energía eléctrica en absoluto.

Cuando el pistón se mueve hacia arriba, se crea un vacío y éste succiona el fertilizante por medio de la manguera de succión, y lo envía a la cámara interna que está en la parte inferior del cuerpo del dosificador.

Cuando el pistón se mueve hacia abajo, se crea una turbulencia que mezcla el fertilizante con el agua que se encuentra en la cámara, obteniendo una mezcla uniforme y homogénea, y por último envía esta mezcla por la línea de salida hacia las plantas (Figura 9.4).

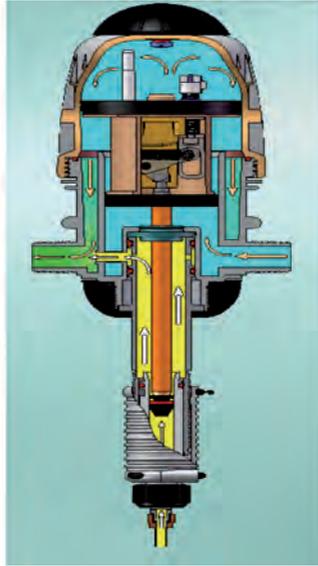


Figura 9.4. Forma de trabajo de un inyector proporcional.

La proporción de inyección se mantendrá constante pese a que haya cambios de presión o flujo de agua (a diferencia del Venturi, o inyectores eléctricos). Esta es la razón por la cual son llamados inyectores o dosificadores proporcionales. Proporcionan las partes por millón del fertilizante recomendado, manteniendo este porcentaje de inyección constante, aun cuando haya fluctuaciones en la presión o flujo del agua.

Cómo seleccionar el dosificador adecuado

Los dosificadores comerciales suelen clasificarse en función del máximo flujo de agua (litros/minuto) que entra a la unidad. Comúnmente son de 30, 42, 53, 75, 151, 379, y aún sobre 420 L/min. Las presiones máximas de estas unidades van de un máximo de 85 psi (6 bar) para unidades de 75 L/min o menos, a un máximo de 110 psi (7.7 bar) para las unidades de 151 L/min, e incluso existen unidades de presiones superiores a 120 psi (8.4 bar).

Con un dosificador es posible usar productos líquidos o polvo 100% soluble en agua. El dosificador proporciona una inyección constante y repetitiva a las plantas (exactamente lo que se recomienda). A la hora de seleccionar un dosificador, las características más importantes son la confiabilidad, servicio postventa y vida útil.

Selección del filtro

Filtrar el agua de entrada al inyector-dosificador es importante. Se recomienda emplear un filtro de plástico lavable con un filtro interno de malla de 200 mesh ó 85 micrones. El filtro es necesario para filtrar arena o pequeñas partículas no solubles antes que éstas entren al

inyector-dosificador, así como para todo el sistema de riego. Este filtro prolonga la vida del dosificador y del sistema de riego, y se debería instalar antes del inyector.

Cómo evitar el golpe de presión

Cuando el agua se está moviendo en una dirección, y se encuentra con una válvula cerrada, la energía del agua viajara de regreso, aproximadamente unas cuatro veces la presión original de entrada. Esta presión puede ser dirigida al dosificador. Para evitar este golpe de presión, se recomienda tener una válvula de una sola dirección instalada DESPUES del dosificador. Esta es comúnmente conocida como válvula cheque.

El mantenimiento es fundamental

Una manera de proteger sellos/empaques consiste en enjuagar el inyector después de usar químicos corrosivos (poner la manguera de succión en un depósito que contenga agua y dejarlo operar por unos 20 segundos). Con ello se consigue evitar que los químicos corrosivos se queden dentro del inyector y que empiecen a actuar contra los empaques.

En cuanto al mantenimiento preventivo, se recomienda revisar cada año sellos y demás partes móviles para cerciorarse de que estén en buen estado. Si hay desgaste, deben ordenarse las partes correspondientes al distribuidor de su área.

Antes de adquirir un dosificador

Es recomendable fijarse en la calidad del dosificador proporcional que vaya a adquirir, así como en el servicio de mantenimiento ofrecido por el distribuidor; y por supuesto que éste disponga de todas las partes y accesorios.

Por último ese debe prestar atención a las experiencias que los otros productores hayan tenido con los distribuidores y con las unidades. Cabe señalar, que existen en el mercado varias marcas comerciales de este tipo de dispositivos: Dosatrón, Dosmatic, Mix Rite, etc.



Figura 9.5. Marcas comerciales de inyectores proporcionales: Dosmatic, Mix Rite, Dosatrón.

En la instalación debe considerarse la posibilidad de instalar más de una unidad en serie o en paralelo, para dar cumplimiento a requerimientos de inyección mayores a las características propias de cada modelo.

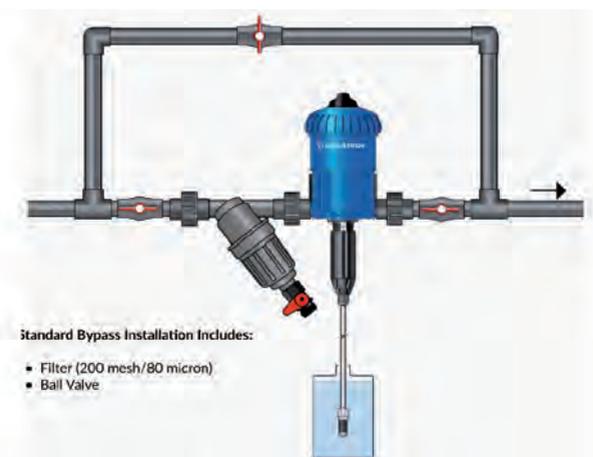


Figura 9.6. Instalación de un inyector proporcional.

Cuadro 9.4. Principales características de varios modelos de Dosatrón.

Descripción	MODELO					
	DL-16		DL-150		DL-210	
	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.
Flujo motriz, L/h	10	2500	10	2500	10	2500
Caudal de inyección, L/h	0.02	40	0.1	125	0.2	250
Capacidad de ajuste de inyección (%)	0.2	1.6	1	5	2	10
Relación de Inyección, caudal de inyección/caudal riego	1:500	1:62.5	1:100	1:25	1:50	1:10
Presión de trabajo, m.c.a	3	60	3	60	5	40
Pérdida de Presión, m.c.a.		9.3		7		5.6

4.4. Dosificadores eléctricos

Su principio de operación es la inyección de la solución desde un estanque abierto a una presión superior a la red utilizando una bomba apropiada (bajo caudal y alta presión). La bomba puede ser accionada por un sistema eléctrico, hidráulico o un motor de combustión. En general inyectan una cantidad de fertilizante no proporcional al volumen del agua de riego, pero algunos modelos presentan modificaciones que las hacen proporcionales, controladores de fertirrigación y variadores de frecuencia. Generalmente están constituidas de un diafragma o un pistón, de materiales que las protegen de la corrosión. Son equipos de mayor costo, aunque sus ventajas son controlar muy bien el ritmo y volúmenes de inyección.



Figura 9.7. Modelos de inyectores de fertilizantes automáticos.

La importancia de **controlar** el proceso del fertirriego se ha ido incrementando con el aumento y sofisticación de la tecnología y experiencia de campo debido a:

- La combinación de los equipos de fertilización en los sistemas de riego modernos es compleja, con la posibilidad de regar en varios turnos y con caudales distintos.
- Los requisitos de la fertilización son más exigentes (fertilización proporcional).
- Los equipos operan sin la presencia humana.
- La gran variedad de tipos de inyectores y de los equipos de fertirriego.
- El uso de diferentes fórmulas de fertilización en forma simultánea.

El conocimiento cada vez más profundo de las necesidades nutritivas de las plantas, ha creado la necesidad de optimizar mucho más los parámetros de la fertirrigación. La tendencia es variar en las unidades empleadas para dosificar fertilizantes. Todavía se fertiliza en unidades de fertilizantes por hectárea. Pero se debería fertirrigar en ppm, meq/L, pH, CE, etc., parámetros que se refieren a las características del agua, los elementos de que dispone y las condiciones en que se encuentran en la solución de suelo. El objetivo no es mejorar el suelo donde se desarrolla la planta, sino la disolución en que la planta se va a nutrir. Los modernos equipos de inyección, permiten la lectura del pH, la CE y de los volúmenes de agua de riego y fertilizantes, que es lo que reciben las raíces de las plantas.

En este tipo de equipos, el control del fertirriego se da en diferentes niveles:

- a) Por volumen: el control se realiza en base a la relación volumen de agua de riego y el volumen de solución nutritiva. Normalmente existe un control de segundo orden que nos permite conocer la CE del agua en cada momento. El sistema de inyección de ácido se realiza en forma independiente y en función del pH ideal deseado.
- b) Duración de la inyección: a lo largo de todo el riego, o parcial, en un periodo definido.
- c) Por CE: el control de la fertirrigación consiste en la determinación y fijación de unos valores de CE y pH ideales, a partir de los cuales, el equipo aumenta o disminuye la

inyección. También, se permite la determinación del porcentaje de cada fertilizante, que mantienen su proporcionalidad según el tiempo de inyección de cada momento.

Si se encuentra en la fase de planificación de un sistema de irrigación con aplicación de fertilizantes, utilice esta lista de control para asegurarse que el sistema satisfaga sus requerimientos:

- Establezca el contenido y las concentraciones de las soluciones de fertilizantes que se utilizaran.
- Establezca los rangos de inyección y el nivel de fertilización requerido, incluyendo el pH y la conductividad eléctrica.
- Establezca el rango de flujo de riego.
- Calcule el rango mínimo requerido de flujo del inyector usando la siguiente fórmula: $\text{rango máximo de flujo de riego} \times \text{rango mínimo de inyección requerido}$. También, otro procedimiento es, conociendo el flujo de riego, calcular una inyección entre 200 a 500 veces menor. Por ejemplo, si el caudal de riego es 150.000 L/h, el rango de trabajo del inyector debería ser entre 300 a 750 L/h.

Es mejor prevenir que lamentar: compre un inyector que pueda proporcionarle un flujo ligeramente mayor al de sus requerimientos máximos.

Mantenimiento del sistema de riego

1. REVISIÓN E INSPECCIÓN DEL SISTEMA DE RIEGO

El agua aplicada durante el riego debe cumplir, entre otros, los siguientes requisitos:

- Suplir los requerimientos de agua de la planta
- Distribución uniforme sobre el área de riego
- No exceder capacidad de almacenamiento de agua del perfil de suelo para impedir percolación profunda
- Evitar la salinización y lixiviación
- Minimizar el deterioro de la estructura del suelo

El riego localizado debe estar en condiciones óptimas de operación en todo momento, lo cual se logra a través de revisión e inspección permanente.

1.1. Filtros y válvulas

Los filtros deben ser desmontados al final de la temporada con el fin de revisar su desgaste y pintar paredes interiores con pintura antióxido. Para los filtros de grava es necesario revisar la arena y si los cantos están redondeados es señal de un cambio. También se deben observar los manómetros, ubicados antes y después de los filtros. La diferencia de presión normal de los de grava es de 1 a 3 metros. Cuando la diferencia sobrepasa 6 metros, es necesario hacer un retrolavado.

Respecto a las válvulas selenoide, si no cierran bien, puede tratarse de una basura existente en la membrana. Para ello se debe desarmar y limpiar.

1.2. Emisores, laterales y matrices

Las obturaciones químicas, son provocadas por precipitaciones de sustancias presentes en el agua de riego. Cuando se detecta obturaciones, es necesario realizar tratamiento de limpieza con ácido, aplicando 3-5 litros de ácido por hectárea, de tal forma que el agua a la salida del emisor, alcance un pH aproximado de 3. Este tratamiento normalmente es necesario realizarlo dos veces en la temporada.

Para el control de las obturaciones biológicas debido a algas transportadas en el agua o desarrolladas en filtros y salidas de emisores se deben emplear biocidas de alta concentración, lo cual se explicará más adelante.

Una condición básica para el adecuado funcionamiento de la fertirrigación es que el sistema este adecuadamente dimensionado y que el agua sea aplicada en forma homogénea en cada planta. Una desuniformidad de aplicación de agua resulta en enormes variaciones en la cantidad de fertilizantes aplicados, y nunca la aplicación de fertilizantes podrá ser más uniforme que la aplicación de agua.

1.3.- Uniformidad de riego

El desarrollo tecnológico que ha permitido la implantación de sistemas de riego localizado, en buena parte de las áreas cultivadas, no se ha visto acompañado por un esfuerzo paralelo en divulgación de estos, de manera que permita al regante conocerlos para así obtener su máximo aprovechamiento. A continuación se describe la metodología a seguir para diagnosticar la calidad de una instalación de riego por goteo y de su manejo por parte del agricultor.

Para cada instalación, han de determinarse dos parámetros clave:

- 1.- La adecuación del riego: ¿Se está aplicando la cantidad de agua que precisan los cultivos, o se está regando en exceso o existe déficit de riego?
- 2.- Conocida la cantidad que se está aplicando, ¿Con qué uniformidad se está distribuyendo dentro de la zona regada?

La adecuación del riego suele evaluarse estimando la eficiencia de aplicación (EA), definida:

$$EA(\%) = \frac{\text{Agua gastada por el cultivo en la ET}}{\text{Agua aplicada al cultivo}} \times 100$$

La uniformidad se mide por varios índices, generalmente referidos en porcentaje. Un porcentaje del 100% significa que la totalidad de la parcela ha recibido exactamente la misma cantidad de agua de riego en todas sus partes. La falta de uniformidad hace que unas partes de la parcela reciban más que otras, por lo que es necesario añadir más agua para que las zonas que menos reciben tengan la suficiente. Ello hace que se deba regar en exceso a la totalidad de la parcela si se quiere garantizar un buen suministro, con serios riesgos de generar asfixia radicular en algunos sectores.

Un sistema de riego por goteo está formado por una unidad central denominada cabezal y por una red de distribución de agua. Los elementos fundamentales que componen el cabezal son: un grupo motobomba, un equipo de filtrado, y un equipo de fertirrigación. La red de distribución está compuesta por una tubería principal, tuberías secundarias y líneas portagoteros con los emisores intercalados o adosados. Cada tubería secundaria

y las líneas portagateros asociadas a ella forman un subsector de riego y el conjunto de subsectores que riegan simultáneamente componen un sector de riego. En la Figura 10.1 se representan esquemáticamente los componentes de una instalación de riego por goteo.

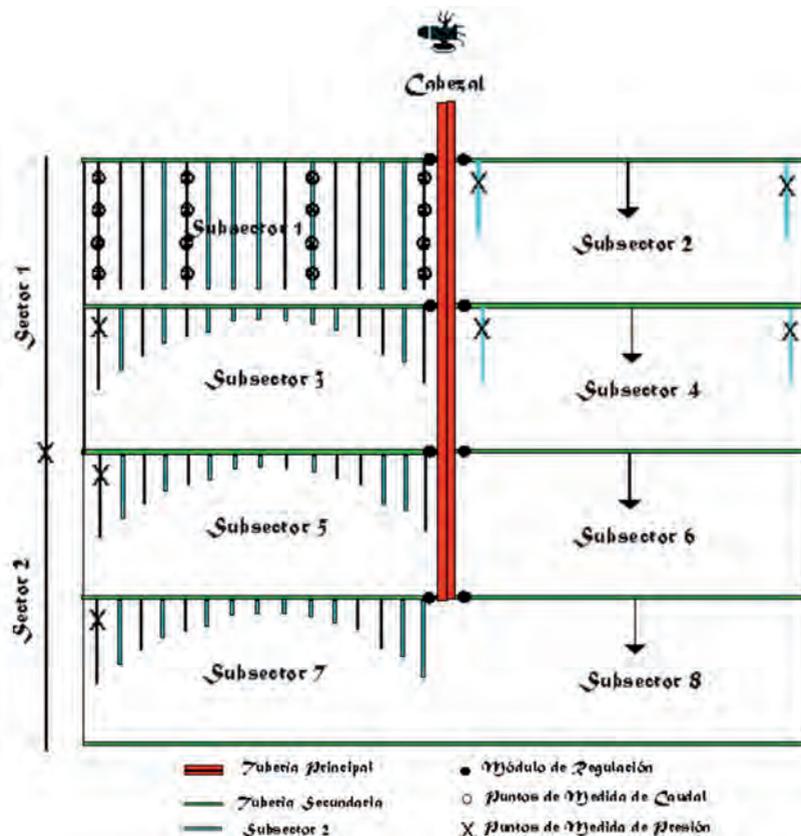


Figura 10.1. Principales componentes de un riego por goteo.

La evaluación de un sistema de riego por goteo incluye los siguientes aspectos:

- Adecuación del cabezal, para cubrir las necesidades de potencia y filtrado de la instalación.
- Estudio del diseño de la red y la uniformidad de aplicación del agua.
- Determinación de la calidad de las tuberías y equipos instalados.
- Evaluación del manejo de la instalación por el agricultor.

Para evaluar la adecuación de la bomba instalada para cubrir las necesidades de la potencia de la instalación se utiliza la siguiente expresión:

$$P = 5,291 \times 10^{-6} \times \frac{Q \times S \times H}{M}$$

donde:

- P : Potencia necesaria (HP)
- Q: Caudal medio emitido por cada gotero (L/h)
- S: Superficie del mayor sector de riego (m²)
- H: Presión a la salida de la bomba (m.c.a)
- M: Marco de los goteros (m²/gotero)

Se considera una eficiencia del grupo motobomba del 70%.

El valor asignado a cada uno de estos parámetros es el que tienen en campo en las condiciones normales de funcionamiento. Las necesidades de filtrado son función del caudal circulante, la cantidad de sólidos en suspensión, naturaleza de estos y el mínimo diámetro de paso del emisor. La adecuación del equipo de filtrado de una instalación a las necesidades de la misma se evalúa siguiendo los siguientes criterios:

La densidad de la malla ha de ser tal que el diámetro máximo de las partículas no retiradas sea menor o igual a un octavo del mínimo diámetro de paso en el emisor, resultando, para buena parte de los emisores instalados, que el tamaño de la retícula de la malla debe ser inferior a 0,1 mm, lo que equivale a una densidad de malla mayor o igual a 140 mesh.

La capacidad de filtrado debe corresponder al caudal máximo circulante para que las pérdidas de carga en el filtro no sean elevadas, con una frecuencia de limpieza adecuada. Cuando se instalan varios filtros en serie su capacidad filtrante debe ser la misma en todos ellos.

La diferencia entre las pérdidas de carga correspondientes al equipo de filtrado para su caudal de trabajo (obtenidas en catálogo) y las pérdidas de carga observadas durante la evaluación deben reflejar si la frecuencia de limpieza es la adecuada.

Un sistema de riego debe distribuir el agua uniformemente en toda la superficie regada, de manera que todas las plantas reciban la misma cantidad y esta sea la adecuada para satisfacer las necesidades hídricas del cultivo durante el intervalo entre riegos. En la práctica es muy difícil que un sistema opere con una uniformidad perfecta. Una forma de evaluar la uniformidad con que un sistema de goteo distribuye el agua es mediante el coeficiente de uniformidad (C.U.), el cual se define como:

$$C.U. = 100 \times \frac{\bar{Q}_{25\%}}{\bar{Q}_n}$$

$\bar{Q}_{25\%}$ es la media del caudal de la descarga del 25% de los emisores con caudal más reducido y \bar{Q}_n es el caudal medio de todos los emisores. La medida de caudales para la estimación de C.U. se puede realizar, en el subsector de riego (Figura 10.1).

Cuadro 10.1. Clasificación de un sistema de riego en función del coeficiente de uniformidad.

Clase	Uniformidad (%)
Excelente	>90
Buena	80-90
Regular	70-80
Pobre	60-70
Inaceptable	<60

Por ejemplo, si se desea evaluar la instalación de riego por goteo de la Figura 10.1; los pasos a seguir serán los siguientes:

A . Comprobar que el sistema funciona con normalidad.

Revisar los filtros

Comprobar que no hay goteros obturados.

Anotar el caudal global del subsector elegido.

Anotar el caudal global previsto en el diseño para el subsector elegido.

B . Tomar el equipo necesario para medir los caudales de los goteros y presiones.

Cronómetro

Probeta graduada

Vasitos para recoger la descarga del gotero o tubo de 1 m de longitud y 50 mm de diámetro de PVC cortado por la mitad para medir caudales en sistemas de tubería porosa o manguera perforada

Manómetro

Libreta de campo para toma de datos.

C. Seleccionar el sector de riego y localizar los puntos de medida.

Tomar el agua de los goteros seleccionados durante el intervalo de tiempo (t) prefijado (preferible múltiplo de minuto). Convertir todas las lecturas de caudales en litros por hora.

$$\frac{V \text{ (ml)}}{t \text{ (minutos)}} \times \frac{1}{16,7} = \text{caudal (L/h)}$$

D. Calcular el coeficiente de uniformidad del subsector.

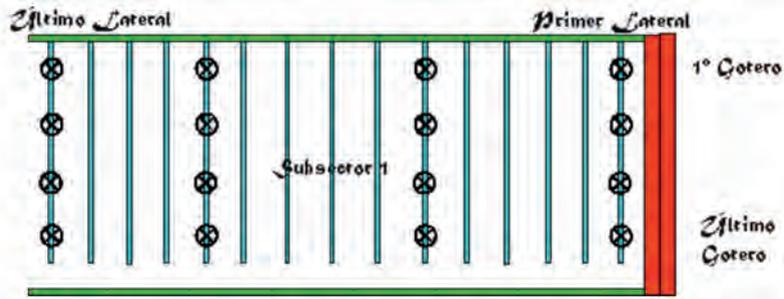


Figura 10.2. Cuartel de riego.

Cuadro 10.2. Registro de caudales por emisor en L/h.

Lateral	1ºgotero	Gotero 1/3	Gotero 1/3	Ultimo gotero
1er Lateral	2.6	2.5	2.2	2.8
Lateral 1/3	2.5	0.9	2.6	2.5
Lateral 2/3	2.0	2.1	2.2	1.9
Ultimo Lateral	1.6	1.7	1.6	2.3

Caudal medio $\bar{Q}_n = 2.12$ litros / hora.

Caudal medio del 25% más bajo $\bar{Q}_{25\%} = 1.45$ litros / hora

Coeficiente de uniformidad de caudales del subsector =

$$\frac{1,45}{2.12} \times 100 = 68,4\%$$

"POBRE"

El procedimiento dado anteriormente es más representativo cuanto mayor sea el número de observaciones.

2. TRATAMIENTO DE LAS OBSTRUCCIONES

Los tipos de obstrucciones se clasifican por su naturaleza del agente que las crea (orgánico o inorgánico), o por su origen (físico, químico o biológico). En el Cuadro 10.3 se presenta una guía para evaluar los posibles riesgos de obstrucciones del agua de riego.

Cuadro 10.3. Guía para evaluar los posibles riesgos de obstrucciones en riego por goteo.

Tipo problema	Bajo	Nivel de riesgo Moderado	Severo
FISICO			
Sólidos en suspensión	<50 mg/L	50-100 mg/L	>100 mg/L
QUIMICO			
pH	<7	7-8	>8
Sales	<500 mg/L	500-2000 mg/L	>2000 mg/L
Conductividad eléctrica	<0,7 dS/m	0,7-3,0 dS/m	>3,0 dS/m
Bicarbonato	<100 mg/L		
Manganeso	<0,1 mg/L	0,1-1,5 mg/L	>1,5 mg/L
Hierro	<0,2 mg/L	0,2-1,5 mg/L	>1,5 mg/L
BIOLOGICO			
Población bacteriana	<10000 un/L	10000-50000 un/L	>50000 un/L

2.1. Causas físicas

En este grupo tenemos las obstrucciones originadas por sólidos en suspensión (arenas, limos y arcillas). Para evitar este problema se utilizan los siguientes procedimientos.

- **Floculación:** Dejar las aguas en un embalse y tratarlas con agentes coagulantes y floculantes, que aumentan la agregación entre partículas facilitando su sedimentación. Ejemplo de productos floculantes son sulfato de aluminio, cloruro férrico, aluminatos, sulfato ferroso, cal, etc.
- **Prefiltrado:** Empleo de hidrociclones, utilización de mallas, rejillas y decantadores.
- **Filtros de arena:** Tamizan el agua en función del diámetro de poros. Estos filtros de arena retienen partículas de tamaño 1/10 del diámetro efectivo de la arena, por lo que suele utilizarse un tamaño efectivo de arena igual al diámetro mínimo de paso del agua por el emisor, como norma de seguridad.
- **Filtros de malla y de anillas:** Son efectivos con aguas no muy sucias que contengan partículas de tipo orgánico. Correctamente dimensionado los filtros de anillas son susceptibles de ser usados bajo cualquier tipo de condiciones.
- **Emisores de flujo turbulento:** Actualmente se diseñan emisores de flujo suficientemente turbulento que limita la sedimentación de partículas finas sobre el interior de sus paredes.

Cuadro 10.4. Clasificación de mallas y tamaño de partículas.

Malla N° mesh	Diámetro equivalente (micrones)	Tipo de partícula	Diámetro (micrones)
16	1180	Arena gruesa	<1000
20	850	Arena media	250-500
30	600	Arena muy fina	50-250
40	425	Limo	2-50
100	150	Arcilla	<2
140	106	Bacteria	0,4-2
170	90	Virus	<0,4
200	75		
270	53		
400	38		

Cuadro 10.5. Sistemas de filtrado a instalar en función del agua empleada.

Precedencia agua	Tipo problema	Tipo filtro
Pozo	Con presencia de arena	Hidrociclón+filtro de anillas
	Sin presencia de arena	Filtro de malla + filtro de anillas
Embalse		Prefiltro+filtro de arena+Filtro de anillas
Canal	Sin arcillas o algas	Filtro de anillas
	Con algas, fangos y carga orgánica	Filtro de arena+ filtro de anillas
Cualquiera	Aguas ferruginosas, calizas, etc.	Tratamiento químico+filtro de arena+filtro de anillas

2.2. Causas químicas

Aun con un filtrado adecuado a las características del agua y del emisor, siempre existe el riesgo de obturación de origen químico debido a las precipitaciones formando incrustaciones. El carbonato cálcico es el constituyente más común de las incrustaciones dentro de las redes de riego.

La oxidación de hierro, manganeso y sulfuro, ya sea producida por bacterias o bien por contacto con el aire, también provoca la precipitación de estos elementos.

El hierro en aguas de pozos profundos al estar en condiciones reductoras permanece como Fe^{+2} , pero al aflorar a la superficie y entrar en contacto con el oxígeno del aire, rápidamente pasa a Fe^{+3} y éste precipita como $Fe(OH)_3$ (hidróxido férrico).



Figura 10.3. Precipitado de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ (hidróxido férrico) en tubería de riego de un huerto de kiwi de la comuna de Quillón, Chile.

El riesgo de formación de obstrucciones de origen químico es elevado por encima de pH 6,5, con dureza superior a 30 o con niveles de hierro o manganeso mayores de 1,5 mg/l.

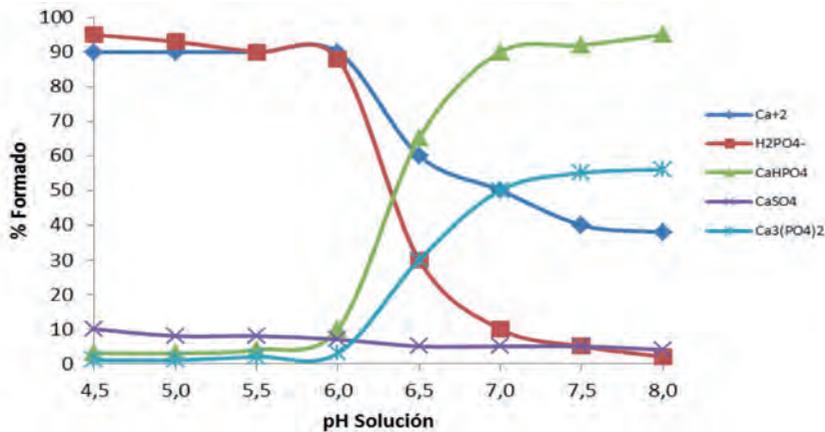


Figura 10.4. Formas químicas de calcio y fósforo en función del pH.

La inyección de ácidos puede evitar o disolver las incrustaciones, reducir o eliminar la precipitación mineral y crear un ambiente no propicio para el crecimiento microbiano.

La propia técnica de fertirrigación puede contribuir a los problemas de obstrucciones. Por encima de pH 7,0, la disponibilidad de fósforo y calcio pueden decrecer considerablemente debido al predominio de la forma HPO_4^{2-} , que genera precipitados insolubles en contacto con el calcio (Figura 10.4).

El pH de la solución de fertirrigación, debe ser tal que permita estar disueltos la totalidad de los nutrientes, evitando de este modo la formación de precipitados y facilitando la disponibilidad de los nutrientes para el cultivo.

Cuadro 10.6. Tratamiento de obstrucciones de tipo químico.

Tipo precipitado	Indicaciones
Carbonato de calcio	Inyección continua de ácido ajustando el pH alrededor de 6. Cuando los precipitados ya están formados, se trata a pH 2-3 y se dejan las conducciones 24 horas llenas con la solución ácida, ello se logra con alrededor de 3 L/ha de ácido fosfórico.
Hierro, Manganeseo y sulfuros	Se puede operar de dos formas: oxidando la forma ferrosa, provocando su precipitación antes de la operación de filtrado, mediante aireación del agua, aplicando hipoclorito sódico (1 mg/L por cada 0,7 de Fe), adición de permanganato potásico (0,6 mg/L por cada 1 mg/L de Fe). La segunda forma es acidificar para mantener la forma ferrosa estable en disolución.
Inadecuado uso de fertilizantes	Ajustar las cantidades de fertilizantes en la solución madre a su grado de solubilidad, observar las cantidades máximas aconsejadas de fertilizantes en solución madre y de riego, efectuar pre y post-riego de lavado con agua sin fertilizantes.

2.3. Causas biológicas

Las aguas superficiales y en general las expuestas a la luz solar, son un medio adecuado para el desarrollo de las algas que, a su vez, llegan a ser alimento de las bacterias. Eliminar en lo posible la acción de la luz solar reduce este foco de obstrucción, complementando con la adición de productos alguicidas, como sulfato de cobre (0,3-3 g/m³, cada 15 días en verano y cada 30 días en otoño, permanganato potásico (4-10 g/m³) seguido de floculación y sedimentación.

La acción directa contra las bacterias se consigue con la aplicación de biocidas, siendo el cloro el más utilizado, en la forma de hipoclorito sódico, que se debe inyectar antes de los filtros de arena.

El ion Cloro tiene diversas propiedades químicas dependiendo de su concentración a bajas concentraciones (1-5 ppm) actúa como bactericida o un agente oxidante del ion Fe⁺³. A muy altas concentraciones (100-1000 ppm) actúa como agente oxidante de la materia orgánica. Para un control efectivo de algas y bacterias el pH del agua debe ser 5,5 a 6,0. Nunca se debe mezclar un ácido con el hipoclorito debido a la generación de gases tóxicos.

La siguiente fórmula se puede utilizar para determinar la tasa de inyección de acuerdo al caudal del sistema de riego.

$$Ti = \frac{0.36 \times Cl_{libre} \times Q}{\% OCL}$$

Donde: Ti = Tasa de inyección de hipoclorito (L/h)

Cl libre = Concentración de cloro libre que se desea en los laterales de riego (ppm).

Q = Caudal de la Bomba (L/s)

% OCL = Es la concentración de ingrediente activo en el producto (%)

Otra alternativa de producto, es el **peróxido de hidrógeno o agua oxigenada** (H₂O₂) que en los últimos años se ha empezado a descubrir sus múltiples utilidades en la agricultura. Es un producto sintético que se encuentra disponible comercialmente en soluciones acuosas de diversas concentraciones y ha sido considerado el mejor agente desinfectante por sus características oxidativas. Por ello, su uso se ha extendido a muchas industrias y está presente en diversos productos de uso diario. Según la concentración aplicada actúa como bactericida, fungicida y destructor de esporas, pudiendo incluso disolver algunas sales. Pero cuando se dosifica en niveles bajos (rango de 10 a 100 ppm), es bastante ineficaz como desinfectante, pero excelente como fuente de oxígeno para el agua, el suelo, el sustrato, etc.

El agua oxigenada es un eficiente aporte de oxígeno para el sistema radicular de las plantas. La principal causa de una baja aireación de suelo está relacionada con sus propiedades físicas como textura, estructura y densidad aparente. En este caso texturas finas, mala estructuración y alta densidad aparente disminuyen directamente la capacidad de aire del suelo y por tanto la oxigenación de las raíces. Los problemas de aireación pueden verse agudizados por malas prácticas de riego, tales como excesivas cargas de agua o altas frecuencias de riego en suelos con restricciones de drenaje. Variados autores, como Cavusoglu y Kabar, (2010); Gil, et al., (2009); Khandaker, et al., (2012); Zuriani, et al., (2015), entre otros, han concluido que la inyección de agua oxigenada al agua de riego de suelos pobremente aireados es una herramienta útil de manejo y se traduce en incremento de rendimiento, calidad de las cosechas y mayor eficiencia de uso de agua y nutrientes.

3. ACIDIFICACIÓN DEL AGUA DE RIEGO

El ajuste de pH de la solución de fertirrigación proporciona dos ventajas importantes:

- Proporciona el pH idóneo para maximizar la disponibilidad de los nutrientes.
- Previene o elimina las obstrucciones en redes de riego y emisores.

De acuerdo a la composición química de las aguas de riego, el poder tampón o amortiguador de éstas ante la aplicación de un ácido, depende casi exclusivamente de la presencia del ión bicarbonato (HCO₃⁻). Este anión es la especie predominante del equilibrio del ácido carbónico en disolución entre pH 4 y 8,3, y es determinante en el valor del pH de la solución. Al adicionar un ácido (cualquier sustancia que aporte iones H⁺), se produce la siguiente reacción de neutralización:



Con lo que se eliminan los iones bicarbonatos, para obtener agua y dióxido de carbono (gas). Esta es la principal reacción que gobierna el pH de una solución nutritiva y que se pretende controlar.

Los ácidos más utilizados son:

- Acido Fosfórico.
- Acido Sulfúrico.
- Acido Nítrico.

Cuadro 10.7. Característica de los ácidos más comunes empleados en fertirrigación

Ácido	Fórmula	Peso Molecular (g)	Peso Equivalente (g)	Densidad (g/cm ³)	Concentración (%)
Fosfórico	H ₃ PO ₄	98.04	98,04	1.71	85
Nítrico	HNO ₃	63.02	63.02	1.40	65
Sulfúrico	H ₂ SO ₄	98.08	49.04	1.84	95

En general, los ácidos se comercializan en unidades de peso y no de volumen como la mayoría de los productos líquidos. La siguiente ecuación permite calcular el volumen de ácido a partir de un determinado peso.

$$V_{ac} = \frac{W_{ac}}{\delta \times Cc/100}$$

Donde: V_{ac} = volumen de ácido (cm³)

W_{ac} = Peso de ácido (g)

δ = Densidad del ácido (g/cm³)

Cc = concentración del ácido en base a peso (%)

Ejemplo: Calcular el volumen de 1000 g de ácido sulfúrico.

Solución: Utilizando valores de densidad y concentración del ácido sulfúrico en la ecuación se obtiene:

$$V_{ac} = \frac{1000g}{1,84 (g/cm^3) \times 95/100}$$

$$V_{ac} = 572 \text{ cm}^3$$

Respuesta: 1000 g de ácido sulfúrico 95% de pureza equivalen a un volumen de 572 cm³.

En el Cuadro 10.8, se muestra la equivalencia aproximada entre peso y volumen de los ácidos más empleados en fertirrigación.

Cuadro 10.8. Equivalencia entre peso y volumen de los ácidos más empleados en fertirrigación.

Ácido	Volumen	Peso
H ₃ PO ₄ 75%	1 cm ³	1,57 g
H ₃ PO ₄ 72%	1 cm ³	1,61 g
H ₃ PO ₄ 85%	1 cm ³	1,71 g
HNO ₃ 59%	1 cm ³	1,36 g
HNO ₃ 54%	1 cm ³	1,33 g
H ₂ SO ₄ 98%	1 cm ³	1,84 g

El ácido fosfórico se emplea comúnmente entre 55 a 85% de riqueza, lo que equivale a 40-61% P₂O₅ base peso. Es el fertilizante fosfatado más utilizado en fertirrigación y frecuentemente, se cubren con él las necesidades de fósforo del cultivo.

El ácido nítrico, se emplea entre 56 a 59% de riqueza, lo que equivale a 12 a 13% N como nitrógeno nítrico. Generalmente es utilizado en sistemas de hidroponía y de fertirrigación en general, para completar el ajuste de pH, una vez cubiertas las necesidades de fósforo con la adición de ácido fosfórico.

El ácido sulfúrico se emplea a una riqueza del 98% y en algunas zonas su uso agrícola está restringido y su empleo no está muy extendido en otras regiones.

Todos los ácidos al liberar protones (H^+) generan una considerable contribución a la conductividad eléctrica (CE). No obstante, este efecto se da en condiciones de dilución de ácidos en agua destilada. Pero al contrario de lo cabría suponer, esto no es así en fertirrigación, puesto que tras el ajuste del pH de la solución nutritiva mediante la adición de ácidos, la CE no se incrementa o lo hace muy escasamente, y en algunos casos hasta desciende con respecto a la solución inicial.

La capacidad tampón del agua está determinada por los bicarbonatos (HCO_3^-) presentes. Es conveniente neutralizar hasta dejar una concentración de 0.5 a 1,0 meq/L de bicarbonatos, y en **forma empírica se sabe que con este nivel de bicarbonatos el pH de la solución nutritiva se situará en un rango entre 5.3-5.8.**

Un meq de cualquier ácido neutraliza un meq de bicarbonato y con 1,5 meq/L de ácido Fosfórico se cubren los requerimientos de la mayoría de los cultivos.

En la Figura 10.5, se puede observar el requerimiento de ácido fosfórico de aguas de riego de distintas procedencias. En el agua A, con un pH de 7,0 se requieren alrededor de 200 ml de ácido fosfórico por m^3 para llevar el agua al pH deseado de 5,5. En tanto, el agua B, con pH inicial de 8,0, solamente se requieren 100 ml de ácido para alcanzar el mismo pH. La diferencia está dada exclusivamente por la concentración de bicarbonato entre ambas calidades de agua.

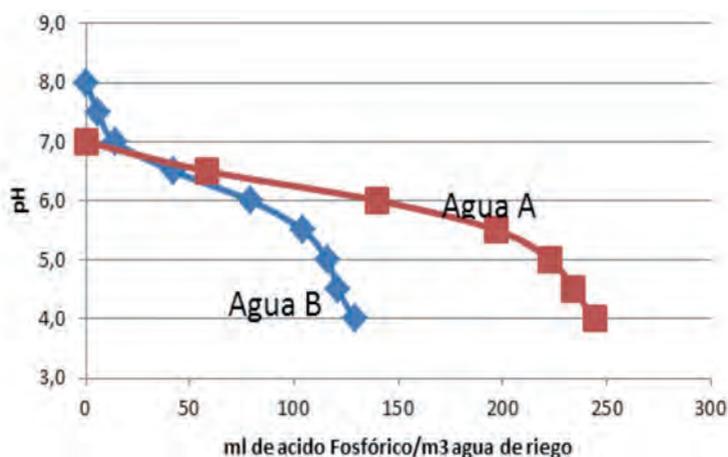


Figura 10.5. Curva de titulación de agua de riego de diferentes productores. Agua A pH= 7,0; Bicarbonatos 3,5 meq/L; Agua B pH= 8,0; Bicarbonatos 1,8 meq/L.

Usando la siguiente ecuación se pueden estimar los requerimientos de ácido para llevar el agua de riego al pH deseado de 5,5 a 5,8.

$$\text{ml/m}^3 = \frac{\text{HCO}_3^- \text{ a neutralizar} \times \text{PE ácido (g)}}{\text{C ac} \times \delta}$$

PE ácido: Peso equivalente del ácido

δ = densidad ácido (g/cm^3)

C ac = concentración ácido (0-1)

Las características de los ácidos (PE, δ , C ac, se presentan en el Cuadro 10.7).

Ejemplo: un productor de frutales dispone de agua de riego con pH 7,5 y una concentración de bicarbonatos de 2,3 meq/L. ¿Que volumen de ácido fosfórico debe emplear para llevar el agua a un pH ideal para fertirrigacion (5,5 a 5,8)?.

Solución: debe neutralizar $2,3 - 1,0 = 1,3$ meq/L de bicarbonato, para lo cual debe aplicar 1,3 meq/L de ácido, lo cual equivalen a:

$$\text{ml/m}^3 \text{ Acido fósforico (85\%)} = \frac{1,3 \times 98}{0,85 \times 1,71} = 88 \text{ ml ácido fósforico por m}^3 \text{ agua de riego}$$

Suponiendo que el caudal del sistema de riego es 8,5 L/s = 28.8 m^3/h . ¿cual debe ser el caudal del inyector de ácido?.

Necesitamos inyectar 88 ml de ácido fosfórico por m^3 agua de riego, por consiguiente, para 28,8 m^3/h , necesitamos inyectar en forma permanente $88 \times 28,8 = 2534 \text{ ml/h} = 2,53 \text{ L/h}$.

Otra alternativa más segura y generalmente más rentable, que el uso directo de ácidos, corresponde al **quemador de azufre**. La disponibilidad ó adquisición del ácido sulfúrico en algunos países es de difícil acceso, ya que está fuertemente restringido por los organismos estatales. Esta tecnología es otro procedimiento para bajar el pH del agua. El sistema se basa en la quema de azufre granulado que produce dióxido de azufre (anhídrido sulfuroso). Al mezclar este gas con el agua, a través del sistema de la máquina, se obtiene agua ácida con un nivel de pH 2.0 que se mezcla con el agua del reservorio para bajar su pH a un rango deseado de 5,0 a 6,5.



Figura 10.6. Quemador de azufre instalado en un reservorio.

Fertirriego con pivote central y aspersión convencional

11

1. PIVOTE CENTRAL

Este método de aplicación de agua es muy adaptable, junto al avance frontal y han experimentado un tremendo crecimiento alrededor del mundo en los últimos años. Principalmente debido a su potencial para aplicar agua en forma eficiente, alto grado de automatización, que permite una menor utilización de mano de obra y a su capacidad para aplicar agua y nutrientes solubles en una amplia gama de suelos, cultivos y condiciones topográficas.

Aproximadamente, un tercio de la superficie regada en los Estados Unidos utiliza sistemas autopropulsados, principalmente pivotes centrales. En nuestro país desde hace unos veinte años se ha venido adoptando este sistema de riego y en la actualidad existen superficies importantes regadas por pivotes. Roa (2016), estima que en Chile existen del orden de 82.200 hectáreas con este sistema. Dichos sistemas de riego han permitido el desarrollo agrícola en extensas áreas de suelos arenosos ocupadas originalmente con plantaciones forestales o áreas con problemas topográficos.

Gracias a los pivotes centrales y laterales móviles automáticos, es relativamente fácil manejar los niveles de riego en forma adecuada. Casi todos los cultivos, incluyendo huertos frutales y vides, así como los tradicionales de remolacha, maíz, papas, granos, alfalfa y hortalizas pueden y han sido regados con éxito con pivote bajo una amplia gama de condiciones. En ciertas situaciones, como el caso de frutales, se requieren prácticas culturales especiales como plantar en círculo.

Un pivote central o lateral móvil consiste básicamente en una tubería lateral con aspersores (Figura 11.1). La tubería lateral es soportada por tensores de acero y torres espaciadas entre 30 y 60 m. Cada torre cuenta con un motor y va sentada sobre dos o cuatro grandes ruedas de goma. El conjunto de tuberías, tensores y aspersores entre dos torres se llama tramo. En cada torre hay acoples flexibles que conectan las tuberías de dos tramos adyacentes. El largo máximo de los tramos es función del tamaño de la tubería, su espesor, pendiente y topografía del terreno. El largo de los tramos generalmente varía para adecuarse a las dimensiones del campo o para ajustar la altura de los aspersores en terrenos ondulados. El voladizo es una tubería de menor diámetro, con aspersores, suspendida por cables al final de la última torre para aumentar el área regada. Cañones y sistemas de esquinas pueden ser colocados al final del equipo para aumentar el radio mojado o regar en las esquinas. La longitud más común de los pivotes es 400 m y su vida útil es de 15 a 20 años.



Figura 11.1. Vista parcial de un pivote.

2. APLICACIÓN DE FERTILIZANTES CON PIVOTE CENTRAL

El sistema de pivote central se ha expandido rápidamente en las diferentes áreas de riego en Chile, debido a sus facilidades de automatización y posibilidad de aplicar el agua en forma más eficiente. Dependiendo de las necesidades del productor, características topográficas y superficie a regar, las dimensiones varían de 60 a 700 m de longitud, correspondiendo a un área regada de 1,1 a 150 has.

La aplicación de este sistema para adicionar productos químicos se ha tornado muy común. En otras latitudes, los productores emplean fertilizantes, herbicidas, insecticidas y fungicidas aplicados vía pivote central, siendo una práctica importante en las actividades productivas de la agricultura de riego. Los métodos de inyección empleados normalmente, utilizan bombas de pistón que se caracterizan por trabajar con bajas variaciones y alta presión, ideales para introducir los productos químicos en el pivote central. El sistema de inyección por succión de la bomba, aprovechando el proceso de entrada de agua, también es un sistema adoptado por algunos productores. Pero debe tenerse presente que en este caso los fertilizantes pasan a través de la bomba afectando su vida útil, por lo cual se requiere una mantención más continua.

Los sistemas de riego por aspersión son excepcionalmente bien adaptados para fertirrigación. Es conveniente, sin embargo, para evitar daños por posible toxicidad u otros, considerar el nivel de tolerancia de los cultivos a la concentración específica de algunos elementos y sus valores umbrales de conductividad eléctrica.

La mayoría de los sistemas de aspersión pueden ser proyectados y operados para aplicar agua con uniformidad superior al 85%.

3. CÁLCULO DE LA TASA DE INYECCIÓN

La tasa de aplicación de fertilizantes vía pivote central debe ser constante durante la aplicación de una determinada dosis en el área regada. Esta es una condición necesaria puesto que el equipo opera a una velocidad continua y uniforme para aplicar la lámina de agua requerida.

La tasa de inyección de un determinado fertilizante depende de la dosis de producto a aplicar en el área, de la velocidad de traslado del equipo, del área regada y de la concentración del fertilizante en el estanque (concentración de la solución madre). Estas variables están relacionadas entre sí y pueden ser calculadas por la siguiente ecuación:

$$q_i = \frac{P_d \times r^2 \times v_t \times V_a}{20.000 \times r_t \times Q_p} \quad (\text{ec. 1})$$

Donde:

q_i = tasa de inyección (litros/min)

P_d = dosis del fertilizante en la superficie regada (kg/ha o litros/ha)

r_t = Distancia del punto central del pivote hasta la última torre (metros)

r = Radio de riego del pivote central (metros)

v_t = Velocidad del pivote en la última torre (metros/minuto)

V_a = Volumen del estanque en que el fertilizante es diluido (litros)

Q_p = cantidad de fertilizante en el estanque (kilos o litros)

La constante 20.000 corresponde a un factor de ajuste de unidades.

En la práctica, lo más común es que se fije la tasa de inyección y se calcule la cantidad de fertilizante que se debe diluir en un determinado volumen de agua.

4. CÁLCULO DE LA CONCENTRACIÓN DEL FERTILIZANTE EN EL AGUA DE RIEGO

La adición de fertilizantes implica un incremento de la actividad iónica y conductividad eléctrica del agua de riego. Dependiendo de la concentración de la solución inyectada, tasa de inyección y caudal del sistema de riego, la sobrecarga de fertilizantes puede producir efectos indeseables, como precipitación de sales en el agua, corrosión de equipos o daños al cultivo. Por ello, se considera de mucha importancia conocer la concentración final del producto inyectado en el agua de riego, para evitar posibles daños. El cálculo de la concentración del producto en el agua de riego, C_a (mg/L), puede realizarse empleando la siguiente ecuación:

$$C_a = \frac{q_i \times (Q_p/V_a)}{60 Q} \times 10^{-6} \quad (\text{ec.2})$$

Donde Q representa el caudal del sistema de riego. El resto de los parámetros fue descrito anteriormente.

Cuando el sistema no dispone de un medidor de caudal, se recomienda estimar su valor a partir de la lámina media aplicada y a la uniformidad de distribución de agua del equipo, empleándose la siguiente fórmula:

$$Q = 3,636 (10)^{-5} \frac{r^2 \times L_i}{U_i} \quad (\text{ec.3})$$

Donde L_i es la lámina media aplicada (mm/d); y U_i , representa el índice de uniformidad considerado, expresado en forma decimal (0-1).

5. VOLUMEN DE SOLUCIÓN MADRE

Una información importante en fertirrigación es la cantidad de estancadas necesarias para aplicar una dosis recomendada. Esta información depende del tamaño del pivote, de la capacidad del estanque, de la velocidad de traslado del equipo y de la tasa de inyección. El número de estancadas necesarias se calcula mediante la fórmula:

$$N_t = \frac{2 \times \pi \times r_t \times q_i}{V_t \times V_a} \quad (\text{ec.4})$$

N_t representa el número de estanques necesarios para aplicar en el círculo completo. Las demás variables fueron definidas anteriormente.

6 . PLANILLA PARA REALIZAR FERTIRRIGACIÓN CON PIVOTE CENTRAL

Esta planilla ayuda al asesor, productor agrícola y/o encargado de riego a calcular la tasa de inyección requerida para aplicar diversas dosis de fertilizantes en kilos/ha, mediante un pivote central o un equipo de avance frontal.

La tasa de inyección de un determinado fertilizante depende de:

- Dosis de producto a aplicar en el área
- Velocidad de traslado del equipo
- Área regada
- Concentración del fertilizante en el estanque (concentración de la solución madre).

Ejemplo: Aplicar 50 kg Urea/ha en la totalidad de la superficie de un pivote central que presenta un radio de riego de 425 metros. La distancia del centro del pivote a la última torre es de 415 metros. La última torre recorre 16 m en 22 minutos para aplicar un riego de 20 mm.



AREA: Determinación de la superficie en hectáreas

	Ejemplo	Su Sistema
A. Radio de riego del pivote (r), en metros	425 m	
B. Area efectiva de riego en m² Area = $\pi \times r^2$. ($\pi = 3,14$) ($B = \pi \times A^2$)	$3,14 \times (425 \text{ m})^2 = 567.163 \text{ m}^2$	
C. Conversión metros cuadrados a hectárea 1 hectárea=10.000 m ²	$567.163 \div 10.000 = 56,7$ hectáreas	
D. Area tratada en hectáreas Multiplicar las hectáreas por el % del pivote $\div 100$. Este ejemplo asume el 100% del pivote (circulo completo). ($D = C \times \% \text{ pivote} \div 100$)	$56,7 \text{ hectáreas} \times 100 \div 100 = 56,7$ hectáreas	

TIEMPO DE APLICACIÓN: Determinación de la velocidad de avance del pivote

	Ejemplo	Su Sistema
E. Distancia a la última torre (rt) Distancia desde el centro del pivote a la rueda de la última torre. Se encuentra generalmente en la carta de aspersión.	415 m	
F. Perímetro de la circunferencia Circunferencia completa en metros Circunferencia = $2 \times \pi \times rt$ ($F = 2 \times \pi \times E$)	$2 \times 3,14 \times 415 \text{ m} = 2.606 \text{ m}$	
G. Distancia de viaje última torre Medir con huincha distancia de un tramo de recorrido de la última torre	16 m	
H. Tiempo de viaje del pivote Registrar en minutos	22 minutos	
I. Convertir tiempo de viaje a horas Minutos $\div 60$ minutos por hora	$22 \text{ minutos} \div 60 = 0,366 \text{ horas}$	
J. Velocidad de viaje de última torre Calcular la velocidad de la última torre en metros por hora. Distancia de viaje \div tiempo. ($J = G \div I$)	$16 \text{ m} \div 0,366 \text{ horas} = 43,7 \text{ m/h}$	
K. Tiempo de aplicación en la totalidad de la superficie del pivote Calcular el tiempo para cubrir la circunferencia total del pivote en horas. Distancia de viaje \div Velocidad ($K = F \div J$)	$2.606 \text{ m} \div 43,7 \text{ m/hr} = 59,6 \text{ h}$	
L. Tiempo de aplicación en el área tratada Multiplicar las horas requeridas para la superficie total del pivote por el porcentaje del area tratada.	$59,6 \text{ hr} \times 100 \div 100 = 59,6 \text{ h}$	

VOLUMEN A APLICAR: Determinación del volumen total a aplicar en litros		
	Ejemplo	Su Sistema
M. Tasa de aplicación Peso del fertilizante a aplicar en kilos por hectárea.	50 kilos de urea por hectárea	
N. Concentración del nutriente en la solución madre.	20% = 0,20 kg/L	
O. Volumen de solución madre por hectárea Tasa de aplicación ÷ concentración. ($O = M \div N$)	50 kilos/ha ÷ 0,20 kg/L = 250 L/ha	
P. Volumen total de solución madre Volumen de solución madre por hectárea por superficie total. ($P = O \times D$)	250 L/ha x 56,7 ha = 14.175 Litros	

TASA DE INYECCION: Calcular la tasa de inyección en litros por hora		
	Ejemplo	Su Sistema
Q. Tasa de la bomba de inyección Calcular la tasa de inyección en litros por hora. Volumen total ÷ Tiempo de aplicación ($Q = P \div L$)	14.175 Litros ÷ 59,6 hr = 238 L/h	

7. APLICACIÓN VÍA ASPERSIÓN CONVENCIONAL

El sistema de riego de laterales portátiles, también denominado aspersión convencional, se caracteriza por la presencia de una o más líneas laterales compuestas de tubos que se acoplan mediante conexiones de fácil manejo (enganche rápido) y que contienen aspersores dispuestos a igual distancia uno del otro. Estos laterales son desplazados manualmente, en periodos de tiempo preestablecidos, ocupando posiciones sucesivas para aplicar el riego a una faja de terreno cuya área depende de la longitud del lateral, del alcance de los aspersores y del intervalo entre riego. Por ser portátiles, los tubos deben ser livianos, con diámetro hasta 75 mm, o excepcionalmente 100 mm, dependiendo del material (PVC rígido, aluminio, zinc acerado).

La inyección de productos químicos con esta modalidad de riego, puede ser realizada utilizando varios métodos ya descritos en capítulo IX (venturi, bombas volumétricas, inyección proporcional, etc.). Por el hecho de que el sistema permanece estacionario durante la aplicación del agua, es común la utilización de estanques cerrados herméticamente, de fibra de vidrio o algún material protegido contra la acción corrosiva de los agroquímicos. El volumen del estanque es función del área a regar, método de inyección y condiciones de abastecimiento de agua.

7.1. Cantidad de producto a inyectar por el lateral (Q_p)

$$Q_l = \frac{E_a \times E_l \times N_a \times P_d}{10.000} \quad \text{Ec. 5}$$

Donde Q_p es la cantidad de producto o nutriente a ser aplicado por la línea lateral (kg); E_a es el espaciamiento entre aspersores dentro del lateral (m); E_l es el espaciamiento entre laterales (m); N_a es el número de aspersores en el lateral; P_d es la dosis recomendada de producto o nutriente (kg/ha).

7.2. Cantidad de producto sólido a ser colocado en el estanque (Q_p)

$$Q_p = \frac{C_a \times Q \times V_a}{q_i P} \quad \text{Ec. 6}$$

En que Q_e es la cantidad de producto/elemento a ser colocado en el estanque (g); C_a es la concentración deseada de la solución a la salida de los aspersores (g/m^3 , mg/L o ppm); Q es el caudal del sistema de riego (m^3/h); V_a es la capacidad del estanque (m^3); q_i representa la tasa de inyección (m^3/h); P es el porcentaje del elemento o nutriente en el producto comercial, expresado en valor decimal (0-1).

7.3. Número de estanques requeridos de producto (N_t)

$$N_t = \frac{P_d \times A}{P \times Q_p} \quad \text{Ec. 7}$$

Donde Q_p la cantidad de producto en el estanque; A es el área de riego por posición; los otros términos fueron definidos anteriormente.

7.4. Memoria de cálculo

Es importante desarrollar una memoria de cálculo, con la finalidad de determinar la cantidad de producto a aplicar, cantidad de producto a disolver en el estanque y número de estancadas requeridas.

- a) La cantidad de producto a ser aplicado por hectárea, a través del sistema de riego (kg/ha), debe ser determinada en base a la producción esperada, capacidad de abastecimiento del nutriente por el suelo y eficiencia de aplicación del fertilizante. La cantidad total requerida por el cultivo debe ser parcializada en varias aplicaciones de acuerdo a los requerimientos de cada fase fenológica del cultivo.

- b) Tipo y concentración de la solución a aplicar depende de la recomendación agronómica establecida para el cultivo.
- c) Se requiere definir el área de riego y tiempo requerido por cada posición de los laterales. El tiempo es función de la capacidad del sistema de riego, capacidad de retención de agua del suelo, clima y cultivo.

A continuación se presenta un ejemplo ilustrativo del procedimiento de cálculo.

7.5 Ejemplo de cálculo

Se desea hacer una fertirrigación con cloruro de potasio en un área de 10 hectáreas a un cultivo de maíz, utilizando un sistema de aspersión convencional con aplicador portátil de productos químicos. Se dispone de la siguiente información, relacionada con el sistema de riego e inyección y producto empleado.

Concentración deseada en agua de riego, $C_a = 100$ ppm K
 Capacidad del sistema de riego, $Q = 30$ m³/h.
 Capacidad de inyección de la bomba, $q_i = 0,48$ m³/h
 Capacidad del estanque, $V_a = 500$ l = 0,5 m³.
 Porcentaje del nutriente en el fertilizante, $P = 50\%$ de K = 0,5.
 Dosis recomendada del nutriente (N), $P_d = 30$ kg/ha de K.
 Área regada por posición, $A = 0,22$ ha
 Espaciamiento entre aspersores en el lateral, $E_a = 12$ m
 Espaciamiento entre laterales, $E_l = 18$ m
 Número de aspersores en cada lateral, $N_a = 10$

Calcular:

a) Cantidad de fertilizante (cloruro de potasio) a ser colocado en el estanque; b) Número necesario de estancadas por aplicación; c) Cantidad de nutriente (kg) a ser aplicado por línea lateral.

Solución:

Cantidad de fertilizante (cloruro de potasio) a ser colocado en el estanque: Usando ecuación 6.

$$Q_p = \frac{(100) \times (30) \times (0,5)}{(0,48) \times (0,5)} = 6.250 \text{ g} = 6,25 \text{ kg}$$

La cantidad máxima recomendada a disolver del cloruro de potasio es de 250 kg en un estanque de 1000 L (Cuadro 4.2, capítulo IV). El factor de dilución (FD), entre el caudal de riego y el caudal de inyección es:

$$FD = (30 \text{ m}^3/\text{h}) / (0,48 \text{ m}^3/\text{h}) = 62,5.$$

Por lo tanto, la solución almacenada en el estanque será diluida por un factor 62,5. Como el estanque tiene 500 litros de capacidad donde se debe solubilizar 6,25 kg de cloruro de potasio, la relación será de apenas 12,5 kg de cloruro de potasio por 1000 litros. Por lo tanto, el fertilizante será fácilmente solubilizado.

Número necesario de estancadas (N_t): De acuerdo a ecuación 7.

$$N_t = \frac{(30) \times (0,22)}{(0,50) \times (6,25)} \approx 2$$

Cantidad de nutriente (K) a ser aplicado por línea lateral:
Reemplazando en la ecuación 5.

$$Q_t = \frac{(12) \times (18) \times (10) \times (30)}{10.000} = 6,48 \text{ kg}$$

que corresponde a 13 kg de cloruro de potasio.

Sistema de control del riego: Empleo de sondas de monitoreo de humedad de suelo⁽¹⁾

12

1. ANTECEDENTES GENERALES

El suelo, la planta y la atmósfera constituyen un sistema continuo, en el cual el suelo proporciona un anclaje mecánico a las plantas, además del almacenaje de agua y oxígeno que absorben las raíces. La atmósfera constituye una fuente de demandas de agua ilimitada y la planta es la unidad conductora entre el suelo y la atmósfera, ya que absorbe el agua del suelo, luego esta circula por el xilema, y finalmente sale a través de los estomas de las hojas hacia la atmósfera en un proceso conocido como transpiración. El flujo de agua se produce en respuesta a un gradiente de energía o de potenciales que existe entre el suelo y la atmósfera.

La transpiración constituye la fuerza motriz del ascenso de agua y nutriente en las plantas. A nivel de las hojas, y en respuesta al gradiente de potencial hídrico entre la atmósfera y la hoja, se produce salida de agua desde estas en forma de vapor a través de los estomas, disminuyendo su potencial hídrico. Esta reducción de potencial hídrico foliar aumenta el gradiente entre la hoja y el suelo, lo que provoca un flujo de agua desde la zona de raíces. En la medida que la disponibilidad de agua del suelo disminuye (disminuye el potencial mátrico y la conductividad hidráulica del suelo), el flujo de agua hacia la planta es cada vez menor, llegando a un momento en que la absorción no puede igualar a la transpiración, produciéndose un déficit hídrico en la planta, lo que induce un cierre estomático. Por otra parte, los excesos de agua en el suelo provocan problemas de aireación, afectando el metabolismo radical, lo que también afecta el desarrollo del cultivo en general. Por lo tanto, es necesario mantener niveles de humedad adecuados en el suelo para satisfacer las necesidades de transpiración de las plantas y no provocar déficit o excesos hídricos, que afecten su crecimiento y desarrollo, ya que al bloquear la transpiración se aumenta la temperatura de la planta y se disminuye la fotosíntesis (carbohidratos), la absorción de nutriente y potencial de turgor responsable de la elongación celular.

Un bloqueo de la transpiración también afecta la absorción de nutrientes y muchas veces la planta adecuadamente fertilizada pueden presentar deficiencias nutricionales. Un bloqueo de la transpiración se puede producir por una disminución del potencial hídrico en el suelo debido a un déficit de agua (potencial mátrico) o bien a un aumento de la salinidad (disminución de potencial osmótico) debido a aplicaciones (concentraciones) inadecuadas de nutrientes. Por anterior, es de suma importancia disponer de un adecuado programa y control del riego.

¹ Autores: Ferreyra-Espada, Raúl y Selles Van Schouwen, Gabriel, Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Av. Santa Rosa - 11.610, La Pintana, Santiago, Chile. Correo-e: rferreyr@inia.cl

La programación de riego consiste en estimar el agua requerida por el cultivo para su desarrollo, en la cantidad y momento adecuado, con el objetivo de maximizar su producción o bien obtener un producto de calidad definida. La programación de riego hay que dividirla en dos etapas, una predictiva que corresponde a la programación propiamente tal y una etapa de control de ésta, a través de la cuantificación de la humedad del suelo y/o el estado hídrico de la planta.

La etapa predictiva de la programación de riego tiene por finalidad establecer a priori los tiempos y las frecuencias entre riegos que permitan obtener un adecuado desarrollo de los cultivos y la etapa de control permite ajustar los tiempos (lámina de riego) y la frecuencia de riego. En este artículo se abordará la segunda etapa de la programación de riego, es decir la de control o ajuste del riego.

2. CONTROL O AJUSTE DEL RIEGO

Monitorear el contenido de agua en el suelo es esencial para ayudar a los agricultores a controlar y ajustar las estrategias de riego de forma de optimizar la producción, conservar agua, reducir los impactos ambientales y ahorrar dinero. Al ayudar a igualar los requerimientos de agua del cultivo con la cantidad aplicada en el riego evitando pérdidas de agua por percolación profunda o por escurrimientos o bien evitar aplicar una cantidad insuficiente. El exceso de riego puede incrementar el consumo de energía, el uso de agua, el movimiento de fertilizantes por debajo de la zona radical y producir problemas de falta de oxígeno en el suelo (asfixia radicular).

El control de la humedad del suelo permite conocer el nivel de disponibilidad de agua en forma cualitativa o cuantitativa, esto último midiendo el contenido de humedad (gravimétrico o volumétrico) o el potencial mátrico del agua en el suelo.

Se debe tener presente que previo al establecimiento de cualquier sistema de control, se debe conocer la variabilidad espacial de los suelos para lograr una clara interpretación de los resultados que se obtengan y que sirvan como una herramienta adecuada para mejorar el manejo de riego del cultivo.

3. ESTIMACIÓN CUALITATIVA DE LA HUMEDAD DE SUELO: USO DE BARRENOS Y CALICATAS

Entre los métodos de control, el más sencillo es el control sensorial del perfil por medio de calicatas o barreno. Consiste en tomar muestras de suelo a distintas profundidades y observar el contenido aparente de humedad. Este método es de muy fácil aplicación, pero requiere de cierta experiencia.

El uso de calicatas es siempre recomendable, pues permite una visualización más completa de la humedad del suelo y, además, permite observar el estado general del perfil y el desarrollo de raíces para comprobar la calidad del riego que se está utilizando. Las calicatas deben ser anchas y profundas, de tal manera que se pueda apreciar toda la zona de desarrollo de raíces (Figura 12.1).

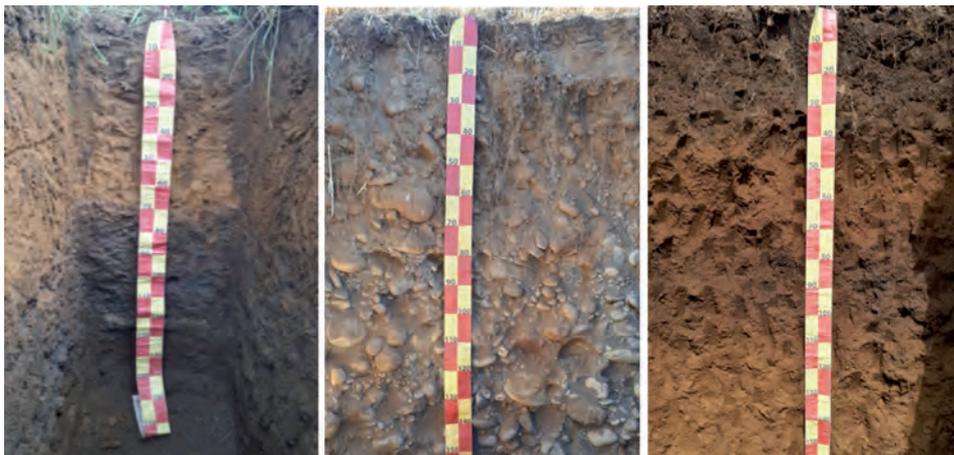


Foto 12.1. Uso de calicata para controlar el riego.

4. DETERMINACIONES CUANTITATIVAS DEL CONTENIDO HUMEDAD DEL SUELO

El control de humedad del suelo se puede realizar mediante el uso de instrumentos que pueden cuantificar ya sea la energía con que el agua está retenida en el suelo (potencial mátrico) o bien el contenido de humedad volumétrico del suelo. Ambos parámetros están íntimamente relacionados, ya que a medida que disminuye el contenido de agua del suelo, aumenta la energía de retención del agua por parte de la matriz del suelo (es decir, disminuye el potencial mátrico). Esta relación depende de la textura y estructura del suelo.

4.1 Tensiómetros y sensor Watermark

Entre los instrumentos que miden la energía del agua en el suelo se encuentran los tensiómetros (Figura 12.2) y los sensores en base a resistencia eléctrica (como los sensores Watermark (Figura 12.3)).



Figura 12.2. Tensiómetros instalados en aguacate.



Figura 12.3. Sensor Watermark.

Los tensiómetros miden la energía de retención del agua en el suelo hasta 60 a 70 kPa o centibares (cb), rango en que se encuentra más del 50% del agua disponible para la planta (HA). Los sensores de resistencia eléctrica pueden registrar valores mayores (0 a 200 kPa), sin embargo, muestran una baja sensibilidad a rangos altos de humedad en el suelo (0-40 kPa), que son comunes y normales en la práctica del riego localizado. En el Cuadro 1 se presentan los rangos utilizados para riego.

Aunque estos instrumentos pueden ser muy útiles, requieren de una instalación y mantención rigurosa, así como una localización muy precisa respecto del sistema radical de las plantas.

Cuadro 12.1. Estado del agua en el suelo según lectura del sensor Watermark (cb).

Estado del agua en el suelo	Lectura (centibares, cb)
Suelo saturado	0-10
Contenido óptimo de humedad	10-30
Valor al que se debe regar en microirrigación	30-40
Valor al que se debe regar en riego superficial	40-50
Rango de suelo seco	60-100
Rango de suelo muy seco	100-200

4.2. Sondas de monitoreo de humedad

Entre los equipos que miden humedad de suelo en los últimos años se está empleando sondas de monitoreo conocidos con el nombre de sondas capacitivas pudiendo ser esta del tipo FDR (Frequency Domain Reflectometry) o TDR (Time Domain Reflectometry), ambas basan su medición en la constante dieléctrica del agua, unas utilizan la frecuencia y otras el tiempo de la onda. Consiste en un capacitor que consta de dos placas de un material conductor que están separadas por una distancia muy corta. Se aplica un voltaje en un extremo de la placa y el material que está entre las dos placas almacena cierto voltaje. Un medidor lee el voltaje conducido entre las placas. Cuando el material entre las placas es aire, el capacitor mide 1 (la constante dieléctrica del aire). La mayoría de los materiales del suelo, tales como la arena, arcilla y material orgánico poseen una constante dieléctrica de 2 a 4. El agua tiene la constante dieléctrica más alta, que es de 78. Por lo tanto, variaciones del contenido de agua del suelo hacen variar la constante dieléctrica del sistema agua-suelo.

A mayor contenido de humedad mayor constante dieléctrica. Los cambios en la constante dieléctrica entonces permiten estimar indirectamente el contenido de agua del suelo.

Estos sensores disponen de una curva de calibración interna que les permite proporcionar sus lecturas como contenido volumétrico de agua en el suelo a la profundidad a la que está instalado. En fruticultura se utilizan principalmente sondas fijas de medición continua.



Figura 12.4. Sondas de capacitancia portátiles (FDR).

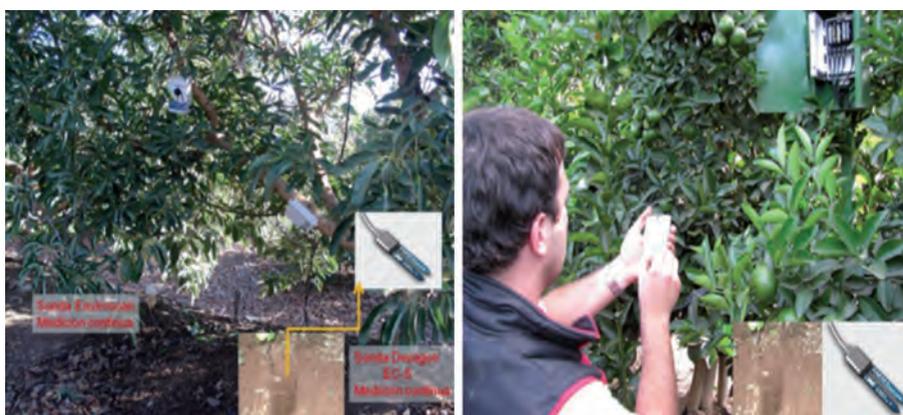


Figura 12.5. Sensores de humedad basados sondas capacitivas fijos con data logger para mediciones continuas.

Las sondas capacitivas fijas se conectan a un Datalogger, el cual permite mantener un registro y almacenamiento de datos continuo. Lo más común es que el registro de datos se realice cada 30 ó 60 minutos, los cuales pueden ser recuperados a distancia por telemetría para su análisis e interpretación. En este capítulo se tratará en forma más detallada las sondas capacitivas fijas.

5. EMPLEO DE SONIDAS CAPACITIVAS FIJAS DE MEDICIÓN CONTINUAS PARA MEJORAR LAS ESTRATEGIAS DE RIEGO

Una estrategia o programa de riego, que considere la evapotranspiración de referencia (E_{to}), el coeficiente de cultivo (K_c) y retención de humedad del suelo permite una buena aproximación a los requerimientos reales de riego del cultivo. Con el uso complementario de sondas de medición continua de la humedad del suelo (FDR) se puede mejorar la estrategia de riego logrado disminuir los volúmenes de agua que se pierden por percolación profunda, disminuyendo el consumo de energía eléctrica y optimizando la relación agua-aire en el suelo.

Los sensores se deben colocar a diferentes profundidades en áreas representativas del campo con el fin de dar seguimiento al movimiento del agua del suelo y a su agotamiento dentro de la zona radical. Esto permitirá monitorear la humedad y determinar el uso del agua por el cultivo a través del tiempo. La información entregada por los sensores de humedad nos permite ajustar las estrategias de riego.

Ya que los sensores miden el contenido de agua cerca de su superficie, es importante evitar las bolsas de aire y la compactación excesiva del suelo alrededor de los sensores para obtener lecturas más representativas del suelo natural.

Los datos obtenidos con los sensores y almacenados en un data logger se pueden visualizar en forma gráfica (Figura 12.6). Donde el eje Y corresponde al contenido de humedad del suelo y en el eje X al tiempo transcurrido durante la toma de datos. El contenido de humedad del suelo se puede expresar como volumen de agua (m^3 de agua/ m^3 de suelo), como altura de agua (mm/profundidad de suelo) o en porcentaje del agua aprovechable en el suelo (HA) entre capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP).

Los diferentes marca o modelos de sondas FDR expresan el contenido de humedad en algunas de estas unidades. Existen equivalencia entre ellas, por ejemplo un contenido de humedad expresado como $0,3 \text{ m}^3$ de agua/ m^3 de suelo equivale a 30 mm de agua/10 cm de profundidad de suelo. Cuando el contenido de humedad del suelo corresponde a CC el HA es 100%. Es necesario indicar que el contenido de humedad a PMP corresponde 0% de HA.

En la Figura 12.6, se muestra un ejemplo de variación del contenido de humedad del suelo, medido con una sonda capacitiva continua. Se observa que después de un riego o lluvia la humedad en el suelo aumenta para luego comenzar a disminuir y luego estabilizarse.

Cuando disminuye el contenido de humedad corresponde a pérdidas de humedad del suelo por evapotranspiración de las plantas o por drenaje en profundidad. Cuando la humedad del suelo no disminuye (está estable) puede corresponder a los periodos en que las plantas dejan de evapotranspirar (noche). Hay que recordar que después de un riego o lluvia cuando el suelo comienza a dejar de drenar este contenido de humedad corresponde a capacidad de campo (CC).

La humedad del suelo expresada en volumen de agua almacenada en el suelo varía entre 0 a $0,4 \text{ m}^3$ de agua/ m^3 de suelo o entre 0 – 40 mm/10cm de profundidad o entre 0 y 100% del HA. Algunos de estos sensores ya están precalibrados para usarse en una amplia gama de tipos de suelo. Sin embargo, para suelos con altos contenidos de arena (texturas gruesas) y suelos con altos contenidos de sal, la calibración estándar no será exacta. Por lo tanto, se deberán realizar ajustes en estos suelos.

Como criterio de interpretación general, un valor de 0 a $0,1 \text{ m}^3$ de agua/ m^3 de suelo indica el rango de un suelo seco o cerca del punto de marchitamiento permanente y un valor de $0,3$ a $0,4 \text{ m}^3/\text{m}^3$ representa el rango de humedad de un suelo de capacidad de campo a saturado. Sin embargo, este criterio puede variar según la textura del suelo. Por tal razón en condiciones de campo es útil regar a saturación y dejar drenar el suelo hasta capacidad

de campo (CC), y en estas condiciones definir qué lectura entregan los sensores a CC, para tomarla como referencia e interpretación de los valores que se midan.

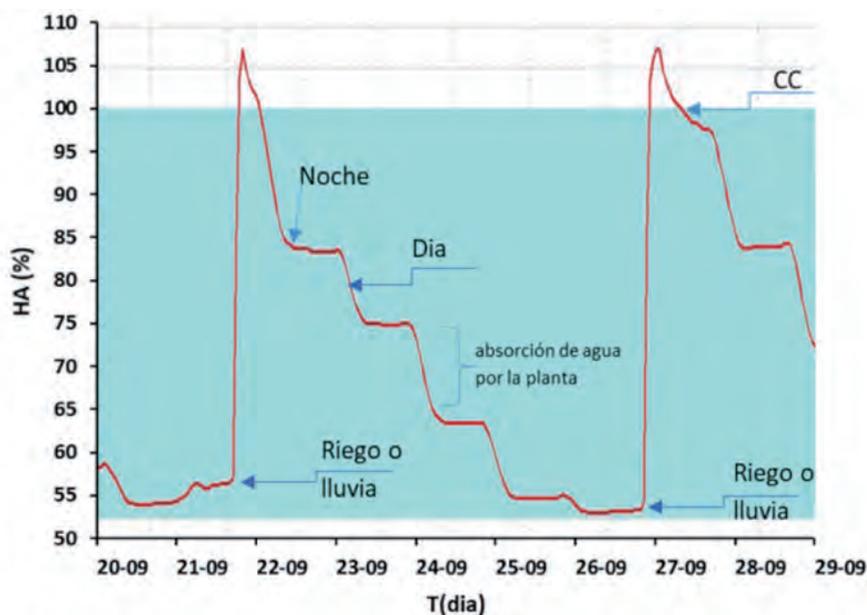
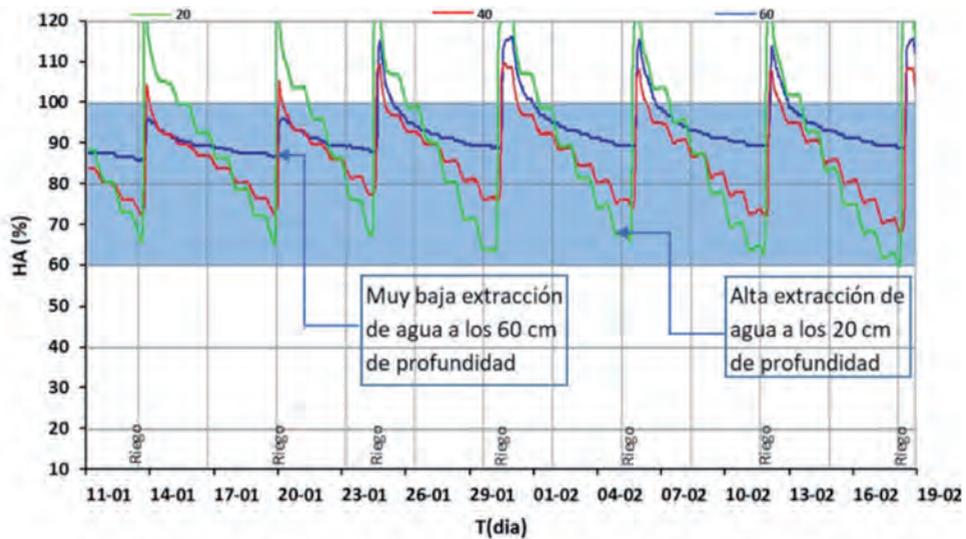


Figura 12.6. Graficas entregadas por los sensores de capacitancia (FDR). Eje y en porcentaje del HA (agua disponible para la planta). 100% es CC y 0% es PMP.

5.1. Humedad de suelo medida con los sensores FDR y Actividad Radical

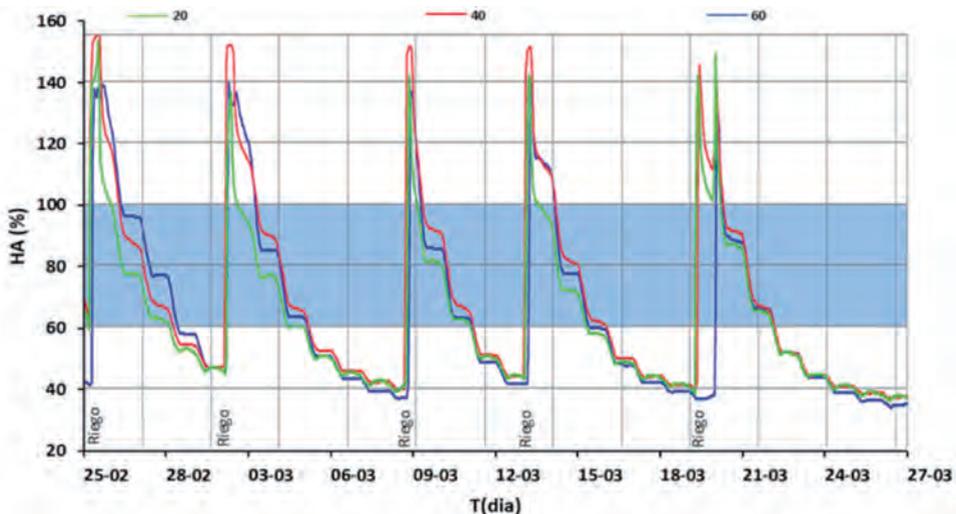
Cuando en el perfil de suelo hay una alta densidad de raíces y están activas, la disminución de la humedad del suelo es más rápida y de mayor magnitud que cuando el sistema radical es menos denso o está dañado. En la Figura 12.7 se puede observar la variación de la humedad del suelo medida con sensores FDR en un huerto cultivado con paltos. Las sondas están ubicadas a tres profundidades, la línea verde corresponde a una sonda instalada a 20 cm, la roja a 40 cm y la azul a 60 cm de profundidad de suelo. En la Figura 12.7, se puede observar que la humedad disminuye más rápidamente en la profundidad de 20 cm al compararla con lo que ocurre a los 60 cm. Es posible que el sistema radicular en los 20 cm de profundidad sea más denso y con mayor actividad radicular que en otras profundidades.



Variaciones de humedad, agua disponible total (HA) a los 20 cm verde, Rojo a los 40 cm y azul a los 60 cm. HA = 100% es Capacidad de campo y 0% es punto de marchitez permanente.

Figura 12.7. Variación del contenido de humedad en el suelo en un huerto de palto con baja actividad radicular en profundidad (60 cm) al compáralo con la profundidad de 20 cm .

En la Figura 12.8 se puede observar la variación de la humedad del suelo medida con sensores FDR en otro huerto cultivado con paltos. Las sondas están ubicadas a tres profundidades al igual que en el cultivo de la Figura 12.7, donde la línea verde corresponde a una sonda instalada a 20 cm, la roja a 40 cm y la azul a 60 cm de profundidad de suelo. La humedad disminuye en forma similar en las tres profundidades. Es posible que el sistema radical tenga la misma densidad y actividad en las diferentes profundidades. En resumen, cuando el sistema radical es homogéneo la disminución de la humedad en el suelo también lo es.

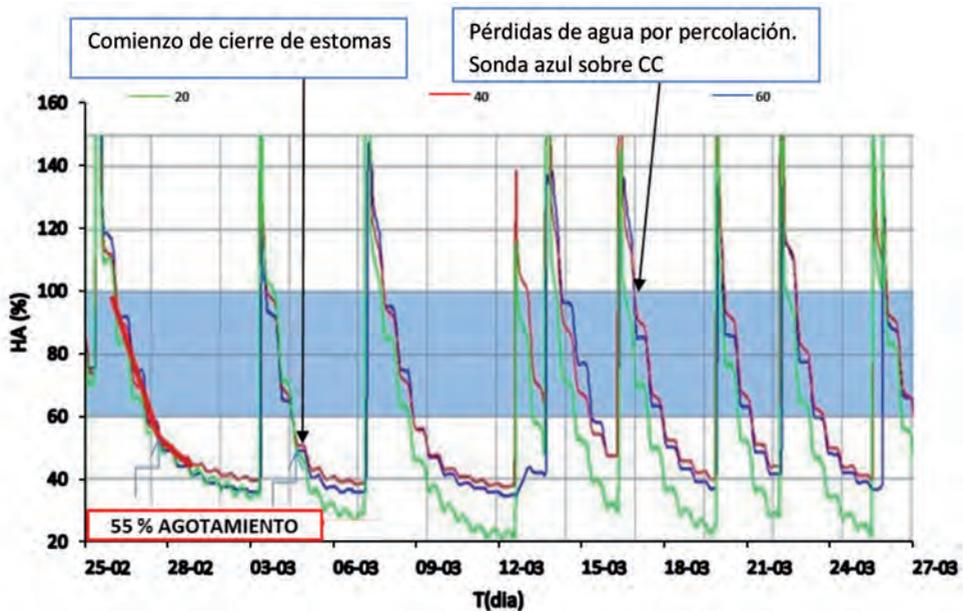


Variaciones de humedad, agua disponible total (HA) a los 20 cm verde, Rojo a los 40 cm y azul a los 60 cm. HA = 100% es Capacidad de campo y 0% es punto de marchitez permanente.

Figura 12.8. Variación del contenido de humedad en el suelo en un huerto de palto con alta actividad radicular en todo el perfil hasta los 60 cm de profundidad (línea azul).

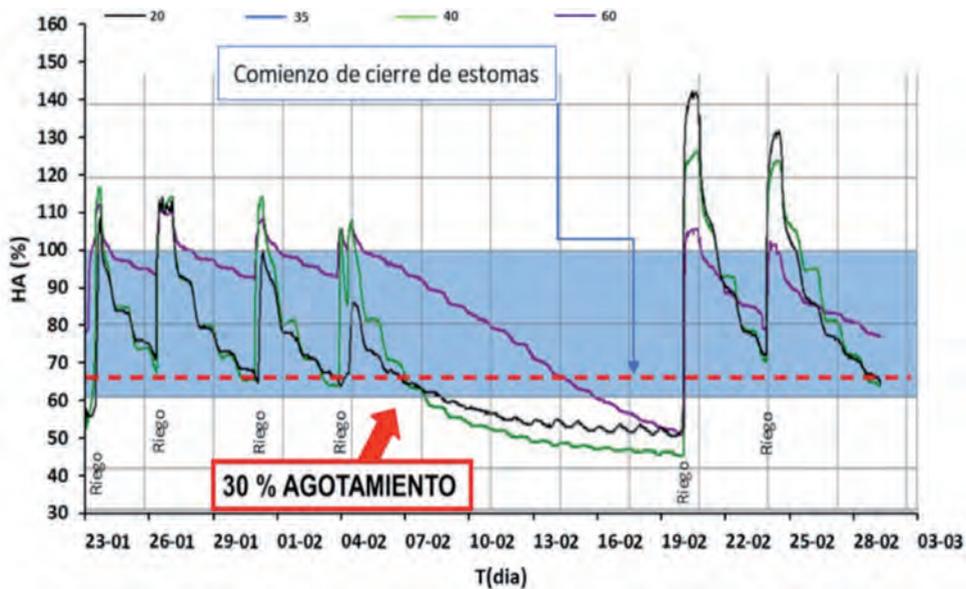
5.3. Cierre estomático y disminución de la transpiración por falta de agua en el suelo

A partir de la información entregada por estos sensores también se puede observar el momento en que las plantas disminuyen la transpiración. Este punto se produce cuando cambia la pendiente de la disminución de agua en el suelo (comienzo de cierre de estomas). En este caso (huerto de palto) se observa que las plantas dejan de extraer agua del suelo cuando se ha agotado casi un 55% del HA (Figura 12.10). En vides el cierre estomático comienza antes que en palto con el suelo más húmedo cuando se ha agotado un 30% del HA (Figura 12.11). Se puede observar que la estrategia de riego utilizada no es la adecuada. Los tiempos de riego son muy largos ya que la humedad en el suelo en la máxima profundidad radical (sonda azul) sobrepasa CC, perdiendo agua en profundidad, fuera de la zona de raíces y la frecuencia ente riego es muy distanciada ya que se observa cierre estomático antes que el próximo riego.



Variaciones de humedad, agua disponible total (HA) a los 20 cm verde, Rojo a los 40 cm y azul a los 60 cm. HA = 100% es Capacidad de campo y 0% es punto de marchitez permanente.

Figura 12.10. Comienzo de cierre de estoma en palto de un huerto de la IV región. Este huerto se riega muy distanciada después que comenzó el cierre estomático. Por otra parte, los tiempos de riego son excesivos ya que se observa pérdidas por percolación profunda (sonda azul).



Variaciones de humedad, agua disponible total (HA) a los 20 cm Negro, Verde a los 40 cm y Morado a los 60 cm. HA = 100% es Capacidad de campo y 0% es punto de marchitez permanente.

Figura 12.11. Comienzo de cierre de estoma en Vides. Este huerto se riega muy distanciado, en una oportunidad (4 al 20 de febrero), después de comenzado el cierre estomático.

En la Figura 12.12 se puede observar la variación de humedad en un huerto de arándano variedad Brightwell en Temuco (Chile), donde se percibe que esta especie comienza a cerrar estomas cuando se agotó un 25% de agua aprovechable para la planta (HA).

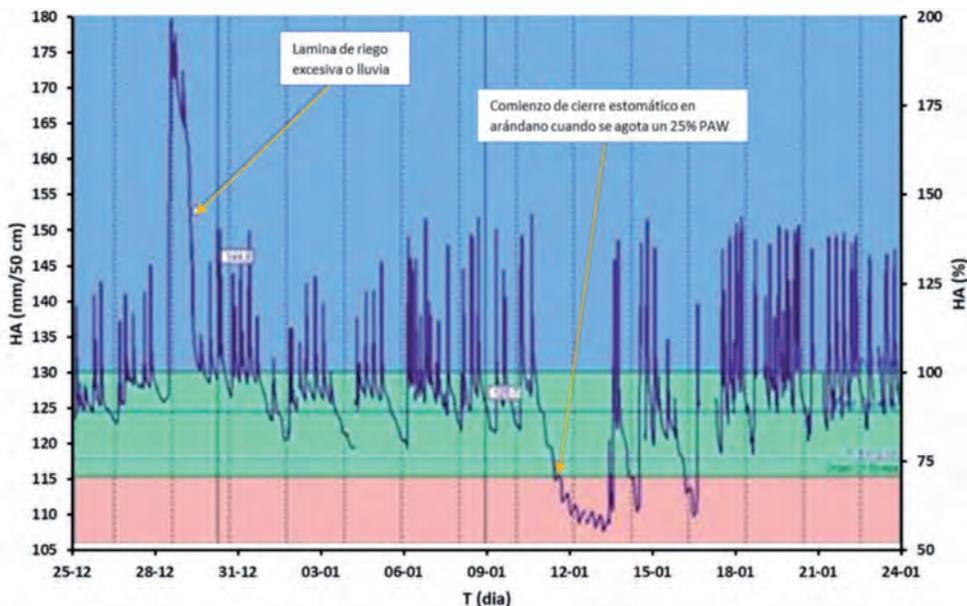
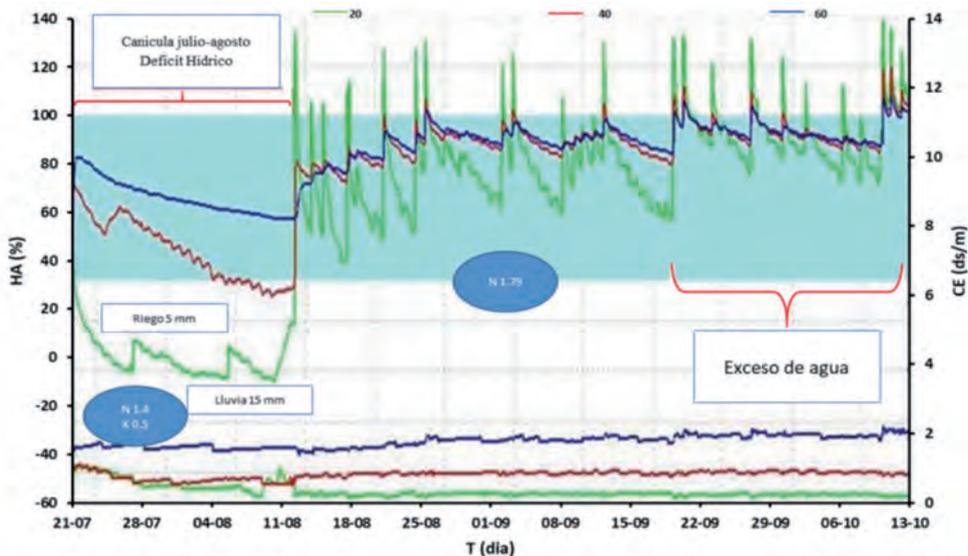


Figura 12.12. Comienzo de cierre de estomas en arándano var Brightwell en Temuco. Este huerto en una oportunidad se rego muy distanciado después que comenzó el cierre estomático. El contenido de humedad corresponde a la suma de los primeros 50 cm de suelo expresada en altura (mm).

5.4. Disminución la humedad en el suelo y el efecto en los nutrientes a nivel foliar

Cuando el suelo presenta falta de agua (estrés hídrico) las plantas cierran estomas disminuyendo la transpiración y por consiguiente la absorción de nutrientes especialmente lo que ingresan a la planta por flujo de masa. En la Figura 12.13, se puede observar un cultivo de caña de azúcar en El Salvador, donde en el mes de julio, el suelo se secó, llegando en los primeros 20 cm de suelo a contenidos de humedad cercano a PMP (0% HA). En este periodo el contenido foliar de nitrógeno y potasio estaba deficitario (1,4% y 0,5%, respectivamente). Después de recuperarse la humedad en el suelo producto de las lluvias entre agosto y septiembre, sin haber aplicado fertilizantes, los niveles foliares mejoraron, el nitrógeno aumento a 1,79% y el potasio a 1,08%.

En periodo sin lluvia el suelo se secó en demasía y los tiempos de riego no fueron suficientes para volver el suelo a capacidad de campo. En ese periodo los niveles de nutrientes foliares fueron bajos, dado los bajos contenidos de humedad del suelo y limitada absorción de agua de las plantas. Posteriormente, producto de las lluvias, estos niveles mejoraron notoriamente sin necesidad de aplicación de nutrientes en forma adicional.



Variaciones de humedad, agua disponible total (HA) a los 20 cm verde, Rojo a los 40 cm y azul a los 60 cm. HA = 100% es Capacidad de campo y 0% es punto de marchitez permanente.

Figura 12.13. Sensores en caña de azúcar en el Salvador. En periodo de lluvia el suelo se secó en demasía y los tiempos de riego no fueron suficientes para volver el suelo a Capacidad de campo. En ese periodo los niveles de nutrientes foliares fueron bajos por falta de agua, cuando la humedad en el suelo aumento estos niveles mejoraron notoriamente sin aplicación de nutriente en forma adicional.

En resumen, a través de los diferentes casos comentados, los sensores de capacitancia (FDR) permiten tener información cuantitativa de los niveles de humedad en el suelo, y poder determinar si los tiempos de riego fueron suficientes para volver el suelo a capacidad

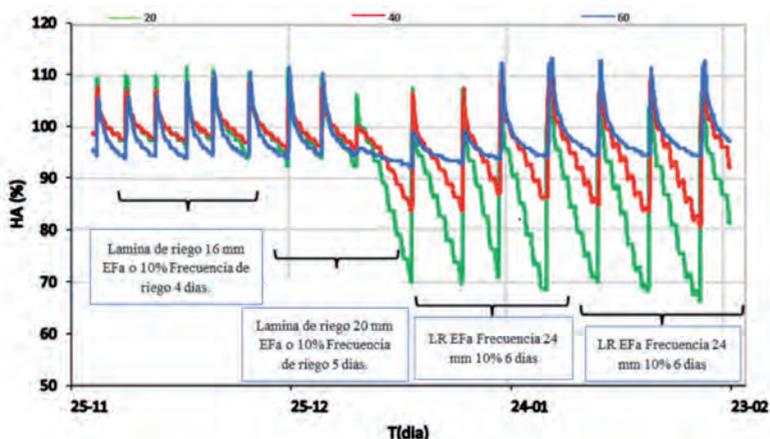
de campo, si el momento del riego es el adecuado, y conocer cómo está la actividad radical en las diferentes profundidades, entre otros factores de interpretación.

5.5. Ajuste de un programa de riego

Un buen programa de riego, que considere la evapotranspiración de referencia (Eto), el coeficiente de cultivo (Kc) y retención de humedad del suelo permite una buena aproximación a los requerimientos reales de riego del cultivo. Con el uso complementario de sondas de medición continua de la humedad del suelo (FDR) se puede mejorar la estimación de los requerimientos de agua del cultivo y con esto disminuir los volúmenes de agua que se pierden por percolación profunda, disminuyendo los costos debido a energía eléctrica y optimizar la relación agua – aire en el suelo.

En la Figura 12.14 se observa como a través del análisis de la humedad de suelo, obtenida a través de un medidor FDR, se puede ajustar un programa de riego. En este ejemplo se ajustó la lámina de riego y los requerimientos de lavados. El programa se inició con una lámina de riego de 16 mm (frecuencia de riego cada 4 días) y se terminó ajustándola a 24 mm (frecuencia de riego cada 6 días). Esto no significó un aumento o disminución de la cantidad de agua a aplicar, solo se ajustó la oportunidad del riego, lo que permitió aumentar la extracción de agua del suelo por las plantas (transpiración) ante un mismo volumen de agua aplicado. Esto se podría deber a que cuando los niveles de oxígeno son bajos la planta restringe la transpiración afectando sus procesos metabólicos.

En algunos huertos, por tratar de evitar asfixia radicular, los agricultores restringen en demasía la aplicación de agua, cayendo en estrés hídrico, con los consiguientes efectos en calibre y desarrollo vegetativo de los árboles. El conocimiento del suelo, la realización de un programa de riego y el control de la humedad del suelo sin duda evitará que se caiga en excesos o déficit de humedad, que afecten la producción.

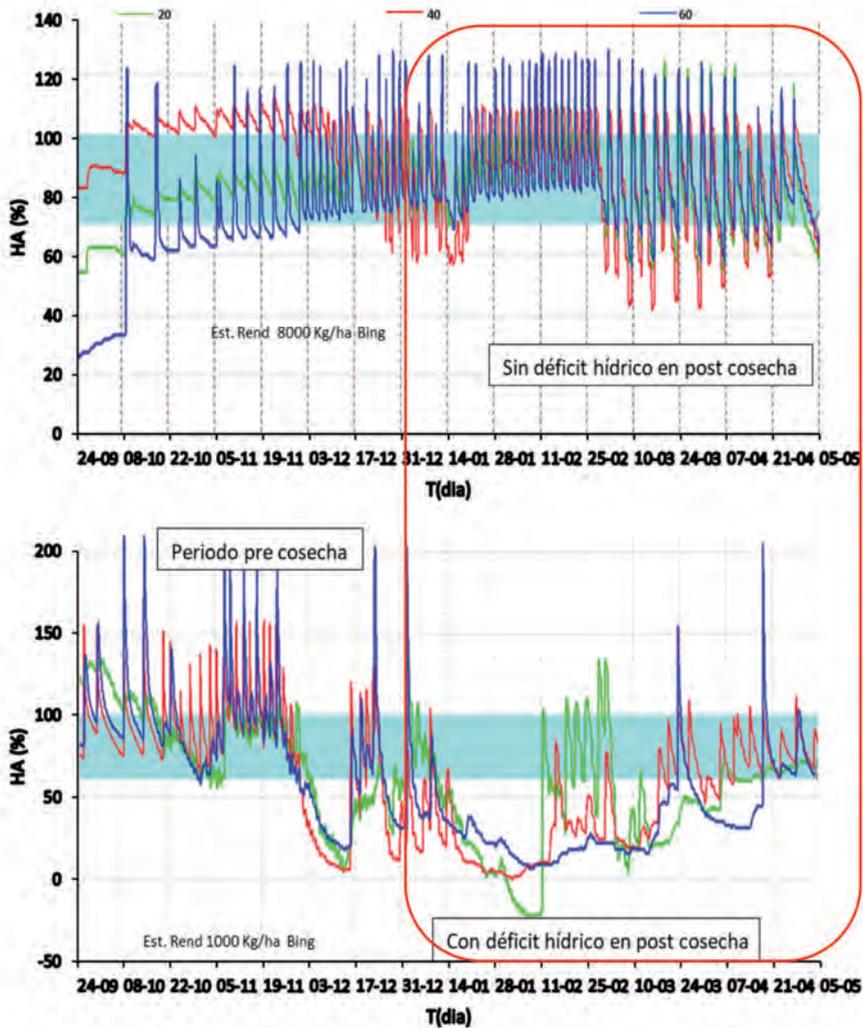


Línea verde agua disponible para las plantas a los 20 cm profundidad, rojo a los 40 cm profundidad y azul a los 60 cm profundidad. Entre 100 y 60% es el agua útil, la que corresponde al 40% de agotamiento del agua disponible para las plantas.

Figura 12.14. Ejemplo de ajuste de un programa de riego a través del uso de sensores de humedad continuos (FDR).

5.6. Comparación de estrategia de riego con sensores FDR

En muchas ocasiones se tienen dudas respecto al efecto de diferentes estrategias en el rendimiento y calidad de la fruta. Los sensores FDR puede ser de gran ayuda en el momento de comparar estrategias de manejo de riego ya que permiten llevar una estadística del manejo realizado. En la Figura 12.15 se puede contrastar dos estrategias de manejo de riego en cerezo, una con déficit hídrico en post cosecha y otra sin estrés en este periodo y su efecto en el rendimiento.



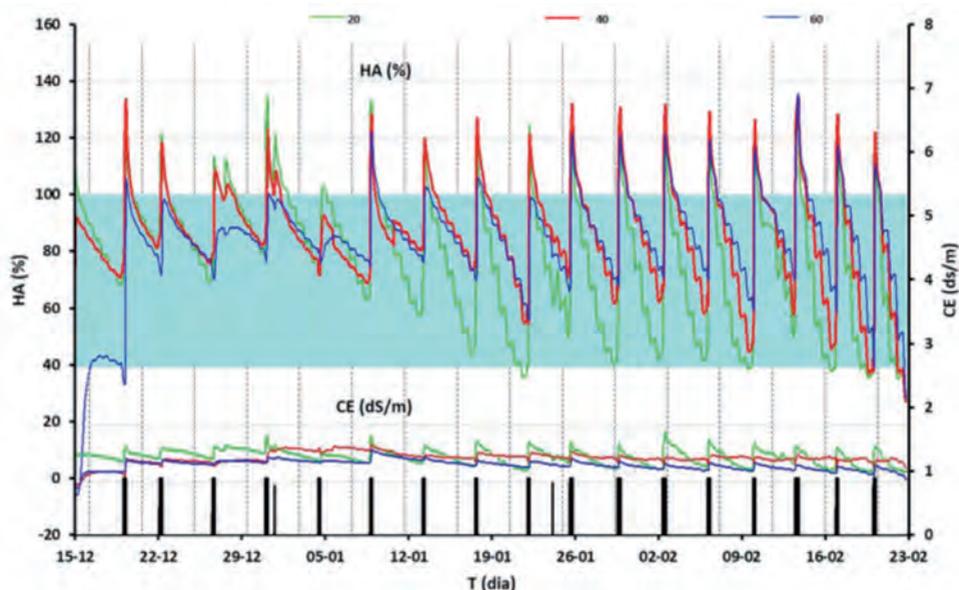
Variaciones de humedad, agua disponible total (HA) a los 20 cm verde, Rojo a los 40 cm y azul a los 60 cm. HA = 100% es Capacidad de campo y 0% es punto de marchitez permanente.

Figura 12.15. Control con sensores FDR la humedad del suelo en dos huertos de cerezo. Se observa el efecto sobre la humedad del suelo de las dos estrategias de riego en postcosecha.

5.7. Monitoreo de la salinidad del suelo con fines de aplicación de fertilizante y manejo del riego

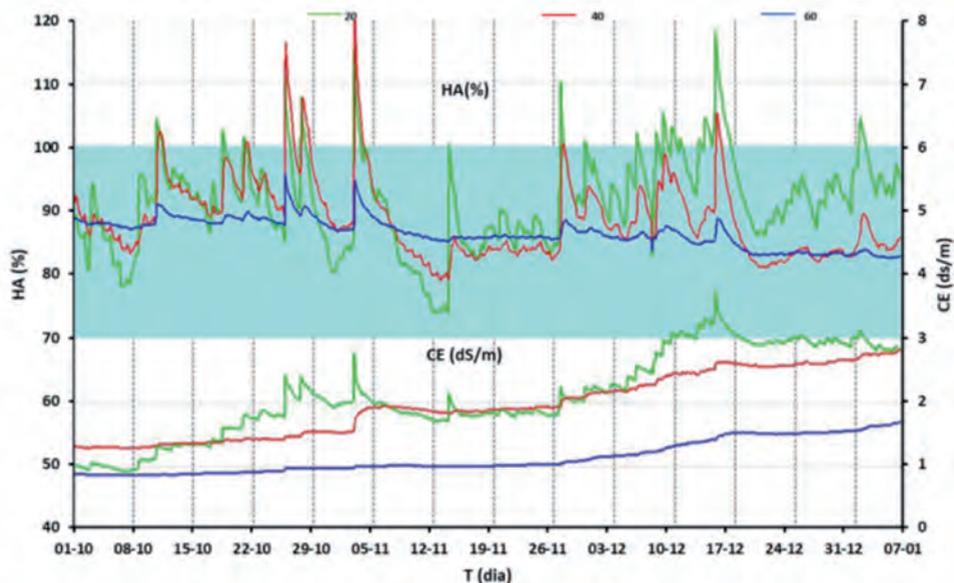
En monitoreo de la salinidad del suelo se realiza mediante el seguimiento de la conductividad eléctrica de la solución suelo (CE). Algunas sondas FDR permiten medir, además del contenido de humedad, la conductividad eléctrica que presenta la solución del agua en el suelo. El conocer la variación de la conductividad eléctrica del suelo puede ser útil para el manejo del riego sobre todo cuando utilizamos aguas salinas. Si la conductividad eléctrica registrada por los sensores aumenta, significa que las sales que trae el agua de riego se están acumulando en el suelo y se tendrá que aplicar láminas de mayor magnitud para lavar estas sales, evitando así daños en el cultivo. También conocer la conductividad eléctrica será útil para saber si los fertilizantes (son sales) que se aplican se están lavando o se están acumulando en el suelo. Esta información permitirá mejorar las estrategias de fertilización.

En la Figura 12.16 se presenta las variaciones del contenido de humedad del suelo y de la conductividad eléctrica en un huerto de paltos. En este caso se puede observar que al inicio de temporada que la CE presentaba, en los primeros 20 cm de suelo (línea verde abajo), valores de 1,5 dS/m y al final de la temporada estos disminuyeron a 1,07 dS/m. Esto indica que sales no se están acumulando en este estrato. Tampoco se están lavando ya que las CE a los 60 cm es estable durante toda la temporada (línea azul abajo). En resumen, en este ejemplo podemos ver que las sales no se están acumulando en el suelo y tampoco se están lavando fuera de la zona de raíces.



Arriba variaciones de humedad, agua disponible total (HA) a los 20 cm verde, Rojo a los 40 cm y azul a los 60 cm. HA = 100% es Capacidad de campo y 0% es punto de marchitez permanente. Abajo variaciones de la Conductividad eléctrica (CE) a los 20 cm verde, Rojo a los 40 cm y azul a los 60 cm. Las barras de color negro corresponden a datos obtenidos con un sensor de presión que indican el momento y magnitud de cada riego.

Figura 12.16. Monitoreo del contenido de humedad del suelo y de la conductividad eléctrica de la solución del suelo.



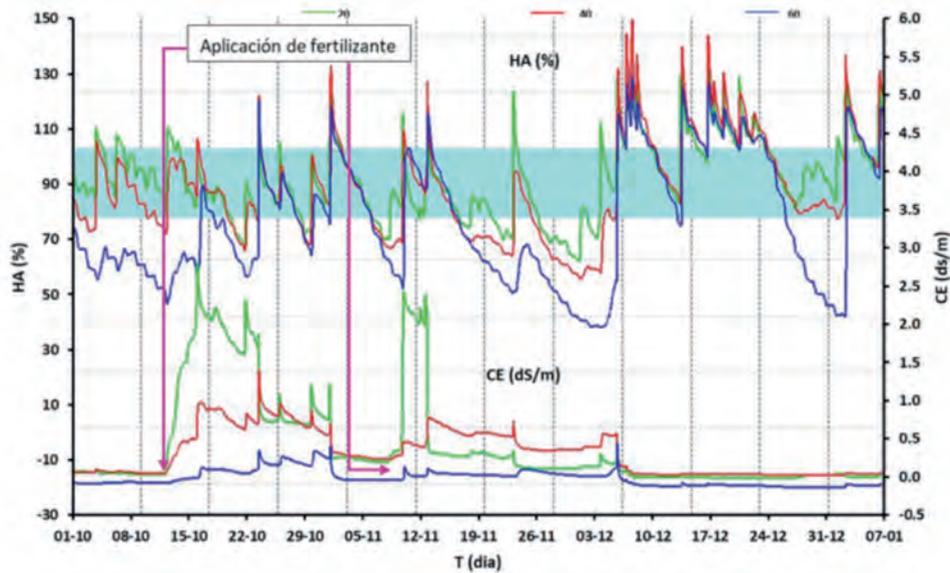
Arriba variaciones de humedad, agua disponible total (HA) a los 20 cm verde, Rojo a los 40 cm y azul a los 60 cm. HA = 100% es Capacidad de campo y 0% es punto de marchitez permanente. Abajo variaciones de la Conductividad eléctrica saturada (CE) a los 20 cm verde, Rojo a los 40 cm y azul a los 60 cm. Las barras de color negro corresponden a datos obtenidos con un sensor de presión que indican el momento y magnitud de cada riego.

Figura 12.17. Monitoreo del contenido de humedad del suelo y el aumento de la conductividad eléctrica de la solución del suelo.

En la Figura 12.17 se presentan las variaciones del contenido de humedad del suelo y de la conductividad eléctrica en un cultivo de banano. Se puede observar que en octubre, en los primeros 20 cm (línea verde abajo), el suelo presentaba valores de CE cercanos a 1,0 dS/m y a fines de diciembre estos aumentaron a 3 dS/m. Esto indica que las sales se están acumulando en este estrato, algo similar ocurre en las otras profundidades de suelo. Por otra parte, la lámina de riego que se está aplicando no llevan el suelo a CC en profundidad (línea azul superior). Es posible que la aplicación de láminas de riego pequeñas sean la causante de este aumento de CE en el suelo. Sin embargo, esta situación podría estar también relacionada por una mala calidad del agua de riego o una aplicación excesiva de fertilizante que al no ser lavados en profundidad están acumulando en el suelo, aumentando la CE. Esta información puede ser útil para ajustar las estrategias de riego en lo referente a las láminas de riego a aplicar y el lavado de sales.

En la Figura 12.18 se presenta las variaciones del contenido de humedad del suelo y de la conductividad eléctrica en un cultivo de banano en un suelo franco arenoso. En este caso, se puede observar que cuando se aplica el fertilizante aumenta la CE del suelo en el estrato de 20 cm de profundidad (línea verde de abajo). La CE en esta oportunidad aumenta de 0,4 dS/m (sin fertilizantes), a 2,5 dS/m (con fertilizantes). Luego se puede ver que con los riegos parte de este fertilizante es desplazado a estratos más profundos (40 cm, línea roja de abajo). También se aprecia cuando la CE del suelo vuelve a 0,4 dS/m,

producto de la absorción de los nutrientes por parte de la planta o por lixiviación a estratos más profundos. Esta información es muy útil para ajustar las estrategias de fertilización en cuanto a oportunidad y así como la cantidad a aplicar.



Arriba variaciones de humedad, agua disponible total (HA) a los 20 cm verde, Rojo a los 40 cm y azul a los 60 cm. HA = 100% es Capacidad de campo y 0% es punto de marchitez permanente. Abajo variaciones de la Conductividad eléctrica saturada (CE) a los 20 cm verde, Rojo a los 40 cm y azul a los 60 cm. Las barras de color negro corresponden a datos obtenidos con un sensor de presión que indican el momento y magnitud de cada riego.

Figura 12.18. Monitoreo del contenido de humedad del suelo y el aumento de la conductividad eléctrica de la solución del suelo. durante la aplicación de fertilizantes.

1. INTRODUCCIÓN

La raíz es un órgano fundamental para la planta, provee de agua, nutrientes y sirve como órgano de reserva. Su crecimiento es de tipo indeterminado, generando tejido nuevo permanentemente, el cual debe responder a una serie de estímulos tanto internos, vale decir propios de la planta, como externos (medioambiente). El crecimiento y la diferenciación radical, como su relación con el resto de la planta y el medio que la rodea, son procesos fuertemente vinculados con hormonas vegetales, generando finalmente la adaptación morfológica y fisiológica de las raíces al medio en que se encuentran. Estas relaciones fitohormonales también, le permiten a las raíces adaptarse tanto a estreses de tipo bióticos como abióticos. Como en el resto de los otros órganos de la planta, en el crecimiento y desarrollo radical están implicadas las 9 hormonas vegetales conocidas hasta el día de hoy: Auxinas, Giberelinas, Citoquininas, Etileno, Ácido Abscísico, Brasinosteroides, Jasmonatos, Ácido Salicílico y Estrigolactonas. Estas fitohormonas son moléculas endógenas que ocurren en forma natural y en bajas concentraciones. Para que una molécula sea considerada una hormona vegetal, debe cumplir tres requisitos: ser de estructura simple, tener efectos fisiológicos comprobados y conocerse su receptor. Este último, es específico de cada hormona vegetal.

2. AUXINAS

Las primeras observaciones, sugiriendo que una sustancia química modificaba el crecimiento de la planta frente a un estímulo lumínico, datan de final del siglo XIX. Charles Darwin y su hijo Francis publican en 1880 “The power of movement in plants” basado en observaciones de coleóptilos de *Phalaris canariensis*. En 1929, el investigador Fritz Went acuña la palabra auxina que proviene de la palabra griega *Auxein* y que significa “crecer”, por ser una sustancia que modula el crecimiento de la planta. Sin embargo, no es hasta en 1933, que los investigadores Kögl, Haagen-Smit y Erxleben descubren el ácido 3-indol acético, conocido por sus siglas en inglés IAA, la principal auxina activa en plantas superiores y vinculada con el crecimiento.

La biosíntesis para llegar a esta forma activa, viene de dos rutas: triptófano dependiente y triptófano independiente. Esta última, es menos conocida y hoy está siendo elucidada. La ruta triptófano dependiente, el aminoácido triptófano es convertido a IAA por dos vías: indol 3-piruvato (IPA) o indol 3-acetamida (IAM). Posteriormente, IAA debe entrar al núcleo de

⁽¹⁾Autor: Thomas Fichet L., Dr., Ing. Agrónomo., Fac. Cs. Agronómicas, Universidad de Chile

la célula y acoplarse con su receptor (específico de auxinas) que es una proteína soluble (TIR) para de esa forma activar, en ese mismo núcleo, genes relacionados con esta señal auxínica. Este receptor sólo reconoce IAA y otras formas de auxinas de síntesis activas producidas por el hombre como 2,4-D, NAA, etc., pero no reconoce otras formas activas de hormona vegetal. Si IAA no se acopla a TIR, será oxidado, conjugado con azúcares o aminoácidos en forma reversible, o irreversible en el retículo endoplasmático, para de esa forma dejar de ser bioactivo.

Esta fitohormona está implicada en la división, elongación y diferenciación celular, favoreciendo la formación de diferentes órganos tanto reproductivo como vegetativo de la planta. Es la principal hormona vegetal relacionada con los diferentes tropismos como gravitropismo o fototropismo. Su síntesis ocurre en diferentes partes de la planta que estén en activo crecimiento. El IAA sintetizado en el ápice de la planta, es transportado hacia la raíz vía floema. Desde su sitio de síntesis, la auxina se mueve bajo dos formas, una forma disociada y otra forma no disociada (IAAH), que difunde pasivamente a través de la membrana plasmática y la forma aniónica o disociada (IAA⁻) requiere de transportadores (proteínas de membrana) tanto de entrada, como de salida de la célula (Figura 13.1). Esto último, es conocido como transporte polar y, requiere de energía y oxígeno. Estos transportadores son proteínas que se generan en el núcleo de la célula y, posteriormente, se ubican en la membrana celular. Los transportadores de entrada (AUX1), están alrededor de toda la membrana celular. En cambio, las proteínas PIN están polarmente localizadas en la membrana celular y juegan un papel muy importante en el transporte polar de auxinas (PAT), generando el gradiente de auxinas a lo largo de la raíz. Los transportadores PIN (1, 2, 3, 4 y 7) son los encargados de dirigir el flujo de auxinas y se encuentran en la parte basal de las células del floema, permitiendo la salida de IAA. En cambio, los PIN (5, 6 y 8) son los encargados de almacenar en el retículo endoplasmático, formas de reserva o degradación de IAA.

También, existen otras proteínas que cumplen funciones como transportadores de salida de IAA (proteínas ABCB). Ellas, al igual que las proteínas AUX1, se encuentran alrededor de toda la célula y por lo tanto no dirigen el flujo de auxinas, como si lo hacen los transportadores PIN (Figura 13.1). El propio IAA, al entrar en la célula del floema, es el encargado de activar genes que codifican para estas proteínas transportadoras, vale decir el mismo IAA genera sus transportadores. Al llegar a la raíz, según la ubicación de los transportadores de salida (PIN), en la parte basal o en la parte lateral de la membrana celular, la auxina seguirá un trayecto vertical o lateral. El flujo vertical determina el crecimiento de la raíz principal, mientras que el flujo lateral induce la ramificación, mediante la formación de una raíz lateral (Figura 13.2). Según el flujo de auxinas, se establece un incremento de IAA en el meristemo apical, quien provee de información esencial para una correcta división celular y orientación de la raíz según gravedad (gravitropismo). En los últimos años, se demostró que las células del meristemo radical, también sintetizan IAA y que es indispensable para mantener el gradiente de auxina que favorece el crecimiento de la raíz. Desde este meristemo apical, el IAA regresa vía transporte polar hasta la zona donde ocurre la elongación celular, incorporándose al flujo principal que viene desde la parte superior de la planta (Figura 13.2). Es en éste retorno, en que las auxinas ejercen su efecto sobre la elongación celular (crecimiento) y diferenciación celular (sistema vascular).

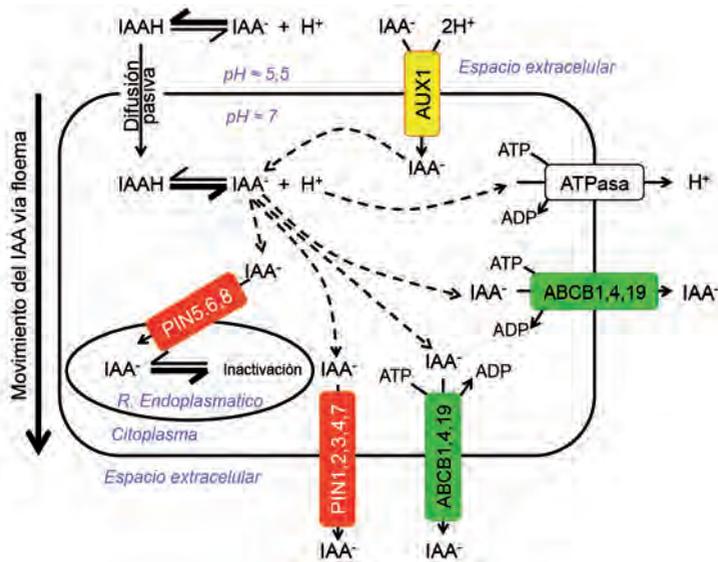


Figura 13.1. Esquema que muestra el movimiento de IAA vía floema entre células, en forma polar y apolar. Si bien existe difusión pasiva de IAA en forma IAAH (transporte apolar), la mayor parte del IAA se mueve en forma disociada (transporte polar), que incluye transportadores de entrada (AUX1) y transportadores de salida (familia PIN y ABCB). En un medio ácido (espacio extracelular), la forma que predomina es IAAH, pero en el citoplasma, cuyo pH es neutro o levemente básico, la forma IAA⁻ es la que predomina.

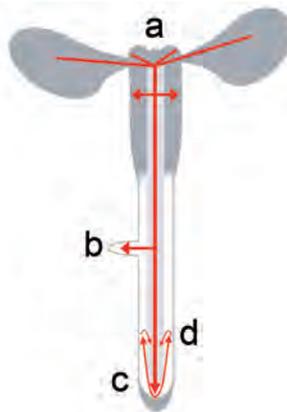


Figura 13.2. Esquema que muestra el movimiento de IAA desde su origen de síntesis (a), inicialmente en plántulas las primeras hojas, en forma basípeta hasta los lugares donde ejerce su acción: raíces laterales (b) y ápices de raíces (c). Esto implica capacidad de transporte hasta el meristemo radical (c) y retorno del flujo de IAA hacia arriba para ejercer su efecto sobre la zona de elongación celular (d), permitiendo de esta forma el crecimiento en longitud de la raíz.

Hoy por hoy, nadie pone en duda que las auxinas son las fitohormonas por excelencia en el crecimiento radical. Si bien permiten el desarrollo de la raíz principal, a mayor concentración de auxinas en raíces se favorece más la ramificación radical y se va limitando el crecimiento en longitud de la raíz principal. Lo que finalmente induce una mayor masa radical de la planta. Las auxinas también tienen la capacidad de generar raíces adventicias, favoreciendo de este modo la propagación por estaca de determinadas especies. Sin embargo, no se debe perder de vista, que las otras hormonas vegetales, aunque menos importantes en el crecimiento de este órgano, interactúan de forma sinérgica o antagónicas con las auxinas en la morfogénesis y desarrollo de las raíces.

3. CITOQUININAS (CK)

Entre 1940 y 1960, comienza la historia de las citoquininas (CK). Los investigadores Caplin y Steward (1948), descubren que la leche de coco (líquido del endospermo) promueve fuertemente la división celular. En 1956, los investigadores Skoog y Miller, descubren la 6-furfurilaminopurina (kinetina), producto del autoclave de esperma de arenque y que es un potente activador de la proliferación celular, pero no es una citoquinina natural. Finalmente, en 1963 los investigadores Miller y Letham identifican la zeatina del endospermo de granos inmaduros de maíz y que era ésta la citoquinina predominante en la leche de coco.

En las plantas superiores, las citoquininas activas son: isopenteniladenina (iP), *trans*-zeatina (tZ), *cis*-zeatina (cZ) y dihidrozeatina (dZ). La mayor parte de la biosíntesis de citoquininas ocurre en los plastos vía metileritritol fosfato (MEP), pero también ocurre síntesis en el citoplasma vía mevalonato (MVA). Esta última ruta, genera mayoritariamente la forma activa (cZ). En la síntesis de citoquininas, el primer paso es la unión entre un nucleótido de adenina y dimetilalilpirofosfato (DMAPP). Esta reacción está catalizada por una enzima clave en la ruta de las citoquininas, isopentenil transferasa (IPT). Estas 4 formas activas de citoquininas, están compuestas por un anillo purina acoplado a una cadena lateral isoprenoide en el nitrógeno amínico de la posición 6 del anillo purina. Se les conoce como citoquininas isoprenoicas. Existen otras formas activas que también tienen el anillo purina pero tienen adosado un anillo aromático, como es el caso de la benciladenina (BA o 6-BAP) y son conocidas como citoquininas aromáticas.

Tanto las citoquininas isoprenoicas como las aromáticas, se acoplan a receptores específicos que sólo reconocen citoquininas activas. Estas proteínas receptoras son: CRE1, AHK2, AHK3 y AHK4. En los últimos años, se ha demostrado que estos receptores están en la membrana del retículo endoplasmático y no en la membrana celular como se pensaba antes. El acople entre una citoquinina activa y el receptor, desencadena la fosforilación de proteínas fosfotransferasas (AHP) y posteriormente otras proteínas conocidas como factores de respuesta a citoquininas (ARR), al interior de la célula, quienes finalmente activarán genes dependientes de ésta señal citoquininica en el núcleo de la célula. Los derivados de fenilureas presentan actividad como citoquininas activas, acoplándose también a los receptores citoquininicos. Estos compuestos son producidos por el hombre y no se encuentran en forma natural en las plantas. Actualmente, los más utilizados en la agricultura son tiazurón (TDZ) y forclorfenurón (CPPU). Las formas endógenas de citoquininas activas pueden conjugarse con azúcares o aminoácidos en

forma reversible (almacenamiento) o irreversible (catabolismo). Además, también pueden ser degradadas en forma irreversible vía la enzima citoquina oxidasa (CKX).

Originalmente, las citoquininas fueron definidas como hormonas vegetales fuertemente vinculadas con la proliferación celular y formación de callos (organogénesis) junto a auxinas. Es por esto, que los órganos con mayores niveles endógenos de citoquininas, son aquellos que presentan fuerte división celular como son los meristemos y órganos inmaduros. En la actualidad, se sabe que las citoquininas, al igual que todas las otras fitohormonas, participan durante todo el desarrollo de la planta, tanto en la parte vegetativa como reproductiva.

Entre los procesos en que intervienen las citoquininas se puede señalar: promoción de la expansión celular, activación de la fotosíntesis, retraso de la senescencia, ramificación y nutrición. En este último punto, se ha demostrado que la síntesis de citoquininas se ve afectada por la fuente de nitrógeno disponible en la planta. Los nitratos inducen la activación de genes que codifican para la enzima isopentil transfera (IPT), favoreciendo de este modo la biosíntesis de CK en raíces y su posterior transporte vía xilema a la parte superior de la planta y/o su síntesis en hojas. A su vez las citoquininas promueven o activan la enzima nitrato reductasa, la cual controla el paso de nitrato a amonio (Figura 13.3). Por el contrario ABA bloquea este paso cuando existe mayor síntesis de esta fitohormona en respuesta a algún tipo de estrés.

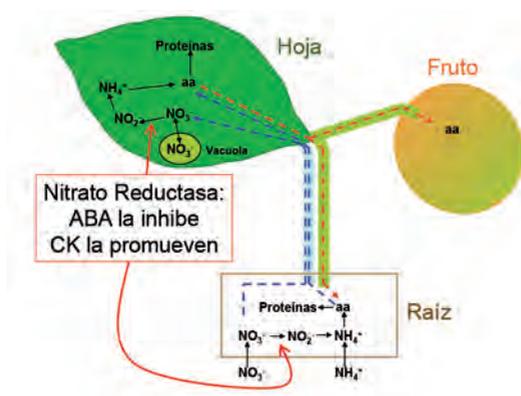


Figura 13.3. La enzima nitrato reductasa es promovida por CK pero inhibida por ABA. Este paso es necesario para la síntesis de aminoácidos los cuales se desplazan hacia la raíz y el fruto desde la hoja vía floema o desde la raíz vía xilema.

Si bien se conocen algunas proteínas transportadoras de membrana citoquininicas (PUPs, ENT y ABCG14), al día de hoy, los trabajos científicos siguen siendo contradictorios sobre la existencia o no de transporte a larga distancia de citoquininas.

Diversos trabajos científicos han señalado que, muchos efectos fisiológicos de las citoquininas pueden explicarse por su interacción con las auxinas. En el caso de la raíz, su crecimiento se incrementa vía auxinas cuando disminuyen los niveles endógenos de citoquininas. Si bien en el meristemo radical se produce una cierta cantidad de CK, por ser una zona de fuerte división celular, no es el lugar de mayor síntesis de esta fitohormona, como si lo son otras partes de la planta en fuerte división celular: meristemo apical, yemas laterales en brotación y ovarios en desarrollo. En vides var. Cabernet Sauvignon en crecimiento, los niveles endógenos (nanogramos por gramo de peso fresco) de zeatinas en meristemo apical, yema en brotación y meristemo radical son: 21,3; 10,9 y 8,1 ng/g PF respectivamente. Este resultado y otros publicados desde el año 2000 demuestran que no son las raíces los principales órganos productores de citoquininas, como se pensaba antes.

A la fecha, existen un gran número de publicaciones científicas que señalan a las citoquininas como reguladores negativos del desarrollo radical y de la formación de raíces laterales a partir de determinadas concentraciones. Ensayos realizados con aplicaciones, vía riego, de concentraciones creciente de TDZ o CPPU en vides var. Red Globe, injertadas sobre diferentes portainjertos, demostró que a medida que aumentaba la concentración del fitoregulator citoquininico, se inhibía el crecimiento radical (Figura 13.4).

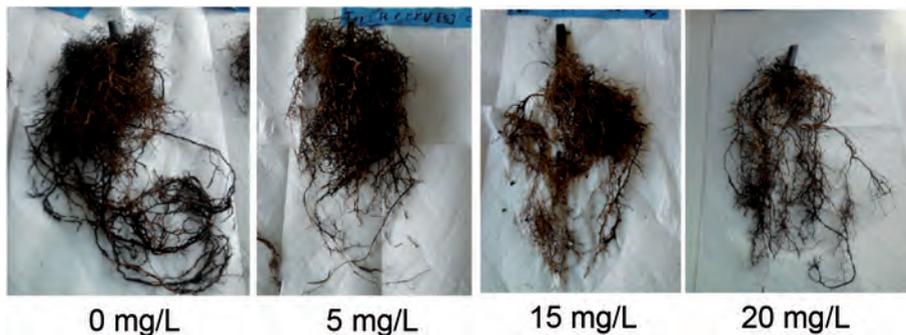


Figura 13.4. Desarrollo radical de vides var. Red Globe injertadas sobre portainjerto Freedom y tratadas con diferentes concentraciones forclorfenurón (CPPU) vía riego.

La forma en cómo las citoquininas reducen el crecimiento radical, es bloqueando el transporte polar de auxinas. Como se mencionó en auxinas, el IAA a medida que pasa de una célula a otra del floema, va generando sus propios transportadores de salida (PIN). Sin embargo, las CK bloquean en el núcleo de la célula del floema la producción de estos transportadores y de esta forma, se reduce el transporte de IAA, transporte necesario para promover la ramificación de les sistema radical (Figura 13.5).

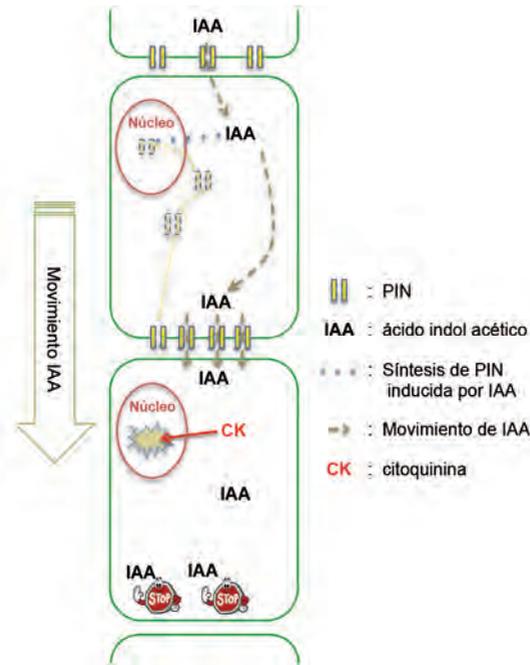


Figura 13.5. Esquema que muestra el movimiento de IAA en raíces vía transporte polar y su relación con CK. El propio IAA va generando sus transportadores de salida (PIN) a medida que pasa de una célula a otra. Sin embargo, las citoquininas (CK), bloquean la producción de estos transportadores, a nivel del núcleo de la célula. De esta forma, se frena el transporte polar de IAA y con ello el crecimiento de las raíces que depende del movimiento de auxinas.

En condiciones de estrés (sobretudo hídrico o salino), se produce una sobre producción de especies reactivas al oxígeno, conocidas por sus siglas en inglés ROS, entre ellas superóxido (O_2^-) y peróxido de hidrogeno (H_2O_2), generando un daño oxidativo tanto en el tejido aéreo como radical de la planta. Esto perjudica el normal crecimiento de las raíces, provocando un menor desarrollo radical. Para evitar o disminuir esta producción de ROS, se activan a nivel celular enzimas antioxidantes como son superóxido dismutasa (SOD), catalasa (CAT), etc. y compuestos antioxidantes como ascorbato (ASA) y glutatión (GSH), que logran suprimir o disminuir este daño oxidativo. Una planta al estar sometida a este tipo de estrés, dependiendo del grado de estrés producido, genera en los meristemas radicales un aumento del contenido de ácido abscísico (ABA), el cual bloquea la síntesis de CK. Sin embargo, trabajos recientes señalan que un aumento de las citoquininas (endógenas o vía aplicación exógena), en raíces de plantas estresadas, podrían bloquear la producción de ROS, al inducir síntesis de enzimas y compuestos antioxidantes, recuperando de esta forma el desarrollo radical.

4. GIBERELINAS (GA)

En Japón las plantas de arroz eran atacadas por el hongo *Fusarium (Gibberella) fujikuroi*, induciendo el alargue excesivo de los entrenudos del tallo, enfermedad conocida como “Bakanae” (planta loca). Posteriormente, al inicio de los años 50, se aíslan las sustancias que producían este hongo y se decidió llamarlas giberelinas (GA) en relación al nombre del hongo. Las GA están formadas por un anillo *ent*-giberelano de 20 o 19 carbonos. Paralelamente, se descubrió que las plantas también producían estos mismos compuestos. Hoy se conocen más de 137 giberelinas, pero en su mayor parte son precursoras sin actividad o formas degradadas también inactivas.

Las GA son producidas desde un compuesto común, el geranilgeranil difosfato (GGDP), originando dos rutas en los vegetales: la 13-hidroxilación cuyas formas activas son GA₁ y GA₃ y, la ruta de la no-hidroxilación cuyas formas activas son GA₄ y GA₇. Posteriormente, estas formas activas pueden ser oxidadas irreversiblemente o conjugadas en forma reversible o irreversible según sea el caso. Esto, como en todas las hormonas vegetales, le permite a la planta regular sus formas activas de una fitohormona, conocido como “homeostasis”. Solamente estas 4 formas activas se pueden acoplar al receptor de giberelinas (GID) que está dentro del núcleo de la célula y de esa forma activar genes dependiente de GA. En gramíneas, existen otras dos formas activas (GA₅ y GA₆), pero vienen desde las mismas rutas de biosíntesis que las otras formas activas.

Las giberelinas están presentes durante todo el ciclo de la planta y en todos sus órganos. Participan activamente en la elongación y división celular, germinación de semillas, etc. En raíces, las giberelinas promueven el crecimiento en longitud de la raíz principal, pero inhiben la ramificación lateral inducida por auxinas. Las GA son sintetizadas en las células del meristemo radical, zona donde ejercen una fuerte actividad. En cambio, en otras células de la raíz tienen una baja presencia. Las giberelinas se acumulan en la endodermis de la zona de elongación de la raíz, estimulando primero el alargue de las células y posteriormente su división. Este proceso es el que permite que la raíz principal crezca en longitud (Figura 13.6).

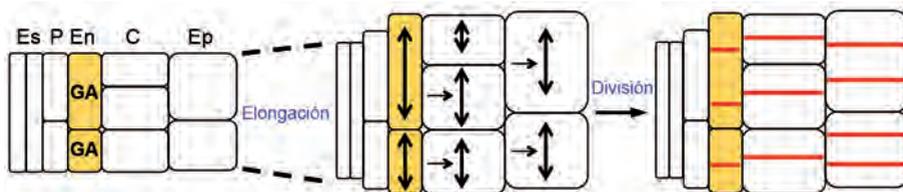


Figura 13.6. Esquema que muestra como las giberelinas (GA) regulan el crecimiento radical. La zona naranja corresponde a las células del endodermis, donde se genera la síntesis de GA que promueven la elongación celular de sus propias células y células vecinas del córtex (flechas) y posteriormente, la división de esas células (líneas rojas). Estela o haces vasculares (Es), periciclo (P), endodermis (En), córtex (C) y epidermis (Ep).

Aplicaciones de inhibidores de la síntesis de giberelinas del tipo triazoles, al suelo, como son: paclobutrazol o uniconazol, según la cantidad aplicada, pueden inhibir el crecimiento en longitud de la raíz principal pero por el contrario favorecer la ramificación radical y con ello una mayor masa de raíces. Trabajos realizados en aplicaciones de paclobutrazol al suelo en plantas del portainjerto de cítricos, "Troyer citrange", han demostrado que concentraciones superior a 5 mg/L, aumentan el número de raíces laterales en desmedro del crecimiento de la raíz principal en longitud.

5. BRASINOSTEROIDES (BR)

En 1979, Grove y colaboradores aíslan de polen de *Brassica napus* L., un compuesto que era una lactona esteroidal con actividad promotora de crecimiento en plantas. Posteriormente, en los años 90 se aíslan y se van descubriendo las rutas de este nuevo tipo de hormonas vegetales y se decide llamarlos brasinosteroides (BR). Están muy relacionados con la elongación y división celular, además de estar implicados en respuesta a estrés de tipo biótico y abiótico. Se les encuentra en toda la planta: semillas, frutos, hojas, yemas y raíces. El precursor de los BR es el campesterol y de ahí se originan las rutas de síntesis hacia las formas activas: la oxidación temprana o tardía del C-6, oxidación en el C-22 y oxidación en el C-23. Todas estas rutas convergen hacia catasterona, la cual finalmente se convierte en brasinolido (BL), siendo este último la forma más activa de los brasinosteroides y que se acopla al receptor de brasinosteroides (BRI1). El acople entre el brasinolido y su receptor, desencadena la activación de factores de respuesta a brasinosteroides, proteínas BZR1/2, al interior de la célula, quienes finalmente activarán genes dependientes de ésta señal en el núcleo de la célula. Al igual que en los casos anteriores de fitohormonas, las formas activas de BR, se inactivan mediante hidroxilaciones y conjugaciones a nivel celular. A nivel de la raíz, los brasinosteroides generan un crecimiento muy similar al de las giberelinas, esto quiere decir que promueven el crecimiento en longitud de la raíz principal mediante elongación celular, pero disminuyen la ramificación radical. Para que exista una mayor ramificación radical, las auxinas deben bloquear parte de la síntesis de BR en la raíz y de esa forma mejorar crecimiento. La mayor síntesis de BR, en raíces, sería en las células del epidermis (siendo las células que se alargarían) y no en las del endodermis, como ocurre con GA. Brasinosteroides, al igual que giberelinas, tienen una relación antagónica con las auxinas en el crecimiento de las raíces, lo que no ocurre en el meristemo apical, donde actúan las tres de forma sinérgica para inducir crecimiento de brotes.

6. ÁCIDO ABCSÍCSICO (ABA)

Las plantas al ser organismo sésiles, poseen mecanismos más eficientes que los animales para adaptarse a distintos tipos de estreses ambientales. Para ello la planta activa una serie de genes que responde a estas alteraciones. La fitohormona que juega un papel crucial en estos procesos de adaptación, es el ácido abscísico (ABA). Originalmente, el ABA fue identificado en la década de los 60 como la hormona vegetal implicada en dormancia de semillas y abscisión de frutitos de algodón. La aplicación exógena de ABA, induce la expresión de genes específicos vinculados con estrés, los mismos genes que se activan en una condición de estrés ambiental. Las plantas responden a un estrés ambiental con

una sobreproducción de ABA y activando la respuesta fitohormonal a ABA. La síntesis de ABA se produce en los plastidios y en todos los órganos de la planta. Su ruta de síntesis comienza desde los carotenoides (compuestos de 40 carbonos), para dar origen a un compuesto de 15 carbonos, ABA. La enzima clave en la ruta del ácido abscísico, es NCED (9-*cis*-epoxicarotenoide dioxigenasa). Ella está encargada de cortar los carotenoides de 40C en un compuesto de 25C y otro de 15C (Xantofila) precursor de ABA. La regulación endógena (homeostasis) de los niveles de ABA, ocurre vía reacciones de hidroxilaciones dando origen a compuestos inactivos (ácido faseico y ácido dihidrofaseico). Pero también, puede ocurrir conjugación de ABA con éster de glucosa, originando un compuesto sin actividad (ABA-GE), pero que sería la forma móvil de ABA dentro de la planta. Al llegar al lugar de acción, este conjugado puede ser desconjugado mediante una β -glucosidasa dando origen nuevamente a ABA. El ácido abscísico se acopla a su receptor constituido por una serie de proteínas cuyo conjunto es conocido como PYR/PYL/RCAR y de esa forma, mediante fosforilaciones, activar a nivel del núcleo de la célula genes vinculados con esta señal fitohormonal como son: cierre estomático, dormancia en semillas o abscisión de hojas y frutos. ABA, es la hormona vegetal más relacionada con respuesta a estrés (salino, hídrico o por temperatura). A nivel de raíces, la mayor síntesis de ABA ocurre en las células de la endodermis cercanas al meristemo apical y desde ahí, a partir de cierta concentración endógena, puede frenar el crecimiento radical, sobretodo la ramificación lateral de raíces, dado que bloquea el proceso de diferenciación celular (Figura 13.7).

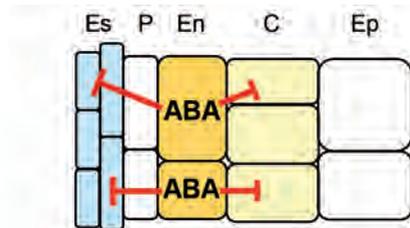


Figura 13.7. La síntesis de ABA se produce en las células del endodermis (naranja) y se moviliza tanto hacia las células de los haces vasculares (celestes), como las células del córtex (amarillo) para así bloquear el crecimiento celular y con ello el desarrollo radical. Estela o haces vasculares (Es), periciclo (P), endodermis (En), córtex (C) y epidermis (Ep).

Durante mucho tiempo se pensó que, producto de una falta de agua en el suelo, se generaba ABA en las raíces de la planta estresada y que posteriormente viajaba vía xilema a la parte aérea, para ejercer sus efectos: cierre estomático, maduración de frutos, abscisión de órganos (hojas, flores y/o frutos), entre otros. Sin embargo, a partir de 2007 varios trabajos científicos, señalan que el ABA, si bien se incrementaba en las raíces producto de un estrés hídrico o salino, la mayor síntesis de ABA se produciría en la parte aérea de la planta y no en las raíces. Esta teoría tomó importancia, cuando varios investigadores descubrieron que producto de un estrés hídrico (aumento del potencial xilemático), los niveles de carotenoides aumentaban en la parte aérea de la planta, incrementando la síntesis de ABA en los tejidos aéreos (recordar que la biosíntesis de ABA viene desde la ruta de los carotenoides). El aumento de esta hormona vegetal induce el cierre estomático parcial o total dependiendo del grado de estrés y de los niveles endógenos de ABA en hojas. Esta fitohormona, sintetizada en hojas, es rápidamente transportada vía floema a la

raíz para ejercer su efecto sobre el sistema radical de la planta (Figura 13.8). En definitiva, si bien hay síntesis de ABA en las células de las raíces, producto de un estrés hídrico, el aumento de ABA en este órgano subterráneo es producto de un aumento significativo de la síntesis de ABA en hojas y que posteriormente viaja a la raíz.

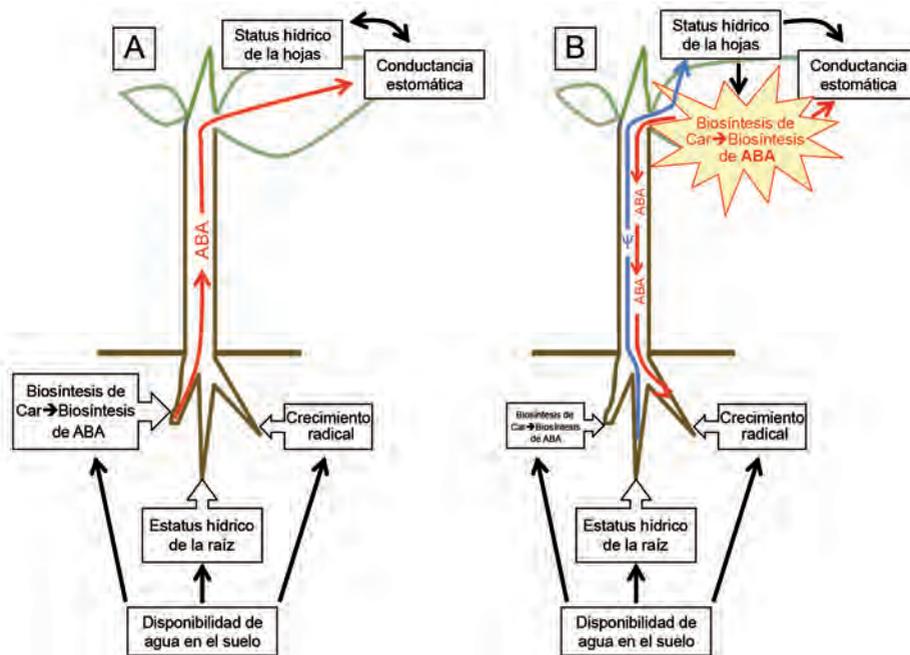


Figura 13.8. A) Tradicionalmente se pensaba que producto de la falta de agua en el suelo, aumentaba la biosíntesis de ABA, vía biosíntesis de carotenoides (Car), en las células de las raíces y de ahí se transportaba a la parte aérea, a través xilema, para inducir cierre estomático. B) En la actualidad se sabe que la falta de agua en el suelo, produce una disminución del potencial xilemático, el cual es captado en la hoja lugar donde se produce una mayor biosíntesis de carotenoides y con ello un aumento en la síntesis de ABA, induciendo cierre estomático. Al mismo tiempo, ABA baja vía floema para ejercer su efecto sobre la raíz.

7. ETILENO

Los primeros trabajos sobre la ruta de síntesis del etileno fueron iniciados por Adams y Yang hace ya más de 40 años atrás. El precursor biológico del etileno en plantas es la metionina (Met.), un aminoácido esencial para la síntesis de proteínas. La ruta de biosíntesis del etileno es bastante simple a diferencia de las otras hormonas vegetales. Además, el etileno es la única hormona vegetal en forma gaseosa. Desde la Met. se pasa a otro compuesto que es el S-adenosilmetionina (SAM). Este compuesto también es precursor de otras rutas metabólicas como son las poliaminas. SAM pasa al ácido 1-aminociclopropano-1-carboxílico (ACC), a través de la enzima ACC sintasa (ACS). Finalmente, el ACC pasa a etileno por medio de la enzima ACC oxidasa (ACO), enzima que tiene como requisito presencia de oxígeno para poder formar etileno. El etileno, al entrar en la célula se acopla a un complejo de receptores (ETR1, ETR2, ERS1, ERS2 y

EIN4) ubicados en la membrana del retículo endoplasmático. De ahí se produce un cambio de estructura de determinadas proteínas, que finalmente activan genes dependientes de etileno en el núcleo de la célula. A nivel de la raíz, el etileno está implicado en la inducción de raíces laterales, adventicias y pelos radicales. Sin embargo, el etileno por sí solo no logra un aumento de la masa radical, lo hace vía auxinas. La forma de actuar del etileno es promoviendo movimiento de auxinas al incrementar la síntesis de transportadores de salida (PIN), junto con un aumento en la síntesis propiamente tal de IAA. Esta hormona vegetal, al igual que las auxinas, bloquea el crecimiento en longitud de la raíz principal, favoreciendo la ramificación.

En condiciones de suelo seco, las células del córtex de la raíz perciben la menor disponibilidad de agua en el suelo e inducen síntesis de etileno. Este a su vez induce síntesis de auxinas y con ello un mayor crecimiento de raíces para ir en busca de agua en el suelo. Por el contrario, en condiciones de suelo anegado (anoxia), no se produce etileno por cuanto se requiere de oxígeno para que la enzima ACC oxidasa pueda oxidar el ácido 1-aminociclopropano-1-carboxílico (ACC) a etileno. Siendo este último, el único que puede inducir mayor biosíntesis y transporte de IAA. La falta de oxígeno no sólo afecta la síntesis de etileno en las raíces, pero también afecta el transporte polar de auxina, que requiere de oxígeno y energía. Finalmente, ello hace que las raíces disminuyan o incluso dejen de crecer dependiendo del grado de saturación de agua en el suelo.

8. JASMONATOS (JA)

Los jasmonatos (JA) corresponden a oxilipinas. En 1962 se aisló metil-jasmonato (una forma de jasmonato volátil) del aroma de jazmín (de ahí el nombre de jasmonatos). El inicio de la síntesis de jasmonatos se produce en la membrana de la célula a partir del ácido linolénico, un ácido graso insaturado de 18 carbonos. Este ácido sufre varias transformaciones hasta llegar a ácido jasmónico, inicialmente en los plastidios y posteriormente en los peroxisomas. El ácido jasmónico es el precursor directo de dos conjugados: metiljasmonato (MeJA) que es un volátil y jasmonoil-isoleucina (JA-Ile), este último conjugado es la forma activa y se acopla al receptor de jasmonato (COI), que se encuentra al interior del núcleo de la célula. Los jasmonatos están ampliamente distribuidos en la planta y están vinculados con respuesta a distintos tipos de estrés pero sobretodo con estrés de tipo biótico, específicamente en respuesta a ataque de herbívoros. Aún cuando también se pueden encontrar como respuesta a daño mecánico, toxicidad por metales, etc. Pequeñas concentraciones de JA pueden inhibir el crecimiento en longitud de la raíz principal pero promover la ramificación lateral vía auxinas. Sin embargo, concentraciones altas de JA inhiben el crecimiento de brotes y raíces. Una herida, a nivel de raíz, induce un aumento de los niveles de JA, los cuales suprimen el desarrollo de las raíces inhibiendo la mitosis celular. En la actualidad, existen varios trabajos que señalan que frente a un estrés en raíces, se requiere síntesis de JA para inducir síntesis de ABA. La síntesis de jasmonatos en raíces ocurre en las células del meristemo radical.

9. ÁCIDO SALICÍLICO (SA)

El ácido salicílico (SA) o ácido 2-hidroxibenzoico, es un compuesto fenólico, con un anillo aromático. Las propiedades farmacológicas de los salicilatos (nombre que reciben SA y sus derivados) han atraído al hombre desde hace mucho tiempo. Las propiedades medicinales de los salicilatos son conocidas desde el siglo V a.C. En 1859, Hermann Kolbe sintetiza químicamente el SA. En 1897, Felix Hoffmann produce un derivado sintético, el ácido acetil salicílico (ASA). En 1899, la compañía Bayer registra el nombre “Aspirina” para ASA. En plantas, el SA y sus derivados están implicados en diversos procesos como son: germinación, apertura estomática, senescencia, respiración, crecimiento celular, nodulación, etc. Pero sobretodo en su relación frente a estreses bióticos y abióticos.

La Resistencia Sistémica Adquirida en plantas (SAR), es un espectro de respuestas inmunes generadas por infección de un patógeno en el tejido atacado y que induce una resistencia sistémica en hojas no atacadas. Esta activación SAR requiere de una molécula señal, el ácido salicílico (SA). Se ha propuesto el metilsalicílico (MeSA), un derivado del SA, quien se desplazaría dentro la planta par activar respuesta SAR. Sin embargo, varios autores también han señalado a otros dos precursores del SA como señales sistémicas: el ácido benzoico y el ácido azelaico. La síntesis de SA, se origina desde un compuesto conocido como corismato por intermedio de dos rutas: vía isocorismato o vía fenilalanina. El SA como forma activa se acoplaría a sus receptores (NPR1, NPR3 y NPR4), para activar genes en respuesta a diversos estímulos inducidos por el ácido salicílico. Si bien el SA está muy relacionado con respuesta a diversos tipos de estrés en plantas, su relación con los jasmonatos, es antagónica. Por ejemplo, el ácido salicílico induce cierre estomático frente al ataque de bacteria como *Pseudomonas syringae*. Sin embargo, la bacteria genera síntesis de jasmonatos para bloquear la señal del SA, evitando el cierre estomático y de esa forma realizar una infección exitosa. Hasta el momento existe poca información sobre los efectos que podría inducir el SA en el crecimiento y desarrollo radical. La mayor parte de la investigación en esta fitohormona se ha centrado en su relación con respuesta a ataques de patógenos.

10. ESTRIGOLACTONAS (SL)

El 1966 Cook junto a otros investigadores aíslan la primera estrigolactona (SL) de exudado de raíces de algodón, el estrigol. Sin embargo, no será hasta el siglo XXI en que las estrigolactonas comenzarán a ser estudiadas e identificadas como una nueva clase de hormona vegetal. Los primeros estudios les asignan un papel importante en el parasitismo e interacción simbióticas (micorrizas), pero también en el proceso de inhibición de la ramificación de la parte aérea de las plantas. En los últimos 10 años han ocurrido los grandes avances en el conocimiento de la ruta de síntesis y modo de acción de estas nuevas fitohormonas. Si bien se sabe que la ruta de síntesis es compartida con ABA, vale decir también provienen de la ruta de los carotenoides, aún se desconocen varios pasos en su ruta de biosíntesis, así como su modo de acción. A la fecha se han determinado varias estrigolactonas activas y que se acoplan a su receptor (D14), entre ellas están: estrigol, orobanchol, sorgolactona, etc. Todas estas moléculas son producidas por las células de las raíces y exudadas al medio (rizósfera). Varios trabajos señalan a las SL

como reguladores positivos en la ramificación radical y crecimiento en longitud de la raíz principal. La forma de actuar de las SL serían activando directamente la ruta de síntesis de las auxinas y/o la síntesis de etileno y con ello la de auxinas, para de esa forma favorecer el crecimiento de raíces. Sin embargo y a diferencia de las auxinas, las SL inhiben el desarrollo de raíces adventicias. Varias investigaciones han demostrado que la carencia de fósforo en el suelo, induce la síntesis de SL en las raíces. Esta mayor producción de SL favorece un aumento en el crecimiento radical tanto en longitud como en ramificación. Al mismo tiempo, la liberación a la rizófora de SL, permite que las micorrizas puedan reconocer a sus plantas huésped, facilitando la colonización por parte de estos hongos de las células radicales y finalmente mejorar el aporte de fósforo a la planta (Figura 13.9).

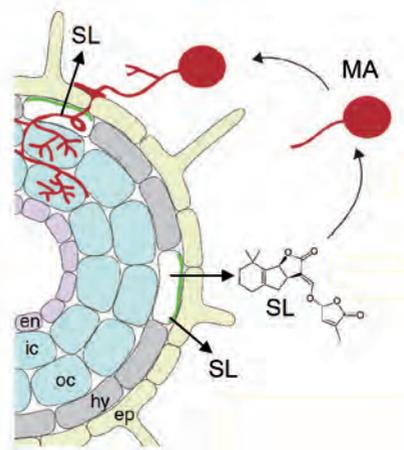


Figura 13.9. Las SL que son producidas en las células de la hipodermis (hy) y posteriormente liberadas a la rizófora, son reconocidas por las micorrizas (MA), las cuales proceden a colonizar las células del córtex (ic y oc), previo paso por las células de la epidermis (ep). Endodermis (en). Adaptado de: Khosla, A. and Nelson, D. 2016. Strigolactones, super hormones in the fight against Striga. *Current Opinion in Plant Biology*. 33: 57-63.

Bibliografía

- Agoreyo, BO, 2012.** Estrés oxidativo y respuesta enzimática antioxidante en bananos de maduración (*Musa sapientum*). *Acta Hortic.*, 945: 119-124.
- Aida, MPN, M. Hairiyah, WHWM Reza y MN Ilida, 2011.** Efecto del peróxido de hidrógeno sobre la calidad de la piña fresca cortada almacenada a 50 ° C. *Actas del 7º Simposio Internacional de la Piña*, Volumen 1, 31 de julio de 2011, Johor Bahru, Malasia.
- Alarcón, A. s/a.** Curso de especialización en cultivos tecnificados con énfasis en nutrición vegetal. Universidad Politécnica de Cartagena, ETSIA. España.
- Al-Babili, S and Bouwmeester H. 2015.** Strigolactones, a novel carotenoid-derived plant hormone. *Annu. Rev. Plant Biol.* 66: 24.1-24.26.
- Allen R., L. Pereira, D. Raes, and M. Smith. 1998.** Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Papers N°56.* 328 p. <http://www.fao.org/docrep/x0490e/x0490e00.htm>.
- Allen R.G., L.S. Pereira, D. Raes, M. Smith. 1998.** Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage. Paper 56.*
- Ayers R. S., D. W. Westcot. 1976.** Calidad del agua para la agricultura. *FAO Riego y Drenaje*, n° 29.
- Barba-Espin, G., P. Díaz-Vivancos, MJ Clemente-Moreno, A. Albacete y L. Faize et al ., 2010.** Interacción entre el peróxido de hidrógeno y las hormonas vegetales durante la germinación y el crecimiento temprano de las plántulas de guisantes. *Plant Cell Environ.*, 33: 981-994.
- Beltrano, J.; Gimenez, D.O. 2015.** Cultivo en Hidroponía. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Universidad Nacional de la Plata. Buenos Aires. Argentina. 180 p.
- Cavusoglu, K. y K. Kabar, 2010.** Efectos del peróxido de hidrógeno en la germinación y el crecimiento temprano de las plántulas de la cebada en condiciones de NaCl y estrés por altas temperaturas. *EurAsian J. BioSci.*, 4: 70-79.
- De Kreij et al. 2005.** Estimating the chemical composition of soil solution by obtaining saturation extract or specific 1:2 by volume extracts. *Plant Soil* 122: 169-175.
- De Kreij et al., 2005.** Fertigation: I. Methodology of the 1:2 volumen water extract. *Proc. Management , use and protection of soil resources.* Sofia 15-19 May 2005, 144-147.

- Depaepe, T. and D. Van Der Straeten. 2017.** Ethylene. In: Encyclopedia of applied plant sciences. 2nd edition. Elsevier Ltd. Vol1: 403-410.
- Doorenbos J, Kassam AH 1979.** Response to water. FAO Irrigation and Drainage paper N° 33 FAO Rome, Italy p 193.
- Epstein, E. & Bloom, A. 2006.** Nutrição Mineral de Plantas. Princípios y Perspectivas. Segunda Edición. Editora planta. 402 p.
- Etchevers, J. 1999.** Técnicas de diagnóstico útiles en la medición de la fertilidad del suelo y el estado nutrimental de los cultivos. Terra Latinoamericana 1999, 17 (julio-septiembre).
- Etchevers, J. 2014.** Diagnóstico del estado nutrimental del suelo y de los cultivos. Programa de Edafología, Colegio de Postgraduado, Campus Montecillo, Montecillo. Material didáctico del Diplomado en Ferrirrigación, Universidad de Concepción, Chile. 17 p.
- Fagan, E.; Ono, E.; Rodrigues J.; Soares, L. Neto, D. 2016.** Fisiología vegetal: metabolismo e Nutrição mineral. Organização Andrei Editora Ltda., Sao Paulo 305 p.
- Fernández , E. y Camacho, F. 2008.** Manual práctico de ferrirrigación en riego por goteo. Ediciones Agrotécnicas S.L. España, Madrid. 165 p.
- Ferreira R, Sellés G, Ahumada R, Maldonado P, Gil P, Barrera C. 2005.** Manejo del riego localizado y ferrirrigación. La Cruz, Chile, Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Boletín INIA N° 126. 56 p.
- Ferreira R, Sellés G, Maldonado P, Celedón J, Gil P, Torres A. 2008.** Soil air content effects on the water status of avocado trees. Acta Horticulturae 792:291-296.
- Ferreira R, Sellés G, Pimstein A. 2000.** Diseño, manejo y mantención de equipos de riego localizado de alta frecuencia. Santiago, Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Boletín INIA N° 35, 75 p.
- Ferreira E, R.; Selles Van S, G.; Gil M, P.; Ruiz, R. 2011.** Asfixia radicular en huertos de palto: Manejo del riego y suelo. Sumario (Es) Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Centro de Regional de Investigacion Rayentue, Rengo. Boletín INIA - Instituto de Investigaciones Agropecuarias no. 231, 54 p
- Geros, H., M. Chaves y S. Delrot, 2012.** La bioquímica de la fruta de uva. Bentham Science Publishers, EE. UU., ISBN: 9781608053605, páginas: 304.
- Halliwell, B., 2006.** Especies reactivas y antioxidantes. La biología redox es un tema fundamental de la vida aeróbica. Plant Physiol., 141: 312-322.
- Holzappel, E y Arumi, J. 2010.** Tecnologías de manejo de agua para una agricultura intensiva sustentable. Dpto. de Recursos Hídricos, Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad de Concepción. Editorial Universidad de concepción. 145 p.
- Hopkins, WG y NPA Hunter, 2004.** Introducción a la fisiología vegetal. 3rd Edn., John Wiley and Sons Inc., Nueva York, ISBN: 978-0-471-38915-6, páginas: 576.
- https://www.agric.wa.gov.au/water-management/using_dye_show_water_movement_below_drip_irrigation. 2016.

- Hutchinson, H.B.; Miller, N.H.J. 1911.** The direct assimilation of inorganic and organic form of nitrogen by higher plants. *Centbl Bakt II*, (30):513-547.
- Jaillais, Y. and G. Vert. 2016.** Brassinosteroid signaling and BRI1 dynamics went underground. *Current Opinoin in Plant Biology*, 33: 92-100.
- Jara, J. 2010.** Requerimientos hídricos de cultivos y frutales. IN: Holzapfel, E.A, Arumí, J.L. (Eds.). *Tecnología de manejo de agua para una agricultura intensiva sustentable*. Editorial Universidad de Concepción, Concepción, Chile, pp. 15-40.
- Jensen, M.E., R.D. Burman, and R.G. Allen. 1990.** Evapotranspiration and irrigation water requirements. American Society of Civil Engineers (Manual N°70), New York, N.Y. USA. 332p.
- Kalve, S., D. De Vos y GT Beemster, 2014.** Desarrollo de la hoja: una perspectiva celular. *Frontiers Plant Sci.*, Vol. 5. 10.3389 / fpls.2014.00362
- Khandaker, MM, AN Boyce y N. Osman, 2012.** La influencia del peróxido de hidrógeno en el crecimiento, desarrollo y calidad de las manzanas (*Syzygium samarangense* , [Blume] Merrill y LM Perry var. Jambu madu). *Planta Fisiol. Biochem.*, 53: 101-110.
- Khandaker, MM, AN Boyce, N. Osman y AS Hossain, 2012.** Propiedades fisicoquímicas y fitoquímicas de la manzana de cera (*Syzygium samarangense* [Blume] Merrill & LM Perry var. Jambu Madu) según la aplicación del regulador del crecimiento. *Sci. Mundo J.* 10.1100 / 2012/728613
- Koltai, H. 2012.** Strigolactones active different hormonal pathways for regulation of root development in response to phosphate growth conditions. *Annals of Botany.* 1-7.
- Kranner, I., T. Roach, RP Beckett, C. Whitaker y FV Minibayeva, 2010.** Producción extracelular de especies reactivas de oxígeno durante la germinación de las semillas y el crecimiento temprano de las plántulas en *Pisum sativum* . *J. Plant Physiol.*, 167: 805-811.
- Lacarra, G.A.R.; & García, S.C. 2011.** Validación de Cinco Sistemas Hidropónicos para la Producción de Jitomate (*Lycopersicum esculentum* Mill.) y Lechuga (*Latuca sativa* L.) en Invernadero. Trabajo de Experiencia Recepcional. Universidad Veracruzana. Xalapa, Veracruz. 5-7 p.
- Lang, A. y JP Nitsch, 1965.** Diferenciación y Desarrollo Parte IV (I). En: *Flower and Fruit Formation*, Lang, A. y JP Nitsch (Eds.). Springer, Nueva York, pp: 1380-1647.
- Lu, X., Y. Ma y X. Liu, 2014.** Efectos de la acumulación de peróxido de hidrógeno, la peroxidación lipídica y la oxidación de polifenoles durante el desarrollo de escaldaduras superficiales en manzanas 'Fuji'. *Hortic. Reinar. Biotechnol.*, 55: 299-307.
- Magwaza, LS y UL Opara, 2015.** Métodos analíticos para la determinación de azúcares y dulzura de productos hortícolas: una revisión. *Sci. Hortic.*, 184: 179-192.
- Mauseth, JD, 2003.** *Botánica: Una introducción a la biología vegetal*. Jones y Bartlett, EE. UU., Pp: 271-272.

- McAdam, S., M. Manzi, J. Ross, T. Brodribb and A. Gómez-Cadenas. 2016.** Uprooting an abscisic acid paradigm: shoots are the primary source. *Plant Signaling and Behavior*, 1559-2324.
- McAdam, S., T. Brodribb and J. Ross. 2016.** Shoot-derived abscisic acid promotes root growth. *Plant, Cell and Environment*, 39: 652-659.
- Micol, JL y S. Hake, 2003.** El desarrollo de las hojas de la planta. *Plant Physiol.*, 131: 389-394.
- Molden, D. ed. 2007.** Water for Food, Water for Life. London and International Water Management Colombo Institute.
- Moneruzzaman, KM, ABMS Hossain, O. Normaniza y AN Boyce, 2011.** Respuestas de crecimiento, rendimiento y calidad al ácido giberélico (GA 3) de la manzana de cera *Syzygium samarangense* var. Jambu air madu frutos cultivados en condiciones de campo. *Afr. J. Biotechnol.*, 10: 11911-11918.
- Moneruzzaman, KM, AN Boyce, O. Normaniza, A. Hossain, Al Alebidi y AM Al-Saif, 2011.** Una evaluación de la evaluación de la calidad nutricional de tres cultivares de *Syzygium samarangense* en condiciones de Malasia. *Afr. J. Agric. Res.*, 6: 545-552.
- Musetti, R., LS di Toppi, M. Martini, F. Ferrini, A. Loschi, MA Favali y R. Osler, 2005.** Localización de peróxido de hidrógeno y estado antioxidante en la recuperación de plantas de albaricoque de Amarillos de Fruta de Piedra Europea. *EUR. J. Plant. Pathol.*, 112: 53-61.
- Neill, SJ, R. Desikan, A. Clarke y JT Hancock, 2002.** El óxido nítrico es un componente novedoso de la señalización de ácido abscísico en células de guarda estomáticas. *Plant Physiol.*, 128: 13-16.
- Osorio A, Tapia F, Salinas R. 1999.** Elementos de riego tecnificado. La Serena, Chile, Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Comisión Nacional de Riego. Cartilla divulgativa. 17 p.
- Ozaki, K., A. Uchida, T. Takabe, F. Shinagawa e Y. Tanaka et al. , 2009.** Enriquecimiento del contenido de azúcar en frutos de melón por tratamiento con peróxido de hidrógeno. *J. Plant Physiol.*, 166: 569-578.
- Pacifici, E., L. Polverari and S. Sabatini. 2015.** Plant hormone cross-talk: the pivot of root growth. *Journal of Experimental Botany*, 66(4): 1113-1121.
- Petri, BG, RJ Watts, AL Teel, SG Huling y RA Brown, 2003.** Fundamentos de ISCO utilizando peróxido de hidrógeno. En: Oxidación química in situ para la remediación de aguas subterráneas, Siegrist, RL, M. Crimi y TJ Simpkin (Eds.). Springer, Nueva York, USA.
- Porta, J.; López-Acevedo, M. y Roquero, C. 2003.** Edafología para la Agricultura y el medio ambiente. 3° Edición. Ediciones Mundi-Prensa. 929 p.
- Quan, LJ, B. Zhang, WW Shi y HY Li, 2008.** El peróxido de hidrógeno en las plantas: una molécula versátil de la red de especies reactivas de oxígeno. *J. Integr. Planta Biol.*, 50: 2-18.

- Rehman, A., AU. Malik, H. Ali, MW Alam y B. Sarfraz, 2015.** Factores previos a la cosecha que influyen en el desarrollo de la enfermedad postcosecha y la calidad de la fruta del mango. *J. Environ. Agric Sci.*, 3: 42-47.
- Roa, G. 2016.** Pivotes en Chile: Cuantos son, dónde están y que superficie riegan. *Red Agrícola*. Octubre 2016.
- Roe, M; Church S; Pinchen, H. & Finglas, P. 2013.** Nutrient analysis of fruit and vegetables. Institute of Food Research, Surrey, UK.
- Sadzawka, A., Carrasco, M.A., Grez, R., Mora, M.L. 2004.** Métodos de análisis recomendados para los suelos chilenos. Comisión de Normalización y Acreditación, Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo. 113 p. Disponible en: http://www.inia.cl/platina/pubbycom/edinia/docs/metodos_an_suelos_v2004.pdf
- Samani, Z. 2000.** Estimating solar radiation and evapotranspiration using minimum climatological data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 126(4): 265-267.
- Screpanti, C., Fonné-Pfistes, R., Lumbroso, A., Rendine, S., Lachia, M. and De Mesmaeker, A. 2016.** Strigolactone for potencial crop enhancement applications. *Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters*. 26: 2392-2400.
- Sela, G. 2016.** Fundamentos del manejo de la fertilización y el riego. Publicación digital. 212 p.
- Selles, G.; Ferreyra R.; Ruiz, R.; Ferreyra, R; Ahumada B, R. 2012.** Compactacion de suelos y su control: Estudio de casos en el valle de Aconcagua. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Centro Regional de Investigacion La Platina, Santiago 53 p. Ubicacion: Boletin INIA 234.
- Selles_Van_S, G.; Ferreyra E, R.** Criterios para controlar el riego en uva de mesa. 36 ref. Sumario (Es) Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Centro Regional de Investigacion La Platina Santiago Mayo 2007 p. 19-45 Seminario Internacional Manejo de Riego y Suelo en Vides para Vino y Mesa, Santiago, CRI La Platina, 26-27 Oct 2005.
- Slesak, I., M. Libik, B. Karpinska, S. Karpinski y Z. Miszalski, 2007.** El papel del peróxido de hidrógeno en la regulación del metabolismo de las plantas y la señalización celular en respuesta al estrés ambiental. *Acta Biochimica Polonica*, 54: 39-50.
- Sonneveld, C & Voogt W. 2009.** *Plant Nutrition of Greenhouse Crops*. SpringerScience Business Media B.V. 2009. 431 pp.
- Sonneveld, C.; Van den Ende J. & De Bes, S. 1990.** Estimating the chemical composition of soil solutions by obtaining saturation extract or specific 1:2 by volume extracts. *Plant Soil* 122, 169-175
- Steduto, P, Hsia, T. C., Fereres, E. y Raes, D. (Ed). 2012.** Crop yield response to wáter. Colección FAO Riego y Drenaje N° 66. 505 p.
- Torres, R., MC Valentines, J. Usall, I. Vinas y C. Larrigaudiere, 2003.** Posible implicación del peróxido de hidrógeno en el desarrollo de mecanismos de resistencia en la fruta de manzana 'Golden Delicious'. *Postcosecha Biol. Technol.*, 27: 235-242.

- Uribe, H.; Lagos, O. y Holzapfel, E. 2001.** Pivote Central. Ministerio de Agricultura, Comisión Nacional de Riego, CORFO, INIA Carillanca. 32 pp.
- Vidal, I. 2007.** Fertirrigación cultivos y frutales. Universidad de Concepción, Facultad de Agronomía, Dpto. de Suelos y Recursos Naturales. 117 p.
- Vranova, E., D. Inze y F. Van Breusegem, 2002.** Transducción de señales durante el estrés oxidativo. *J. Exp. Bot.*, 53: 1227-1236.
- Wang, SY, 2010.** Antioxidantes en las frutas y sus posibles propiedades anticancerígenas. *Acta Hortic.*, 864: 463-469.
- Yuan, L.; Wenquan, N.; Jingwei, W.; Jian, W.; Mingzhi, Z.; Kangyong, 2016.** Review on advances of airjection irrigation. *Int. J. Agric & Biol Eng.* 9(2):1-10
- Zhong-Bao, Y., C. He, Y., Ma, M. Herde and Z., Ding. 2017.** Jasmonic acid enhances Al-induced root growth inhibition. *Plant Physiology.* 173: 1420-1433.
- Zhou, B., N. Li, Z. Zhang, X. Huang y H. Chen et al. , 2012.** El peróxido de hidrógeno y el óxido nítrico promueven el crecimiento reproductivo en Litchi chinensis . *Biol. Plant.*, 56: 321-329.
- Zuriani, S.; Mohammad; Khandaker, M.; , Nashriyah Mat y Amru Nasrulhaq Boyce, 2015.** Efectos del peróxido de hidrógeno en el crecimiento, desarrollo y calidad de las frutas: una revisión. *Diario de agronomía*, 14: 331-336.

PESOS ATÓMICOS DE ELEMENTOS DE INTERES EN FERTILIDAD DE SUELO Y NUTRICIÓN VEGETAL

Nombre	Símbolo	Peso atómico
Aluminio	Al	26,97
Azufre	S	32,06
Boro	B	10,82
Calcio	Ca	40,08
Carbono	C	12,01
Cloro	Cl	35,457
Cobalto	Co	58,94
Cobre	Cu	63,54
Flúor	F	19
Fósforo	P	30,98
Hidrógeno	H	1,008
Hierro	Fe	55,85
Magnesio	Mg	24,32
Manganeso	Mn	54,93
Molibdeno	Mo	95,95
Nitrógeno	N	14,008
Níquel	Ni	58,69
Oxígeno	O	16
Potasio	K	39,096
Sodio	Na	22,997
Yodo	I	126,92
Zinc	Zn	65,38

PESO EQUIVALENTE DE ALGUNOS IONES Y SALES

Símbolo químico o fórmula	Peso equivalente en gramos	Nombre común
Ca ⁺⁺	20,04	Ion calcio
Mg ⁺⁺	12,15	Ion magnesio
Na ⁺	23,00	Ion sodio
K ⁺	39,10	Ion potasio
Cl ⁻	35,46	Ion cloro
SO ₄ ⁼	48,03	Ion sulfato
CO ₃ ⁼	30,00	Ion carbonato
CO ₃ H ⁻	61,01	Ion bicarbonato
Cl ₂ Ca	55,49	Cloruro de calcio
SO ₄ Ca	68,07	Sulfato de calcio
SO ₄ Ca ₂ H ₂ O	86,09	Yeso
CO ₃ Ca	50,04	Carbonato de calcio
Cl ₂ Mg	47,62	Cloruro magnésico
SO ₄ Mg	60,19	Sulfato magnésico
CO ₃ Mg	42,16	Carbonato magnésico
NaCl	58,45	Cloruro de sodio
SO ₄ Na ₂	71,03	Sulfato de sodio
CO ₃ Na ₂	53,00	Carbonato de sodio
CO ₃ HNa ₂	84,01	Bicarbonato de sodio
KCl	74,55	Cloruro de potasio
K ₂ SO ₄	87,13	Sulfato de potasio
KCO ₃	69,10	Carbonato de potasio
KCO ₃ H	100,10	Bicarbonato de potasio
S	16,03	Azufre
SO ₂	32,03	Dióxido de azufre
SO ₄ H ₂	44,54	Ácido sulfúrico
(SO ₄) ₃ Al ₂ 18H ₂ O	111,07	Sulfato de aluminio
SO ₄ Fe7H ₂ O	139,01	Sulfato ferroso

PESO MOLECULAR DE LAS FORMAS IONICAS ABSORBIDAS POR LAS PLANTAS

Forma Iónica	Peso Molecular
NO_3^-	62,01
NH_4^+	18,042
$\text{HPO}_4^{=}$	95,978
$\text{H}_2\text{PO}_4^{=}$	96,986
K^+	39,1
Ca^{++}	40,08
Mg^{++}	24,31
$\text{SO}_4^{=}$	96,06
$\text{SO}_3^{=}$	80,06
Fe^{++}	55,85
Mn^{++}	54,94
Zn^{++}	65,37
Cu^{++}	63,54
BO_3^{---}	58,81
HBO_3^{---}	59,818
$\text{H}_2\text{BO}_3^{---}$	60,826
B(OH)_4^-	78,842
MoO_4^{-}	159,94
Cl^-	35,45
Na^+	32,06

VALOR	CONVERSIÓN		RESULTADO
1	N	NO ₃	4,43
1	N	NH ₃	1,22
1	N	(NH ₄)SO ₄	4,72
1	N	(NH ₄)NO ₃	2,86
1	K	K ₂ O	1,2
1	KCl	K ₂ O	0,63
1	CaO	Ca	0,71
1	CaCO ₃	CaO	0,56
1	MgO	Mg	0,6
1	MgO	MgSO ₄	2,99
1	MgO	MgCO ₃	2,09
1	P	P ₂ O ₅	2,29
1	S	SO ₂	2
1	S	SO ₃	0,4
1	S	SO ₄	3
1	%	ppm	10000

VALOR	CONVERSIÓN		RESULTADO
1	NO ₃	N	0,23
1	NH ₃	N	0,82
1	(NH ₄)SO ₄	N	0,21
1	(NH ₄)NO ₃	N	0,35
1	K ₂ O	K	0,83
1	K ₂ O	KCl	1,58
1	Ca	CaO	1,4
1	CaO	CaCO ₃	1,78
1	Mg	MgO	1,66
1	MgSO ₄	MgO	0,33
1	MgCO ₃	MgO	0,48
1	P ₂ O ₅	P	0,44
1	SO ₂	S	0,5
1	SO ₃	S	2,5
1	SO ₄	S	0,33
1	ppm	%	0,0001

VALOR (cmol/kg)	CMOL+/KG A PPM	RESULTADO
1	Ca	200,4
1	Mg	121,6
1	Na	230
1	K	391
1	H	10

VALOR (ppm)	PPM A CMOL+/KG	RESULTADO
1	Ca	0,00499
1	Mg	0,00822
1	Na	0,00435
1	K	0,00256
1	H	0,1

VALOR	VOLÚMEN		RESULTADO
1	m ³	acre-pulg	0,00973
1	m ³	pie cúbico(ft ³)	35,3
1	m ³	pulg cúbica (in ³)	60000
1	L	cuarto de galón	1,057
1	L	pie cúbico(ft ³)	0,0353
1	L	galón	0,265
1	L	onza (oz)	33,78

VALOR	VOLÚMEN		RESULTADO
1	acre-pulg	m ³	102,8
1	pie cúbico(ft ³)	m ³	0,0283
1	pulg cúbica (in ³)	m ³	0,0000164
1	cuarto de galón	L	0,946
1	pie cúbico(ft ³)	L	28,3
1	galón	L	3,78
1	onza (oz)	L	0,026

VALOR	LONGITUD		RESULTADO
1	km	milla	0,621
1	m	yarda	1,094
1	cm	pulgada	0,394

VALOR	LONGITUD		RESULTADO
1	milla	km	1,609
1	yarda	m	0,914
1	pulgada	cm	2,54

VALOR	ÁREA		RESULTADO
1	km ²	milla ²	0,386
1	km ²	acre	247,1
1	ha	acre	2,471

VALOR	ÁREA		RESULTADO
1	milla ²	km ²	2,59
1	acre	km ²	0,00405
1	acre	ha	0,405

VALOR	MASA		RESULTADO
1	ton(métrica)	ton(inglesa)	1,102
1	qq	kg	100
1	kg	libra (lb)	2,205
1	g	onza (oz)	0,035

VALOR	MASA		RESULTADO
1	ton(inglesa)	ton(métrica)	0,9072
1	kg	qq	0,01
1	libra (lb)	kg	0,454
1	onza (oz)	g	28,35

VALOR	CONCENTRACIÓN		RESULTADO
1	ppm	%	0,0001
1	meq/100 g	cmol/kg	1
1	%	g/kg	10
1	ppm	mg/kg	1

VALOR	CONCENTRACIÓN		RESULTADO
1	%	ppm	10000
1	cmol/kg	meq/100 g	1
1	g/kg	%	0,1
1	mg/kg	ppm	1

VALOR	PRESIÓN		RESULTADO
1	bar	lb/pulg ² , psi	14,5
1	bar	atm	0,9869
1	kg/cm ²	atm	0,9678
1	kg/cm ²	lb/pulg ² , psi	14,22
1	atm	lb/pulg ² , psi	14,7
1	kilopascal	lb/pulg ² , psi	0,145
1	kilopascal	atm	0,009869

VALOR	PRESIÓN		RESULTADO
1	lb/pulg ² , psi	bar	0,06895
1	atm	bar	1,013
1	atm	kg/cm ²	1,033
1	lb/pulg ² , psi	kg/cm ²	0,07031
1	lb/pulg ² , psi	atm	0,06805
1	lb/pulg ² , psi	kilopascal	6,895
1	atm	kilopascal	101,3

VALOR	PRODUCCIÓN		RESULTADO
1	ton(métrica)/ha	ton(inglesa)/acre	0,0001
1	kg/ha	lb/acre	1
1	qq/acre	g/kg	10
1	hl/ha	mg/kg	1

VALOR	PRODUCCIÓN		RESULTADO
1	ton(inglesa)/acre	ton(métrica)/ha	10000
1	lb/acre	kg/ha	1
1	g/kg	qq/acre	0,1
1	mg/kg	hl/ha	1



Universidad de Concepción
Facultad de Agronomía
Departamento de Suelos y Recursos Naturales

ISBN: 978-956-227-450-0



9 789562 274500