

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE



ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ORIHUELA

DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA AGROALIMENTARIA

TESIS DOCTORAL

**EVALUACIÓN AGRONÓMICA Y FISIOLÓGICA DEL CULTIVO
TOMATE (*SOLANUM LYCOPERSICUM*): INFLUENCIA DEL SISTEMA DE
CULTIVO EN CONDICIONES SALINAS Y DEL MANEJO DE RIEGO CON
ALTAS TEMPERATURAS MEDIOAMBIENTALES**

Wilbert Michael Rodríguez Ortega

Orihuela, 20 de Mayo de 2013

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE



ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ORIHUELA

DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA AGROALIMENTARIA

**EVALUACIÓN AGRONÓMICA Y FISIOLÓGICA DEL CULTIVO
TOMATE (*SOLANUM LYCOPERSICUM*): INFLUENCIA DEL SISTEMA DE
CULTIVO EN CONDICIONES SALINAS Y DEL MANEJO DE RIEGO CON
ALTAS TEMPERATURAS MEDIOAMBIENTALES**

TESIS DOCTORAL

Autor: D. Wilbert Michael Rodríguez Ortega

Ingeniero Agrónomo

Máster en Ciencias Agrícolas

Orihuela, 20 de Mayo de 2013

DIRECTORES

Vicente Martínez López

Profesor de Investigación

Francisco García Sánchez

Científico Titular



Evaluación agronómica y fisiológica del cultivo tomate: Influencia del sistema de cultivo en condiciones salinas y del manejo de riego con altas temperaturas medioambientales

Trabajo realizado por **Wilbert M. Rodríguez Ortega** para optar al grado de Doctor por la Universidad Miguel Hernandez de Elche

Directores:
Dr. Vicente Martínez López
Dr. Francisco García Sánchez



CSIC

CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

D VICENTE MARTÍNEZ LÓPEZ, DIRECTOR DEL DEPARTAMENTO DE NUTRICIÓN VEGETAL DEL CENTRO DE EDAFOLOGÍA Y BIOLOGÍA APLICADA DEL SEGURA PERTENECIENTE AL CENTRO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS (CEBAS-CSIC).
INFORMA:

Que la Tesis Doctoral titulada “Evaluación agronómica y fisiológica del cultivo tomate: Influencia del sistema de cultivo en condiciones salinas y del manejo de riego con altas temperaturas medioambientales” ha sido realizada por el doctorando D. Wilbert Michael Rodríguez Ortega, bajo la inmediata dirección y supervisión de los doctores D. Vicente Martínez López y D. Francisco García Sánchez, en el Departamento de Nutrición Vegetal del CEBAS-CSIC, y que el Departamento ha dado conformidad para que sea presentada ante la comisión de Doctorado.

Y para que conste a los efectos oportunos, firmo la presente en Orihuela, a 20 de Mayo de 2013.

Fdo: D. VICENTE MARTÍNEZ LÓPEZ

D. Vicente Martínez López, Profesor de Investigación y D. Francisco García Sánchez Científico Titular, ambos pertenecientes al Departamento de Nutrición Vegetal, del Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura (CEBAS-CSIC),

AUTORIZAN:

La presentación de la Tesis Doctoral titulada **“EVALUACIÓN AGRONÓMICA Y FISIOLÓGICA DEL CULTIVO TOMATE: INFLUENCIA DEL SISTEMA DE CULTIVO EN CONDICIONES SALINAS Y DEL MANEJO DE RIEGO CON ALTAS TEMPERATURAS MEDIOAMBIENTALES”**, realizada por D. Wilbert Michael Rodríguez Ortega, llevada a cabo bajo nuestra dirección en los laboratorios e instalaciones del Departamento de Nutrición Vegetal del CEBAS, considerando que se trata de un trabajo original de investigación que reúne todos los requisitos establecidos en el R.D. 778/1998, de 30 de abril (B.O.E de 1 de mayo de 1998).

En Murcia, a 20 de Mayo de 2013

Vicente Martínez López
Profesor de Investigación

Francisco García Sánchez
Científico Titular

AGRADECIMIENTOS

A mis directores de Tesis, Dr. Vicente Martínez López y Dr. Francisco García Sánchez, por haberme dado la oportunidad de trabajar en su departamento, grupo de investigación y realizar esta Memoria. Así como por el interés y dedicación en el seguimiento y supervisión de la misma durante estos años.

A las personas del Departamento de Nutrición Vegetal, la Finca Experimental de Santomera “Tres Caminos” y de la EPSO Universidad Miguel Hernández, con las que he coincidido y me han ayudado en esta etapa como doctorando: Vicente Gimeno, Teresa, Diana, Fernando A., Fernando C., Javier A., Paco R., Rosa, Mario, Inma, Vicente L., Manolo, Silvia, Julio, Sabina, Mercedes, Antonio, Ramón, Fernando, Pedro, Alejandro, Abid, Javier y José Javier.

A amigo y hermano español, José Antonio Esteban Cánovas, por su apoyo incondicional y por los buenos momentos compartidos.

A mis compañeros de trabajo en Cuba, Carlos Aragón, Fernando Sagarra, Yudelsys Tandrón, Leyanes Díaz, Yanier Acosta, Luis Barrios, Adrians Esquivel, Carlos Mazorra, Nicolás Quintana, y Dayamí Fontes por sus aportes desinteresados

A mis amigos de Cuba, los que están o no, por hacer que la distancia sea mas llevadera.

A mis padres y hermano, quiero agradecerles su confianza y todo el apoyo que se siente de su parte, aun estando lejos. A mi familia en general, los Ortegas, los de siempre.

De manera muy especial quiero agradecer a mi Noelia, por estar siempre a mi lado, por su apoyo y comprensión, por ser única y especial, por darme siempre el impulso necesario para llegar, en la Tesis y en la vida, y sobre todo por su inmenso amor. También a sus padres, hermana, abuelos, tíos y primos, por acogerme en su familia como uno más.

Resumen

El tomate es uno de los cultivos hortícolas más importantes en España produciéndose alrededor de 4 millones de toneladas anuales. En los últimos años, se está incrementando espectacularmente la producción de tomate en cultivos sin suelo en invernadero. Sin embargo, el clima semi-árido que sufre el sureste español, caracterizado por una precipitación media anual que no sobrepasa los 300 mm y una temperatura máxima que puede alcanzar los 45 °C en los meses de verano, hace que los agricultores tengan que emplear para el riego aguas con alta concentración de NaCl; y por otro lado, evitar temperaturas excesivas en verano en el interior de los invernaderos. Los efectos negativos que producen tanto la salinidad como las altas temperaturas en el cultivo de tomate pueden ser disminuidos aplicando una serie de estrategias agronómicas. En esta tesis se evaluaron las respuestas agronómicas y fisiológicas del cultivo de tomate estudiando cómo influye el sistema de cultivo cuando se emplea aguas salinas en el riego, y por otro lado como influye el manejo de riego en plantas cultivadas a diferentes temperaturas medioambientales. En ambos casos se realizaron medidas de producción, calidad de los frutos, nutrición mineral de las plantas, y parámetros de intercambio gaseoso, relaciones hídricas y fluorescencia de clorofilas. En el primer experimento se ensayaron tres sistemas de cultivo, dos de raíz desnuda (hidropónico y NGS), y uno con sustrato inerte (perlita), regando las plantas con 3 diferentes aguas de riego según la concentración de NaCl, control (0 mM NaCl), 40 mM NaCl y 80 mM NaCl. En este experimento se observó que el sistema hidropónico es el más idóneo para cultivar plantas de tomate de la variedad 'Optima' en condiciones de salinidad en el rango ensayado de 2-10 dSm⁻¹, ya que plantas cultivadas en este sistema, independientemente de la salinidad ensayada, tuvieron la mayor producción comercial. La calidad química de los frutos (SST y TA) mejora con la salinidad, pero en una mayor medida en los frutos del sistema de NGS. La asimilación neta de CO₂ (A_{CO2}) disminuyó con la salinidad cuando la concentración de Cl en las hojas fue superior al 1,5%, y esta reducción se debe principalmente a desajustes metabólicos de la fotosíntesis más que a factores no estomáticos o procesos relacionados con la captación de la luz. En el segundo experimento, se evaluaron las respuestas agronómicas y fisiológicas de las plantas de tomate 'Anairis' cultivadas en perlita con dos temperaturas ambientales diferentes (25 °C y 35 °C) combinándolas con tres frecuencias de riego (alta, FR1; moderada, FR2; baja, FR3). En este experimento, se observó que aquellas plantas cultivadas a 25 °C y regadas a alta frecuencia de riego tuvieron la mayor producción

comercial, mientras que plantas a 35 °C y manejadas con una baja frecuencia tuvieron la menor producción. Sin embargo, en este último tratamiento la calidad química de los frutos mejoró al incrementar la concentración de sólidos solubles totales. En los parámetros de intercambio gaseoso A_{CO_2} y g_s también observamos los valores más bajos en plantas a 35 °C y con baja frecuencia debido a que el efecto perjudicial de la temperatura alta en la fotosíntesis se sumó al déficit hídrico que sufrieron las plantas con la baja frecuencia de riego.

Summary

The tomato is one of the most important horticultural crops in Spain producing about 4 million tons. In recent years, the production of tomato is increasing dramatically in crops without soil in a greenhouse. However, the climate semi - arid area faced the Spanish Southeast, characterized by a mean annual precipitation that does not exceed 300 mm and a maximum temperature that can reach 45 ° C in the summer months, makes farmers use irrigation water with high concentration of NaCl; and on the other hand, to avoid excessive temperatures in summer greenhouses inside. The negative effects that produce both high temperatures and salinity in the cultivation of tomato can be diminished by applying a series of agronomic strategies. In this thesis evaluated the agronomic and physiological responses of the tomato crop studying how influences the culture system when using saline waters for irrigation, and on the other hand as influences the management of irrigation in plants grown at different environmental temperatures. In both cases measures of production, quality of the fruits, mineral nutrition of plants, and water relations, gas exchange and chlorophyll fluorescence parameters were carried out. In the first experiment we tested three systems of cultivation, two bare-root (hydroponic and NGS), and one with inert substrate (perlite), watering plants with 3 different water irrigation depending on the concentration of NaCl, control (0 mM NaCl), 40 mM NaCl and 80 mM NaCl. In this experiment it was observed that the hydroponic system is the most suitable for cultivating the variety tomato plants 'Optimum' conditions of salinity in the tested range of 2-10 dSm⁻¹, since plants grown in this system, independently tested salinity had more commercial production. The chemical quality of the fruits (SST and TA) improves with salinity, but in a more measured in the fruits of the NGS system. The net uptake of CO₂ (A_{CO_2}) decreased with the salinity when Cl concentration in leaves was higher than 1.5%, and

this reduction is mainly due to photosynthesis metabolic imbalances rather than non-stomatal factors or processes related to the capture of light. In the second experiment, we assessed the agronomic and physiological responses of 'Anairis' tomato plants grown in perlite with two different ambient temperatures (25 ° C and 35 ° C) combined with three irrigation frequencies (high, FR1; moderate, FR2; low, FR3). In this experiment, that those plants grown at 25 ° C and irrigated high-frequency of irrigation had more commercial production, while plants at 35 ° C and managed with a low frequency had lower production was observed. However, in this latter treatment quality chemistry of fruits improved by increasing the concentration of total soluble solids. In the parameters of gas exchange A_{CO_2} and g_s we also observed lower values in plants, at 35 ° C and low frequency since the damaging effect of high temperature on photosynthesis joined the water shortage suffered by plants with low frequency of irrigation.

"Nuestro tiempo es para mí, esencialmente, un tiempo de barbarie. Y no me refiero solo a violencia, sino a una civilización que ha degradado los valores que integraban su naturaleza. Un valor era la justicia".

Jose Luis Sampedro (01/02/1917; 08/04/2013)

"La peor de las actitudes es la indiferencia, decir no puedo, hacer nada, ya me las arreglaré".

Stéphane Hessel (20/10/1917; 27/12/2013)

"La persona que no se interesa por sus semejantes es la que tiene mayores dificultades en la vida y causa las mayores heridas en los demás. De esos individuos surgen todos los fracasos humanos."

Dale Carnegie (24/11/1888; 01/11/1955)

Abreviaturas

A_{CO_2}	Asimilación neta de CO_2
C_i	Concentración de CO_2 subestomático
$(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$	Molibdato de Amonio
$(\Psi\pi 100)$	Potencial osmótico a plena turgencia
“a*”	Eje que va desde colores verdes (-a*) hasta colores rojos (+a*)
“b*”	Eje que evoluciona desde azul (-b*) hasta colores amarillos (+b*)
“L*”	Luminosidad;
Ac	Ácido
ADP	Adenosín difosfato
AFE	Área foliar específica.
ANOVA	Análisis de Varianza
ATP	Adenosín trifosfato
ATP-asa	Enzimas que producen la hidrólisis del adenosín trifosfato (ATP)
B	Boro
BER	Podredumbre apical, en inglés blossom-end rot
$Ca(NO_3)_2$	Nitrato de Calcio
Ca	Calcio
CE	Conductividad Eléctrica
Cl	Cloruro
CO_2	Dióxido de carbono
Col.	Colaboradores
CRA	Contenido relativo de agua
Cu	Cobre
$CuSO_4$	Sulfato de Cobre
D	Desconocido
DDT	Días después del trasplante
dS	Decisiemens
dS/m^2	Decisiemens por metro cuadrado
E_{leaf}	Transpiración foliar
ETR	Tasa de transporte de electrones
$F'm$	Máxima fluorescencia en hojas adaptadas a la luz después de aplicar un pulso saturante de luz actínica.

F'o	Fluorescencia mínima en hojas adaptadas a la luz después de un pulso de luz roja.
F'v	Fluorescencia variable en hojas iluminadas ($F'v = F'm - F'o$).
F'v/F'm	Eficiencia de las antenas en los centros de reacción del PSII
Fe	Hierro
Fm	Valor máximo de fluorescencia en hojas adaptadas a la oscuridad.
Fo	Fluorescencia mínima de hojas adaptadas a la oscuridad.
Fs	Fluorescencia estable a cualquier nivel de luz.
Fv/Fm	Máxima eficiencia cuántica de los centros de reacción del PSII
Fv:	Componente variable de la fluorescencia, obtenida al restarle al valor de fluorescencia máxima el valor de fluorescencia inicial.
g	Gramos
GB	Glicina-betaína
g _s	Conductancia estomática
H	Hidrógeno
H ₂ SO ₄	Ácido Sulfúrico
H ₃ BO ₃	Ácido Bórico
Ha	Hectáreas
HR	Humedad Relativa
IM	Índice de madurez de frutos de tomate
IU	Unidad Internacional
K	Potasio
kcal	Kilo calorías
kg planta ⁻¹	Kilogramos por planta
Kg	Kilogramo
KH ₂ PO ₄	Fosfato Monopotásico
kj	Kilo joules
KNO ₃	Nitrato de Potasio
KOH	Hidróxido de Potasio
L	Litro
L/h ⁻¹	Litros por hora
m	metros
m ²	Metros cuadrados
m ³ ha ⁻¹	Metros cúbicos por hectáreas

m ³	metros cúbicos
μg	Microgramos
mg	Miligramos
Mg	Magnesio
MgSO ₄	Sulfato de Magnesio
min	Minutos
mm	Milímetros
mM	Milimolar
MM/ha	Millones de toneladas
mmol	Milimol
MMt	Millones de toneladas por hectáreas
Mn	Manganeso
MnSO ₄	Sulfato de Magnesio
Mo	Molibdeno
MPa	Megapascal
Mt	Miles de toneladas
N	Newton o normalidad
n	Número de muestras
N.E.P.	Hortalizas no especificadas en ninguna parte
Na	Sodio
NaCl	Cloruro de Sodio
NADPH	Nicotinamida adenina dinucleótido fosfato
NGS	New Growing Systems
nm	Nanómetros
NPQ	Quenching no fotoquímico
ns	Diferencias no significativas
P	Fósforo
PAR	Radiación de luz fotosintéticamente activa (μmol m ⁻² s ⁻¹)
pH	Potencial de Hidrógeno
PS	Peso seco
psi	Libra-fuerza por pulgada cuadrada
PVC	Policloruro de Vinilo
Q	Quinona
qP	Quenching fotoquímico

Rad _{ACUM}	Radiación acumulada
RAE	Equivalentes de la actividad del retinol
ROS	Especies reactiva de oxígeno
rpm	Revoluciones por minutos
S	Azúfre
s	Segundo
S0	Control
S1	Tratamiento Salino 1 (40 mM de NaCl)
S2	Tratamiento Salino 2 (80 mM de NaCl)
SN	Solución Nutritiva
SO ₄	Sulfato
SST	Sólidos solubles totales
t/ha	Toneladas por hectáreas
TA	Acidez Titulable
T ^a	Temperatura
T ^a acum	Temperatura Acumulada
THoja	Transpiración foliar
Ud	Unidad
UEA	Uso eficiente del agua
W	Vatios
Wm ⁻²	Vatios por metro cuadrado
Zn	Zinc
ZnSO ₄	Sulfato de Zinc
$\Delta F/F'm$ o Φ PSII	Eficiencia fotoquímica del PSII
μL	Microlitros
μmol m ⁻² s ⁻¹	Micromol por metro cuadrado por segundo
μmol	Micromol
Ψ _p	Potencial de turgor
Ψ _w	Potencial hídrico al alba
Ψ _π	Potencial osmótico
%	Porcentaje
° C	Grados Celsius

ÍNDICE GENERAL

1. CAPITULO 1. INTRODUCCION	1
1. 1 EL CULTIVO DEL TOMATE.....	3
1.1.1. Producción mundial de cultivos hortícolas.....	3
1.1.2. El cultivo del tomate en la Región de Murcia.....	5
1.1.3. Valor comercial y nutricional.....	6
1.1.4. Origen, taxonomía y descripción botánica.....	10
1.2. EL CULTIVO DEL TOMATE EN SISTEMAS SIN SUELO.....	12
1.2.1. Necesidad de utilizar sistemas de cultivo sin suelo.....	12
1.2.2. Sistemas de cultivo sin suelo.....	13
1.2.3. Optimización de la fertirrigación de los cultivos sin suelo.....	21
1.3. EFECTO DE LA SALINIDAD EN LOS CULTIVOS AGRÍCOLAS.....	23
1.3.1. Efecto osmótico y/o tóxico de la salinidad.....	24
1.3.2. Factores que influyen en la tolerancia del cultivo a la salinidad.....	25
1.3.3. Mecanismo de adaptación de las plantas a la salinidad.....	29
1.3.4. Respuesta del tomate al estrés por salinidad.....	31
1.4. EFECTO DE LA TEMPERATURA EN LOS CULTIVOS AGRÍCOLAS.....	33
1.4.1. Las altas temperaturas como problema agronómico.....	33
1.4.2. Efectos de las altas temperaturas sobre las plantas.....	34
1.4.3. Tolerancia de las plantas a las altas temperaturas.....	36
1.4.4. Respuesta del tomate al estrés por temperatura.....	38
1.5. BIBLIOGRAFÍA.....	42
CAPITULO 2. OBJETIVOS Y PLAN DE TRABAJO	53
2.1. OBJETIVOS.....	55
2.2. PLAN DE TRABAJO.....	57
CAPITULO 3. ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE PLANTAS DE TOMATE (<i>SOLANUM LYCOPERSICUM</i>) BAJO INVERNADERO EN DIFERENTES SISTEMAS DE CULTIVO SIN SUELO EN CONDICIONES SALINAS	59
3.1 INTRODUCCIÓN.....	61
3.2 MATERIAL Y MÉTODOS.....	62
3.2.1 Material vegetal y condiciones de cultivo.....	62
3.2.2 Diseño experimental.....	64
3.2.3 Descripción de los sistemas de cultivo.....	65
3.2.4 Determinaciones analíticas.....	68
3.2.4.1 Rendimiento de frutos.....	68
3.2.4.2 Parámetros de calidad del fruto.....	68
3.2.4.3 Determinación de parámetros químicos en el zumo.....	70
3.2.4.4 Crecimiento vegetativo y análisis mineral en el tejido vegetal.....	71
3.2.4.5 Parámetros de intercambio gaseoso.....	71
3.2.4.6 Parámetros de fluorescencia de clorofilas.....	72

3.2.4.7 Relaciones hídricas.....	75
3.2.4.8 Análisis estadístico.....	76
3.3 Resultados.....	77
3.3.1 Producción y calidad de frutos.....	77
3.3.1.1 Rendimiento total.....	77
3.3.1.2 Rendimiento comercial.....	78
3.3.1.3 Rendimiento no comercial.....	80
3.3.1.4 Calidad de fruto.....	81
3.3.2. Desarrollo vegetativo de las plantas.....	90
3.3.3 Estado nutricional de las plantas.....	93
3.3.4 Relaciones hídricas, y parámetros de fotosíntesis y fluorescencia de clorofilas.....	107
3.3.5 Matriz de correlación de Pearson.....	111
3.4 Discusión.....	111
3.4.1. Efecto del sistema de cultivo y la salinidad sobre la producción y calidad de los frutos.....	111
3.4.2. Efecto de la salinidad y el sistema de cultivo sobre la nutrición mineral.....	115
3.4.3. Efecto de la salinidad y el sistema de cultivo sobre los parámetros de intercambio gaseoso, relaciones hídricas y fluorescencia de clorofilas.....	117
3.5. CONCLUSIONES.....	119
3.6. BIBLIOGRAFÍA.....	120

CAPITULO 4. ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE PLANTAS DE TOMATE (*SOLANUM LYCOPERSICUM*) BAJO INVERNADERO A ALTAS TEMPERATURAS MEDIOAMBIENTALES CULTIVADAS CON TRES DIFERENTES FRECUENCIAS DE RIEGO
..... 123

4.1 INTRODUCCIÓN.....	125
4.2 MATERIAL Y MÉTODOS.....	126
4.2.1 Material vegetal y condiciones de cultivo.....	126
4.2.2 Diseño experimental.....	128
4.2.3 Descripción del sistema de cultivo.....	129
4.2.4 Determinaciones analíticas.....	131
4.2.5 Análisis estadístico.....	133
4.3 RESULTADOS.....	133
4.3.1 Producción y calidad de frutos.....	133
4.3.1.1 Rendimiento total, comercial y no comercial.....	133
4.3.1.2 Calidad de frutos.....	138
4.3.2 Parámetros de desarrollo vegetativo.....	148
4.3.3 Nutrición mineral de hojas, tallo y raíces.....	149
4.3.4 Parámetros de relaciones hídricas, intercambio gaseoso y fluorescencia de clorofilas.....	155
4.4 DISCUSIÓN.....	160

4.5 CONCLUSIONES	168
4.6 BIBLIOGRAFÍA.....	169
CAPITULO 5. CONCLUSIONES.	173
ANEXOS	179

CAPITULO 1:

Introducción



1. 1 EL CULTIVO DEL TOMATE

1.1.1 Producción mundial de cultivos hortícolas

Según datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), la producción mundial de hortalizas alcanzó en 2011 los 890 millones de toneladas, con una superficie cultivada de más de 52 millones de hectáreas. China es el principal productor de hortalizas a nivel mundial, con una producción total de más de 448 MMt (millones de toneladas), lo que se traduce en más del 50 % de la producción mundial total. Por detrás de China, se sitúan países como India, Estados Unidos o Turquía con una producción de 72,5 (8,1 % del total), 38,0 (4,3 % del total) y 24,4 MMt (2,7 % del total), respectivamente. Italia y España, con una producción de 13,6 y 12,7 MMt, respectivamente, son los países europeos con mayor producción hortícola (Tabla 1.1). Estos ocupan el octavo y noveno puesto en el ranking de principales productores hortícolas en el mundo. En cuanto al rendimiento de los cultivos estimándolo como producción kilogramos por hectárea cosechada (kg/ha), España se sitúa en el primer lugar con 33,5 toneladas producidas por hectárea cultivada, seguido de Corea del Sur (34,9 t/ha), Estados Unidos (28,6 t/ha), Japón (27,6 t/ha) Egipto (26,8 t/ha), Italia (25,7 t/ha) e Irán (25 t/ha).

Tabla 1.1 Producción, superficie cultivada y rendimiento de los principales países productores de hortalizas a nivel mundial en el año 2011.

País	Producción (MMt)	Superficie (MMha)	Rendimiento (t/ha)
China	448,9	23,9	18,8
India	72,5	5,7	12,8
USA	38,1	1,3	28,6
Turkia	24,5	1,0	24,6
Rusia	16,5	1,0	17
Egipto	16,1	0,6	26,8
Irán	15,9	0,6	25
Italia	13,6	0,5	25,7
España	12,7	0,4	33,5
Japón	11,9	0,4	27,6
México	11,7	0,7	16,5
Corea del Sur	11,2	0,3	34,9
Nigeria	9,9	1,5	6,5
Brasil	9,3	0,5	20,7
Indonesia	8,7	1,0	8,5

Fuente: FAOSTAT. (2011). Producción, superficie cultivada y rendimiento a nivel mundial.

En cuanto a las hortalizas cultivadas el tomate es la que más se produce en el mundo, con una producción de 126 MMt, una superficie cultivada de 5 MMha y un rendimiento de 25 t/ha según datos del año 2011 (Tabla 1.2). El tomate, es una de las hortalizas donde se observan mayores rendimientos por superficie plantada, seguido de las sandías con 23 t/ha y coles, crucíferas y lechugas con 22 t/ha.

Tabla 1.2 Producción, área cosechada y rendimiento de los principales cultivos hortícolas a nivel mundial en el año 2011.

Producción Mundial de Hortalizas	Producción	Área Cosechada	Rendimiento
	MM t	MM ha	t/ha
Hortalizas NEP **	241	17	14
Tomates	126	5	25
Sandías	93	4	23
Coles y Crucíferas	69	3,1	22
Cebollas Secas	64	3,5	19
Pepinos y Pepinillos	45	2,6	17
Berenjenas	32	2,1	16
Zanahorias y Nabos	27	1,2	22
Melones	26	1,3	20
Chiles y Pimientos	26	1,7	15
Lechuga	24	1,1	22
Calabazas	20	1,5	13
Coliflor y Brócoli	19	1,0	19
Ajo	15	1,2	13
Espinacas	14	0,89	16
Maíz Verde	9	1,1	9
Guisantes	8	1,1	8
Espárragos	7	1,4	5
Judías Verdes	6,4	0,91	7
Cebollas Frescas	3,6	0,21	17
Judías Verdes con hilo	2,7	0,3	9
Alcachofas	1,3	0,13	10
Total Mundial	891,3	52,32	17

Fuente: FAOSTAT. (2011). Hortalizas ordenadas por toneladas producidas.

**

MMt

MMha

N.E.P. No especificadas en ninguna parte

Millones de toneladas

Millones de hectáreas

Los principales países productores de tomate en el año 2011 fueron China, India, y Estados Unidos de América con una producción de 48,6, 16,8 y 12,6 MMt, respectivamente. España ocupa el noveno lugar a nivel mundial con una producción total de 3,8 MMt y el segundo país europeo después de Italia (Tabla 1.3). España es el primer país exportador, con 910 Mt (Mt, miles de toneladas) seguido de los Países Bajos con 603 Mt. El principal destino del producto exportado es el resto de países europeos, tanto como producto de consumo en fresco como tomate procesado.

Tabla 1.3 Principales países productores de tomate a nivel mundial en el año 2011.

País	Producción (MMt)
China	48,6
India	16,8
Estados Unidos de América	12,6
Turquía	11,0
Egipto	8,1
República Islámica de Irán	6,8
Italia	5,9
Brasil	4,4
España	3,8
Uzbekistán	2,6
México	2,4
Federación Rusia	2,2
Ucrania	2,1
Nigeria	1,5
Tunes	1,3
Portugal	1,2
Marruecos	1,2
Grecia	1,2
República Árabe de Siria	1,2

Fuente: FAOSTAT. (2011). Producción de tomate a nivel mundial

1.1.2 El cultivo del tomate en la Región de Murcia.

En la región de Murcia el tomate es uno de los cultivos hortícolas más importantes, en el 2011 se produjeron alrededor de 394 Mt, siendo la tercera comunidad autónoma productora de España. Su producción se destina sobre todo al mercado en fresco exportándose un 70 % de la misma. En Murcia, a diferencia de la provincia de Almería, donde predominan los pequeños y medianos productores, la mayor parte de la

producción de tomate para fresco es producida por grandes empresas con gran capacidad de explotación, aunque las cooperativas tienen un papel importante en este sector.

Existe una marcada diferencia entre la producción del cultivo del tomate al aire libre y en cultivo protegido, así como la producción en secano y con regadío. En la región de Murcia debido a las condiciones de suelo y climatológicas (bajas precipitaciones, largos períodos con altas temperaturas diurnas, baja humedad relativa, etc.) típicas de zonas mediterráneas, no se suele sembrar tomate en secano, es decir todo el tomate que llega al consumidor y se contabiliza como producción de tomate es bajo regadío. Ésta área cultivada bajo regadío se divide en cultivo protegido (3436 ha) y en área cultivada al aire libre (590 ha). La diferencia entre rendimientos es alta cuando hablamos de cultivo protegido (104 t/ha) y área cultivada al aire libre (62 t/ha) y esto está dado por el mayor control en el riego y fertilización que se puede ejercer durante el cultivo desde la siembra hasta la cosecha (Tabla 1.4).

Tabla 1.4. Superficie sembrada, producción y rendimiento de tomate en la Región de Murcia (RM), 2011.

Superficie (ha)			
Secano	Regadíos		Total
	Aire libre	Protegido	
0	590	3436	4026
Rendimientos (t/ha)			
Secano	Regadíos		Total
	Aire libre	Protegido	
0	62	104	166
Producción (Mt)	37	357	394

Fuente: MAGRAMA. (2011). Superficie, producción y rendimiento de tomate en la RM

1.1.3 Valor comercial y nutricional.

Actualmente se cultivan varios cientos de cultivares e híbridos de tomate que se han ido desarrollando como respuesta a la demanda que presenta el mercado (Leonardi y col., 1996). Así, los cultivares de tomate para consumo en fresco que se cultivan actualmente, presentan grandes diferencias de tamaño (desde unos pocos hasta cientos de gramos), de forma (achatado, redondeado, alargado, en forma de pera) o de color (desde el amarillo hasta el rojo oscuro). El mercado europeo de productos frescos incrementa constantemente sus demandas de productos fácilmente distinguibles por criterios que reflejen calidad.

En los últimos años los consumidores se han vuelto más exigentes y están demandando alimentos más saludables y nutritivos, lo que ha causado un gran esfuerzo en la mejora para obtener altos valores nutricionales en frutas y verduras. Aunque, el tomate no tiene un gran contenido en vitaminas y antioxidantes, es una hortaliza consumida ampliamente a lo largo del todo el año (27,36 y 46,05 kg/habitante y año en Europa y España, respectivamente; FAOSTAT, 2011). Esto la convierte en una de las principales fuentes de minerales, vitaminas y antioxidantes en muchos países (Esquinas-Alcázar y Nuez, 1995).

Dentro de la calidad interna de los frutos de tomate podemos distinguir entre:

- **Calidad organoléptica:** Engloba todas aquellas sensaciones que experimentamos al consumir un alimento relacionadas con el gusto (dulzor, acidez, amargor, etc.), olfato (aroma, perfume) y tacto (firmeza, harinosidad, etc.; Pretel y col., 2004). La calidad organoléptica es la que determina que un alimento sea o no consumido. Guarda una relación directa con la cantidad de sólidos solubles (ácidos y azúcares, principalmente) y compuestos aromáticos del fruto.

- **Calidad nutritiva y funcional:** Es el grado de utilidad que poseen los alimentos para satisfacer los requerimientos de sustancias necesarias para garantizar el buen funcionamiento del organismo humano o animal. La calidad nutritiva aunque es imperceptible para los consumidores, es de gran importancia. Algunas sustancias de estos alimentos proporcionan adicionalmente beneficios médicos o saludables, incluyendo la prevención y el tratamiento de enfermedades, denominándose entonces compuestos nutraceuticos (Jack, 1995). Estos caracteres pueden variar dependiendo de la especie, el cultivar, los factores ambientales, las técnicas agrícolas, los tratamientos postcosecha y el almacenaje (Dumas y col., 2003).

El interés del consumidor por productos vegetales de alta calidad y de propiedades nutritivas adicionales se está incrementando en los últimos años (Kubota y Thomson, 2006). La calidad del producto vegetal es un tema complejo ya que deben ser consideradas diferentes características como textura, contenido de minerales y vitaminas, sabor y otras características organolépticas y nutricionales (Gruda, 2005).

Los principales componentes nutricionales del tomate son azúcares y ácidos orgánicos, proteínas, lípidos y aminoácidos, minerales, componentes fenólicos, pigmentos y vitaminas (Tabla 1.5). Estos tres últimos se han identificado como

componentes nutraceuticos, por lo que el tomate se ha identificado como un alimento funcional y nutraceutico (Jack, 1995; Canene-Adams y *col.*, 2005).

Los azúcares reductores representan aproximadamente el 50 % de la materia seca siendo la glucosa y la fructosa los mayoritarios. Los ácidos orgánicos, principalmente cítrico y málico, representan más del 10 % de la materia seca (Chamarro, 2003). Tanto los azúcares como los ácidos aportan un escaso valor nutritivo al tomate, aunque sí tienen un papel fundamental en su sabor. El contenido medio de proteínas, aminoácidos y lípidos del tomate es muy pobre, alrededor de 0,6 % del peso fresco (Davies y Hobson, 1981). De modo que el tomate no puede ser considerado una fuente importante de estos compuestos.

Los minerales representan una fracción pequeña del peso fresco, aproximadamente un 0,4 % (Davies y Hobson, 1981), pero desempeñan un importante papel en la composición nutritiva del fruto. El incremento del contenido en minerales del tomate está condicionado por la práctica de la fertilización y por la influencia de los factores abióticos a los que sea sometida la planta. El tomate es una fuente interesante de vitaminas para nuestro organismo, principalmente vitamina C y la provitamina A (β -caroteno). Las vitaminas son moléculas orgánicas esenciales para el normal crecimiento, desarrollo y reproducción de humanos y animales.

Tabla 1.5. Valores nutricionales para tomate.

Componentes	Unidades	Cantidad
Agua	g	94,52
Energía	kcal	18
Energía	kJ	74
Proteínas	g	0,88
Lípidos totales	g	0,2
Cenizas	g	0,5
Fibra total	g	1,2
Azúcares totales	g	2,63
Sacarosa	g	0,00
Glucosa (dextrosa)	g	1,25
Fructosa	g	1,37
Lactosa	g	0,00
Maltosa	g	0,00
Galactosa	g	0,00
Almidón	g	0,00
Ac cítrico	g	351
Ac. málico	g	92,5
Ac oxálico	g	26,95
Ac ascórbico	g	14,5
Ac fumárico	g	3,33
Calcio, Ca	mg	10
Hierro, Fe	mg	0,27

Magnesio, Mg	mg	11
Fósforo, P	mg	24
Potasio, K	mg	237
Sodio, Na	mg	5
Zinc, Zn	mg	0,17
Cobre, Cu	mg	0,059
Manganeso, Mg	mg	0,114
Selenio, Se	µg	0,13
Vitamina C, Ác. Ascórbico total	mg	7
Tiamina	mg	0,037
Riboflavina	mg	0,019
Niacina	mg	0,594
Ácido pantoténico	mg	0,089
Vitamina B-6	mg	0,08
Folato total (1)	µg	15
Colina total	mg	6,7
Betaína	mg	0,1
Vitamina B-12	µg*	0
Vitamina A, IU	IU**	833
Vitamina A, RAE	RAE***	42
Retinol	µg	0
Vitamina E (alpha-tocopherol)	mg	0,54
Tocoferol, beta	mg	0,01
Tocoferol, gamma	mg	0,12
Tocoferol, delta	mg	0
Vitamina K (filoquinona)	µg	7,9
Ácidos grasos totales saturados	g	0,028
Ácidos grasos totales monoinsaturados	g	0,031
Ácidos grasos totales poliinsaturados	g	0,083
Triptófano	g	0,006
Treonina	g	0,027
Isoleucina	g	0,018
Leucina	g	0,025
Lisina	g	0,027
Metionina	g	0,006
Cistina	g	0,009
Fenilalanina	g	0,027
Tirosina	g	0,014
Valina	g	0,018
Arginina	g	0,021
Histidina	g	0,014
Alanina	g	0,027
Ácido aspártico	g	0,135
Ácido glutámico	g	0,431
Glicina	g	0,019
Prolina	g	0,015
Serina	g	0,026
Betacaroteno	µg	1624
Alfacaroteno	µg	20
Cryptoxanthin, beta	µg	490
Licopeno	µg	308
Lutein + zeaxanthin	µg	51

Fuente: USDA, Base de Datos Nacional de Nutrientes de Referencia Estándar, edición 19, 2006. Unidades de Nutriente en 100 g de tomate.

* Microgramos

** Unidades internacionales por sus siglas en inglés

*** Equivalentes de la actividad del retinol

1.1.4 Origen, taxonomía y descripción botánica.

El origen del género *Lycopersicon* se localiza en la región Andina que se extiende desde el Sur de Colombia al Norte de Chile y desde la costa del Pacífico (incluidas las islas Galápagos) a las estribaciones orientales de los Andes, comprendiendo los países de Colombia, Ecuador, Perú, Bolivia y Chile (Esquinas-Alcázar y Nuez, 1995). Sin embargo, parece que fue en México donde se originó el cultivo del tomate, muy probablemente a partir de *L. esculentum* var. cerasiforme, único *Lycopersicon* silvestre que crece como mala hierba y que se encuentra fuera del área de distribución del género.

A la llegada de los españoles a América, el tomate estaba integrado en la cultura azteca y en la de otros pueblos del área mesoamericana, existiendo diversidad de tamaños, formas y colores del fruto por lo que se considera que se había formado un centro de diversificación secundario de la especie. El vocablo “tomate” no se introdujo en la lengua castellana hasta 1532, procedente de la lengua náhuatl se denominaba *tomatl*, aplicado genéricamente para plantas con frutos globosos o bayas, con muchas semillas y pulpa acuosa. Para precisar la especie se empleaba un prefijo calificativo, así para *L. esculentum* se usaba *xitomatl* (jiltomate) mientras que la especie más apreciada y empleada por los aztecas, *Physalis philadelphica* Lam., se denominaba *miltomatl*, tomate de milpa o simplemente tomate.

Cuando el tomate fue introducido en el viejo continente tuvo una aceptación muy desigual. Así, en España, Portugal e Italia pasó rápidamente a formar parte de la gastronomía popular. En el resto de Europa fue usado sólo como planta ornamental, por sus flores amarillas y sus bayas rojas o amarillas. Esta reticencia a su consumo se debió fundamentalmente a que la mayoría de las *Solanaceae* europeas son ricas en alcaloides tóxicos. Esta situación se mantuvo en algunos países como Alemania hasta principios del siglo XIX mientras que España y Portugal lo difundieron por todo el mundo a través de sus rutas comerciales y colonias de ultramar.

La primera descripción botánica del tomate la realizó Pier Andrea Mattioli, del jardín botánico de Padua (Italia), quien publicó su herbario en 1554. Desde entonces aparece descrito en numerosos herbarios como el de Matthias de L'Obel en 1581, el de Gerard en Inglaterra en 1597 o el de Salmon en Estados Unidos, ya en 1710.

El tomate pertenece al género *Solanum*, el cual, en cuanto a número de especies, es relativamente poco importante dentro de la familia en la que se encuadra, las

Solanaceae. Esta familia se divide, atendiendo a características morfológicas del embrión, en dos subfamilias: la *Cestroidae* y la *Solanoideae*. El carácter más importante de la subfamilia *Solanoideae*, en la que se incluyen los géneros *Lycopersicon* y *Solanum* L., es que todos sus miembros poseen una gran uniformidad en el número cromosómico ($2n=24$). Estos dos géneros se diferencian entre sí por la presencia de expansiones apicales estériles en las anteras en *Lycopersicon*, que están ausentes en *Solanum* (Taylor, 1986). Otra característica diferenciadora es el mecanismo de dehiscencia anteridial, presentando *Lycopersicon* dehiscencia tipo longitudinal mientras que en *Solanum* la apertura de las anteras es mediante poros apicales (Rick, 1982). No obstante, estudios posteriores han determinado que la dehiscencia en *Lycopersicon* comienza por poros apicales que derivan rápidamente en surcos longitudinales (Bonner y Dickinson, 1989). Como excepción hay que citar a *Lycopersicon pennellii* (Corr.) D'Arcy con dehiscencia poricidal pero encuadrada hoy en *Lycopersicon* aspects. (*New Phytologist* 113:97-115).

La taxonomía generalmente aceptada es: Clase *Dicotyledoneas*, Orden *Solanales* (*Personateae*), Familia *Solanaceae* y Subfamilia *Solanoideae*. La situación taxonómica del tomate entre las Solanáceas ha resultado siempre clara, no así su ubicación genérica. Así, Caspar Bauhin (1623) en su *Pinax* reconoce la existencia de un grupo de plantas que incluyen los actuales géneros *Solanum*, *Atropa* L., *Physalis* L. y otros. En 1700, Tournefort establece siete géneros colocando los de fruto blando en un grupo diferenciado. Este autor reconoció *Lycopersicon* como distinto de *Solanum*. Linneo, en contra de la práctica común en su época y apoyándose en el *Pinax*, incluyó *Lycopersicon* dentro del género *Solanum*, denominado al tomate *Solanum lycopersicum*.

El tomate cultivado, *Lycopersicon esculentum* Mill., es una planta autógena, muy ramificada, rastrera y perenne, aunque se cultiva como anual. La raíz es pivotante pero tiende a ser fasciculada cuando la planta proviene de trasplante. Todas las partes vegetativas aéreas, junto con los pedúnculos, pedicelos y cálices florales son densamente pubescentes y glandulares, lo que da a la planta su olor característico. Los tallos son gruesos y angulosos, de color verde, con nodos compuestos de dos o, más comúnmente, tres hojas y una inflorescencia. En la axila de cada hoja aparece un tallo secundario. Según el tipo de crecimiento, las plantas pueden ser determinadas o indeterminadas. En plantas de hábito indeterminado la yema de la axila de la hoja más joven (la inmediatamente inferior a la inflorescencia terminal) es la que continúa el

crecimiento e inhibe la brotación de otras yemas axilares (al menos por un período). Esta yema crece y mueve a la hoja más joven a una posición por encima de la inflorescencia la cual es desplazada hacia el costado, dando la apariencia de un crecimiento continuo del tallo principal. Luego de diferenciadas 3 o 4 hojas, esta yema se transforma en una segunda inflorescencia terminal. Esta secuencia de crecimiento y desarrollo se repite indefinidamente durante todo el ciclo de la planta de hábito indeterminado. A la porción de tallo que incluye 3 o 4 hojas y un racimo se le llama “simpodio”. En las plantas de tipo determinado hay una fuerte brotación de yemas axilares y se producen menor número de hojas por simpodio, dando lugar al típico hábito arbustivo de estos cultivares. Por lo tanto, el hábito de crecimiento del cultivo de tomate varía entre dos tipos principales llamados “indeterminados” y “determinados”, sin embargo del punto de vista botánico ambos tipos son determinados, ya que la yema apical siempre se diferencia en una inflorescencia terminal (Atherton y Rudich, 1986).

1.2 EL CULTIVO DEL TOMATE EN SISTEMAS SIN SUELO.

1.2.1 Necesidad de utilizar sistemas de cultivo sin suelo

La escasez y la baja calidad del agua disponible para la agricultura es un problema en la Región de Murcia y en la mayor parte del mundo. Esto hace que en los sistemas de cultivo intensivos empiecen a utilizar sistemas de cultivo sin suelo ya que permiten incrementar la eficiencia del uso del agua (Gregory, 2004). El interés por la aplicación práctica de estos sistemas ha ido creciendo desde 1925 hasta nuestras fechas, básicamente por la industria de los invernaderos (Resh, 1997). Este interés fue debido a la imposibilidad de reutilizar año tras año la tierra donde se cultivaba, por los problemas de estructura y fertilidad del suelo, derivados del uso excesivo de fertilizantes y aguas con alto contenido de sales disueltas, y los problemas de enfermedades de suelo. El área de cultivos sin suelo en el sureste de España está estimada en unas 5.000 ha, correspondiendo la mitad a lana de roca y la otra mitad se reparte entre perlita, arena, fibra de coco y otros sustratos (Urrestarazu, 2004). Esta expansión es debida, además de los problemas citados, a la gran demanda de productos vegetales, la extinción en el uso del bromuro de metilo como desinfectante de suelos, el incremento de las zonas urbanizables y el precio de la tierra arable.

1.2.2 Sistemas de cultivo sin suelo

Los sistemas de cultivo sin suelo se pueden clasificar en dos grandes grupos dependiendo del medio en el que se desarrollen las raíces: cultivos en sustrato o cultivos a raíz desnuda (en agua o hidropónicos y en aire o aeropónicos). Existe un elevado número de materiales para ser utilizados como medios de cultivo de las plantas desarrolladas sin suelo. La elección de un material u otro estará determinado por varios factores: la disponibilidad del mismo, la finalidad de la producción, su coste, las propiedades físico-químicas y las experiencias previas en su utilización.

Existen diferentes criterios de clasificación de los sustratos, basados en el origen de los materiales, y pueden ser, naturales (orgánicos e inorgánicos) y sintéticos, y según sus propiedades se clasifican por su actividad química en inertes y químicamente activos; también pueden ser analizados por sus propiedades bioquímicas, biológicas y físicas; dentro de esta última, se estudian la humedad higroscópica, densidad volumétrica, densidad de la fase sólida, porosidad, acidez del sustrato, la conductividad eléctrica (CE), entre otras según lo referido por Martínez y García (1993), Abad (1993), Abad y Noguera (1997), citados por Alarcón (2000).

Sustratos orgánicos

En general los sustratos orgánicos poseen mayor conductividad eléctrica y capacidad de intercambio catiónico que los sustratos inorgánicos (Sahin y *col.*, 2002ab), dificultando el control de la nutrición mineral del cultivo. Esta mayor capacidad de intercambio catiónico ofrece más flexibilidad en el riego y fertilización, permitiendo una fertilización intermitente, es decir alternando riegos con SN completa con riegos de agua sin fertilizantes, incluso permitiendo abonado de fondo, aunque desde el punto de vista del ajuste de la nutrición mineral, es preferible una fertirrigación continua. La directa proporcionalidad de la capacidad tampón de un sustrato con la capacidad de intercambio catiónico, es la respuesta a que los sustratos orgánicos tengan un mayor poder buffer o tampón comparados con los sustratos inorgánicos, ya que en ellos, las sustancias húmicas presentes, proporcionan capacidad tampón frente a un amplio margen de pH,

Dentro de los sustratos orgánicos los más importantes y utilizados en Europa son las turbas, cortezas de madera y la fibra de coco (Fotografía 1.1).

Turbas

Las turbas están formadas por restos de musgos y otras plantas superiores que se hallan en proceso de carbonización lenta, fuera del contacto con el oxígeno, a causa de un exceso de agua, por lo que conservan largo tiempo su estructura anatómica. Los residuos vegetales pueden depositarse en diferentes ecosistemas lo que daría lugar a la formación de dos tipos de turba: Sphagnum u oligotróficas y herbáceas o eutróficas. Las turbas Sphagnum son los componentes orgánicos más utilizados en la actualidad para medios de cultivos que crecen en macetas, debido a sus excelentes propiedades físico-químicas. Sin embargo, y a pesar de que durante casi 30 años las turbas han sido los materiales más utilizados como sustratos, en los últimos tiempos han sido sustituidos por los inorgánicos debido a alteraciones microbiológicas e interacciones con la disolución nutritiva, rápida descomposición, aireación reducida, etc... Además, las reservas de turba son limitadas y no renovables, por lo que su uso indiscriminado puede originar un impacto medioambiental de importancia.

Cortezas de madera

Las cortezas de madera se trata de un término que incluye a la corteza interna (floema vivo) y a la corteza externa de los árboles. Se pueden utilizar cortezas de diferentes árboles siendo las más utilizadas las de pino. Pueden estar en estado fresco o compostadas, las primeras pueden provocar una deficiencia en nitrógeno (N) y problemas de fitotoxicidad; el compostaje reduce estos problemas. Sus propiedades físicas dependen del tamaño de la partícula, pero la porosidad suele superar el 80-85 %.

Fibra de coco

La fibra de coco es un sustrato que ha entrado de manera importante a nivel comercial en la última década y que actualmente se encuentra en auge (Alarcón y Murcia, 2000). La fibra de coco es un subproducto de la industria del coco (*Cocos nucifera*) que se encuentra disponible en grandes cantidades en los países productores de cocos. Los subproductos resultantes del desfibrado de la nuez de coco proceden del mesocarpio de la misma y consisten en fibras largas, que se suelen utilizar para diversas actividades de manufactura, más restos de fibras y polvo, de aspecto similar a la turba, que se acumulan como residuo. Son generalmente estos restos de fibras (de longitud inferior a 2 mm) los que suelen utilizarse en mezclas como sustrato y se presentan

generalmente prensadas en ladrillos que deben deshacerse y rehumectarse previamente a su uso. Las fibras largas, de longitud superior a 16 mm, se utilizan como sustratos para los cultivos sin suelo ya que tienen buen equilibrio entre retención de agua y capacidad de aireación. Evita las enfermedades fungosas en las raíces como consecuencia del exceso de humedad. El pH de este producto es estable y controlado, oscila entre 5,5 y 6,5, rango que resulta apropiado para la mayoría de las plantas



Fotografía 1.1. Detalle de sustratos orgánicos (turba, corteza de madera y fibra de coco).

Sustratos inorgánicos

Los sustratos inorgánicos se consideran un medio material donde se desarrolla el sistema radicular del cultivo que presenta un volumen físico limitado y debe encontrarse aislado del suelo, además tiene como funciones mantener adecuada la relación aire y solución nutritiva (SN) para proporcionar a la raíz el oxígeno y los nutrientes necesarios y servir de anclaje a la planta (Alarcón y *col.*, 2000).

Dentro de los sustratos inorgánicos más utilizados nos encontramos la perlita, lana de roca, la arena y la sepiolita (Fotografía 1.2).

Perlita

La perlita es un material silicio de origen volcánico que sometido a altas temperaturas se expande por deshidratación y da lugar a un material granulado, de muy baja densidad aparente, biológicamente estéril y que es apto para utilizarse en agricultura especialmente en el cultivo de hortalizas como el tomate. Otras características físicas son la capacidad de absorción de agua, la densidad aparente y el espacio poroso total. Las características físicas de la perlita están estrechamente vinculadas a la granulometría que presenta el material. El tipo de perlita más utilizado actualmente para el cultivo de hortalizas es la de granulometría comprendida entre 0 y

los 5 mm. La forma estandarizada de presentación de la perlita es en sacos de polietileno de 800 galgas de espesor y doble capa (negros por el interior y blancos por el exterior). Las dimensiones del saco son de 120 cm de longitud y un diámetro aproximado de 20 cm con este dimensionamiento se cubica 40 litros de sustrato.

Las principales ventajas de la perlita son:

- Retiene un elevado porcentaje de humedad, durante más tiempo.
- Maximización de los nutrientes del agua, manteniendo los nutrientes solubles sobre las partículas de perlita.
- Facilita un rápido enraizamiento, garantizando una estructura densa de las raíces lo que reduce el impacto del trasplante e incrementa el índice de supervivencia.
- Tiene un pH neutro y mayor capacidad de intercambio catiónico.
- Sustrato liviano

Lana de roca

Es un producto mineral transformado industrialmente por temperaturas elevadas. Se trata de un silicato de Al (aluminio) con presencia de calcio y magnesio, y trazas de hierro y manganeso. Este sustrato se utiliza principalmente en países europeos como Holanda, Francia, Reino Unido o Dinamarca. Es un material con una porosidad total elevada (superior al 95 %), una alta capacidad de retención de agua fácilmente disponible y gran aireación, sin embargo, desde el punto de vista químico, es prácticamente inerte, sin ninguna capacidad tampón, lo que exige un perfecto control de la nutrición hídrica y mineral. Por otro lado, presenta el problema de la eliminación de residuos una vez finalizada su vida útil Raviv y *col.*, (2002).

Arena

La arena es un material de naturaleza silíceo y de composición variable, que depende de los componentes de la roca silicatada original. Puede proceder de las canteras, de ríos o ramblas. Es necesario que las arenas estén exentas de limos, arcillas y carbonatos cálcicos (CO_3Ca); de acuerdo con el estudio realizado en Egipto por Abou-Hadid y *col.*, (1987), se observa que cultivos desarrollados tanto en arena como en lana de roca presentan resultados similares. Existen experiencias, realizadas en China, donde se ha utilizado la arena como soporte obteniéndose excelentes resultados (Mancini y

Mugnossa, 1993, Fujiyama y Nagal, 1987). En el sudoeste de España, la arena constituye el sustrato más utilizado, aunque su uso está disminuyendo debido a las restricciones legales en materia medioambiental (Martínez y Abad, 1992). En resumen, de las experiencias realizadas en países como España y Egipto puede deducirse que la arena es un buen sustrato y debe ser utilizado en países donde este material se encuentre en abundancia, debido al abaratamiento de los costos y las ventajas de suministro, siempre, teniendo en cuenta los problemas derivados del uso indiscriminado y de arenas de baja calidad.

Sepiolita

La sepiolita es un mineral de la arcilla cuya composición está basada principalmente en silicato de magnesio hidratado. En España se ha desarrollado un experimento a escala comercial, en invernaderos de polietileno, para evaluar el comportamiento de la arena, la perlita, la lana de roca y la sepiolita y esta última mezclada con leonardita. Los resultados indican que los rendimientos más altos se obtuvieron con una mezcla de perlita, sepiolita y lana de roca (Martínez y Abad, 1992). Estos autores demuestran las buenas cualidades de la sepiolita en condiciones de elevada salinidad, resaltando la ausencia de contaminantes y su excelente precio.



Fotografía 1.2. Detalle de sustratos inorgánicos (perlita, lana de roca, arena y sepiolita).

Sistemas de raíz desnuda:

Los sistemas a raíz desnuda consisten en la suspensión de las raíces total o parcialmente en la disolución nutritiva, actualmente son alternativas productivas para la obtención de hortalizas precoces, así como para obtener mayores cosechas en el año.

A través de la disolución de los fertilizantes altamente solubles en agua se entregan los elementos minerales esenciales para el cultivo. En los sistemas a raíz desnuda, se puede realizar un control preciso de la concentración de cada nutriente y de los equilibrios entre ellos. En estos casos se debe garantizar una buena oxigenación de las raíces y tratar de evitar cualquier infección a través de la solución nutritiva. Los sistemas a raíz desnuda pueden ser:

NGS® (New Growing System)

El sistema de cultivo NGS® representa una nueva forma de cultivo sin suelo a raíz desnuda. Fue desarrollado completamente en Almería (España) por la empresa New Growing System. En este sistema las raíces se desarrollan en un conjunto de láminas de polietileno (PE) superpuestas en forma de V donde se hace pasar la solución nutritiva (SN) que circula en un circuito cerrado. Estas láminas están dispuestas de tal forma que la SN después de recorrer un tramo de la lámina, pasa o cae a la lámina siguiente por medio de unos agujeros o taladros, troquelados en la parte inferior o en las escaleras laterales de dichas laminas.

La SN recorre un largo camino desde que es liberada por el sistema de goteo, hasta que es recogida por la última lamina (colectora), es durante este camino cuando la SN pone a disposición de las raíces: agua, nutrientes y oxígeno. Al mismo tiempo, la SN retira de la rizósfera los iones no asimilados o los compuestos excretados por las raíces y contribuye a renovar los gases que participan en la respiración radical (O_2 y CO_2). En el caso que se emplee una SN calentada (invierno) o refrigerada (verano), la SN facilita el intercambio de calor con el sistema.

Las raíces, una vez han superado el cepellón y guiadas por el movimiento del agua a favor de la pendiente de la bolsa, son conducidas hasta el agujero que les permite descender a la capa inferior. Este proceso se repite tantas veces como capas interiores tiene la bolsa; de este modo, el sistema se puede adaptar a diferentes cultivos. La SN es recogida al final de cada línea de cultivo mediante un embudo conectado a un colector que canaliza, por gravedad, los drenajes hacia un depósito de recogida ubicado en el cabezal de riego, donde se reponen el agua y los nutrientes consumidos por la planta. El sistema NGS es un sistema que aprovecha el cien por cien los drenajes. Las principales ventajas de este sistema son:

- Es un sistema sin suelo a raíz desnuda que no precisa de ningún sustrato.
- Permite obtener altas producciones de excelente calidad.
- Permite obtener producciones más precoces.
- Ha sido desarrollado para trabajar en circuito cerrado ahorrando agua y nutrientes.
- Tiene un bajo impacto ambiental y permite reutilizar el cien por cien de los drenajes.
- El movimiento continuo de la solución nutritiva reduce los riesgos de salinidad que aparecen cuando se utilizan aguas de mala calidad o sustratos orgánicos e inertes y se acumulan las sales en éstos.
- Mantiene el sistema radicular perfectamente aireado, lo que se traduce en una producción más abundante.
- Admite la incorporación de cualquier sistema de desinfección de SN.

NFT (Nutrient Film Technique)

El sistema NFT se caracteriza por aplicar una técnica de flujo continuo de una película de solución nutritiva, es un sistema de cultivo en agua donde la solución nutritiva circula continuamente por una serie de canales de cultivo donde estos sirven para el sostén y desarrollo de las raíces de las plantas. Por el canal, con una ligera pendiente (0.5 -1.0 %) recorre una película o lámina de unos 3 a 5 milímetros de agua conteniendo la solución nutritiva, luego ésta es recolectada por una tubería de drenaje que está conectada con el tanque. Finalmente la solución retorna al tanque. Este flujo continuo de solución nutritiva permite que las raíces tengan una buena oxigenación y un adecuado suministro de nutrientes para las plantas Spensley, K; Cooper (1978); Winsor y col. (1978).

Las principales ventajas del sistema NFT son:

- El agua se encuentra muy fácilmente disponible para el cultivo, lo que representa una de las mayores ventajas del sistema, al ser mínimo el gasto de energía que debe realizar la planta en la absorción, pudiendo aprovechar éstas en otros procesos metabólicos.
- La renovación continua de la solución nutritiva en el entorno de la raíz, permite un suministro adecuado de nutrientes minerales y oxígeno.
- Alto nivel de tolerancia a la concentración de nutrientes, con la recomendación de no utilizar bajas concentraciones que provoquen deficiencias de los mismos para las plantas.

- Las producciones suelen ser mayores y más precoces, además de una calidad excelente.
- Ha sido desarrollado para trabajar en circuito cerrado ahorrando agua y nutrientes, a la vez que tiene un bajo impacto ambiental y permite reutilizar el cien por cien de los drenajes.

Raíz flotante

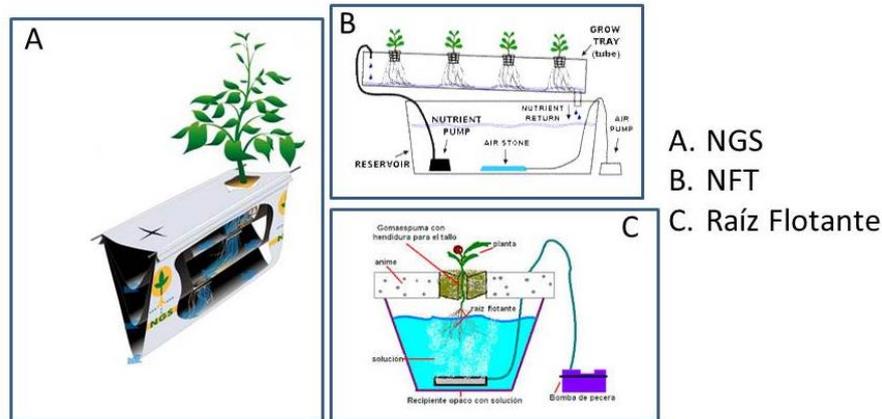
El cultivo de raíz flotante es una técnica de cultivo de plantas en soluciones acuosas, donde estas crecen flotando en una placa, cubo o recipiente, teniendo siempre su raíz dentro de la solución nutritiva. El sistema lleva incorporado un electrosoplante u otro mecanismo encargado de incorporar la aireación y mediante el cual se oxigenan las raíces.

Las principales ventajas del sistema consisten en:

- Ahorro de agua debido a que es un sistema cerrado y el agua que se reincorpora solo puede ser debido al consumo por la planta o a una acumulación de sales en la solución nutritiva.
- Sencillo control y manejo del sistema, el cual una vez en marcha solo se necesita de un control de la solución nutritiva y de las atenciones culturales al cultivo.
- Mayor producción en menos espacio, debido a que las plantas no necesitan competir por los nutrientes, y así se pueden optimizar las densidades de plantación en la medida en que nos lo permita el desarrollo vegetativo del cultivo.
- Optimización en el uso de fertilizantes ya que solo se usa la cantidad requerida por el cultivo en todo su ciclo vegetativo.
- Menos uso de productos fitosanitario, casi nulo.
- Obtención de productos con mayor calidad y limpieza.

Es importante destacar que no existe un mejor sistema de cultivo o un sustrato ideal, cada uno presenta una serie de ventajas e inconvenientes y su elección dependerá de las características del cultivo a implantar, de las variables ambientales y de la instalación a

utilizar. Lo que si existe es un manejo ideal para cada tipo de sistema de cultivo o sustrato a emplear.



Fotografía 1.3. Detalle de sistemas de raíz desnuda (NGS, NFT y Raíz Flotante).

1.2.3 Optimización de la fertirrigación de los cultivos sin suelo

En todos los tipos de cultivo sin suelo, el suelo es sustituido en su función de aportar nutrientes a las plantas por una SN artificial la cual es suministrada al cultivo por un sistema de riego (Savvas, 2001). Para formular la composición de una SN para un cierto cultivo, debe de haber resultados experimentales sobre los requerimientos nutricionales de ese cultivo en particular. Estos datos son esenciales para comprobar y ajustar el estado nutricional de la planta durante el cultivo. Además, incluso cuando se dispone de una correcta SN para un cultivo determinado, que da buenos rendimientos, es esencial aportarla correctamente para un sustrato determinado. La SN debe ser aportada a las plantas siguiendo una eficiente programación del riego con respecto a la cantidad total de agua aportada y la frecuencia de su aplicación. En los últimos años y debido al interés que su aplicación comercial tiene para los agricultores, se han realizado grandes esfuerzos, apoyados por la mejora de los equipos y técnicas analíticas, en la investigación de soluciones nutritivas específicas para cada cultivo en particular (de Kreij, 1996; Resh, 1997; Hanan, 1998).

En el área mediterránea, la práctica totalidad de las parcelas de cultivos sin suelo están bajo invernadero y son, hoy en día, sistemas abiertos a solución perdida, es decir, los lixiviados se dejan percolar en el suelo, bien en el mismo emplazamiento que los sustratos, o bien son canalizados fuera del invernadero donde se desechan. No obstante, cada día se impone con más fuerza la necesidad de regeneración y reutilización de estas

aguas de drenaje, e incrementar el uso eficiente de las aguas de riego (Alarcón y *col.*, 1998). Un paso previo a la reutilización de los drenajes es el estudio de adecuación de un sustrato para un cultivo, donde se obtenga información precisa acerca del consumo de agua y nutrientes por las plantas, necesidades de lavado, concentración de nutrientes en los drenajes, estado nutricional del cultivo, etc. Con esta información se podrán crear modelos que integren el manejo del riego, la fertilización y las respuestas de las plantas, y desarrollar estrategias ambientales y económicas óptimas (Klaring, 2001).

Como ya hemos apuntado, a la necesidad de reutilizar las aguas de drenaje, se le suma la necesidad de utilizar aguas con alta CE. Esto requiere un mayor conocimiento de la tolerancia a la salinidad de los cultivos y el empleo de técnicas de fertirriego adecuadas (Shannon y Grieve, 2000). Así pues, en un marco más amplio, la optimización del manejo de los cultivos sin suelo pasa por, encontrar estrategias de riego que hagan un uso eficiente del agua, que contemplen la calidad del agua de riego y que mantengan rendimientos sostenibles sin descender los parámetros de calidad de los frutos (Flowers y *col.*, 2005; Ragab y *col.*, 2005).

Entre las variables a tener en cuenta en el desarrollo de estrategias de riego y que pueden determinar la respuesta del cultivo a la salinidad están, el medio de cultivo, el tipo de sal, estado de crecimiento de la planta (Del Amor y *col.*, 2001), el sistema de riego empleado (Rouphael y *col.*, 2004; Incrocci y *col.*, 2006), y variables como la conductividad eléctrica de la solución nutritiva (CE_{SN}), la frecuencia de riego, y la cantidad de nutrientes en la solución requeridas por las plantas (Dorais y *col.*, 2001; Mitchell y *col.*, 1991a; Peet y Willits, 1995; Santamaría y *col.*, 2004; Savvas y *col.*, 2005ab; Silber y *col.*, 2005a; Silber y *col.*, 2005b; Assouline y *col.*, 2006).

En las últimas décadas, el aporte de una SN ha llegado a ser una operación de rutina, no sólo para cultivos hidropónicos o en sustratos, sino también para cultivos que crecen en el suelo (Savvas, 2001). Esta práctica ha permitido un mejor control de la nutrición de las plantas, especialmente, en los cultivos sin suelo, donde la reserva de nutrientes en la zona radicular es restringida. La concentración total de nutrientes se considera como una de las propiedades más importantes de la SN en sistemas sin suelo, ya que determinará la fuerza iónica de esa solución. Si además de conocer la concentración total de sales, conocemos el pH, el contenido de micronutrientes, la proporción entre los macronutrientes, y la composición del agua base, podemos decir que la SN está completamente definida (Savvas y Adamidis, 1999).

Además de definir la SN, es necesario conocer cuál será su manejo óptimo para las condiciones de cultivo. En este sentido, cuando nos enfrentamos a aguas de baja calidad, establecer una programación de riego adecuada conlleva más dificultad que si se aplican aguas de buena calidad (Paranychianakis y Chartzoulakis, 2005). Ello es debido a la escasa información existente del uso del agua por las plantas crecidas en un sustrato determinado bajo condiciones de estrés salino. De este modo, el éxito de la estrategia de riego no sólo dependerá del rendimiento final por planta sino también del consumo de agua por planta.

Aumentando la frecuencia de riego se previene la formación de zonas en el entorno radicular lo suficientemente secas como para restringir la absorción de nutrientes entre los sucesivos eventos de riego, descendiendo el gradiente de concentración entre la SN y el medio radicular, y disminuyendo el papel de la difusión en el transporte de nutrientes hacia la raíz (Silber y *col.*, 2003). Se conoce que el riego con alta frecuencia mantiene la humedad en el sustrato y previene la concentración de sales en el sustrato minimizando los efectos adversos de la sal en las plantas (Boman y *col.*, 2005; Helalia y *col.*, 1996; Paranychianakis y Chartzoulakis, 2005).

1.3. EFECTO DE LA SALINIDAD EN LOS CULTIVOS AGRÍCOLAS.

La salinidad es un problema mundial en la agricultura que amenaza el desarrollo socio-económico de los países. De acuerdo al Servicio de Gestión de Suelos y Nutrición Vegetal, la superficie total de suelos salinos actualmente asciende a 397 millones de hectáreas, 19,5 % de los suelos agrícolas de regadío y el 2,1 % de los de secano están afectados por la salinidad. Para el año 2050 se espera que la salinidad cause problemas serios a más del 50 % de los suelos cultivables.

La salinidad es un fenómeno natural característico de zonas áridas y semiáridas, donde la evaporación excede a la precipitación, y donde la escasez de precipitaciones, hace necesario el riego para una producción óptima. Este problema lejos de ser resuelto ha empeorado en los últimos años, la urbanización y la industrialización con una mayor competencia por el agua de alta calidad y la sobreexplotación de los acuíferos subterráneos aumenta la intrusión de agua salada en los pozos. Incluso el agua de buena calidad puede contener de 100-1000 gramos de sal por m⁻³. Con una aportación anual de 10.000 m³ ha⁻¹, se añade al suelo entre 1 y 10 toneladas de sal. Como resultado de la

transpiración y la evaporación del agua, las sales solubles se acumulan en los suelos y deben ser eliminadas periódicamente por lixiviación y drenaje.

1.3.1 Efecto osmótico y/o tóxico de la salinidad

Cuando la concentración de sal en la solución del suelo es elevada, el potencial osmótico de dicha solución es muy bajo. Por lo tanto, la salinidad reduce el potencial hídrico externo. A salinidades elevadas, el potencial hídrico externo puede estar por debajo del potencial hídrico de las células provocando deshidratación osmótica. Esto se conoce como el efecto osmótico de la salinidad.

La mayor parte de las respuestas rápidas en la tasa de elongación de las hojas a la salinidad es atribuible a los cambios en el estado hídrico de las células (Munns y Tester, 2008). La eliminación de la salinidad de la zona radicular provoca que la tasa de expansión foliar inmediatamente revierta al nivel anterior sin sal, lo que sugiere que el déficit hídrico es la razón principal para la reducción del crecimiento, lo cual ocurre más por la cantidad de sal de la zona radicular que por la toxicidad de las mismas. La salinización del suelo disminuye la disponibilidad y absorción de agua, y así reduce la presión radicular que transporta el agua y los solutos por el xilema.

En los suelos salinos Na y Cl son por lo general los iones dominantes. A pesar de la esencialidad de cloruro como un nutriente para todas las plantas superiores y el sodio como nutriente mineral para muchas halófitas y algunas especies C₄, la concentración de ambos iones en suelos salinos, supera con creces los demás nutrientes y conduce a un efecto específico en plantas no tolerantes a la salinidad (Fig. 1.1). La alta concentración de algunos de estos iones conduce a su acumulación en el tejido de la planta, produciendo toxicidad. En estas condiciones, estos iones tóxicos interfieren con la asimilación de otros nutrientes esenciales causando desequilibrios nutricionales.

La proporción de estos iones (Cl y Na) con respecto a otros nutrientes esenciales para las plantas pueden ser bastante elevados, causando desequilibrios nutricionales. La interacción de Na/K, Na/Ca, Mg/Ca, Cl/NO₃ es bien conocida. Cabe destacar, por ejemplo, la interacción Na/K. Debido a que el Na es químicamente muy parecido al K por su tamaño, el K puede desplazar al Na en numerosos sitios donde el K participa activando la funcionalidad de las enzimas y regulando la conformación de las proteínas. La presencia de Na en lugar de K crea problemas a nivel bioquímico.

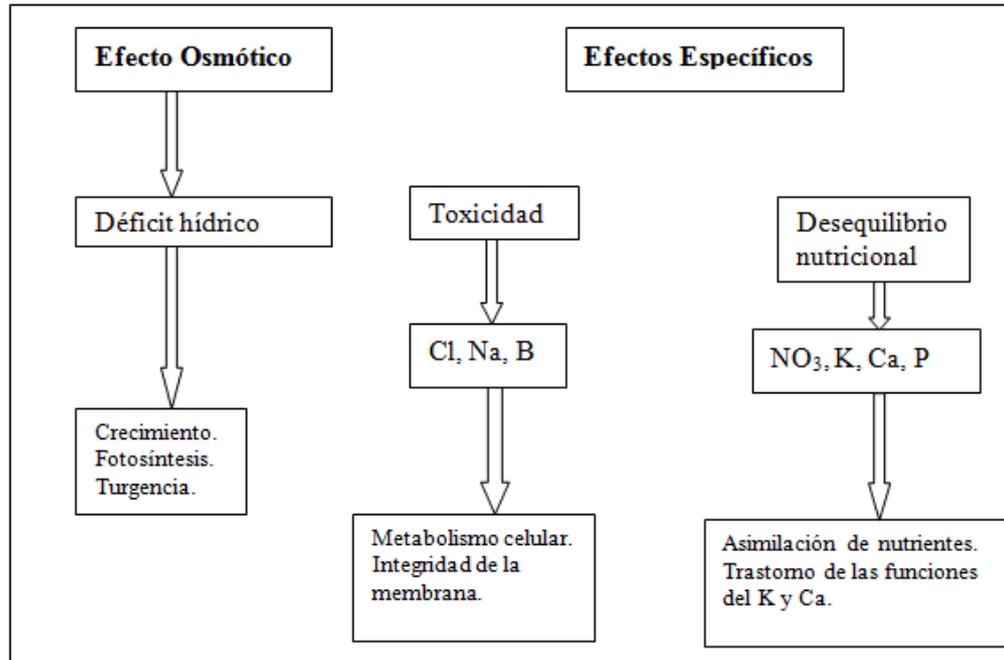


Figura 1.1. Efectos de la salinidad en las plantas: efectos osmótico y específico

El efecto tóxico de la salinidad queda reflejado principalmente por dos hechos que se observan en los experimentos con salinidad. Una de ellas es que las concentraciones moderadas de Na, Cl⁻ o SO₄ u otros iones reducen el crecimiento o causan lesiones específicas. La otra es que soluciones iso-osmóticas de diferentes composiciones pueden provocar respuestas muy diferentes. Como era de esperar, los genotipos pueden diferir en estas respuestas, incluso dentro de una misma especie. La toxicidad debido a concentraciones moderadas de algunos iones de los suelos salinos es más común en las plantas leñosas. Los efectos secundarios del estrés por NaCl incluyen alteraciones en la absorción de K, disfunción de las membranas celulares, disminución de la fotosíntesis y otros procesos bioquímicos, generación de especies reactivas de oxígeno (ROS) y la muerte celular programada (Buchanam y *col.*, 2000).

1.3.2. Factores que influyen en la tolerancia del cultivo a la salinidad

La tolerancia a la salinidad de una planta se puede definir como la capacidad de la planta para soportar los efectos de exceso de sal en el medio de crecimiento radicular. Implícitamente en esta definición está la idea de que una planta puede soportar una cantidad exacta de sal sin efectos adversos. La tolerancia a la sal de una planta no es un valor exacto. Éste depende de muchos factores, condiciones y límites. Desde un punto de vista agronómico, la tolerancia a la salinidad de un cultivo concreto a una

determinada salinidad del suelo es la respuesta relativa del propio cultivo en condiciones no salinas (Hirt y Shinozaki, 2004). De este modo, la tolerancia a la salinidad podría verse afectada por una serie de factores, tales como el tipo de sales en la solución del suelo, condiciones de crecimiento (medio ambiente y manejo), la edad y la variedad de la planta. La figura 1.2 muestra el crecimiento de diferentes especies sometidas a la salinidad relacionada con la de los controles no salinos. En el grupo IA son *Suaeda maritime* y *Atriplex nummularia*. Estas especies muestran la estimulación del crecimiento con niveles de Cl^- por debajo de 400 mM. El grupo IB, *Spartina townsendii* y *Beta vulgaris* (remolacha azucarera), toleran la sal, pero su crecimiento se retarda. El grupo II, incluye halófitas tales como *Festuca rubra* ssp *littorallis* y *Puccinellia peisonis* y no halófitas, como el algodón y la cebada. Este grupo también incluye tomate (intermedio) y la soja, que son más sensibles. El grupo III, comprende especies muy sensibles a la sal, muchos árboles frutales como los cítricos, aguacate y frutas de hueso.

Los suelos agrícolas de regadío son, por lo general, fertilizados para lograr la máxima productividad. Sin embargo, la aplicación de fertilizantes a veces es inadecuada o incluso omitida debido a los altos costos o al sistema de riego. Los cultivos que crecen en suelos de baja fertilidad parecen más tolerantes a la salinidad que aquellos que crecen con la fertilidad adecuada, esto se debe a que la fertilidad y no la salinidad, es el primer factor limitante en el crecimiento de las plantas. Aplicaciones de fertilizantes incrementarán los rendimientos de los cultivos, independientemente de la salinidad del suelo, pero esto ocurre en una mayor proporción cuando los suelos son no salinos con respecto a suelos salinos.

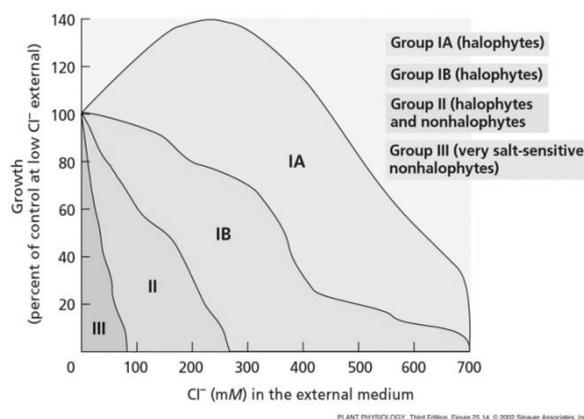


Figura 1.2. Clasificación de plantas según su respuesta a la salinidad

Por lo tanto, si el rendimiento se reduce considerablemente más por un factor que por el otro, aliviando las condiciones más limitantes se incrementará más el rendimiento que corrigiendo las condiciones menos severas. Las propiedades físicas del suelo también pueden modificar la tolerancia a la salinidad de los cultivos. Por ejemplo, suelos con una estructura pobre o con una capa impermeable podrían restringir el crecimiento de las raíces, tanto como influir en la distribución de agua y la sal en el suelo.

En condiciones de campo, la salinidad del suelo es rara vez constante con el tiempo y uniforme en el espacio (García-Sánchez y *col.*, 2010). Dependiendo de la magnitud de la lixiviación y el drenaje, la distribución de la sal puede ser uniforme en el suelo y cambiar ligeramente con la profundidad, o puede ser altamente irregular y variar desde las concentraciones de sal cerca de la superficie del suelo, que aproximadamente son iguales a la del agua de riego, a concentraciones en el fondo de la zona radicular que son varias veces mayores.

El clima, es uno de los factores que afecta principalmente a la respuesta de las plantas a la salinidad. En general, las plantas son más sensibles a la salinidad a altas temperaturas y baja humedad relativa (Levy y Syvertsen, 2004).

La sensibilidad de los cultivos a la salinidad del suelo cambia a menudo de una etapa de crecimiento a la siguiente. Dependiendo de las especies de plantas, las plantas pueden ser más sensibles durante los primeros estadios del crecimiento vegetativo que durante la etapa reproductiva del desarrollo. En general, la germinación es la etapa más tolerante a la salinidad.

La tolerancia a la sal de un cultivo se puede describir mediante la representación continua del rendimiento relativo en función de la salinidad del suelo (Fig. 1.3). Maas y Hoffman (1977) propusieron que las gráficas de respuestas de los cultivos a la salinidad estarían formadas por dos rectas, la primera es una meseta de tolerancia con una pendiente de cero, y la otra es una recta cuya pendiente indica la reducción del rendimiento por cada unidad que se incrementa la salinidad en la zona radicular.

$$Y_r = 100 - b*(EC_e - a)$$

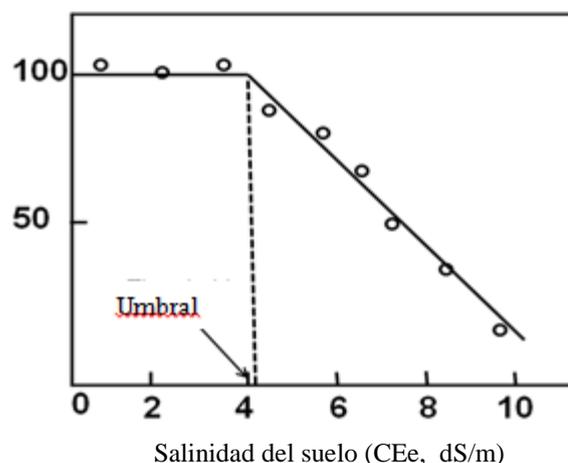


Figura 1.3. Parámetros de tolerancia a la salinidad: umbral (a) y la pendiente (b) derivada de la relación entre la salinidad del suelo y el rendimiento relativo (Yr).

En estas gráficas ‘Yr’ es el rendimiento relativo (tanto por ciento de la producción de cada tratamiento salino en relación a la producción en condiciones no salinas); ‘a’ es el umbral de salinidad expresado en dS/m; ‘b’ es la pendiente expresada en % de reducción de rendimiento por dS/m y la ECe es la conductividad eléctrica media del extracto de suelo saturado tomado en la zona radicular. Las especies de plantas han demostrado un amplio grado de variación en su capacidad para tolerar las condiciones salinas. Los valores de los parámetros ‘a’ y ‘b’ de algunas hortalizas y frutales se muestran en la Tabla 1.2. La judía se califica como un cultivo sensible a la salinidad ya que disminuye el rendimiento un 19 % por cada unidad de incremento en la salinidad (ECe) más allá del umbral de 1,0 dS/m, mientras que la cebada es un cultivo considerado tolerante a la salinidad con un ECe umbral de 8 dS/m y una pendiente del 5 %.

Tabla 1.2. Tolerancia a la salinidad de algunos cultivos de hortalizas (verduras) y frutales

Nombre común	Cultivo Nombre botánico	Conductividad eléctrica del extracto	
		Umbral	Pendiente (%)
Judía	Phaseolus vulgaris	1	19
Lechuga	Lactuca sativa	1.3	13
Almendra	Prunus dulcis	1.5	19
Pimiento	Capsicum annum	1.5	14
Maíz	Zea mays	1.7	12
Melocotonero	Prunus persica	1.7	21
Pomelo	Citrus paradise	1.8	16
Alfalfa	Medicago sativa	2	7.3
Tomate	Lycopersicon	2.5	9.9
Brócoli	Brassica oleracea	2.8	9.2
Palmera datilera	Phoenix dactylifera	4	3.6
Espárragos	Asparagus officinalis	4.1	2
Soja	Glycine max	5	20
Trigo	Triticum aestivum	6	7.1
Remolacha	Beta vulgaris	7	5.9
Algodón	Gossypium hirsutum	7.7	5.2
Cebada	Hordeum vulgare	8	5

1.3.3. Mecanismo de adaptación de las plantas a la salinidad

Las homeostasis iónica y osmótica son necesarias para la tolerancia a la salinidad de las plantas (Fig. 1.4). Las plantas responden al efecto osmótico, evitando la pérdida de agua y manteniendo el potencial de turgor. En respuesta al menor potencial hídrico de la solución del suelo, las plantas deben ajustarse osmóticamente. Lo hacen mediante la acumulación de iones inorgánicos, o mediante la síntesis de compuestos orgánicos con el fin de disminuir el potencial osmótico en la célula o por la combinación de ambos métodos (Lambers y *col.*, 1998). El equilibrio osmótico en el citoplasma se logra por la acumulación de solutos orgánicos que no inhiben los procesos metabólicos, estos solutos son conocidos como osmolitos compatibles. Estos son los azúcares (principalmente sacarosa y fructosa), polioles (glicerina, inositol metilado), azúcares complejos (trehalosa, rafinosa, fructanos), metabolitos con carga (glicina, betaína) y aminoácidos tales como la prolina. Las halófitas pueden acumular grandes cantidades de sales inorgánicas en los orgánulos celulares (vacuolas, glándulas, etc.). Con el fin de prosperar en un medio salino las glicofitas deben sintetizar osmolitos orgánicos en mayor medida que las plantas que utilizan la sal como su principal osmolito. Este proceso tiene un costo de energía que es responsable, en parte, de la reducción del rendimiento.

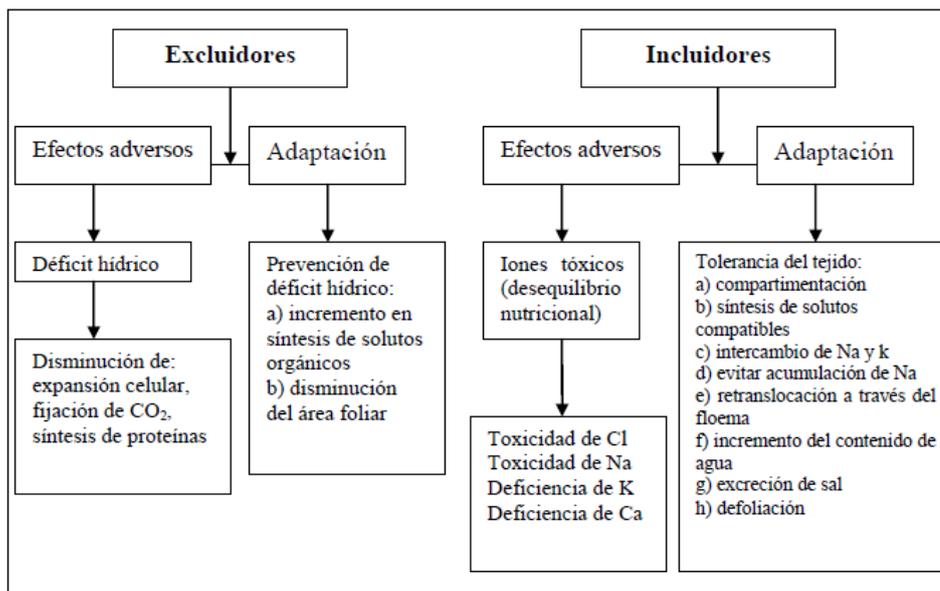


Figura 1.4. Diferentes respuestas y mecanismos de las plantas a la salinidad. Excluidoras, especies que excluyen la sal a nivel radicular mientras que las especies incluidoras, absorben y acumulan la sal en las vacuolas de las células vegetales.

La homeostasis iónica intracelular requiere el control de la absorción de iones tóxicos en el interior de las vacuolas para facilitar su compartimentación. Teniendo en cuenta que la vacuola es un compartimento esencial para la expansión celular, la acumulación de iones en este orgánulo facilita el ajuste osmótico que impulsa el crecimiento con el mínimo impacto perjudicial sobre la maquinaria del citosol y la vacuola (Taiz y Zeiger, 2006). El establecimiento de la homeostasis iónica y osmótica tras un estrés salino es esencial no sólo para prevenir la muerte celular sino también para el mantenimiento de los estados estacionarios fisiológicos y bioquímicos necesarios para el crecimiento y la finalización del ciclo de la vida.

Las proporciones de Na y Cl con otros nutrientes esenciales pueden ser muy elevadas y pueden causar deficiencias de elementos nutritivos presentes en concentraciones mucho más bajas (Ruiz y col., 1997). Las necesidades de K para mantener la tasa de crecimiento de la planta son más elevadas cuando la planta está en condiciones salinas. Las plantas con una elevada selectividad de K/Na han demostrado ser más tolerantes a la salinidad que otras con baja selectividad de K/Na. Las elevadas concentraciones de sulfato y en mayor medida Cl⁻ disminuyen la velocidad de absorción de nitratos. Los iones de Na han demostrado que causan alteraciones en la nutrición de Ca. Los trastornos nutricionales que involucran otros elementos pueden estar vinculados a los efectos de la salinidad sobre el transporte y metabolismo de Ca.

El estrés salino provoca un aumento de especies reactivas de oxígeno (ROS). A menos que las especies reactivas de oxígeno sean anuladas, pueden ocurrir daños irreversibles en los lípidos de la membrana, proteínas y ácidos nucleicos. Las plantas producen antioxidantes de bajo peso molecular como el ácido ascórbico, glutatión reducido, tocoferoles y carotenoides, y el uso de enzimas desintoxicantes como superóxido dismutasa, catalasas, ascorbato peroxidasas, glutatión S-transferasa y glutatión peroxidasa para capturar especies reactivas de oxígeno.

1.3.4. Respuesta del tomate al estrés por salinidad

La salinidad en el sustrato o en agua de riego restringe la disponibilidad de agua a las plantas de forma similar al estrés hídrico, causando una reducción en la tasa de crecimiento del fruto e incluso en la producción (Munns, 2002) y alterando las relaciones hídricas de la planta. Niveles altos de salinidad disminuyen el potencial hídrico de la planta, la cual reduce el flujo de agua hacia el fruto y la tasa de expansión del mismo (Ehret y Ho, 1986). Sin embargo, esta reducción en la toma de agua está contrarrestada por una reducción en la tasa de transpiración y ajuste del potencial osmótico (Krauss y *col.*, 2006).

La firmeza del fruto parece incrementar con la salinidad (Petersen y *col.*, 1998), aunque esto depende también del cultivar. El efecto de la sal puede verse agravado por las condiciones ambientales. La aplicación de agua salina durante el día o en cultivo de primavera o verano causa reducciones más serias en la producción que durante la noche o en cultivo de otoño (Stanghellini, 1994) dado que altos niveles de temperatura y radiación y bajos niveles de humedad relativa en época de verano disminuyen el potencial hídrico de la planta induciendo una transpiración más rápida. El transporte de agua vía floema supone normalmente un 80 % del total del transporte de agua, y en condiciones de estrés salino hasta el 90 %. La concentración de compuestos orgánicos en floema incrementa un 40 % en condiciones salinas. La tasa de iones transportados por el xilema incrementa con la salinidad de forma significativa, pero su contribución al ajuste osmótico del fruto es menor (Plaut y *col.*, 2004).

La reducción de la toma de agua por la planta bajo condiciones salinas podría estar relacionada con una reducción en parámetros morfológicos y/o fisiológicos tales como el área foliar, la densidad estomática y el cierre estomático (Romero-Arya y *col.*, 2001). Por otro lado se sabe que el peso seco (Saranga y *col.*, 1993) y la producción de fruto (Bolarín y *col.*, 1991) de tomate se reducen en proporción al incremento de

salinidad en la solución de riego. Algunos autores apuntan por tanto que el peso seco de la parte vegetativa de la planta sería un buen indicador de la toma de agua por parte de la planta en condiciones salinas, sabiendo que la toma de agua por parte de las plantas de tomate disminuye según incrementa la concentración de sal en el agua de riego, un ajuste en la conductividad eléctrica de la solución nutritiva permitiría a los productores de tomate bajo invernadero modificar la disponibilidad de agua, abriendo la posibilidad de ahorrar agua y reducir la carga de sal en el sustrato (Soria y Cuartero, 2000).

En tomate, la reducción de la producción por efecto de la salinidad está principalmente causada por una disminución en el flujo de agua hacia el fruto (Ehret y Ho, 1986), combinado con un acortamiento del periodo de crecimiento del fruto (Mizrahi, 1982). El efecto de la salinidad en la producción de fruto de tomate es debido generalmente a una disminución en el tamaño del fruto más que en el número de frutos (Plaut, 2004). No todas las variedades reducen su tamaño de fruto en la misma proporción bajo condiciones salinas. En general, cuanto más pequeño es el fruto, menos importante es la reducción en peso bajo condiciones de salinidad moderada (Cruz, 1991). A bajos niveles de conductividad eléctrica (CE) de la solución de riego, la reducción en la producción es causada principalmente por reducción en el peso medio del fruto. Así, algunos autores han constatado que una conductividad eléctrica entre 4,6-8 mS/cm^{-1} reduce la producción mediante una reducción en el tamaño del fruto, mientras que una CE de 12 mS/cm^{-1} reduce tanto el tamaño como el número de frutos (Adams, 1991).

Dado que el agua representa más del 92 % del peso del fruto, la disminución en tamaño puede principalmente estar adscrita a una disminución en la acumulación de agua en el mismo. El incremento en la concentración de soluto en frutos expuestos a salinidad puede ser meramente un resultado de la disminución del agua transportada (Ehret y Ho, 1986), sin embargo, las células vegetales tienen la capacidad, conocida como ajuste osmótico, de mantener la presión de turgencia. Este ajuste implica la acumulación de solutos en la célula, principalmente solutos compatibles, azúcares o aminoácidos en el citoplasma, y solutos inorgánicos en la vacuola lo cual explicaría el aumento de azúcares en el fruto y la mayor turgencia de las células.

1.4. EFECTO DE LA TEMPERATURA EN LOS CULTIVOS AGRÍCOLAS

1.4.1. Las altas temperaturas como problema agronómico

Casi la totalidad de la Región de Murcia disfruta de un clima mediterráneo de tipo semiárido, que se caracteriza por sus inviernos templados y suaves (11 °C de media en diciembre y enero); veranos secos y calurosos (con máximas de 40 °C) y una temperatura media anual de 18 °C. En general la región está caracterizada por el déficit de agua, es decir, por registrar un balance hídrico negativo todo o parte del año a causa de la escasez e irregularidad de las lluvias, registrando precipitaciones medias muy escasas (de 300 a 350 mm anuales) debido a que su disposición orográfica (al este de las Cordilleras Béticas) dificulta la llegada de las borrascas atlánticas como consecuencia del llamado Efecto Föhn. En esta zona la relación entre las precipitaciones y la evapotranspiración se halla entre 0,21-0,50. La recurrencia de sequías es un rasgo distintivo del clima mediterráneo semiárido de la región, llevando siglos de sequías y seguirán registrando este fenómeno meteorológico, incluso más acentuado con el Cambio Climático (López Bermúdez *et al.*, 1986; López Bermúdez, 2006; IPCC, 2007; MMA, 2007).

En tal caso, la agricultura murciana ha ido evolucionando fundamentalmente en su búsqueda de alternativas para dar solución a las condiciones climáticas imperantes a la que están sometidos los cultivos en la región, esto se ve reflejado en el incremento de la superficie productiva de vegetales bajo condiciones de invernaderos, a través de los cuales se pueden controlar en dependencia de su tipo variables meteorológicas como la temperatura y la intensidad de radiación solar. Esto conlleva a la utilización mecanismos acoplados a los invernaderos, como ventanas y mallas de sombreado, o de sistemas de enfriamiento como nebulizadores (airflow), cooling, extractores y recirculadores que necesitan del consumo de cierta cantidad de agua y electricidad. Por todo esto es de gran importancia el conocimiento sobre la temperatura óptima para que un cultivo se desarrolle satisfactoriamente (Tabla 1.3), y de acuerdo a esto se puede crear un plan de acción donde podamos mantener el cultivos entre el rango de temperatura adecuado con el mínimo de consumo de agua y disminuyendo el gasto energético (Marucci y Pagniello, 2011).

Tabla 1.3. Valores de temperatura adecuados para varios cultivos hortícolas en invernadero.

Especie	Temperatura Mínima Letal	Temperatura Mínima Biológica	Temperatura Óptima		Temperatura Óptima Biológica
			Noche	Día	
			Tomate	(-2) a 0	
Pepino	0	10-13	18-20	24-28	28-32
Melón	0	12-14	18-21	24-30	30-34
Judía	0	10-14	16-18	21-28	28-35
Pimiento	(-2) a 0	10-12	16-18	22-28	28-32
Berenjena	(-2) a 0	9-10	15-18	22-26	30-32

Fuente: R. Tesi, Medios de protección para la hortoflorofruticultura y el viverismo Mundi Prensa, 2001.

1.4.2. Efectos de las altas temperaturas sobre las plantas

Las plantas superiores son incapaces de mantener sus células, tejidos u órganos a una temperatura óptima constante (a diferencia de los animales) y atendiendo a la elevada dependencia que presentan los procesos fisiológicos y bioquímicos con esta, las plantas se afectan profundamente por cambios en la temperatura ambiente. Fitter y Hay (1989) señalaron que la temperatura de una hoja depende de:

- La hora del día (variación regular diurna).
- Mes del año (variación regular estacional).
- Nubosidad y velocidad del viento (variación irregular a corto plazo).
- Posición dentro del follaje (hojas de "sol" y de "sombra").
- Altura sobre la superficie del suelo.
- Formas y dimensiones de la hoja (a lo que se pudiera agregar el ángulo de inserción con relación al tallo).

Mientras que la temperatura de la raíz depende, además de los dos primeros aspectos, de:

- Profundidad por debajo de la superficie del suelo.
- Propiedades del suelo y la transferencia de calor a través del mismo (por ejemplo: contenido de humedad, densidad, color, cubierta vegetal).

Los anteriores aspectos ponen de manifiesto la gran variabilidad térmica a la que puede estar sometida una planta en su ciclo de vida. La respuesta de la intensidad con que transcurre cualquier proceso fisiológico o bioquímico ante un rango de temperaturas se representa por una curva asimétrica (Verwijst y VonFircks, 1994), de la

cual se pueden destacar tres temperaturas fundamentales: la mínima y la máxima, a las cuales el proceso cesa completamente, y la temperatura óptima, donde se logra la mayor intensidad del proceso. Algunos autores señalan, la existencia de un rango óptimo de temperatura, en la que la intensidad del proceso fisiológico o bioquímico se encuentra dentro del 90 % de la intensidad máxima. Otros, sin embargo, han identificado una condición de estrés cero, la cual se establece cuando existen las condiciones óptimas para el crecimiento y desarrollo de la planta, y esta puede variar según la especie en cuestión (Hale y Orcutt, 1987 y Maham y *col.*, 1995).

Esta respuesta característica de los organismos vivos está dada por el hecho de que la temperatura afecta los procesos en dos formas sustancialmente antagónicas. Primero, a medida que la temperatura de la célula vegetal se eleva, la velocidad del movimiento (vibracional, rotacional y traslacional) de las moléculas se incrementa, provocando un aumento en la intensidad de los procesos. Sin embargo, virtualmente todos los procesos del vegetal están catalizados por enzimas, y estas dependen de una estructura y disposición espacial determinada para su normal funcionamiento, que se pierde cuando la temperatura se aleja por encima del rango óptimo. De esta forma, cuando la temperatura aumenta por encima de la óptima, la intensidad de los procesos disminuye.

Levitt (1980) señaló cuatro efectos fundamentales que produce el aumento de la temperatura por encima del rango óptimo (estrés por altas temperaturas), estos son:

- La respuesta diferenciada de las velocidades de reacción, debido a diferencias en la energía de activación de las mismas.
- Desnaturalización y agregación de las proteínas.
- Hiper fluidez de los lípidos de las membranas.
- Descomposición química directa.

Todos ellos se traducen en daños al vegetal en dependencia de la rapidez de su aparición, entre los que se encuentran: la inhibición del crecimiento (Leithold y *col.*, 1997), el agotamiento de las reservas (Aloni y *col.*, 1991), la acumulación de elementos tóxicos (Asada, 1999), lesiones bioquímicas (Rank y *col.*, 1991), descomposición de proteínas, eflujo de iones (Gong y *col.*, 1998) y pérdida de la semipermeabilidad de la membrana.

Las altas temperaturas ejercen un efecto determinante en las plantas, la respuesta del cultivo del tomate a las mismas ha sido estudiada por diferentes autores. Adams y *col.* (2001) informaron que la tasa de aparición de hojas en el cultivo del tomate y el ritmo de avance de la anthesis tienen una temperatura base de 7 °C y una tope de 22 °C, la tasa de desarrollo de los frutos y maduración tiene una temperatura base de 5,7 °C y una tope de 26 °C, la tasa de crecimiento del fruto individual tiene un tope entre 22 y 25 °C y la tasa de cuajado tiene un tope igual o inferior a 26 °C. El tamaño del fruto tiene un tope entre 17 y 18 °C (Adams y *col.* 2001; De Koning 1996). Se informó de que la fotosíntesis de la hoja tiene una temperatura base de 6 a 8 °C (Duchowski Brazaityte y 2001) y una tope de alrededor de 30 °C (Bunce 2000). También Peat y *col.* (1998) observaron que el porcentaje del número de frutos por planta cuajados en el cultivo del tomate a 32/26 °C fue de sólo el 10 % de los que a 28/22 °C se produjeron.

1.4.3. Tolerancia de las plantas a las altas temperaturas.

La tolerancia al calor se define generalmente como la capacidad de la planta para crecer y producir un rendimiento económico a altas temperaturas. Sin embargo, aunque algunos investigadores creen que las temperaturas nocturnas son otros factores importantes que limitan, han argumentado que las temperaturas del día y la noche no afectan a la planta de forma independiente y que la temperatura media diurna es un mejor predictor de la respuesta de la planta a alta temperatura (Peet y Willits, 1998). En el tomate, por ejemplo, cuando la temperatura ambiente supera los 35 °C, la germinación de la semilla, la emergencia, el crecimiento vegetativo, la floración y fructificación, así como la maduración de los frutos se ven afectados negativamente.

Las plantas manifiestan diferentes mecanismos de tolerancia para sobrevivir bajo temperaturas elevadas, incluyendo una evolución fenológica y morfológica a largo y corto plazo o la adaptación mediante mecanismos de aclimatación como vía para evitar el estrés térmico. Como por ejemplo cambiando la orientación de las hojas, enfriamiento por transpiración o la alteración de las composiciones de lípidos de membrana. En muchas plantas de cultivo, la maduración temprana es muy correlacionada con pequeñas pérdidas de rendimiento a altas temperaturas, que puede ser atribuido a la participación de un mecanismo de escape (Adams y *col.*, 2001). Las plantas pueden experimentar diferentes tipos de estrés en diferentes etapas de desarrollo y sus mecanismos de respuesta al estrés puede variar en diferentes tejidos (Queitsch y

col., 2000). Se conoce que las plantas experimentan grandes fluctuaciones de temperatura diurna, y a su vez la adquisición de la termotolerancia puede reflejar un mecanismo más general que contribuye a la homeostasis del metabolismo en una base diaria (Hong y *col.*, 2003).

Bajo estrés, diferentes especies de plantas pueden acumular una gran variedad de osmolitos tales como azúcares y alcoholes de azúcares (polioles), prolina, compuestos de amonio terciarios y cuaternario, y compuestos de sulfonio terciario (Sairam y Tyagi, 2004). La acumulación de dichos solutos puede contribuir a la mejora de la tolerancia al estrés térmico por la planta, por ejemplo, la Glicin-betaína (GB), una amina anfótera cuaternaria, juega un papel importante como un soluto compatible en plantas bajo diferentes estrés, tales como la salinidad o altas temperatura (Sakamoto y Murata, 2002). Como la GB, también se sabe que la prolina se produce en las plantas y normalmente se acumula en grandes cantidades en respuesta a las tensiones ambientales (Kavi Kishore y *col.*, 2005). En la evaluación del significado funcional de la acumulación de solutos compatibles, se sugiere que la síntesis de prolina o GB puede amortiguar el potencial redox celular con calor u otras tensiones ambientales (Wahid y Close, 2007). Bajo condiciones de altas temperaturas, el cuajado de frutos en plantas de tomate puede verse afectado considerablemente debido a la alteración del metabolismo de los azúcares y prolina durante el transporte a la ventana estrecha del desarrollo reproductivo masculino (Sato y *col.*, 2006).

Las altas temperaturas a las cuales están expuestas las plantas son un límite para que las hojas y tallos puedan mantener la estructura de sus proteínas y enzimas requeridas para mantener el crecimiento (Shinozaki y Yamaguchi-Shinozaki, 2007). La necesidad de realizar reacciones químicas, metabolismo y construcción de estructuras celulares, implica estabilidad de mecanismos bioquímicos. La gran estrategia evolutiva común de funcionamiento en plantas terrestres corresponde a desarrollar una mayor tasa transpiratoria cuando el agua no es limitante, esta transpiración implica pérdida a la atmósfera de agua líquida en forma de vapor y así mismo el calor de evaporación cedido por las hojas reduce permanentemente su temperatura. Junto con la liberación de calor, existen otros procesos acompañantes y de apoyo para la adaptación al problema de economía del agua. Se ha visto que la porción apical y regiones de las hojas más expuestas a la luz y temperatura, que a su vez corresponden a los tejidos más tiernos, activos y con mayor demanda de agua, sintetizan compuestos que estabilizan su

condición y favorecen especialmente la retención de agua como defensa a la marchitez por sequía.

Las plantas pueden regular mecanismos temporales de cierre estomatal (Taiz y Zeiger, 2006); producir cambios de posición y expresar caída anticipada de hojas. A través de la apertura estomática que conforman las "células de guarda" ubicadas en la epidermis se regula simultáneamente la salida de agua y el ingreso de CO₂ para el proceso de fotosíntesis. El resto de células que conforma la epidermis casi no evapora, dado que conforma una superficie cuticular cerosa de escasa permeabilidad. Por otro lado, junto a un escaso número de estomas, la falta de hojas reduce la superficie transpiratoria y la posición vertical favorece una menor incidencia de luz. La regulación de la temperatura interna se realiza por difusión continuada del agua en su proyección horizontal. Si durante el día se calienta más el agua celular de las células más externas o superficiales expuestas al sol, con respecto a la temperatura del agua en el centro, el agua caliente difunde hacia el interior, y ésta de menor temperatura se mueve hacia la periferia, enfriando. Durante la noche, al enfriarse antes el agua de las células más externas, se produce el fenómeno inverso; el agua central más caliente difunde hacia fuera neutralizando el efecto del frío ambiental sobre los tejidos.

Otra estrategia observada en varias especies de hoja ancha y no suculenta, consiste en acelerar la senescencia de sus hojas, y a través de su eliminación, evitar la transpiración y pérdida de agua. La señal de sequía aumenta la cantidad endógena de algunas fitohormonas como son el ácido abscísico y/o el etileno, acelerando la senescencia de las hojas y promoviendo su caída más temprana (Zhang y Outlaw, 2001). Durante la estación de crecimiento siguiente, los tallos que permanecen verdes y/o vivos, emiten nuevas hojas para iniciar nuevamente la fotosíntesis.

1.4.4. Respuesta del tomate al estrés por temperatura

Las investigaciones referentes al efecto de las altas temperaturas en el cultivo del tomate refieren que estas influyen marcadamente en la producción del cultivo, por ser uno de los factores que gobiernan el crecimiento y el desarrollo de la planta (Bose y Ghosh, 1995). El crecimiento y desarrollo del tomate transcurre entre límites de temperaturas de 15 a 29 °C, pero las condiciones óptimas se establecen a temperaturas de 20 a 24 °C. De hecho, tanto valores de temperaturas bajas como elevadas influyen negativamente sobre la planta. Para un desarrollo eficiente de todos los procesos, en el

ciclo de vida de la planta del tomate, es necesario una diferencia de temperatura de al menos 6 °C entre el día y la noche (Gent, 1990).

Se ha señalado que las altas temperaturas producen modificaciones en las funciones de la planta, llegando a inhibir la fotosíntesis y desorganizando los sistemas enzimáticos necesarios para el desarrollo de su vida. En este sentido, se plantea que a temperaturas de 37 °C o superiores, se esperan alteraciones que afectan desde el punto de vista económico, pues mientras que la fotosíntesis puede detenerse por un periodo y posteriormente reanudarse, estas condiciones causan serios daños en las estructuras reproductoras, lo que trae consecuencias en el cuajado de los frutos y la disminución de la producción (Cuartero y *col.*, 1995).

Las altas temperaturas afectan la fotosíntesis provocando modificaciones en la distribución de la energía de excitación entre los fotosistemas, en la actividad del ciclo de Calvin y otros procesos tales como fotorrespiración y productos de síntesis (González y *col.*, 1996). Las plantas de tomate expuestas a altas temperaturas pueden mostrar una disminución en la fijación de CO₂, una reducción en la concentración interna de CO₂, variaciones en el contenido de pigmentos fotosintéticos, una reducción de la conductividad estomática, y una acelerada senescencia de las plantas.

Por otra parte se ha señalado que las altas temperaturas en tomate modifican los valores de consumo de oxígeno e incrementan la actividad deshidrogenasa, de modo que temperaturas no letales producen serios daños en la actividad funcional del sistema respiratorio (Iglesias, 1994). Es conocido que la reorganización del proceso de respiración es fundamental para la adquisición de determinada resistencia a las altas temperaturas ya que se requiere de cierta cantidad de energía para los procesos de adaptación y reparación (Iglesias, 1994).

La composición aminoacídica, también, se altera con las altas temperaturas. En hojas de tomate se ha señalado la acumulación de prolina libre después de la exposición al calor, observándose que los genotipos más tolerantes acumulan mayor cantidad que los susceptibles (Basra y *col.*, 1992). Del mismo modo, estos autores encontraron que las altas temperaturas reducen la cantidad de prolina libre en anteras y polen, debido quizás a su mayor acumulación en hojas, lo que conlleva a una disfunción del polen y por tanto a una reducción del potencial productivo. A las altas temperaturas, también se le atribuye un efecto adverso sobre el crecimiento del tubo polínico, la germinación y el desarrollo del embrión (Cuartero y *col.*, 1995).

Las altas temperaturas retardan la formación de los racimos, reduce el número de flores por racimos (Abdul-Baki, 1991) y el tamaño de las flores. En el estado de floración, la temperatura óptima es de 13-17 °C durante la noche y 23 °C durante el día (Gomez y *col.*, 2000). Por su parte la fructificación se daña a 26/20 °C (día /noche) y se interrumpe severamente por encima de 35/26 °C (día /noche) (Stevens y Rick, 1987).

La fotosíntesis, como todos los procesos fisiológicos, depende de la temperatura. Las plantas, usualmente, tienen un óptimo de temperatura para la cual el valor neto de fijación de dióxido de carbono es máximo. Temperaturas superiores al óptimo resultan en una reducción en los valores de fotosíntesis.

Los efectos de la temperatura sobre la fotosíntesis se han investigado ampliamente, estableciéndose, de forma general, que en las plantas C₃ se afecta el proceso a temperaturas superiores a 35°C, resultando las plantas C₄ y CAM más tolerantes, esto permite la expansión y diversificación de estas plantas hacia regiones más cálidas. Ehleringer y Monson (1993), señalaron que las dicotiledóneas C₄ se expanden y diversifican hacia áreas cálidas con una aridez progresivamente superior y las monocotiledóneas C₄ a zonas con una precipitación superior en el verano.

Los daños producidos por el estrés de calor incluyen cambios estructurales y funcionales en la célula. Los procesos bioquímicos y fisiológicos que se afectan con las altas temperaturas son, principalmente, la activación de las enzimas fotosintéticas (con su efecto en la disminución en la fijación de CO₂), la integridad de las membranas, la fosforilación y el transporte de electrones en los cloroplastos, la conductividad estomática a la difusión del CO₂ y la translocación de los compuestos producidos en el proceso. Sus efectos en el crecimiento y la sobrevivencia dependen de la intensidad y duración del estrés de calor. Un periodo prolongado a una temperatura moderadamente alta puede ser tan dañino como una breve exposición a temperaturas extremas (Georgieva, 1999).

Entre todas las funciones de la célula, la actividad fotosintética de los cloroplastos resulta ser la más sensible al calor, considerándose el sitio primario de daño los componentes del sistema fotosintético localizado en las membranas de los tilacoides, siendo el más probable el Fotosistema II (FSII) (Havaux, 1993; Stefanov y *col.*, 1996 y Heckathorn y *col.*, 1997). Un aumento en la temperatura foliar provoca una reducción en la actividad del FSII relacionada con la disociación de los complejos captadores de luz (LHCn) del núcleo central del FSII y su posterior migración (estado

de transición) hacia las regiones no apesadas de las membranas de los tilacoides (Georgieva, 1999).

Investigaciones anteriores han demostrado que la actividad del FSI parece ser mucho más estable al calor que la del FSII (Havaux, 1993). Se ha encontrado que en condiciones de temperaturas moderadamente elevadas se estimula la actividad del FSI in vivo y ex vitro, y esta estimulación parece estar asociada con un incremento en la capacidad del transporte cíclico de electrones a través del FSI, lo cual pudiera ser un proceso adaptativo para producir ATP, en condiciones donde la actividad del FSII disminuye severamente. Esta síntesis de ATP puede ser importante para la supervivencia de las plantas y necesaria para los procesos de reparación de danos provocados por el estrés de calor (Janssen y Van Hasselt, 1994).

Entre las reacciones del FSII, el proceso de fotólisis del H₂O es particularmente sensible al calor (Enamy y *col.*, 1994). El complejo que produce oxígeno contiene 4 átomos de Mn por FSII, que sirven como oxidante directo del agua (Georgieva, 1999). Las proteínas de 33, 23 y 17 kDa asociadas con la superficie del lumen del complejo del centro de reacción del FSII tienen un papel importante en la producción de oxígeno. Se ha demostrado que la inactivación por calor de complejo está directamente relacionada con la proteína de 33 kDa, pero no con el Mn (Enamy y *col.*, 1994).

La inhibición en la fijación de CO₂, por las altas temperaturas, ha sido abordada en muchas especies de plantas (Makino y *col.*, 1994, Law y Crafts-Bryner, 1999). Diversos componentes del aparato fotosintético, y procesos metabólicos asociados al mismo, son sensibles a las altas temperaturas; sin embargo, el FSII es térmicamente sensible, pero puede aclimatarse al calor (Havaux, 1993a). Se ha encontrado que existe una proteína de choque térmico localizada en el cloroplasto que protege al FSII de los daños por las altas temperaturas (Heckathorn y *col.*, 1998).

La exportación de asimilatos es otro de los procesos metabólicos sensibles al estrés por altas temperaturas. Jiao y Grodzinski (1996) señalaron que el estrés de calor, en una atmósfera rica en CO₂, inhibió la exportación de asimilatos en un grado mayor que la fotosíntesis. Sin embargo, en estudios con diferentes especies de plantas, se observó una inhibición en la fotosíntesis neta y no en la exportación de asimilatos (Leonardos y *col.*, 1996). Esta respuesta diferenciada establece que las altas temperaturas afectan en mayor o menor medida uno u otro proceso fisiológico o bioquímico, en dependencia de la especie. Los efectos inhibitorios del tratamiento de

calor y la aparición de picos de fluorescencia de la clorofila a reflejan un proceso de desorganización de las membranas cloroplásticas, donde el calor provoca la desintegración del grana, seguido por un incremento en el contenido lipídico de la membrana tilacoidal.

1.5. BIBLIOGRAFÍA

- Abdul-Baki, A.A. (1991). Tolerance of tomato cultivars y selected germoplasm to heat stress. *Journal of the American. Society. Horticultural Science* 116, 1113-1116.
- Abou-Hadid, A.F.; Al-Beltagy, A.S.; Burrage, S.W. (1987). Comparison of hydroponic systems for tomato. *Egypt Journal of Horticulturae* 14, 19-130.
- Adams, S.R.; Cockshull, K.E.; Cave C.R.J. (2001). Effect of temperature on the growth and development of tomato fruits. *Annals of Botany* 88, 869-877.
- Adams, P. (1991). Effects of increasing the salinity of the nutrient solution with major nutrients or sodium-chloride on the yield, quality and composition of tomatoes grown in rockwool. *Journal of Horticultural Science* 66, 201-207
- Alarcón, A.L.;Murcia, F. (2000). Cultivo en fibra de coco. En: *Tecnología para cultivos de alto rendimiento, Novedades Agrícolas. Eds., (Murcia, España), 245-253.*
- Alarcón, A.L.; Madrid, R.;Egea C. (1998). Modelo de cultivo sin suelo con recirculado integral de lixiviados. *Actas de Horticultura.* 21, 216.
- Alarcón, A. L. (2000). Introducción a los cultivos sin suelos. Sistemas y sustratos. En: *Tecnología para cultivos de alto rendimiento. Eds., Novedades Agrícolas S.A. España, 191-204.*
- Aloni, B.; Pashkar, T.;Kami, L. (1991). Partitioning of [¹⁴ C]-sucrose and acid invertase activity in reproductive organs of pepper plants in relation to abscission under heat stress. *Annals of Botany* 67, 371-377.
- Asada, K. (1999). The water-water cycle in chloroplasts: Scavenging of Active Oxygen and Dissipation of Excess Photons. *Annu. Rev. Plant Physiology. Plant Molecular Biology* 50, 601-39.
- Assouline, S.; Moller, M.; Cohen, S.; Ben-Hur, M.; Grava, A.; Narkis, K.; Silber A. (2006). Soil-plant system response to pulsed drip irrigation and salinity: Bell pepper case study. *Soil Science Society of America Journal* 70, 1556-1568.
- Atherton, J.G.; Rudish, J. (1986). The tomato crop: A Scientific Basic for improvement. *Chapman and Hall, London and New York* 661.

- Basra, A.S. Amarjit, S.; Basra, C.P.; Malik, I.S.; Grover. (1997). Proline and polyamine accumulation in relation to heat tolerance in tomato. *Botanical Bulletin-Academia Sinical Taipei* 38, 165-169.
- Bolarin, M.C.; Fernández, F.G.; Cruz, V. (1991). Salinity tolerance in 4 wild tomato species using vegetative yield salinity response curves. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 116, 286-290
- Boman, B.J.; Zekri, M.; Stover E. (2005). Managing salinity in citrus. *Horttechnology* 15, 108-113.
- Bonner, L.J.; Dickinson, H.G. (1989). Anther dehiscence in *Lycopersicon esculentum*. I. Structural aspect. *New Phytologist* 113, 97-115.
- Bose, A; Ghosh, B. (1995). Responses of photosynthetic apparatus in rice cultivars under heat stress. *Photosynthetica* 31, 625-630.
- Buchanam, B.; Gruissem, W.; Jones R.L. (2000). *Biochemistry and Molecular Biology of Plants. American Society of Plant Physiologists* Rockville, Maryland. USA.
- Bunce J.A. (2000) Acclimation of photosynthesis to temperature in eight cool and warm climate herbaceous C3 species: temperature dependence of parameters of a biochemical photosynthesis model. *Photosynthesis Research* 63, 59-67.
- Canene-Adams, K.; Campbell, J.K.; Zaripheh, S.; Jeffery E.H.; Erdman J.W. (2005). *The tomato as a functional food. Journal of Nutrition* 135, 1226-1230.
- Chamarro, J. (2003). Anatomía fisiología de la planta. En: *El cultivo del tomate Ediciones Mundi Prensa, Madrid, España*, 43-91
- Chocano Vañó, C.; Sánchez Fuster, M.C.; López Bermúdez, F., (2007). La agroecología como alternativa a la prevención y lucha contra la desertificación en la región de Murcia: La comarca del Noroeste». *Revista Agroecología* 2, 75-84.
- Cohen, S.; Dinar, M.; Matan, E.; Dinkin, I.; Cohen, Y.; Karni, L.; Aloni, B.; Assouline S. (2005). High fertigation frequency and phosphorus level: Effects on summer-grown bell pepper growth and blossom-end rot incidence. *Plant and Soil* 270, 135-146.
- Cruz, V.; Caro, M.; Cuartero, J. (1991). Salinity tolerance of normal-fruited and cherry tomato cultivars *Plant and Soil* 136, 249-255.
- Cuartero, J.; Fernández-Muñoz, R.F.; González-Fernández, J.J. (1995). Estrés abióticos. En: F, Nuez (Eds). *El cultivo del tomate. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, Barcelona y México*. 351-384.

- Davies, J.N.; Hobson, G.E. (1981). The constituents of tomato fruit. The influence of environment, nutrition and genotype. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 15, 205-280.
- De Koning, A.N.M. (1996). Quantifying the responses to temperature of different plant processes involved in growth and development of glasshouse tomato. *Acta Horti* 406, 99-104.
- De Kreijl, C. (1996). Interactive effects of air humidity, calcium and phosphate on blossom-end rot, leaf deformation, production and nutrient contents of tomato. *Journal of Plant Nutrition*, 19, 361-377.
- Del Amor, F. M.; Martínez V.; Cerdá A. (2001). Salt tolerance of tomato plants as affected by stage of plant development. *Hortscience* 36, 1260-1263.
- Domínguez, E.; Heredia, A. (1999). Water hydration in cutinized cell walls: a physico-chemical analysis. *Biochimica et Biophysica Acta* 146, 168-176.
- Dorais, M.; Papadopoulos, A. P.; Gosselin A. (2001). Influence of electric conductivity management on greenhouse tomato yield and fruit quality. *Agronomie* 21, 367-383.
- Duchowski, P.; Brazaityte, A. (2001). Tomato photosynthesis monitoring in investigations on tolerance to low temperatures. *Acta Horticulturae* 562, 335-339
- Dumas, Y.; Dadomo, M.; Lucca, G.D.; Grolier, P. (2003). Effects of environmental factors and agricultural techniques on antioxidant content of tomatoes. *Journal of Science of Food and Agriculture* 83, 369-382.
- Ehleringer, J.R.; Monson, R.K. (1993). Evolutionary and ecological aspects of photosynthetic pathway variation. *Annual Review of Ecology and Systematics* 24, 411-439.
- Ehret, D. L.; Ho, L. C. (1986). Translocation of Calcium in Relation to Tomato Fruit-Growth. *Annals of Botany* 58, 679-688.
- Enamy, I.M.; Kitamura, T.; Tato, Y.; Isokawa, H.; Ohta, S.; Kato H. (1994). Is primary cause of thermal inactivation of oxygen evolution in spinach PSII membranes release of the 33kDa protein or of Mn. *Biochimica et Biophysica. Acta* 186, 52-58.
- Esquinas-Alcázar, J.; Nuez, F. (1995). Situación taxonómica, domesticación y difusión del tomate. *En: el cultivo del tomate, Nuez F. ed. Mundi-Prensa. Madrid.* 11-42.

- Esquinas-Alcázar, J.T.; Nuez, F. (1995). Situación taxonómica, domesticación y difusión del tomate. In: Nuez, F. (Ed.), *El cultivo del tomate. Ed Mundi Prensa, Madrid, Spain*, 13-42.
- F.A.O. (2011). Statistics Division of the Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://faostat.fao.org/>.
- Feller U.; Crafts-Bryner S.J.; Salvucci M.E. (1998). Moderately high temperatures inhibit ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase oxygenase (Rubisco) activase-mediated activation of Ribulose. *Plant Physiology* 116, 539-546.
- Fitter, A.H.; Hay, R.K.M. (1989). Environmental physiology of plants. Temperature *Academic Press, New York* 187-224.
- Flowers, T. J.; Ragab, R.; Malash, N.; Gawad, G. A.; Cuartero J.; Arslan, A. (2005). Sustainable strategies for irrigation in salt-prone Mediterranean. *Agricultural Water Management* 78, 3-14.
- García-Sánchez, F.; Rubio, F.; Martínez V. (2010). Abiotic stresses: salinity y drought. In: *Agricultural Sciences: Topics in modern Agriculture*. Studium Press, USA.
- Gent, M.P. (1990). Carbohydrate level and growth of tomato plant. I. The effects of carbon dioxide enrichment and diurnally fluctuating temperatures. *Plant Physiol.*, 79:694-699.
- Georgieva, K. (1999). Some mechanisms of damage and Acclimation of the photosynthetic apparatus due to high temperature. *Bulgary Journal Plant Physiology* 25, 89-99.
- Gómez, O.; Casanova, A.; Laterrot, H.; Anais, G. (2000). Mejora genetica del cultivo del tomate para la production en el Caribe. *La Habana. Cuba*. 159p.
- Gong, M.; Vyerluit, M.R.; Knight, M.R.; Trewavas, A.J. (1998). Heat-shock-induced changes in intracellular Ca level in tabacco seedlings in relation to thermotolerance. *Plant Physiology* 116, 429-437.
- Gong, M.; Vyerluit, M.R.; Knight, M.R.; Trewavas, A.J. (1998). Heat-shock-induced changes in intracellular Ca level in tabacco seedlings in relation to thermotolerance. *Plant Physiology* 116, 429-437.
- González, J.; Pastenes, C.; Horton, P. (2001). Efecto de la temperatura, el estrés hídrico y luminoso sobre la heterogeneidad del fotosistema II en cuatro variedades de poroto (*Phaseolus vulgaris* L.). *Rev. Chil. de Hist. Nat.*, 74, 779-791.

- Gregory, P. J. (2004). Agronomic approaches to increasing water use efficiency. *Water Use Efficiency in Plant Biology* 142-167.
- Gruda, N. (2005). Impact of environmental factors on product quality of greenhouse vegetables for fresh consumption. *Critical Reviews in Plant Sciences* 24, 227-247.
- Hale, M.G.; Orcutt, D. M. (1987). The physiology of plant under stress. *John Wiley y Sons, New York* 1-4.
- Hanan J.J. (1998). Greenhouses: advanced technology for protected cultivation. *Boca Raton, Florida, USA*.
- Havaux, M. (1993). Characterization of thermal damage to the photosynthetic electron transport system in potato leaves. *Plant Science* 94, 19-33.
- Heckathorn, S. A.; Coleman, J.S.; Hallberg, R.I. (1997). Recovery of net CO₂ assimilation after heat stress is correlated with recovery of oxygen-involving-complex proteins in *Zea Mays* L. *Photosynthetica* 34, 13-20.
- Heckathorn, S. A.M.; Downs, C. A.; Coleman, J.S. (1998). The small, methionine-rich chloroplast heat-shock protein protect photosystem II electron transport during heat stress. *Plant Physiology* 116, 439-444.
- Helalia, A. M.; AlTahir, O. A.; AlNabulsi, Y. A. (1996). The influence of irrigation water salinity and fertilizer management on the yield of Alfalfa (*Medicago sativa* L). *Agricultural Water Management* 31, 105-114.
- Hirt, H.; Shinozaki K. (2004). Plant Response to Abiotic Stress. *Springer -Verlag, Berlin*.
- Hong, S.W.; Lee, U.; Vierling, E. (2003). Arabidopsis hot mutants define multiple functions required for acclimation to high temperatures. *Plant Physiology* 132,757-767.
- Iglesias, L. (1994). Tolerancia al estrés de calor en plantas. *Cultivos Tropicales* 15, 99-107.
- Incrocci, L.; Malorgio, F., La Bartola, A.; Pardossi, A. (2006). The influence of drip irrigation or subirrigation on tomato grown in closed-loop substrate culture with saline water. *Scientia Horticulturae* 107, 365-372.
- Jack, D.B. (1995). Keep taking the tomatoes the exciting world of nutraceuticals. *Molecular Medicine* 118-121.
- Janssen, L. H. J.; Van Hasselt, P. R. (1994). Temperature effects on chlorophyll fluorescence induction in tomato. *Journal Plant Physiology* 144, 129-135.

- Jiao, J.; Grodzinski, B. (1996). The effect of leaf temperature and photorespiratory conditions on export of sugars during steady state photosynthesis in *Salvia splendens*. *Plant Physiology* 111, 169-1773.
- Kavi Kishore, P.B.; Sangam, S.; Amrutha, R.N.; Laxmi, P.S.; Naidu, K.R.; Rao, K.R.S.S.; Rao, S.; Reddy, K.J.; Theriappan, P.; Sreenivasulu, N. (2005). Regulation of proline biosynthesis, degradation, uptake and transport in higher plants: its implications in plant growth and abiotic stress tolerance. *Current Science* 88, 424-438.
- Klaring, H. P. (2001). Strategies to control water and nutrient supplies to greenhouse crops. *A review Agronomie* 21, 311-321.
- Krauss, S.; Schnitzler, W. H.; Grassmann, J.; Woitke, M. (2006). The influence of different electrical conductivity values in a simplified recirculating soilless system on inner and outer fruit quality characteristics of tomato. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 54, 441-448.
- Kubota, C.; Thomson, C. A. (2006). Controlled environments for production of value-added food crops with high phytochemical concentrations: Lycopene in tomato as an example. *Hortscience* 41, 522-525.
- Lambers, H.; Stuart Chapin II, F.; Pons, T.L. (1998). *Plant Physiological Ecology*. Springer, Berlin.
- Law, R.D.; Crafts-Bryner S.J. (1999). Inhibition and Acclimation of Photosynthesis to Heat Stress Is Closely Correlated with Activation of Ribulose-1,5-Bisphosphate Carboxylase/Oxygenase. *Plant Physiology* 120, 173-181.
- Leithold, B.; Muller, G.; Weber, W.E.; Westermann, T. (1997). Investigations on heat tolerance of spring wheat varieties of different origin under growth chamber conditions. *Journal of Agronomy and Crop Science* 179, 115-122.
- Leithold, B.; Muller, G.; Weber, W.E.; Westermann, T. (1997). Investigations on heat tolerance of spring wheat varieties of different origin under growth chamber conditions. *Journal of Agronomy and Crop Science* 179, 115-122.
- Leonardos, E. D.; Tsujita, M. J.; Grodzinski, B. (1996). The effect of source or sink temperature on photosynthesis and ¹⁴C partitioning in and export from a source leaf of *Alstroemeria*. *Plant Physiology* 97, 563-575.

- Levitt, J. (1980). Responses of plants to environmental stress: Vol. I. Chilling, freezing, y high temperature I. Stress and strain terminology. Academic. *Press New York* 3-9.
- Levy, Y.; Syvertsen, J.P. (2004). Irrigation water quality and salinity effects in citrus trees. *Horticulture Review* 30, 37-82.
- López Bermúdez, F. (2007). Manantiales, huertas y regantes: construcción social de un indicador de riesgo de desertificación en la comarca del no de la Región de Murcia (España). *Comunicación en el 5º Congreso Ibérico. Gestión y Aprovechamiento del Agua. Universidad del Algarbe*.
- Maas, E.V.; Hoffman G.J. (1977). Irrigation Drainage Division. *ASCE*.103-115.
- MAGRAMA. (2011). Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. <http://www.magrama.gob.es/>.
- Mahan, J. R.; McMichael, B. L.; Wanjura, D. F. (1995). Methods for reducing the adverse effects of temperature stress on plants: A Review. *Environmental and Experimental Botany* 35, 251-258.
- Mahan, J. R.; McMichael, B. L.; Wanjura, D. F. (1995). Methods for reducing the adverse effects of temperature stress on plants: A Review. *Environmental and Experimental Botany* 35, 251-258.
- Makino, A.; Nakano, H.; Mae, T. (1994). Effects of growth temperature on the Responses of Ribulose-1,5-Bisphosphate Carboxylase, Electron Transport Components, and Sucrose Synthesis Enzymes to Leaf Nitrogen in Rice, y their Relationships to Photosynthesis. *Plant Physiology* 105, 1231-1238.
- Mancini, L. y Scarascia Mugnossa, G. (1993). Yield y quality of Chinese cabbage grown on sand culture y NFT system, *Acta Horticulturae* 361, 578-582.
- Martínez, P.F.; Abad M. (1992). Soilless culture of tomato in different mineral substrates. *Acta Horticulturae* 323, 1-259.
- Mitchell, A. R.; Donovan, T. J. (1991). Field infiltration of a salt-loaded soil - evidence of a permeability hysteresis. *Soil Science Society of America Journal* 55, 706-710.
- Mizrahi, Y.; Pasternak D. (1985). Effect of Salinity on Quality of Various Agricultural Crops. *Plant and Soil* 89, 301-307.
- Munns, R. (2002). Comparative physiology of salt and water stress. *Plant, Cell and Environment* 25, 239-250.

- Paranychianakis, N. V.; Chartzoulakis K. S. (2005). Irrigation of Mediterranean crops with saline water: from physiology to management practices. *Agriculture Ecosystems & Environment* 106, 171-187.
- Peat, M.M.; Sato S. y Gardner R.G. (1998). Comparing heat stress effects on male-fertile y male-sterile tomatoes. *Plant Cell & Environment* 21, 225-231.
- Peet, M. M.; Willits D. H. (1995). Role of Excess Water in Tomato Fruit Cracking. *Hortscience* 30, 65-68.
- Peet, M.M.; Willits, D.H. (1998). The effect of night temperature on greenhouse grown tomato yields in warm climate. *Agricultural and Forest Meteorology* 92, 191-202.
- Petersen, K. K.; Willumsen, J.; Kaack K. (1998). Composition y taste of tomatoes as affected by increased salinity and different salinity sources. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology* 73, 205-215.
- Plaut, Z.; Grava, A.; Yehezkel, C.; Matan, E. (2004). How do salinity and water stress affect transport of water, assimilates y ions to tomato fruits. *Physiologia Plantarum* 122, 429-442.
- Pretel, M.T.; Botella, M.A.; Amoros, P.J.Z.A., (2004). Antioxidative activity y general fruit characteristics in different traditional orange [*Citrus sinensis* (L.) Osbeck] varieties *European Food Research y Technology* 219, 474-478.
- Queitsch, C.; Hong, S.W.; Vierling, E.; Lindquest, S. (2000). Heat shock protein 101 plays a crucial role in thermotolerance in *Arabidopsis*. *The Plant Cell* 12, 479-492.
- Ragab, R., Malash, N.; Gawad, G. A.; Arslan, A.; Ghaibeh, A. (2005). A holistic generic integrated approach for irrigation, crop and field management 2. The SALTMED model validation using field data of five growing seasons from Egypt and Syria. *Agricultural Water Management*, 78, 89-107.
- Raviv, M.; Wallach, R.; Silber, A.; Bar-Tal, A. (2002). Substrates y their analysis. Hydroponics productions of vegetables and ornamentals. *Embryogenesis Published Athens, Greece* 25-102.
- Resh, H.M. (1997). Hydroponic food production. *Santa Barbara, CA*.
- Rick, C. M. (1982). Genetic-relationships between self-incompatibility y floral traits in the tomato species *Biologisches Zentralblatt*. 101, 185-198
- Romero-Arya, R.; Soria, T.; Cuartero, J. (2001). *Plant Science* 160 (2), 265-272.

- Rouphael, Y.; Colla, G.; Battistelli, A.; Moscatello, S. and Proietti, S. (2004). Yield, water requirement, nutrient uptake y fruit quality of zucchini squash grown in soil and closed soilless culture. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology* 79, 423-430.
- Ruiz, D.; Martínez, V.; Cerdá, A. (1997). Citrus response to salinity: growth and nutrient uptake. *Tree Physiology* 17, 141-150.
- Sahin, U.; Anapali, O.; Ercisli, S. (2002a). Physico-chemical and physical properties of some substrates used in horticulture. *Gartenbauwissenschaft* 67, 55-60.
- Sahin, U.; Anapali, O.; Hanay, A. (2002b). The effect of consecutive applications of leaching water applied in equal, increasing or decreasing quantities on soil hydraulic conductivity of saline sodic soil in the laboratory. *Soil Use and Management* 18, 152-154.
- Sairam, R.K.; Tyagi, A. (2004). Physiology and molecular biology of salinity stress tolerance in plants. *Current Science* 86, 407-421.
- Sakamoto, A.; Murata, N. (2002). The role of glycine betaine in the protection of plants from stress: clues from transgenic plants. *Plant Cell Environment* 25, 163-171.
- Santamaría, P.; Cantore, V.; Conversa, G.; Serio F. (2004). Effect of night salinity level on water use, physiological responses, yield and quality of tomato. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, 79, 59-66.
- Saranga, Y.; Zamir, D.; Marani, A. (1993). Breeding tomatoes for salt tolerance - variations in ion concentrations associated with response to salinity *Journal of the American Society for Horticultural Science* 118, 405-408.
- Sato, S.; Kamiyama, M.; Iwata, T.; Makita, N.; Furukawa, H.; Ikeda, H. (2006). Moderate increase of mean daily temperature adversely affects fruit set of *Lycopersicon esculentum* by disrupting specific physiological processes in male reproductive development. *Ann. Bot* 97, 731-738.
- Savvas, D. (2001). Nutritional management of vegetables y ornamental plants in hydroponics. Crop Management y Postharvest Hyling of Horticultural Products. *Quality Management, Plymouth, UK: Science Publishers, Inc* 37-87.
- Savvas, D.; Adamidis, K (1999). Automated management of nutrient solutions based on target electrical conductivity, pH, and nutrient concentration ratios. *Journal of Plant Nutrition* 22, 1415-1432.

- Savvas, D.; Meletioui, G., Margariti, S.; Tsirogiannis, L.; Kotsiras, A (2005a). Modeling the relationship between water uptake by cucumber and NaCl accumulation in a closed hydroponic system. *Hortscience* 40, 802-807.
- Savvas, D.; Pappa, V. A.; Kotsiras, A.; Gizas, G (2005b). NaCl accumulation in a cucumber crop grown in a completely closed hydroponic system as influenced by NaCl concentration in irrigation water. *European Journal of Horticultural Science* 70, 217-223.
- Shannon, M. C.; Grieve, C. M. (2000). Options for using low-quality water for vegetable crops. *Hortscience* 35, 1058-1062.
- Shinozaki, K. y Yamaguchi-Shinozaki, K. (2007). Gene networks involved in drought stress response and tolerance. *Journal of Experimental Botany* 58(2), 221-227.
- Silber, A.; Bruner, M.; Kenig, E.; Reshef, G.; Zohar, H.; Posalski, I.; Yehezkel, H.; Cohen, S.; Dinar, M.; Assouline S. (2005a). High irrigation frequency and transient NH₄ concentration: effects on soilless-grown bell pepper. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology* 80, 233-239.
- Silber, A.; Xu, G.; Levkovitch, I.; Soriano, S.; Bilu, A.; Wallach, R. (2003b). High fertigation frequency: the effects on uptake of nutrients, water and plant growth. *Plant and Soil* 253, 467-477.
- Soria, T.; Cuartero, J.; Romero-Arya, R. Book (2000). Yield and fruit quality of salinised tomato plants with enhanced Ca fertilization Conference: International Symposium on Techniques to Control Salination for Horticultural Productivity Location: Antalya, Turkey 07-10-2000 TSHS; EUFA; CIHEAM IAMB; Int Soc Hort Sci, *Proceedings of the International Symposium on Techniques to Control Salination for Horticultural Productivity Book Series: Acta Horticulturae* 573, 35-41
- Spensley, K.; Winsor, G.W.; Cooper, A.J. (1978). Nutrient film technique-crop culture in flowing nutrient solution. *Outlook on Agriculture* 9, 299-305.
- Stanghellini, T. C. (1996). A Model of Greenhouse humidity suitable for control of crop processes Conference: 2nd IFAC/ISHS Workshop on Mathematical and Control Applications in Agriculture y Horticulture Location: Silsoe, Engly Book Series: *Acta Horticulturae* 406, 125-131.

- Stefanov, D.; Yordanov, I.; Tsonev, T. (1996). Effect of thermal stress combined with different irradiance on some photosynthetic characteristics of barley (*Hordeum vulgare* L.) plants. *Photosynthetica* 32, 171-180.
- Stevens, M.A. y Rick, C.M. (1987). Genetic y Breeding. En: J.G. Atherton, J. y Rudich (Eds): *Tomato Crop. Chapman y may, London*.
- Taiz, L.; Zeiger, E. (2006). *Plant Physiology*. 4th ed. Sinauer Associates, Sunderland, MA.
- Taylor, I.B. (1986). Biosystematics of the tomato. *The tomato crop: a scientific basis for improvement* 1-34.
- Tesi, R. (2001). “Medios de protección para la horto-floro-fruticultura y el viverismo” *Mundi-Prensa* Madrid 288.
- Verwijst, T.; Vonfircks, H.A. (1994). Plant-response to temperature stress is characterized by an asymmetric sigmoid function. *Environmental and Experimental Botany* 34, 69-74.
- Wahid, A.; Close, T.J. (2007). Expression of dehydrins under heat stress and their relationship with water relations of sugarcane leaves. *Plant Biology* 51, 104-109.
- Zhang, S.Q.; Outlaw, W.H. (2001). Abscisic acid introduced into the transpiration stream accumulates in the guard cell apoplast and causes stomatal closure. *Plant Cell & Environ* 24, 1045-1054.

CAPITULO 2:

Objetivos y plan de trabajo



España es uno de los principales países productores de tomate del mundo, con una producción media anual de 4,81 millones de toneladas destinadas principalmente al consumo en fresco. Por comunidades, la Región de Murcia se sitúa en tercer lugar con una producción de 394 mil toneladas, superada solamente por Extremadura y Andalucía. De esta producción, el 34% se produce bajo condiciones de invernadero con un rendimiento medio de 104 t/ha, superando los 62 t/ha obtenidos en campo. Sin embargo, la producción de tomate en la región de Murcia se ve limitada por sus características climáticas, ya que los recursos hídricos de buena calidad son muy escasos y con frecuencia se utilizan para el riego aguas subterráneas de elevado contenido en sales, principalmente NaCl. Además, en los meses de verano, las plantas se ven sometidas a una alta intensidad de radiación solar durante gran parte del día. El cultivo del tomate (*Solanum Lycopersicon*) se ve afectado negativamente bajo estas condiciones, por lo que es necesario aplicar nuevas estrategias agronómicas teniendo en cuenta diversos factores, como sistemas de cultivo o criterios en el manejo de riego que nos permitan paliar los efectos negativos de estos estreses en este cultivo, por lo que nos trazamos los siguientes objetivos:

2.1. Objetivos.

Objetivo General Experimento N° 1. Salinidad y sistemas de cultivos hidropónicos.

Determinar el mejor sistema de cultivo sin suelo para la variedad de tomate “Óptima” según la calidad del agua de riego.

Objetivos específicos.

1. Evaluar el efecto del riego con soluciones nutritivas de tres niveles salinos sobre el crecimiento y desarrollo de plantas de tomate *var.* “Óptima” cultivadas en tres sistemas de cultivo sin suelo (hidropónico, perlita y NGS).
2. Determinar la respuesta fisiológica y morfológica de plantas de tomate *var.* “Óptima” cultivadas en tres sistemas de cultivo sin suelo y regadas con soluciones nutritivas de tres niveles salinos.
3. Caracterizar la capacidad, las respuestas fotosintéticas, y el estado hídrico de plantas de tomate *var.* “Óptima” cultivadas en tres sistemas de cultivo sin suelo y regadas con soluciones nutritivas de tres niveles salinos.

4. Analizar el comportamiento de la nutrición mineral de plantas de tomate *var.* “Óptima” cultivadas en tres sistemas de cultivo sin suelo y regadas con soluciones nutritivas de tres niveles salinos.
5. Conocer el comportamiento de la calidad del fruto de plantas de tomate *var.* “Óptima” cultivadas en tres sistemas de cultivo sin suelo y regadas con soluciones nutritivas de tres niveles salinos.

Objetivo General Experimento N° 2. Temperatura y manejo de frecuencia de riego.

Determinar la mejor frecuencia de riego en plantas de tomate *var.* “Anairis” cultivadas en un sistema sin suelo, para diferentes temperaturas medioambientales (25 °C y 35 °C).

Objetivos específicos.

1. Evaluar el efecto del manejo de la frecuencia del riego sobre el crecimiento y desarrollo de plantas de tomate *var.* “Anairis” en un sistema de cultivo sin suelo a diferentes temperaturas (25 °C y 35 °C) en condiciones de invernadero.
2. Determinar la respuesta fisiológica y morfológica de plantas de tomate *var.* “Anairis” cultivadas en un sistema de cultivo hidropónico a diferentes temperaturas (25 °C y 35 °C) y manejadas con tres frecuencias de riego en condiciones de invernadero.
3. Caracterizar las respuestas fotosintéticas y las relaciones hídricas de plantas de tomate *var.* “Anairis” cultivadas en un sistema de cultivo hidropónico a diferentes temperaturas (25 °C y 35 °C) y manejadas con tres frecuencias de riego en condiciones de invernadero.
4. Determinar el comportamiento de la nutrición mineral de plantas de tomate *var.* “Anairis” cultivadas en un sistema de cultivo hidropónico a diferentes temperaturas (25 °C y 35 °C) y manejadas con tres frecuencias de riego en condiciones de invernadero.
5. Determinar el comportamiento de la calidad del fruto de plantas de tomate *var.* “Anairis” cultivadas en un sistema de cultivo hidropónico a diferentes temperaturas (25 °C y 35 °C) y manejadas con tres frecuencias de riego en condiciones de invernadero.

2.2. Plan de trabajo

Ambos experimentos se realizaron en 2011 y 2012, en la finca experimental perteneciente al CEBAS, ubicada en Santomera, en diferentes invernaderos cuyas características técnicas se describen en el apartado de “Material y Métodos” de cada experimento de esta memoria. Para la consecución de los objetivos se realizó el siguiente plan de trabajo:

Plan de Trabajo Experimento N° 1

Plantas de tomate *var.* “Óptima” se cultivaron sobre tres sistemas de cultivos (hidropónico, sacos con perlita como sustrato y NGS) y se regaron con tres tratamientos salinos, control (solución nutritiva Hoagland ; S0), salinidad uno (Solución Nutritiva Hoagland con 40 mM de NaCl; S1) y salinidad dos (Solución Nutritiva Hoagland con 80 mM de NaCl; S2). Durante el período de crecimiento y desarrollo vegetativo de las plantas se le hicieron las tareas de mantenimiento acordes con los requerimientos del cultivo, y se realizaron medidas de parámetros de intercambio gaseoso, fluorescencia de clorofilas, relaciones hídricas y concentración de nutrientes. También se cosecharon los frutos de tomate en la medida en que estos iban madurando, se midió su calibre, se pesaron y se les hicieron diferentes pruebas para determinar la calidad de los mismos (Sólidos Solubles Totales, Diámetro Ecuatorial y Longitudinal, Acidez Titulable, pH, Conductividad Eléctrica, firmeza y dureza). Todo se hizo diferenciándolos por tratamientos y por nódulos o racimos. Al finalizar el experimento se cosecharon las plantas para determinar los parámetros de crecimiento, y se guardaron muestras para su posterior análisis en el laboratorio.

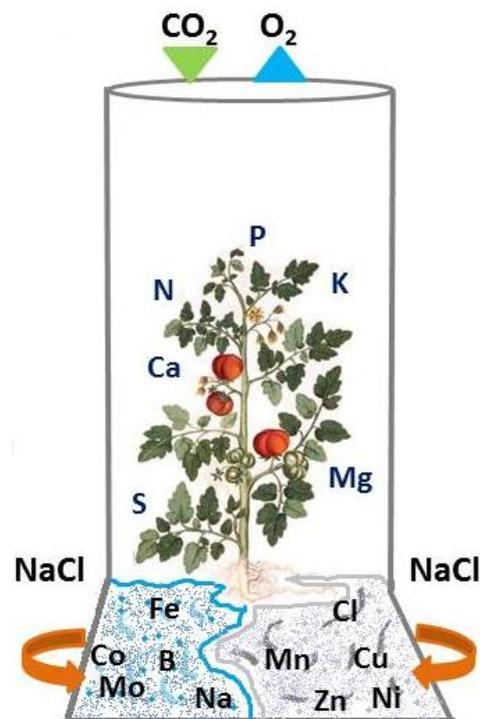
Plan de Trabajo Experimento N° 2

Plantas de tomate *var.* “Anairis” se cultivaron a diferentes temperaturas (25 °C y 35 °C), sobre un sistema de cultivo sin suelo (sacos con Perlita de sustrato) y se manejaron tres frecuencias de riego (FR1, las plantas se regaban cuando consumían 0.4 litros; FR2, las plantas se regaban cuando consumían 0.8 litros y FR3, las plantas se regaban cuando consumían 1.2 litros). Durante el período de crecimiento y desarrollo vegetativo de las plantas se le hicieron las tareas de mantenimiento acordes con los requerimientos del cultivo, y se realizaron medidas de parámetros de intercambio gaseoso, fluorescencia de clorofilas, relaciones hídricas y concentración de nutrientes. También se cosecharon los frutos de tomate en la medida en que estos iban madurando, se midió su calibre, se pesaron y se les hicieron diferentes pruebas para determinar la calidad de los mismos (Sólidos Solubles Totales, Diámetro Ecuatorial y Longitudinal, Acidez Titulable, pH Conductividad Eléctrica, Firmeza, Dureza, Azúcares, Fenoles y Ácidos Orgánicos).

Al finalizar el experimento se cosecharon las plantas para determinar los parámetros de crecimiento, y se guardaron muestras para su posterior análisis en el laboratorio.

CAPITULO 3:

Estudio del comportamiento de plantas de tomate (*Solanum lycopersicum*) bajo invernadero en diferentes sistemas de cultivo sin suelo en condiciones salinas



3.1 INTRODUCCIÓN

El tomate es uno de los cultivos hortícolas más importantes de España produciéndose alrededor de 4 millones de toneladas anuales. Las principales áreas de producción están localizadas en la Región de Murcia y la provincia de Almería, áreas cuyo clima es semiárido caracterizado por una precipitación media anual que no sobrepasa los 300 mm. Ante esta situación de escasez de recursos hídricos de buena calidad, los agricultores usan para el riego aguas de mala calidad, procedentes de pozos o acuíferos subterráneos, que contienen una alta concentración de sales solubles principalmente NaCl. Aunque el tomate es considerado un cultivo moderadamente tolerable a la salinidad, cuando la concentración de NaCl es alta se produce una disminución de la producción y el desarrollo vegetativo. Además, el nivel de tolerancia a la salinidad puede depender de una multitud de factores como la variedad, composición de sales en el agua de riego, manejo de riego, variables climáticas y sistema de cultivo, entre otros factores. Por otro lado, la producción de tomate en cultivos sin suelo en invernadero se está incrementando espectacularmente en los últimos años. Estos sistemas de cultivo permiten reducir los aportes de agua y nutrientes, evitando la contaminación de los suelos y de los acuíferos, y contribuyendo de forma sostenible al ahorro de agua al reutilizar toda o parte de la solución nutritiva drenada por el cultivo.

En el mercado se pueden encontrar una gran variedad de sustratos que van desde los orgánicos (fibra de coco, viruta de madera, pajas de cereales, residuos de industria del corcho, etc.) a los inorgánicos (lana de roca, fibra de vidrio, perlita, vermiculita, arcilla expandida). Actualmente también han aparecido en el mercado sistemas de raíz flotante, que a diferencia de otros sistemas de raíz desnuda como es el caso del hidropónico, donde la raíz está sumergida en la solución nutritiva y se la hace pasar un flujo continuo de aire para oxigenarla, y en este caso la raíz es bañada cada cierto tiempo con la solución nutritiva que va recirculando según las necesidades del cultivo. Sin embargo, este tipo de sistemas todavía no se han estudiado cuando se emplean para el riego aguas salinas. Por lo tanto, este experimento tiene como objetivo evaluar las respuestas agronómicas y fisiológicas de las plantas de tomate regadas con aguas salinas cultivadas con sistema de raíz flotante (NGS[®]) comparándolas con otros sistemas de cultivo como son la perlita o el sistema hidropónico tradicional.

3.2 MATERIAL Y MÉTODOS

3.2.1 Material vegetal y condiciones de cultivo

En este experimento se emplearon plantas de tomate (*Solanum lycopersicum*) variedad “Óptima”, suministradas por un semillero comercial (Baby Plant S.L.). El experimento se llevó a cabo en un invernadero situado en la finca experimental “Tres Caminos” del Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura (CEBAS), localizado en el término municipal de Santomera (Murcia) cuyas coordenadas son 38° 06' 26.32'' N y 1°02'07.14'' O. El invernadero es de tipo multitunel y está construido con placas de policarbonato y techo de polietileno, consta con una superficie de 650 m² y 4,5 m de altura hasta la canal. Para el control de la temperatura dispone de un sistema de refrigeración del tipo “Cooling-system” que mantiene la temperatura por debajo de los 30 °C en verano. También consta de ventiladores y de un sistema de calefacción con generador de aire caliente por combustión indirecta (SIAL Mirage 65) que mantiene la temperatura por encima de los 9 °C en invierno, y malla térmica para ahorro energético. El control de la humedad se realiza mediante un equipo de humidificación con compresor de aire (Ingersoll-R y SSR), manteniendo la humedad relativa en un 65 %. Para el control de la radiación se dispone de una malla de sombreo Aluminycol 30 %. El invernadero incluye un sistema de sensores de radiación, de temperatura y de humedad relativa colocados a una altura de 1.5 m (Foto 3.1). Todos los datos se recogen periódicamente y son almacenados en una base de datos para su posterior análisis.

Se dispuso de trampas cromatrópicas de color amarillo para el control de la mosca blanca (*Trialeurodes vaporariorum* y *Bemisia tabaci*), pulgones (*Myzus persicae* y *Aphis gossypii*), y de color azul para los trips (*Frankliniella occidentalis*), principales vectores de virosis. Periódicamente y cuando se consideró necesario, se aplicaron tratamientos insecticidas, fungicidas y acaricidas mediante pulverización foliar, con objeto de prevenir y controlar el desarrollo de plagas y enfermedades, esto se hizo combinando las siguientes materias activas: imidacloprid (Confidor) y buprofezin (Applaud).

Las técnicas de cultivo empleadas en el tomate, fueron similares a las utilizadas en los invernaderos comerciales. Las plantas fueron entutoradas con hilo de rafia y la poda consistió en dejar una sola guía, eliminando los tallos secundarios conforme iban saliendo.



Fotografía 3.1. Vista parcial del invernadero donde se realizó el experimento

El diseño del invernadero y los equipos instalados, permitieron cierta capacidad de control sobre el ambiente en el interior del mismo (Fig. 3.1). A pesar del notable descenso de la humedad relativa (Hr) registrado en el exterior del invernadero en los meses de abril a julio, en el interior del invernadero la Hr pudo ser controlada en las horas centrales del día. En los meses de primavera la temperatura durante la noche en el interior del invernadero fue unos 5-8 °C mayor que en el exterior, y en las horas centrales del día (mayo y julio) la temperatura en el interior del invernadero fue amortiguada, evitando picos de calor en el interior del invernadero. La radiación exterior tuvo valores similares durante todo el ciclo de cultivo, no obstante las horas de insolación aumentaron de 8 horas (h) y 45 minutos (min) en abril a 12 h 4 min en julio. En el interior la irradiación llegó a alcanzar en momentos concretos del día entre los 400-600 Wm⁻² que corresponden aproximadamente entre 1800-2200 μmolm⁻²s⁻¹. El déficit de presión de vapor en los meses más fríos fue mayor en el interior del invernadero que en el exterior del invernadero y en los meses cálidos fue menor en el interior que en el exterior del invernadero.

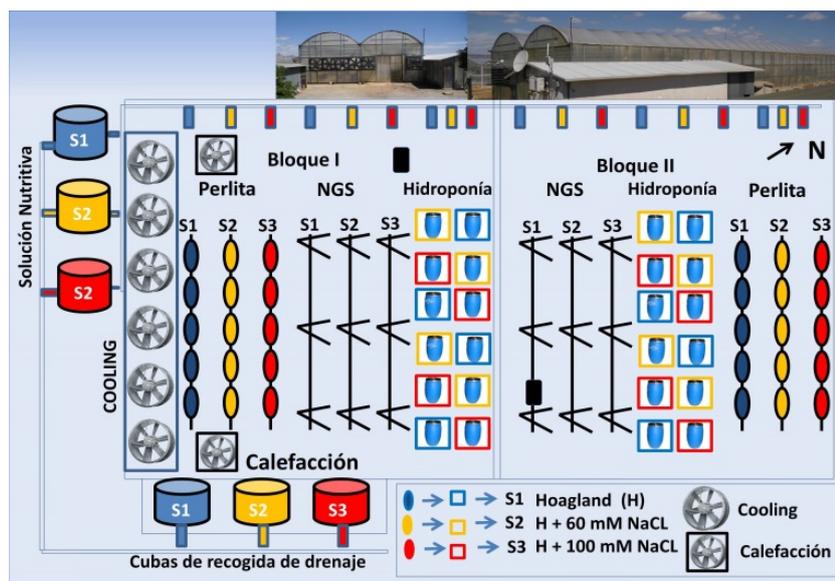


Figura 3.1. Diseño experimental, fotografía y planta del invernadero, con la disposición de los experimentos en tres sistemas de cultivos hidropónicos.

Condiciones climáticas.

Este experimento se desarrolló en el año 2010 entre los meses de abril y julio. En este periodo de tiempo el promedio mensual de temperatura, humedad relativa e irradiación en el interior y exterior del invernadero es mostrado en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Valores medios, mínimos y máximos de temperatura, humedad relativa e irradiación en el interior del invernadero durante el experimento.

2010	Tª (°C)			HR (%)			Irradiación (Wm ⁻²)		
	Med	Mín	Máx	Med	Mín	Máx	Med	Mín	Máx
Abril	20,3	12,2	31,9	67,4	53,4	91,6	320	148	399
Mayo	22,3	16,4	32,1	68,1	59,1	89,6	361	130	442
Junio	26,1	20,2	28,1	64,5	52,6	92,1	412	129	532
Julio	27,1	22,3	29,2	65,2	52,1	94,5	433	136	584

3.2.2 Diseño experimental

El diseño experimental fue bifactorial (3 sistemas de cultivo x 3 tratamientos salinos) en dos bloques cuyos tratamientos estaban distribuidos al azar. Los tres sistemas de cultivo fueron hidropónico, perlita y NGS, los cuales se combinaron factorialmente con tres tratamientos salinos, control (solución nutritiva Hoagland; S0), salinidad uno (Solución Nutritiva Hoagland con 40 mM de NaCl; S1) y salinidad dos (Solución Nutritiva Hoagland con 80 mM de NaCl; S2).

A los 14 días después del trasplante (DDT) en cada uno de los sistemas se iniciaron los tratamientos salinos. Para evitar un posible choque osmótico por altas concentraciones de NaCl, los tratamientos a los que se les adicionó sal se iniciaron con una concentración de 20 mM, y esta concentración se fue incrementando progresivamente en intervalos de 20 mM NaCl por día hasta llegar a la concentración final indicada anteriormente.

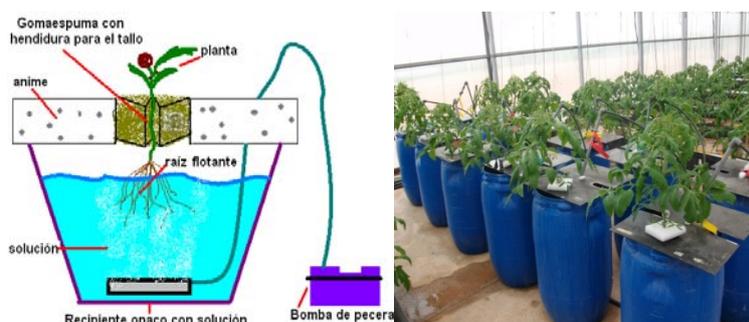
Las soluciones nutritivas se preparaban a partir de agua desionizada que se obtenía mediante un sistema de ósmosis inversa modelo KP-HWL. Como solución base se utilizó la solución nutritiva “Hoagland ” modificada, cuya composición es: 6 mM KNO₃, 4 mM Ca(NO₃)₂, 1 mM KH₂PO₄, 1 mM MgSO₄, 20 μM Fe⁺³ masquolate, 25 μM H₃BO₃, 2 μM MnSO₄, 2 μM ZnSO₄, 0.5 μM CuSO₄, 0.5 μM. (NH₄)₆Mo₇O₂₄·4H₂O. Y a partir de esta solución base se añadía para cada tratamiento salino la correspondiente cantidad de NaCl.

3.2.3 Descripción de los sistemas de cultivo

Cultivo hidropónico

Se utilizaron ocho cubas, una planta por cuba, para cada uno de los tres tratamientos salinos, distribuyéndose estos en dos bloques. En total hubo 24 plantas que se recolectaron al final del experimento, después de 108 días.

Se utilizaron cubos de polivinilo de 120 L de capacidad, dotados de un sistema de aireación permanente (Foto 3.2). Sobre cada cubo se colocó una placa de plástico de color negro provista de 3 orificios; uno para colocar la planta sujeta mediante adaptadores de corcho y algodón hidrófobo, de manera que así la raíz permanecía constantemente sumergida en la disolución. El segundo orificio se utilizaba para añadir agua y nutrientes, así como para medir tanto el pH y la C.E y el tercero para introducir el tubo de la aireación.



Fotografía 3.2. Detalle de las plantas de tomate y del sistema de cultivo sin suelo (cubos de hidroponía de 120 L de capacidad), en condiciones de invernadero.

El sistema utilizado para la aireación de la disolución nutritiva consistía en un electrosoplante situado en el exterior del invernadero que con una red de tuberías metálicas y tubos rígidos de PVC se conducía el aire hasta los distintos cubos. Los aireadores estaban colocados en el fondo de los recipientes para lograr una mayor homogeneidad y así evitar la deposición de nutrientes en el fondo.

El pH y la CE de la solución nutritiva fueron medidos diariamente, ajustándose a 5.6-6 cuando era necesario mediante la aplicación de NaOH ó HNO₃ a 0.5mM. Se tomaban muestras de la SN de los cubos quincenalmente al principio, y semanalmente al final, cuando las plantas eran más grandes. Una vez analizada la SN se reponían los nutrientes con el fin de mantener su concentración en $\pm 10\%$ de los valores iniciales. El volumen de la SN en el contenedor se mantuvo constante por adición de agua desionizada tres veces por semana, de tal manera que el consumo de SN fue de (litros por planta): 181, 165 y 132 para los tratamientos S0, S1 y S2 respectivamente.

Perlita

Se utilizaron sacos de perlita de dimensiones 120 x 22 x 15 cm con una capacidad de 40 L (Foto 3.3). Para cada tratamiento salino había dos filas de cuatro sacos con tres plantas por saco. Con un total de 24 plantas. La densidad de plantación fue de 2,5 plantas/m² manteniendo un diseño experimental con dos bloques al azar, se consideró como unidad experimental las tres plantas por saco.



Fotografía 3.3. Detalles de las plantas de tomate y del sistema de cultivo sin suelo (sacos con sustrato comercial de Perlita) en condiciones de invernadero.

El riego se programó semanalmente y se realizó a solución perdida. La cantidad y frecuencia de riego se hizo en función de la CE y el % de la solución de drenaje, teniendo como principio que el saco nunca tuviera menos del 70% de su capacidad máxima de retención de agua. El porcentaje de drenaje se modificaba cuando era necesario para mantener la conductividad eléctrica del drenaje con valores no superiores al 15 % de la solución de riego. Con este sistema el consumo de solución nutritiva fue de 117, 112, 109 litros por plantas en los tratamientos S0, S1 y S2, respectivamente. Se utilizó un sistema de goteros autocompensantes y autodrenantes de 2.2-3 L/h⁻¹.

New Growing Systems (NGS)

NGS es un sistema multi-banda, compuesto por una celosía (estructura de hierro) que sirve de soporte y da forma a la multi-banda (bolsa de plástico alargada que da soporte al cultivo y recoge el drenaje de la SN (SN_{DRENAJE}) que posteriormente es recirculada a través de un sistema cerrado) a todo lo largo fijándose mediante unos clips de plástico, (Foto 3.4). La densidad de plantación utilizada fue de 2.5 plantas/m² colocando 12 plantas por línea de multi-banda. Se utilizó un sistema de goteros autocompensantes y autodrenantes de 8 L h⁻¹. Después de cada riego se recogían los drenajes en una cuba de 1000 L. Esta solución se volvía a utilizar para el riego siguiente.



Fotografía 3.4. Detalle de las plantas de tomate y del sistema de cultivo sin suelo (New Growing Systems, NGS) en condiciones de invernadero.

La frecuencia de riego se programó en función del agua recogida en cada riego. Al ser el sistema de riego recirculado, se agregó cuando fue necesario agua desionizada a las cubas de recogida para que la CE del tratamiento control no superará los 2 dS/m. En los primeros 30 DDT, se comenzó regando 5 minutos cada 15 minutos, y posteriormente se incrementó la frecuencia de riegos de 5 minutos cada 10 minutos para finalmente mantener una frecuencia de 5 minutos cada 5 minutos. El pH se ajustaba

diariamente en el rango 5,5-6 usando NaOH ó HNO₃ a 0.5mM. Con este sistema se obtuvo un consumo de 195, 172 y 152 L por planta en los tratamientos S0, S1 y S2, respectivamente.

3.2.4 Determinaciones analíticas

El pH y la CE se midieron diariamente. El pH fue ajustado entre 5,5-6 cuando correspondía. Semanalmente se realizaron análisis de nutrientes a las cubas de riego y se reincorporaban los nutrientes que se necesitaba hasta reajustar nuevamente la composición nutritiva de la SN según la SN Hoagland.

3.2.4.1 Rendimiento de frutos

Los frutos de tomate fueron cosechados diariamente cuando alcanzaban el color rojo. Se determinó el peso fresco y el calibre de todos los frutos individuales por planta y tratamiento. Los frutos fueron clasificados en comerciales [> 70 g, sin podredumbre apical (BER), sin rajado o ningún tipo de deformación o daño mecánico] y en no comerciales [< 70 g, con podredumbre apical (BER), rajado o algún tipo de deformación o daño mecánico].

3.2.4.2 Parámetros de calidad del fruto

Los parámetros de calidad se midieron a 24 frutos para cada combinación sistema de cultivo y tratamiento salino, considerando una unidad experimental como 3 frutos cosechados por planta (n=8). Los frutos analizados eran del racimo dos.

Índice de forma: Para calcular el índice de forma se midió el calibre ecuatorial y el longitudinal con un pie de rey, y se calculó mediante la fórmula:

$$IF = \text{Diámetro Ecuatorial} / \text{Diámetro Longitudinal}$$

Color: Las medidas de color se realizaron con un diferenciador de color por tri-estímulo (Minolta CR300), y se expresaron como valores de Hunter L*, a* y b*. Estas coordenadas están correlacionadas con tres conceptos (índices) básicos que se pueden distinguir en toda apreciación del color, los denominados Hue (tono o color base), Value (luminosidad) y Chroma (saturación). La claridad es L*, mientras que la cromaticidad (tono y croma) está indicada por a* y b* conjuntamente. El valor de a* representa el eje que va desde colores verdes (-a*) hasta colores rojos (+a*) y b* representa el eje que evoluciona desde azul (-b*) hasta colores amarillos (+b*). Cada

color viene dado por tres valores de estas coordenadas que representan un punto en el espacio tridimensional (Fig. 3.2).

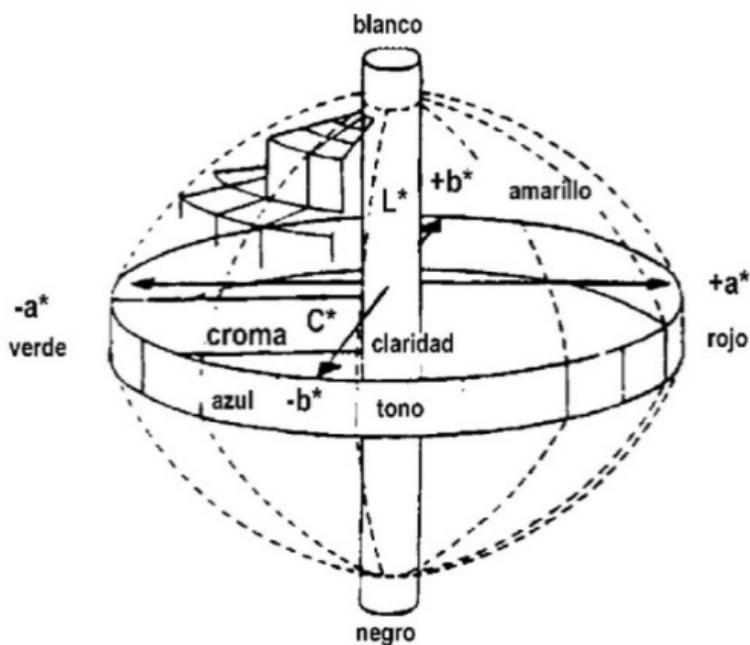


Figura 3.2. Representación gráfica de L* claridad), a* (tono) y b* cromía).

Para determinar el color de la piel del fruto se realizaron tres medidas en tres puntos equidistantes de la zona ecuatorial de los frutos antes de la realización de los ensayos de dureza sobre la pulpa. Con las tres medidas obtenidas en cada fruto para cada valor de L*, a* y b* se calcularon una única tripleta de coordenadas para cada fruto. Para expresar el color, se calculó el cociente a*/b* de los parámetros a* y b*, debido a que tienen una buena correlación con la apreciación visual del color de los frutos (Stewart y Wheaton, 1973). También se determinó el índice de Color, aplicando la siguiente fórmula:

$$\text{Índice de Color} = \frac{1000 * a}{L * b}$$

Dureza: Se determinó mediante un penetrómetro Bertuzzi FT (Foto 3.5), con un émbolo de 8 mm de diámetro, realizándose 3 medidas de compresión por fruto hasta ser atravesado.



Fotografía 3.5 Penetrómetro empleado para medir la dureza.

Firmeza: Se determinó con un texturómetro TA XT plus Texture Analyzer utilizando un dispositivo de presión de forma plana. (Foto 3.6.)



Fotografía 3.6. Texturómetro empleado para medir la firmeza.

3.2.4.3 Determinación de parámetros químicos en el zumo

Los parámetros químicos se midieron en el zumo una vez licuado el mesocarpio con licuadora doméstica Moulinex.

pH y la CE: Introduciendo el electrodo de cada equipo en el zumo de tomate filtrado y asentado.

Sólidos solubles totales: Los sólidos solubles totales fueron medidos por el índice de refracción expresado en °Brix, para ello se depositó una gota de zumo sobre un refractómetro Atago N1 (lectura refractométrica a 20 °C).

Acidez valorable: Se determinó en el zumo de los frutos mediante valoración potenciométrica. 5 ml de zumo se valoraron con NaOH 0.05 N hasta pH= 8.1 (AOAC, 1984) y se expresó como gramos de ácido cítrico por 100 ml de zumo.

3.2.4.4 Crecimiento vegetativo y análisis mineral en el tejido vegetal.

Se realizaron dos muestreos (60 DDT y 108 DDT) para determinar la concentración de nutrientes en las plantas (se midió por espectrometría de plasma acoplado inductivamente (Iris Intrepid II, Thermo Electron Corporation, Franklin, USA, tras la digestión con 3mL de peróxido de oxígeno y 5mL de ácido nítrico, utilizando un microondas CERM con un rampa de temperatura en la que se alcanza 200 °C en 20 min, y se mantiene esta temperatura durante 2 h, CEM Mars Xpress, North Carolina, USA), medir el área foliar de cada planta (medidor de área foliar LICOR-3100C) y el peso seco de cada uno de los tejidos de la planta. A partir del peso seco de las hojas, tallo y raíz, y de las medida del área foliar, se calcularon los siguientes parámetros de crecimiento: peso fresco y seco de hoja y tallo, área total foliar y área total específica. Las hojas muestreadas fueron de mediana edad y tamaño. Del tallo se tomaron muestras de la parte inferior, media y superior. De la raíz se tomaron muestras representativas libres de agentes externos pertenecientes al sustrato o sistema de cultivo. Y de los frutos se tomaron muestras de frutos del racimo dos para cada complejo sistema-tratamiento. Cada una de las partes de la planta se introdujo en la estufa a 70 °C durante tres días, previamente lavadas con agua destilada.

3.2.4.5 Parámetros de intercambio gaseoso

A los 60 y 90 DDT se midieron los parámetros de intercambio gaseoso: asimilación neta de CO₂ (A_{CO_2}), transpiración foliar (T_{HOJA}), uso eficiente del agua ($UEA = A_{CO_2}/T_{HOJA}$), y relación CO₂ subestomático: CO₂ ambiental (C_i/C_a). Estos parámetros se midieron entre las 8:00 y 10:00 de la mañana para evitar valores altos de déficit de presión de vapor. Se utilizó un equipo portátil de fotosíntesis CIRAS-2 equipado con una fuente de luz LED para hacer medidas a 1000 PAR. La concentración de CO₂ se mantuvo constante a 400 ppm (Foto 3.7).

Estos parámetros de intercambio gaseoso se midieron en hojas adultas totalmente expandidas en seis plantas por tratamiento salino y sistema de cultivo. Las medidas se hicieron en dos días consecutivos.



Fotografía 3.7. Equipo portátil de fotosíntesis empleado para hacer las medidas de intercambio gaseoso.

3.2.4.6 Parámetros de fluorescencia de clorofilas

Las medidas de fluorescencia de clorofilas se realizaron en las mismas hojas en las que se midieron los parámetros de intercambio gaseoso utilizando en este caso un fluorímetro de pulso modulado FMS-2 (Hansatech) (ver Foto 3.8), donde las hojas estaban adaptadas a la luz y a la oscuridad. Las medidas de fluorescencia de clorofilas es una herramienta muy útil que permite estudiar cambios que se producen en el PSII sin necesidad de hacer medidas invasivas en las plantas, y además estas medidas son muy sensibles y complementarias con las medidas de los parámetros de intercambio gaseoso. A continuación hacemos un pequeño resumen sobre la fase luminosa de la fotosíntesis, los parámetros que se miden con el equipo de fluorescencia de clorofilas FMS-2 (Hansatech) y como se miden dichos parámetros:

Parte de la luz que incide en una hoja es capturada por los pigmentos fotosintéticos. Dependiendo de la longitud de onda, la luz entra en uno de los dos centros de reacción llamados fotosistema I (PSI) y fotosistema II (PSII), que están localizados en las membranas de los cloroplastos. Cuando una molécula de clorofila *a* absorbe un fotón de energía, y uno de sus electrones adquiere un estado de energía mayor, en este estado este electrón puede pasar a una molécula de quinona (Q) reduciéndola e iniciando el transporte lineal de electrones (Fig. 3.3). Este proceso puede pasar indistintamente en el PSI y el PSII (PSI y PSII son nombrados así no por el orden de reacción sino por el orden en que estos sistemas fueron descubiertos). En el PSI el proceso fotoquímico genera poder reductor en forma de NADPH que se utilizará más tarde en el ciclo de Calvin para asimilar el CO₂ atmosférico y sintetizar azúcares. De esta forma la energía luminosa es convertida en energía química. Otro proceso importante en el proceso lumínico de la fotosíntesis es el llamado “fotólisis del agua”. Este proceso consiste en suministrar electrones a las clorofilas procedentes de la ruptura de las moléculas de agua generando así H⁺ y oxígeno que es liberado a la atmósfera. Los protones generados participarán mediante la bomba de protones ATP-asa en la regeneración de ATP a partir del ADP. Cuando una molécula de clorofila *a* es excitada mediante la luz, no siempre los electrones pasan a la cadena del transporte de electrones sino que esta energía puede ser disipada en forma de calor (‘quenching no fotoquímico’) o mediante la emisión de luz fluorescente (‘quenching fluorescente’; Fig 3.4). Los equipos de fluorescencia de clorofilas son capaces de medir esta luz fluorescente y dependiendo de las condiciones de medida nos dan información sobre la fase luminosa de la fotosíntesis.

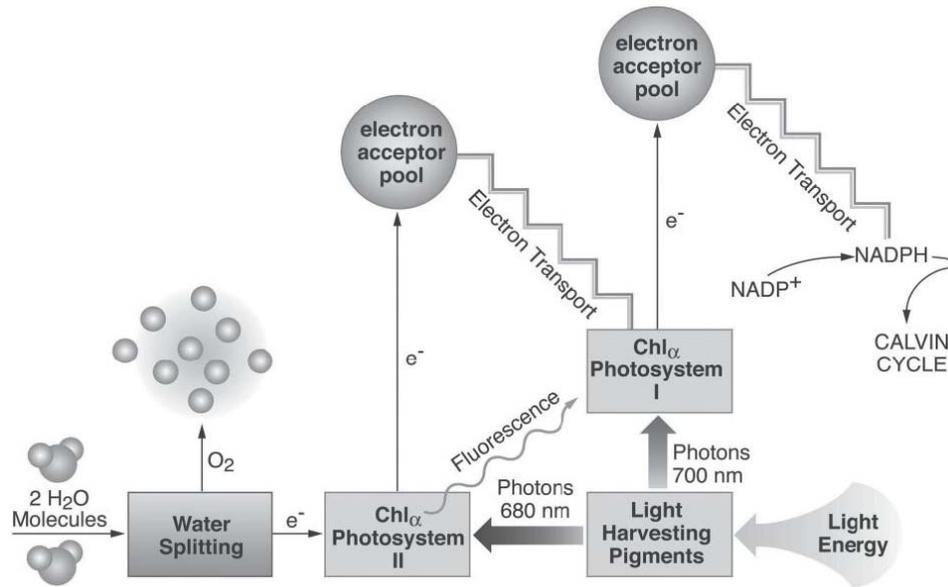


Figura 3.3. Diagrama simplificado de la fase luminosa de la fotosíntesis.

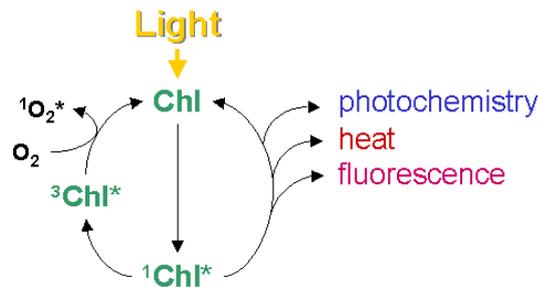


Figura 3.4. Posibles procesos para desactivar las clorofilas excitadas.

El equipo de fluorescencia de clorofilas mide los siguientes parámetros relacionados con la fase luminosa de la fotosíntesis:

- **F_v/F_m: Máxima eficiencia cuántica de los centros de reacción del PSII.**

Es la fluorescencia variable dividida por la fluorescencia máxima. Esta es una relación útil, que ha mostrado ser proporcional al rendimiento cuántico fotoquímico y muestra un alto grado de correlación con el rendimiento cuántico de la fotosíntesis neta.

- **F'_v/F'_m: Eficiencia de las antenas en los centros de reacción del PSII,** (F'_m - F'_o)/F'_m.

- **qP: 'quenching fotoquímico'** calculado como (F'_m-F_s)/(F'_m-F'_o). Se considera una medida del estado de oxidación de las quinonas (QA), es decir, la proporción de centros del PSII que se encuentran en estado 'abierto'. Su valor puede estar entre 0 y 1.

- **ΔF/F'_m o ΦPSII: Eficiencia fotoquímica del PSII,** se calcula como (F'_m-F_s)/F'_m. Hace referencia a los cambios en el rendimiento cuántico efectivo a la luz y pueden deberse a alguno de estos dos parámetros (o de ambos): la proporción de centros

del PSII en estado abierto (qP) o a cambios en el rendimiento intrínseco de estos centros ($F'v/F'm$).

● **NPQ: 'quenching no fotoquímico'** calculado como $(F_m - F'm)/(F'm)$. Una alternativa a esta definición es $qNP = 1 - (F'm - F'o)/(F_m - F'o)$. Su valor puede estar entre 0 y 1.

● **ETR: Tasa de transporte de electrones** = $\Phi_{PSII} * PAR * 0.5 * a$, donde **PAR** es la densidad de flujo fotónico fotosintético incidente, '**a**' es la fracción de luz que es absorbida por la hoja y **0.5** es la fracción de luz absorbida utilizada por el PSII.

Para obtener los parámetros descritos anteriormente se tienen que medir los siguientes parámetros de fluorescencia:

● **F_o**: fluorescencia mínima de hojas adaptadas a la oscuridad.
● **F_m**: valor máximo de fluorescencia en hojas adaptadas a la oscuridad.
● **F_v**: componente variable de la fluorescencia, obtenida al restarle al valor de fluorescencia máxima el valor de fluorescencia inicial.

● **PAR**: radiación de luz fotosintéticamente activa ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$).
● **Temperatura foliar**: °C.
● **F_s**: Fluorescencia estable a cualquier nivel de luz.
● **F'm**: Máxima fluorescencia en hojas adaptadas a la luz después de aplicar un pulso saturante de luz actínica.

● **F'o**: Fluorescencia mínima en hojas adaptadas a la luz después de un pulso de luz roja.

● **F'v**: Fluorescencia variable en hojas iluminadas ($F'v = F'm - F'o$).

Para medir los parámetros F_o , F_m , F_v , F_s , $F'o$ y $F'm$ se realizó la cinética de fluorescencia de clorofilas tal como se muestra en la fig. 3.5. Primero las hojas fueron adaptadas a la oscuridad durante 30 minutos, entonces se iluminaron con luz de baja intensidad fotosintética ($PAR \leq 1 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) para medir F_o . A esta medida le siguió un pulso de saturación de luz de $12000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ durante 0.8 segundos para medir F_m . Entonces las hojas se iluminaron con luz actínica de $1500 \mu\text{mol m}^{-2}$ durante 100 segundos para medir F_s y transcurrido este tiempo se vuelve a aplicar un pulso de saturación de luz como el anterior para medir $F'm$. Se apaga después la luz actínica e inmediatamente se aplicó un pulso de saturación de luz roja de 735 nm de intensidad $12000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ durante 0.8 segundos para medir $F'o$. Los pulsos de saturación de luz se utilizan para medir la fluorescencia máxima tanto en condiciones de luz como en condiciones de oscuridad. Lo que hace es que todas las quinonas pasen a la forma

reducida al captar los electrones, como el transporte de electrones es mucho más rápido que las reacciones del ciclo de Calvin, entonces la luz capturada por las clorofilas tiene que ser disipada en forma de fluorescencia.

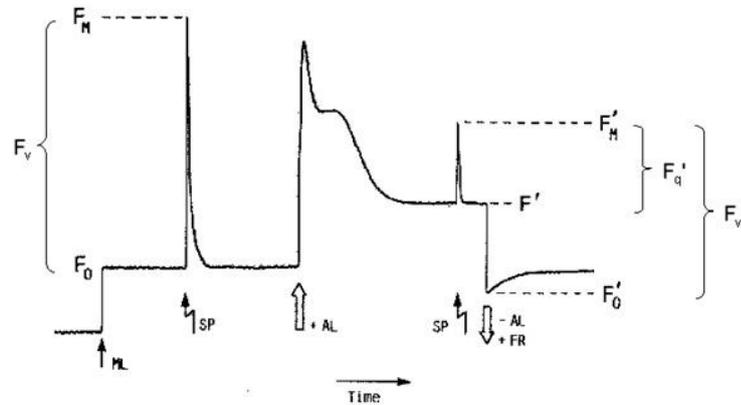


Figura 3.5. Secuencia de pulsos de luz seguida en las medidas de fluorescencia de clorofilas.

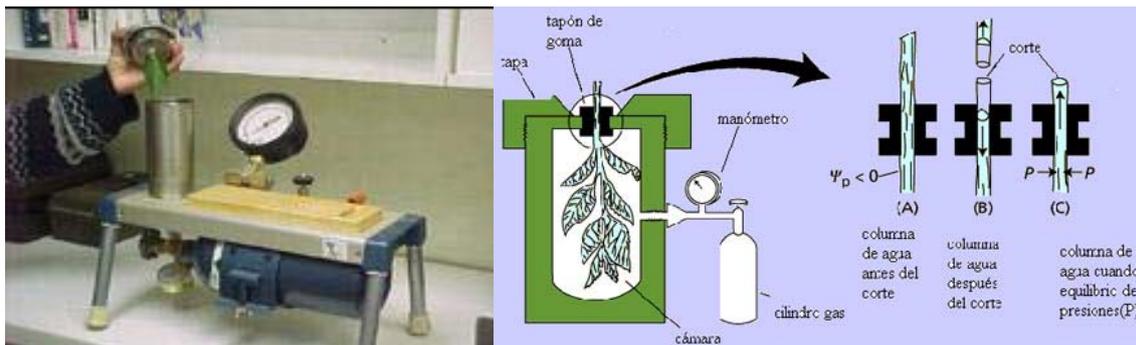


Fotografía 3.8. Equipo portátil de fluorescencia empleado para hacer las medidas de parámetros.

3.2.4.7 Relaciones hídricas.

Para conocer el estado hídrico de las plantas se realizó a los 60 y 90 DDT un estudio de relaciones hídricas, midiendo el potencial hídrico al alba (Ψ_w), potencial osmótico ($\Psi\pi$), potencial de turgor (Ψ_p), contenido relativo de agua (CRA), y potencial osmótico a plena turgencia ($\Psi\pi_{100}$). El potencial hídrico (Ψ_w) al alba (5:00-7:00) se determinó utilizando una cámara de presión tipo Scholander (PMS Instrument, Corvallis, OR; Scholander y *col.*, 1965; ver Foto 3.9) en hojas totalmente expandidas situadas en la región media de la planta. Los valores fueron tomados en unidades de psi (libra-fuerza por pulgada cuadrada) y transformados a MPa mediante la siguiente ecuación:

$$\Psi_w = - (0.0687 \times \text{psi} + 0.091)/10$$



Fotografía 3.9 Cámara de Scholander empleada en la determinación del potencial hídrico foliar (Ψ_w).

Inmediatamente después de esta medida, las hojas fueron envueltas en papel aluminio, congeladas en nitrógeno líquido y almacenadas en bolsas de plástico a -20°C para su posterior análisis. En el laboratorio, las hojas se descongelaron a temperatura ambiente y la savia se extrajo por centrifugación durante 5 min a 8000 rpm a 4°C en microtubos perforados. La osmolalidad se determinó en alícuotas de $10\ \mu\text{L}$ en un osmómetro que mide el punto de congelación (Digital Osmometer, Roebling, Berlin), obteniendo el potencial osmótico en MPa de la savia de la hoja por la ecuación de Van't Hoff, y el potencial de turgor (Ψ_p) fue calculado como la diferencia entre el Ψ_w y el Ψ_π .

$$\Psi_\pi = -Osm \times 0.0024$$

$$\Psi_p = \Psi_w - \Psi_\pi$$

3.2.4.8 Análisis estadístico.

Para el análisis de los datos se aplicó el ANOVA a un diseño bifactorial, tres sistemas de cultivos (NGS, Perlita e Hidroponía) x tres tratamientos salinos (0, 40 y $80\ \text{dS/m}^2$). Cuando uno de los factores principales, sistema o salinidad, fue significativo, $p < 0,05$, las medias fueron separadas por el Test de Rango Múltiple de Duncan. Cuando la interacción fue significativa, se realizó el Test de separación de medias de Duncan de dos formas diferentes: i) comparando el efecto de la salinidad para cada uno de los sistemas de cultivo, utilizando letras minúsculas para identificar diferencias significativas entre los tratamientos salinos; ii) comparando los efectos del sistema de cultivo para cada tratamiento salino, utilizando letras mayúsculas para identificar diferencias significativas entre los sistemas.

3.3 Resultados

3.3.1 Producción y calidad de frutos

3.3.1.1 Rendimiento total

La producción total de frutos por planta cosechada durante todo el desarrollo del cultivo fue afectada tanto por el sistema de cultivo como por la salinidad. En cuanto al sistema de cultivo la mayor producción se obtuvo en las plantas cultivadas en hidropónico (4,5 kg planta⁻¹), seguido de perlita (3,6 kg planta⁻¹) y NGS (2,7 kg planta⁻¹). Estas diferencias en la producción entre los sistemas de cultivo se debieron principalmente a las diferencias en el peso medio de los frutos más que al número de frutos por planta (Tabla 3.2). Así, los tomates procedentes del sistema de hidroponía tuvieron un mayor peso medio (159.5 g) que aquellos procedentes de perlita (133,6) o NGS (113,2). Al aumentar la salinidad en la SN disminuyó progresivamente la producción total de frutos por planta, y este efecto fue similar en los tres sistemas ensayados. Por lo que las plantas cultivadas en NGS y con el tratamiento salino más alto (S2) son las que tuvieron un menor rendimiento. Por otro lado, la pérdida de producción por la salinidad se debió principalmente a la reducción del peso medio de los frutos en los tres sistemas ensayados, y también a una disminución en el número de frutos en las plantas cultivadas en NGS (Fig. 3.6). En cuanto a los frutos afectados por la fisiopatía del BER, en el tratamiento control no hubo diferencias significativas entre los sistemas ensayados. Los tratamientos salinos S1 y S2 tendieron a incrementar su número en plantas cultivadas en hidroponía y perlita con respecto al tratamiento S0, sin embargo en el sistema de NGS la salinidad no tuvo ningún efecto.

Tabla 3.2. Efectos del sistema de cultivo y la salinidad sobre parámetros de rendimiento total e incidencia de *blossom-end rot* en plantas de tomate.

	Producción total (kg planta ⁻¹)	Peso medio fruto (g)	Nºfrutos (planta ⁻¹)	Nºfrutos BER (planta ⁻¹)
Factor principal: Sistema				
Hidropónico	4,5±0,3a	159,5±11,0a	29±1a	5±1a
NGS	2,7±0,2b	113,2±6,52b	23±1b	2±0b
Perlita	3,6±0,2c	133,6±7,30c	27±1a	3±1b
Factor principal: Salinidad				
S0	4,5±0,2a	172,9±5,99a	26±1	1±0c
S1	3,4±0,2b	123,8±5,07b	27±1	3±1b
S2	2,4±0,2c	97,89±3,91c	24±2	5±1a
Sistema	***	***	**	***
Salinidad	***	***	ns	***
Sistema x Salinidad	ns	ns	***	***

, * y “ns” indican diferencias significativas a $p < 0,01$, $p < 0,001$ y no significativas, respectivamente.

Para cada columna, valores con diferentes letras presentan diferencias significativas al 95% según el test de Rango múltiple de Duncan. Los valores de cada uno de los parámetros son valores medios ± error estándar; (n=24).

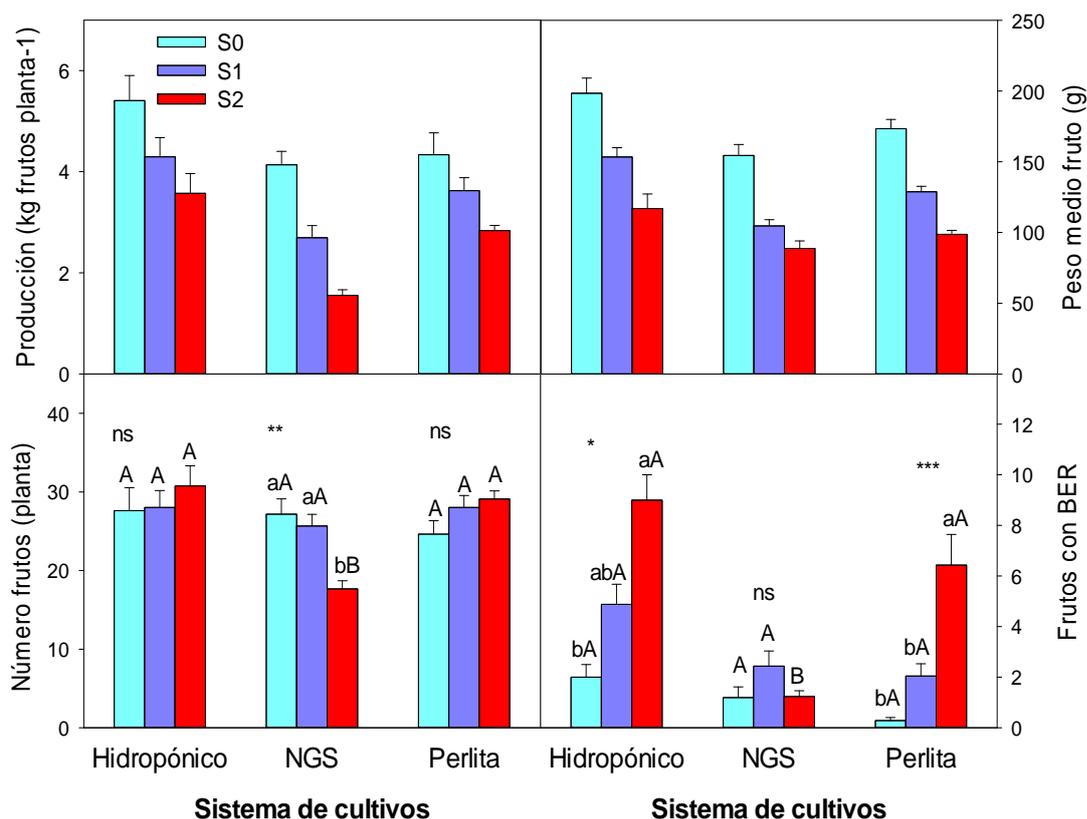


Figura 3.6 Efecto de la salinidad (S0, control; S1, 40 mM NaCl; S2, 80 mM NaCl) sobre parámetros de rendimiento total e incidencia de blossom-end rot en tres sistemas de cultivo sin suelo. La barra de error indica el error estándar de la media (n=8). *, **, *** y “ns” indican diferencias significativas a $p < 0,05$, $p < 0,01$, $p < 0,001$ y no significativas, respectivamente, entre los tratamientos salinos para cada sistema de cultivo. Valores con diferentes letras presentan diferencias significativas al 95% según el test de Rango múltiple de Duncan. Letras minúsculas comparan los tratamientos salinos para cada sistema de cultivo. Letras mayúsculas comparan los sistemas de cultivo para cada tratamiento salino.

3.3.1.2 Rendimiento comercial

En el rendimiento comercial de las plantas de tomate se consideraron aquellos frutos que son aptos para ser vendidos para su consumo en fresco, por lo tanto, se eliminan aquellos frutos que tienen síntomas de BER o un peso menor de 70 g. Los resultados siguen la misma tendencia que el rendimiento total. Las plantas cultivadas en hidropónico tienen una mayor producción que aquellas cultivadas en perlita y NGS, y esto es debido al mayor peso medio de los frutos obtenidos en el primer sistema (Tabla 3.3; Fig. 3.7). La salinidad disminuyó progresivamente la producción al incrementar la concentración de NaCl en la SN, y esta disminución fue similar en los tres sistemas de cultivo ensayados. La salinidad principalmente afectó al peso medio de los frutos en los tres sistemas, y solamente afectó al número de frutos en NGS. Resumiendo, para cada tratamiento salino empleado en el riego la mayor producción siempre se obtiene con el sistema de hidroponía y la menor en el sistema de NGS.

Tabla 3.3. Efectos del sistema de cultivo y la salinidad sobre parámetros de rendimiento comercial en plantas de tomate.

	Producción Frutos (kg planta ⁻¹)	Peso medio fruto (g)	Nº frutos/planta ⁻¹
Factor principal: Sistema			
Hidropónico	3,9±0,4a	184,3±10,2a	21±1 ^a
NGS	2,2±0,3c	133,8±5,7c	16±1b
Perlita	3,13±0,2b	148,7±6,6b	21±1 ^a
Factor principal: Salinidad			
S0	4,3±0,2a	187,8±6,8a	23±1 ^a
S1	2,8±0,2b	141,8±5,2b	20±1b
S2	1,8±0,2c	123,4±4,0c	14±1c
Sistema	***	***	**
Salinidad	***	***	***
Sistema x Salinidad	ns	ns	*

*, **, *** y “ns” indican diferencias significativas a $p < 0,05$, $p < 0,01$, $p < 0,001$ y no significativas, respectivamente. Para cada columna, valores con diferentes letras presentan diferencias significativas al 95% según el test de Rango múltiple de Duncan. Los valores de cada uno de los parámetros son valores medios ± error estándar (n=24).

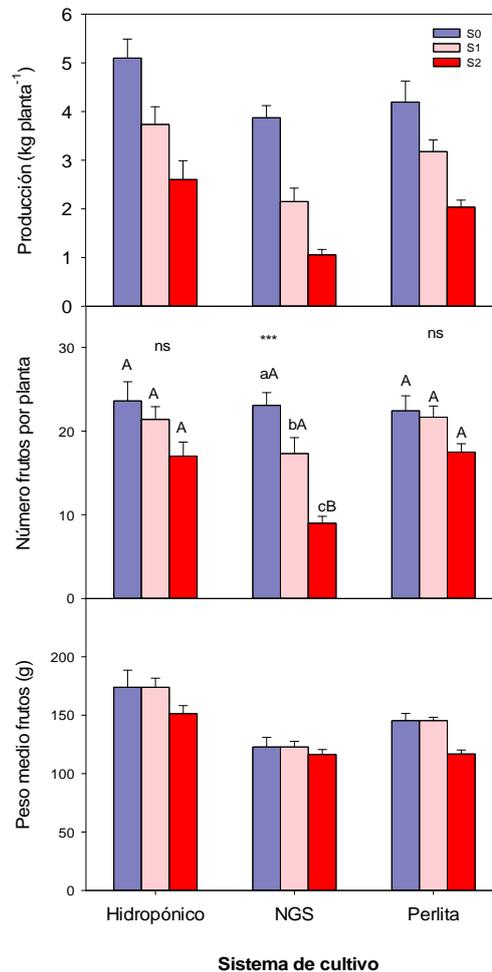


Figura 3.7. Efecto de la salinidad (S0, control; S1, 40 mM NaCl; S2, 80 mM NaCl) sobre parámetros de rendimiento total en tres sistemas de cultivo sin suelo. La barra de error indica el error estándar de la media (n=8). *** y “ns” indican diferencias significativas a $p < 0,001$ y no significativas, respectivamente, entre los tratamientos salinos para cada sistema de cultivo. Valores con diferentes letras presentan diferencias significativas al 95% según el test de Rango múltiple de Duncan. Letras minúsculas comparan los tratamientos salinos para cada sistema de cultivo. Letras mayúsculas comparan los sistemas de cultivo para cada tratamiento salino.

3.3.1.3 Rendimiento no comercial.

Como se explicó anteriormente, el rendimiento no comercial tiene en cuenta frutos con BER y/o con peso medio menor de 70 g. En el tratamiento no salino (S0) el rendimiento no comercial no fue afectado por el sistema de cultivo (Tabla 3.4). Entonces, independientemente del sistema de cultivo, para S0 se obtuvo una producción no apta para el comercio en fresco de 0.4 kg por planta, lo que representa una media de 3 frutos. La salinidad incrementó el rendimiento no comercial, pero este incremento fue mayor en los sistemas hidropónico y perlita que NGS. Además, en estos dos primeros sistemas se observaron diferencias significativas entre los tratamientos salinos S1 y S2, mientras que no hubo diferencias significativas entre estos tratamientos para las plantas en NGS e hidropónico (Fig. 3.8). De todos los frutos considerados no comerciales predominaron más los frutos de menor tamaño que aquellos afectados por BER (datos no mostrados).

Tabla 3.4. Efectos del sistema de cultivo y la salinidad sobre parámetros de rendimiento no comercial en plantas de tomate.

	Producción no comercial (g planta ⁻¹)	Nº frutos/ planta ⁻¹
Factor principal: Sistema		
Hidropónico	589,3±104a	8±2
NGS	445,0±39b	7±1
Perlita	464,2±70ab	6±1
Factor principal: Salinidad		
S0	232,4±38c	3±0c
S1	511,8±42b	7±1b
S2	697,5±64a	11±1a
Sistema	*	Ns
Salinidad	***	***
Sistema x Salinidad	**	*

*, **, *** y “ns” indican diferencias significativas a $p < 0,05$, $p < 0,01$, $p < 0,001$ y no significativas, respectivamente. Para cada columna, valores con diferentes letras presentan diferencias significativas al 95% según el test de Rango múltiple de Duncan. Los valores de cada uno de los parámetros son valores medios ± error estándar (n=24).

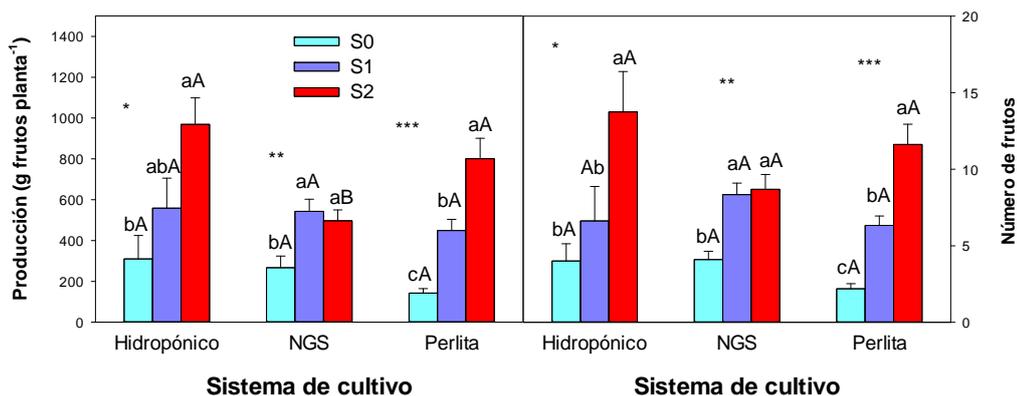


Figura 3.8. Efecto de la salinidad (S0, control; S1, 40 mM NaCl; S2, 80 mM NaCl) sobre parámetros de rendimiento no comercial en tres sistemas de cultivo sin suelo. La barra de error indica el error estándar de la media (n=8). *, ** y *** indican diferencias significativas a $p < 0,05$, $p < 0,01$, $p < 0,001$ entre los tratamientos salinos para cada sistema de cultivo. Valores con diferentes letras presentan diferencias significativas al 95% según el test de Rango múltiple de Duncan. Letras minúsculas comparan los tratamientos salinos para cada sistema de cultivo. Letras mayúsculas comparan los sistemas de cultivo para cada tratamiento salino.

3.3.1.4 Calidad de fruto

Durante el desarrollo del cultivo se cosecharon frutos de tomate para evaluar su calidad en relación tanto al sistema de cultivo como de la salinidad empleada en la SN. Los frutos procedentes de los sistemas de cultivo hidropónico y perlita tuvieron un mayor diámetro longitudinal y ecuatorial, y un menor índice de forma que los frutos de las plantas cultivadas en NGS. La dureza no fue afectada por el sistema de cultivo pero sí la firmeza que fue mayor en frutos procedentes de hidroponía seguido de perlita y NGS. Al incrementar la salinidad en la SN disminuyó progresivamente tanto el diámetro ecuatorial y longitudinal como la firmeza. En el índice de forma solo se encontraron diferencias significativas entre el tratamiento S0 y S1, siendo este índice mayor en el tratamiento salino S1. En resumen, se puede decir que el sistema NGS empleado con aguas salinas de 80 mM NaCl (S2) dieron los frutos más pequeños y con una baja firmeza (Tabla 3.5 y Fig. 3.9).

En los parámetros de color solo se aprecian diferencias significativas en la luminosidad L^* y b^* para el factor sistema de cultivo (Tabla 3.6). Frutos procedentes de NGS tuvieron una mayor L^* y b^* que aquellos del sistema de hidroponía, sin embargo, no hubo diferencias significativas entre frutos de NGS y perlita (Fig. 3.10). La salinidad no afectó el color de los frutos en ninguno de los parámetros medidos.

Tabla 3.5. Efectos del sistema de cultivo y la salinidad sobre los parámetros de calidad diámetro ecuatorial (D. Ecuatorial), diámetro longitudinal (D. Longitudinal), índice de forma (I. Forma), dureza y firmeza en frutos de tomate.

	D. Ecuatorial (mm)	D. Longitudinal (mm)	I. Forma	Dureza (N m ⁻²)	Firmeza (N)
Factor principal: Sistema					
Hidropónico	78,6±2,6a	60,8±1,7a	0,77±0,01b	5,28±0,32	16,03±0,56a
NGS	65,5±2,0b	55,5±1,4b	0,85±0,01a	5,31±0,20	12,15±0,60c
Perlita	76,2±1,9a	60,6±1,4a	0,80±0,00b	5,08±0,15	14,21±0,60b
Factor principal: Salinidad					
S0	82,6±1,8a	65,2±0,9a	0,79±0,01b	5,11±0,21	16,82±0,47a
S1	70,9±1,8b	59,0±1,1b	0,83±0,01a	5,18±0,20	13,10±0,53b
S2	64,1±1,9c	51,9±1,0c	0,81±0,01ab	5,36±0,22	11,53±0,46c
Sistema	***	***	***	ns	***
Salinidad	***	***	*	ns	***
Sistema x Salinidad	ns	ns	ns	ns	ns

*, *** y “ns” indican diferencias significativas a $p < 0,05$, $p < 0,001$ y no significativas, respectivamente. Para cada columna, valores con diferentes letras presentan diferencias significativas al 95% según el test de Rango múltiple de Duncan. Los valores de cada uno de los parámetros son valores medios ± error estándar (n=24).

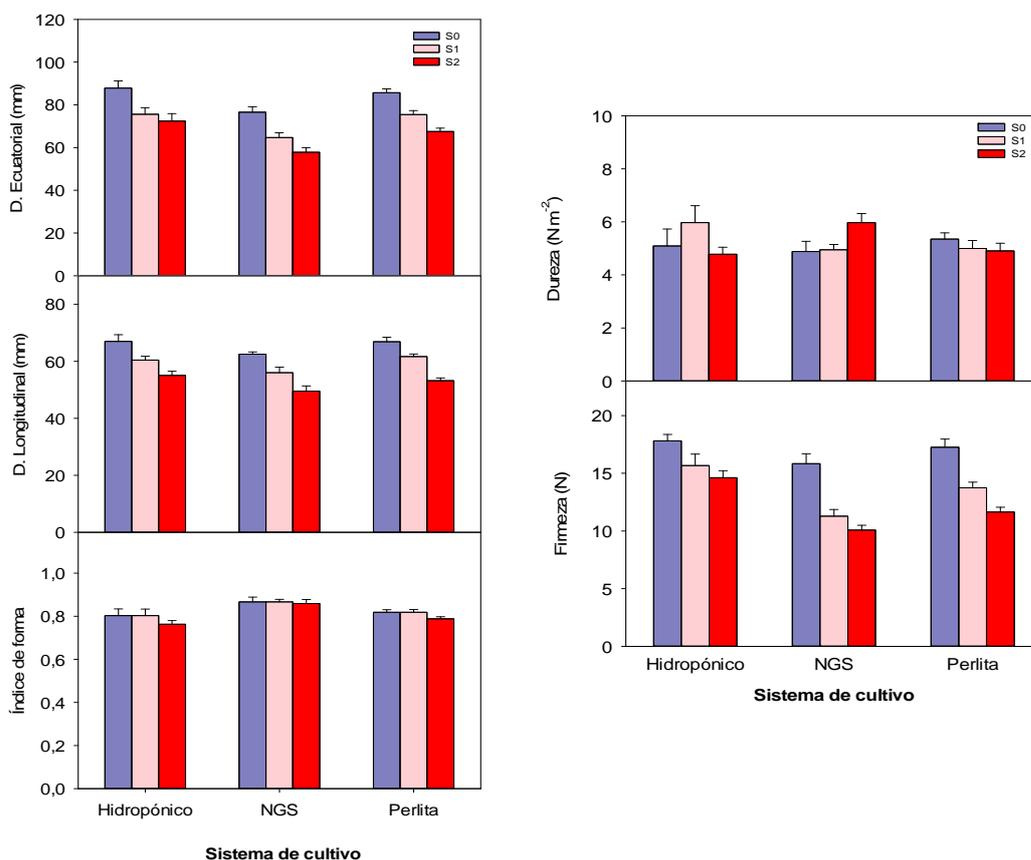


Figura 3.9. Efecto de la salinidad (S0, control; S1, 40 mM NaCl; S2, 80 mM NaCl) sobre parámetros de rendimiento no comercial en tres sistemas de cultivo sin suelo. La barra de error indica el error estándar de la media (n=8).

Tabla 3.6. Efectos del sistema de cultivo y la salinidad sobre las coordenadas colorimétricas L, a*, b* y a*/b*, y el índice de color (I. Color) de frutos de tomate.

	L*	a*	b*	a*/b*	I. Color
Factor principal: Sistema					
Hidropónico	41,82±12,0b	19,39±5,60	25,29±7,30b	0,77±0,22	18,6±5,4
NGS	43,36±8,85a	19,18±3,91	27,05±5,52a	0,71±0,14	16,5±3,4
Perlita	42,66±9,30ab	19,84±4,32	26,25±5,72ab	0,76±0,16	17,8±3,9
Factor principal: Salinidad					
S0	42,93±10,1	18,84±4,44	26,92±6,34	0,70±0,16	16,5±3,9
S1	42,57±9,76	18,78±4,30	25,82±5,92	0,73±0,16	17,3±4,0
S2	42,83±9,57	20,68±4,62	26,44±5,91	0,79±0,17	18,4±4,1
Sistema	*	ns	*	ns	ns
Salinidad	ns	ns	ns	ns	ns
Sistema x Salinidad	ns	ns	ns	ns	ns

* y "ns" indican diferencias significativas a $p < 0,001$ y no significativas, respectivamente. Para cada columna, valores con diferentes letras presentan diferencias significativas al 95% según el test de Rango múltiple de Duncan. Los valores de cada uno de los parámetros son valores medios \pm error estándar (n=24).

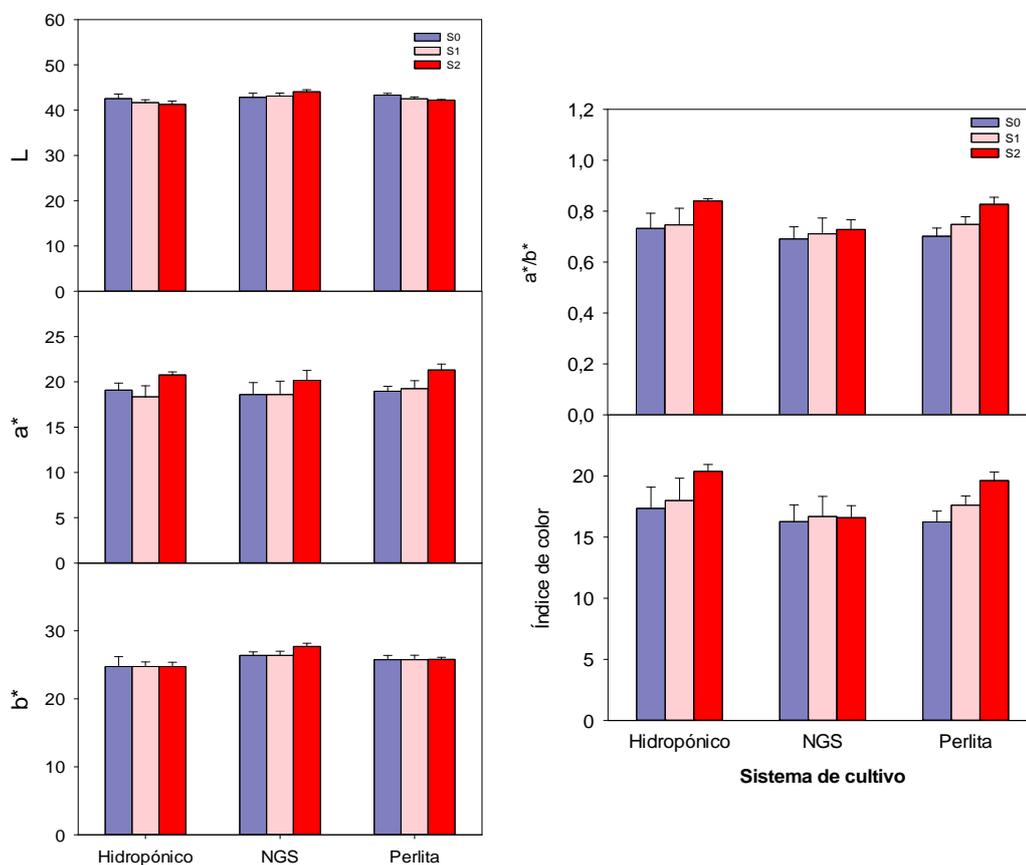


Figura 3.10. Efecto de la salinidad (S0, control; S1, 40 mM NaCl; S2, 80 mM NaCl) sobre las coordenadas colorimétricas L, a*, b*, a*/b*, y el índice de color en tres sistemas de cultivo sin suelo. La barra de error indica el error estándar de la media (n=8).

En los parámetros de calidad interna del zumo, conductividad eléctrica (CE), pH, sólidos solubles totales (SST) y acidez valorable (TA) no hubo diferencias entre los frutos procedentes de los tres sistemas regados con el tratamiento S0 (Fig. 3.11). La salinidad mostró una tendencia a incrementar de los SST, TA y CE en los frutos de los tres sistemas, pero este incremento fue mayor en los frutos procedentes del sistema NGS (Tabla 3.7). Así, para el tratamiento de salinidad S2 se alcanzaron los valores más altos que fueron 8,4 °Brix, 3,9 g l⁻¹ y 5,21 dS m⁻¹, respectivamente. El pH no fue afectado ni por la salinidad ni por el sistema de cultivo. El índice de madurez solo fue afectado por el sistema de cultivo, teniendo los frutos procedentes de NGS y perlita un mayor valor que los frutos cultivados en hidropónico.

La concentración de Cl y Na en los frutos de tomate incrementó progresivamente al incrementar la concentración de NaCl en la SN. En el caso del Cl⁻ el sistema no afectó significativamente la concentración en los frutos (Tabla 3.8). Para el Na⁺, sin embargo, se observó que el mayor incremento se dio para el sistema NGS, existiendo diferencias significativas en los dos tratamientos salinos S1 y S2 entre este sistema y perlita, pero no con el sistema de hidroponía (Fig. 3.12).

Tabla 3.7. Efecto de la salinidad y el sistema de cultivo sobre los parámetros de calidad químico conductividad eléctrica (CE), pH, sólidos solubles totales (SST), acidez valorable (TA) e índice de madurez (IM) de frutos de tomate.

	CE (dS m ⁻²)	pH	SST (°Brix)	TA (g/l)	I. M
Factor principal: Sistema					
Hidropónico	4,09±0,11b	4,53±0,01	5,14±0,13c	27,4±0,9b	1,9±0,06b
NGS	4,58±0,13a	4,55±0,01	6,66±0,33a	32,7±1,4a	2,1±0,04a
Perlita	4,02±0,07b	4,52±0,01	5,56±0,16b	26,8±0,7b	2,1±0,03a
Factor principal: Salinidad					
S0	3,71±0,05c	4,56±0,01	4,70±0,06c	24,3±0,6	1,9±0,05
S1	4,31±0,07b	4,53±0,01	5,84±0,12b	29,6±0,8b	1,9±0,041
S2	4,73±0,11a	4,51±0,01	7,14±0,31a	33,9±1,3a	2,1±0,04
Sistema	***	ns	***	***	*
Salinidad	***	ns	***	***	ns
Sistema x Salinidad	**	ns	***	**	ns

*, **, *** y “ns” indican diferencias significativas a $p < 0,05$, $p < 0,01$, $p < 0,001$ y no significativas, respectivamente. Para cada columna, valores con diferentes letras presentan diferencias significativas al 95% según el test de Rango múltiple de Duncan. Los valores de cada uno de los parámetros son valores medios ± error estándar (n=24).

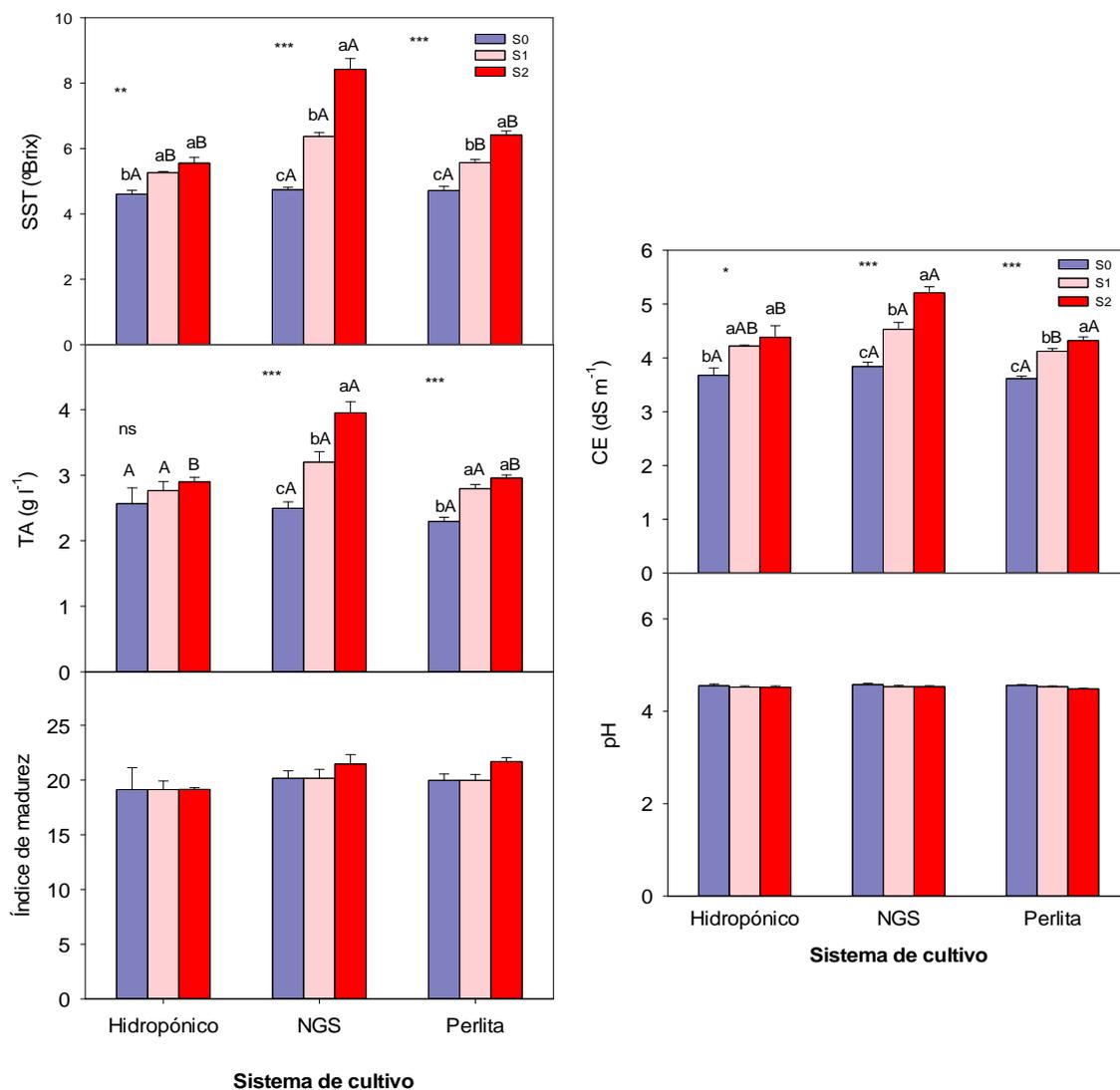


Figura 3.11. Efecto de la salinidad (S0, control; S1, 40 mM NaCl; S2, 80 mM NaCl) sobre los parámetros de calidad química, conductividad eléctrica (CE), pH, sólidos solubles totales (SST), acidez valorable (TA) e índice de madurez (IM) de frutos de tomate cultivados en tres sistemas de cultivo sin suelo. La barra de error indica el error estándar de la media (n=8). *, **, *** y “ns” indican diferencias significativas a $p < 0,05$, $p < 0,01$, $p < 0,001$ y no significativas, respectivamente, entre los tratamientos salinos para cada sistema de cultivo. Valores con diferentes letras presentan diferencias significativas al 95% según el test de Rango múltiple de Duncan. Letras minúsculas comparan los tratamientos salinos para cada sistema de cultivo. Letras mayúsculas comparan los sistemas de cultivo para cada tratamiento salino.

Tabla 3.8. Efecto del sistema de cultivo y la salinidad en la concentración de Cl y Na en los frutos de tomate.

	Cl (%)	Na (%)
Factor principal: Sistema		
Hidropónico	1,03±0,09	0,16±0,02b
NGS	0,94±0,05	0,21±0,03a
Perlita	0,90±0,04	0,12±0,01b
Factor principal: Salinidad		
S0	0,64±0,02c	0,04±0,004c
S1	1,01±0,03b	0,17±0,01b
S2	1,16±0,04a	0,28±0,02a
Sistema	ns	***
Salinidad	***	***
Sistema x Salinidad	ns	*

*, **, *** y “ns” indican diferencias significativas a $p < 0,05$, $p < 0,01$, $p < 0,001$ y no significativas, respectivamente. Para cada columna, valores con diferentes letras presentan diferencias significativas al 95% según el test de Rango múltiple de Duncan. Los valores de cada uno de los parámetros son valores medios \pm error estándar ($n=24$).

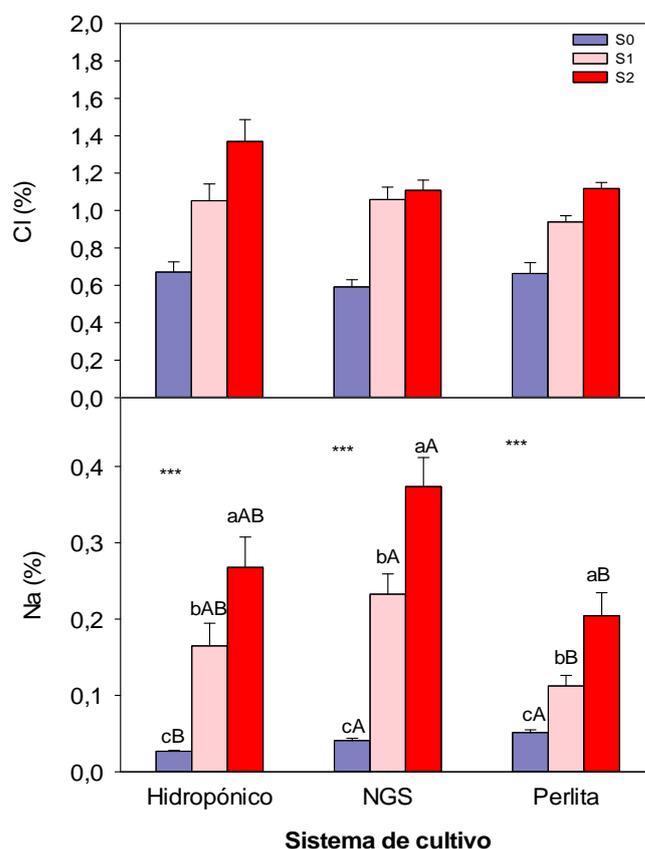


Figura 3.12. Efecto de la salinidad (S0, control; S1, 40 mM NaCl; S2, 80 mM NaCl) sobre la concentración de Cl y Na en frutos de tomate cultivados en tres sistemas de cultivo sin suelo. La barra de error indica el error estándar de la media ($n=8$). *** indica diferencias significativas a $p < 0,001$, entre los tratamientos salinos para cada sistema de cultivo. Valores con diferentes letras presentan diferencias significativas al 95% según el test de Rango múltiple de Duncan. Letras minúsculas comparan los tratamientos salinos para cada sistema de cultivo. Letras mayúsculas comparan los sistemas de cultivo para cada tratamiento salino.

Independientemente de los tratamientos salinos, la concentración de P y S en los frutos de tomate fue mayor en los sistemas hidropónico y perlita que en NGS. La concentración de Ca no fue afectada por el sistema de cultivo, y la concentración de K en frutos de plantas regadas con el tratamiento S0 fue similar para los tres sistemas (Tabla 3.9 y Fig 3.13). Al incrementar la concentración de NaCl en la SN disminuyó progresivamente la concentración de P, S y Ca, aunque en el caso del Ca no se observaron diferencias significativas entre los tratamientos S0 y S1. En el caso del K, la concentración disminuyó en los tratamientos S1 y S2 con respecto al tratamiento S0 para plantas en NGS, sin embargo, la salinidad no afectó al K en plantas cultivadas en hidropónico o perlita.

El K, fue el único elemento que mostró diferencias significativas en la interacción Sistema x Salinidad. Para los tres sistemas (hidroponía, NGS y perlita), a medida que incrementaban los niveles de salinidad disminuía la concentración de K. En el sistema hidropónico y perlita, de manera individual, no se observaron diferencias significativas en los tratamientos salinos, y este mismo comportamiento tuvieron comparándose entre ellos. No siendo así para el sistema NGS, que a medida que aumentaban las concentraciones salinas en los tratamientos disminuía la concentración de K en estos existiendo diferencias significativas. A su vez, al compararlo con los sistemas de hidropónico y perlita, en el tratamiento control S0, no existieron diferencias significativas, no siendo así en los tratamientos salinos S1 y S2 donde sí se reflejaron diferencias significativas.

Tabla 3.9. Efecto del sistema de cultivo y la salinidad en la concentración de Ca, K, P y S en los frutos de tomate.

	Ca (%)	K (%)	P (%)	S (%)
Factor principal: Sistema				
Hidropónico	0,15±0,01	4,21±0,11a	0,49±0,02a	0,14±0,01a
NGS	0,13±0,01	3,74±0,19b	0,42±0,02b	0,12±0,01b
Perlita	0,14±0,01	4,10±0,14a	0,52±0,02a	0,15±0,004a
Factor principal: Salinidad				
S0	0,16±0,01a	4,51±0,14a	0,57±0,01a	0,16±0,005a
S1	0,15±0,01a	3,99±0,11b	0,47±0,01b	0,13±0,005b
S2	0,12±0,01b	3,57±0,14c	0,39±0,01c	0,12±0,005c
Sistema	ns	*	***	***
Salinidad	**	***	***	***
Sistema x Salinidad	ns	*	ns	ns

*, **, *** y "ns" indican diferencias significativas a $p < 0,05$, $p < 0,01$, $p < 0,001$ y no significativas, respectivamente. Para cada columna, valores con diferentes letras presentan diferencias significativas al 95% según el test de Rango múltiple de Duncan. Los valores de cada uno de los parámetros son valores medios \pm error estándar ($n=24$).

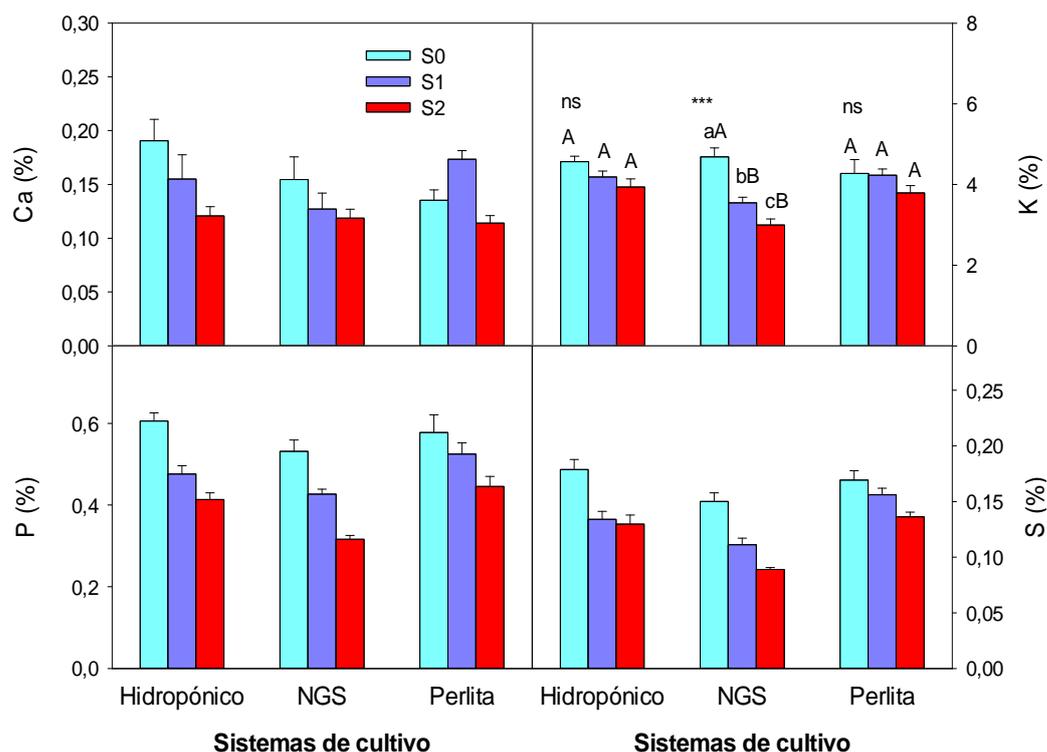


Figura 3.13. Efecto de la salinidad (S0, control; S1, 40 mM NaCl; S2, 80 mM NaCl) sobre la concentración de Ca, K, P y S en frutos de tomate cultivados en tres sistemas de cultivo sin suelo. La barra de error indica el error estándar de la media (n=8). *** y “ns” indica diferencias significativas a $p < 0,001$ y no significativas entre los tratamientos salinos para cada sistema de cultivo. Valores con diferentes letras presentan diferencias significativas al 95 % según el test de Rango múltiple de Duncan. Letras minúsculas comparan los tratamientos salinos para cada sistema de cultivo. Letras mayúsculas comparan los sistemas de cultivo para cada tratamiento salino.

Independientemente de los tratamientos salinos, la concentración de Cu fue significativamente mayor para frutos de plantas cultivadas en hidropónico seguido de perlita y NGS, la concentración de Fe fue similar en hidropónico y perlita pero significativamente mayor que para NGS, y la concentración de Zn fue mayor en hidropónico que en NGS o perlita (Tabla 3.10). En los frutos de plantas regadas con el tratamiento S0 la concentración de Mg fue similar en los tres sistemas, y la concentración de Mn fue mayor significativamente en NGS comparado con frutos de hidropónico pero no con frutos de perlita. La salinidad disminuyó el Fe de forma similar en los tres sistemas, así los frutos de plantas de NGS regados con el tratamiento S2 mostraron la concentración más baja. La concentración de Cu y Mg también disminuyó con la salinidad, pero en el caso de plantas cultivadas en hidropónico y NGS, pero no en perlita (Fig. 3.14) y (Fig. 3.15). En el caso del Mn, los tratamientos S1 y S2 disminuyeron la concentración de forma similar en relación al tratamiento control en frutos procedentes de NGS, sin embargo, estos tratamientos salinos no afectaron a este nutriente en plantas cultivadas en hidropónico o perlita.

Tabla 3.10. Efecto del sistema de cultivo y la salinidad en la concentración de Cu, Fe, Mg, Mn y Zn en los frutos de tomate.

	Cu(mg kg ⁻¹)	Fe(mg kg ⁻¹)	Mg(mg kg ⁻¹)	Mn(mg kg ⁻¹)	Zn(mg kg ⁻¹)
Factor principal: Sistema					
Hidropónico	7,43±0,41a	53,59±2,83a	0,16±0,01a	10,90±0,68	35,29±1,18a
NGS	3,25±0,34c	39,24±3,22b	0,12±0,01b	11,45±0,90	26,72±1,14b
Perlita	5,25±0,19b	51,02±2,02a	0,15±0,004a	12,25±0,55	26,35±0,87b
Factor principal: Salinidad					
S0	6,18±0,53a	56,78±2,70a	0,17±0,005a	14,04±0,63a	30,06±1,49
S1	4,90±0,40b	46,91±2,68b	0,13±0,01b	10,75±0,64b	28,26±1,36
S2	4,78±0,57b	40,35±2,62c	0,13±0,01b	9,981±0,55b	29,75±1,50
Sistema	**	***	***	ns	***
Salinidad	**	***	***	***	ns
Sistema x Salinidad	*	ns	*	*	ns

*, **, *** y “ns” indican diferencias significativas a $p < 0,05$, $p < 0,01$, $p < 0,001$ y no significativas, respectivamente. Para cada columna, valores con diferentes letras presentan diferencias significativas al 95% según el test de Rango múltiple de Duncan. Los valores de cada uno de los parámetros son valores medios \pm error estándar ($n=24$).

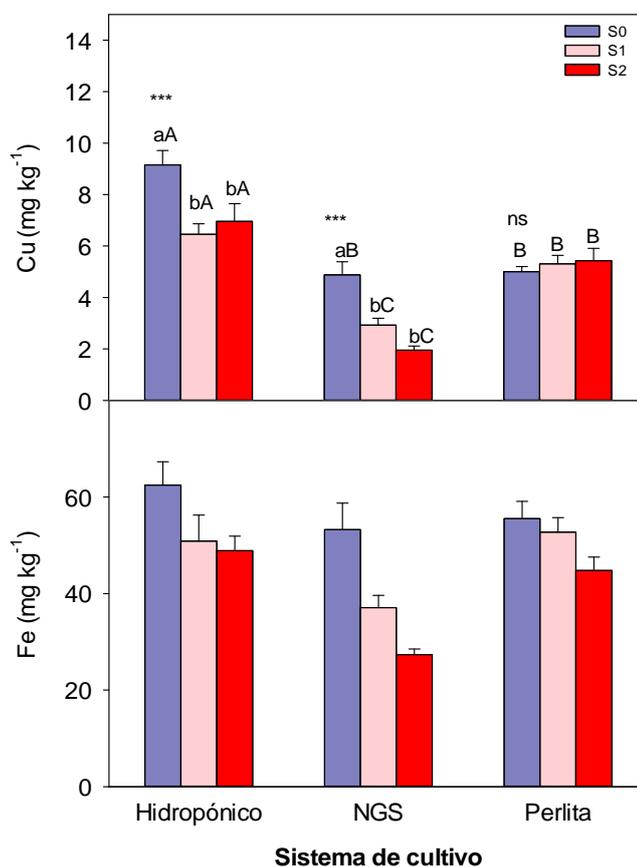


Figura 3.14. Efecto de la salinidad (S0, control; S1, 40 mM NaCl; S2, 80 mM NaCl) sobre la concentración de Cu y Fe en frutos de tomate cultivados en tres sistemas de cultivo sin suelo. La barra de error indica el error estándar de la media ($n=8$). *** y “ns” indica diferencias significativas a $p < 0,001$ y no significativas entre los tratamientos salinos para cada sistema de cultivo. Valores con diferentes letras presentan diferencias significativas al 95% según el test de Rango múltiple de Duncan. Letras minúsculas comparan los tratamientos salinos para cada sistema de cultivo. Letras mayúsculas comparan los sistemas de cultivo para cada tratamiento salino.

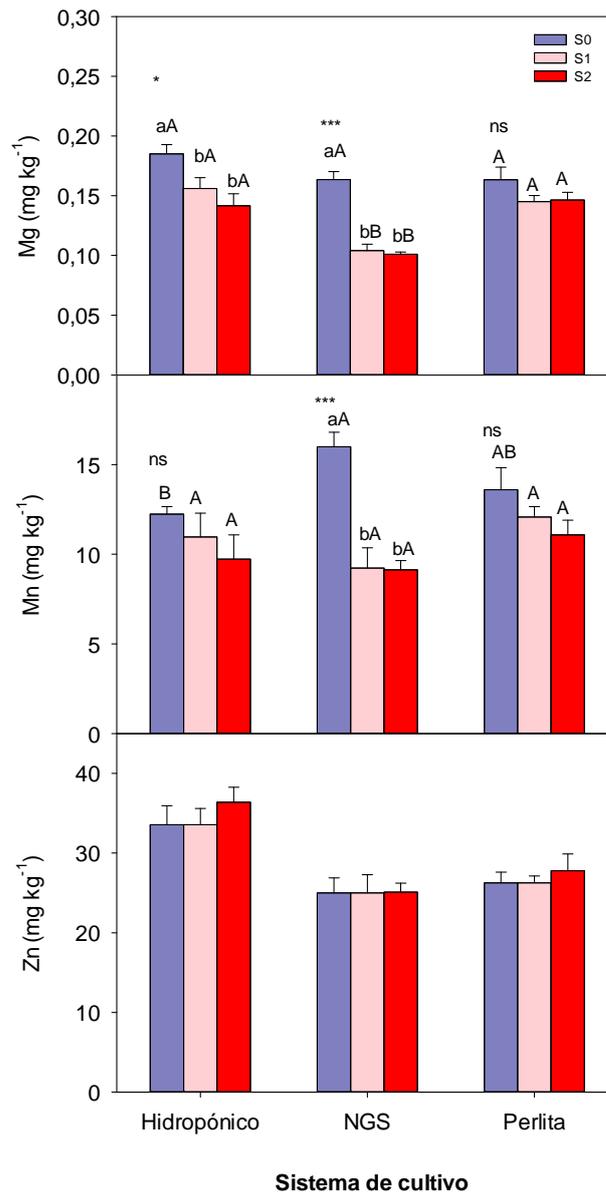


Figura 3.15. Efecto de la salinidad (S0, control; S1, 40 mM NaCl; S2, 80 mM NaCl) sobre la concentración de Mg, Mn y Zn en frutos de tomate cultivados en tres sistemas de cultivo sin suelo. La barra de error indica el error estándar de la media (n=8). *, *** y “ns” indica diferencias significativas a $p < 0,05$, $p < 0,001$ y no significativas entre los tratamientos salinos para cada sistema de cultivo. Valores con diferentes letras presentan diferencias significativas al 95% según el test de Rango múltiple de Duncan. Letras minúsculas comparan los tratamientos salinos para cada sistema de cultivo. Letras mayúsculas comparan los sistemas de cultivo para cada tratamiento salino.

3.3.2. Desarrollo vegetativo de las plantas

Con el fin de comparar los efectos de la salinidad y los sistemas de cultivo en el desarrollo vegetativo de las plantas se midió el peso seco de las hojas, tallo, y área foliar en dos muestreos a lo largo del experimento (50 DDT y 101 DDT). Aunque se obtuvieron datos de la raíz en el sistema de cultivo hidropónico, en los otros dos sistemas fue imposible separar las raíces para determinar el peso seco. A los 50 DDT las plantas cultivadas en hidropónico tuvieron un mayor desarrollo vegetativo que las

plantas en NGS o perlita, ya que le peso seco total de las hojas y el tallo, y el área foliar fue mayor en las plantas en hidropónico que en los otros dos sistemas (Tabla 3.11). El área foliar específica no fue afectada por el sistema de cultivo. La salinidad en este primer muestreo no afectó a ningún parámetro de crecimiento.

Tabla 3.11. Efecto del sistema de cultivo y la salinidad sobre el desarrollo vegetativo de la parte aérea de plantas de tomate en dos diferentes fechas de muestreo. PS indica peso seco y AFE es el área foliar específica.

	PS total hojas (g planta ⁻¹)	PS total tallos (g planta ⁻¹)	Área foliar (m ² planta ⁻¹)	AFE (m ² kg ⁻¹)
50 DDT				
Factor principal: Sistema				
Hidropónico	131,1±8,65a	65,25±4,09a	3,68±0,22a	28,72±2,18
NGS	52,43±4,03b	35,68±3,35b	1,83±0,19c	35,92±4,35
Perlita	69,10±2,68b	39,09±1,30b	2,44±0,14b	35,53±2,12
Factor principal: Salinidad				
S0	89,95±16,5	46,79±5,80	2,80±0,34	35,13±4,50
S1	84,24±9,69	52,10±5,26	2,74±0,30	33,35±2,45
S2	78,45±12,3	41,13±4,28	2,41±0,33	31,69±2,30
Sistema	***	***	***	ns
Salinidad	ns	ns	ns	ns
Sistema x Salinidad	ns	ns	ns	ns
101 DDT				
Factor principal: Sistema				
Hidropónico	225,7±5,17a	59,10±3,71a	5,53±0,10a	24,52±0,09c
NGS	88,69±9,10c	43,45±2,71b	2,74±0,18c	32,16±1,48a
Perlita	113,9±3,98b	44,26±1,49b	3,25±0,08b	28,66±0,29b
Factor principal: Salinidad				
S0	137,5±16,2a	49,39±2,71a	3,74±0,33a	27,78±0,63b
S1	131,4±18,8a	49,02±3,11a	3,61±0,38a	28,42±0,80b
S2	111,1±20,3b	42,22±3,52b	3,20±0,41b	31,45±1,93a
Sistema	***	***	***	***
Salinidad	***	**	***	***
Sistema x Salinidad	***	**	***	***

, * y “ns” indican diferencias significativas a $p < 0,01$, $p < 0,001$ y no significativas, respectivamente. Para cada columna, valores con diferentes letras presentan diferencias significativas al 95% según el test de Rango múltiple de Duncan. Los valores de cada uno de los parámetros son valores medios ± error estándar ($n=24$).

A los 101 DDT, independientemente de la salinidad, igual que observamos en el primer muestreo, las plantas cultivadas en hidropónico tuvieron el mayor crecimiento vegetativo caracterizado por una alta biomasa de hojas y tallo, y área foliar total (Tabla 3.11). La salinidad disminuyó significativamente la biomasa seca de las hojas y el tallo en plantas cultivadas en NGS, pero estos parámetros no fueron afectados en los otros dos sistemas (Fig. 3.16). La disminución de estos parámetros fue mayor para el tratamiento salino más alto S2, así se observó una reducción del 53 y 36 % en las hojas y tallo, respectivamente, en relación con el tratamiento control. El área foliar específica aumento con el tratamiento S2 solo para plantas cultivadas en NGS con respecto al tratamiento S0.

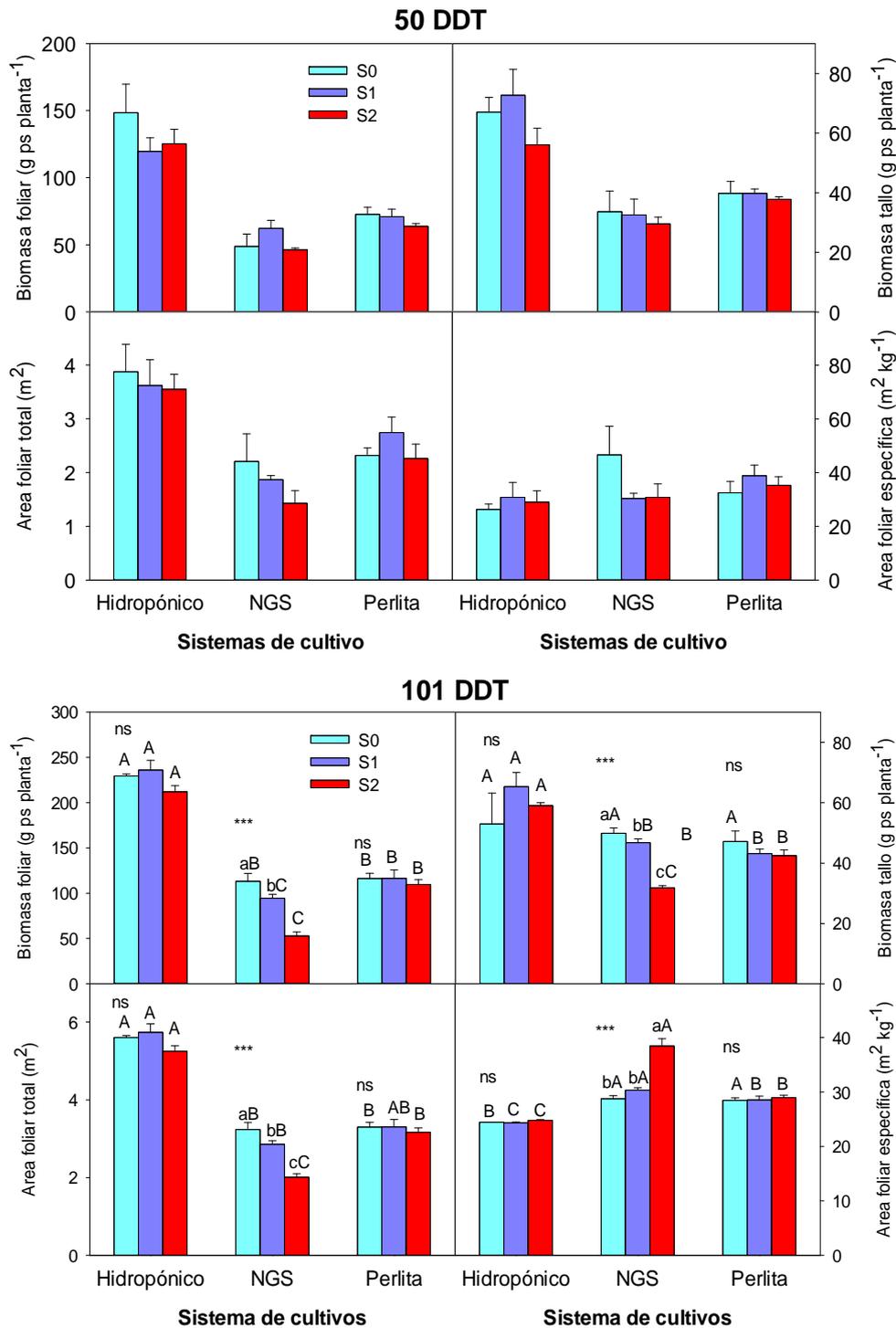


Figura 3.16. Efecto de la salinidad (S0, control; S1, 40 mM NaCl; 80 mM NaCl) sobre los parámetros vegetativos de biomasa seca de hojas y tallo, área foliar y área foliar específica en dos fechas de muestreo en plantas de tomate cultivadas en tres sistemas de cultivo sin suelo. La barra de error indica el error estándar de la media (n=8). *** y “ns” indica diferencias significativas a p<0,001 y no significativas entre los tratamientos salinos para cada sistema de cultivo. Valores con diferentes letras presentan diferencias significativas al 95% según el test de Rango múltiple de Duncan. Letras minúsculas comparan los tratamientos salinos para cada sistema de cultivo. Letras mayúsculas comparan los sistemas de cultivo para cada tratamiento salino.

3.3.3 Estado nutricional de las plantas

Al incrementar la concentración de NaCl en la solución nutritiva incrementó la concentración de Cl y Na en las hojas, independientemente del sistema de cultivo. Ahora bien, en la concentración de Cl en las dos primeras fechas de muestreo, la mayor concentración se dio en las plantas de hidropónico seguido de NGS, observándose la menor concentración en perlita, para sus correspondientes tratamientos salinos (Tabla 3.12; Fig. 3.17). Sin embargo, al final del experimento se observó que las plantas en NGS tuvieron una mayor concentración que aquellas en hidropónico, teniendo en cuenta las plantas de perlita la menor concentración en el tratamiento S2. En el tratamiento S1, hidropónico y NGS tuvieron similares concentraciones siendo ambos mayores que en perlita. Con respecto a las fechas de muestreo, se observó en general que las dos primeras fechas dan valores muy similares, pero al pasar de 50 DDT a 101 DDT la concentración incrementó significativamente.

En el caso del Na, en la primera fecha de muestreo, tanto para el tratamiento salino S1 como S2, las plantas en NGS tuvieron una concentración parecida a aquellas en hidropónico, y esta concentración fue mayor significativamente que las plantas en perlita. Sin embargo, en la segunda fecha de muestreo, en el tratamiento S2 la concentración de Na fue diferente significativamente para cada uno de los tres sistemas siguiendo el siguiente orden ascendente perlita, hidropónico y NGS, no observándose diferencias entre los sistemas para el tratamiento S1 (Tabla 3.13; Fig. 3.18). En la tercera fecha de muestreo el Na para el tratamiento S2 siguió una tendencia similar que la segunda fecha de muestreo, mientras que en esta tercera fecha en el tratamiento S1 la concentración fue mayor que para perlita e hidropónico.

Tabla 3.12. Efecto del sistema de cultivo y la salinidad sobre la concentración de Cl y Na en las hojas de plantas de tomate en tres diferentes fechas de muestreo.

Fecha:	25 DDT		50 DDT		101 DDT	
	Cl	Na	Cl	Na	Cl	Na
Factor principal: Sistema						
Hidropónico	1,64±0,26a	0,62±0,15a	1,77±0,30a	0,70±0,16b	1,72±0,29b	0,53±0,10ab
NGS	1,26±0,21b	0,65±0,13a	1,34±0,24b	0,95±0,22a	2,18±0,37a	0,79±0,16a
Perlita	0,73±0,11c	0,31±0,05b	0,79±0,12c	0,32±0,05c	0,82±0,10c	0,34±0,06b
Factor principal: Salinidad						
S0	0,41±0,03c	0,07±0,02c	0,40±0,03c	0,05±0,003c	0,28±0,01c	0,05±0,003
S1	0,92±0,07b	0,44±0,05b	0,95±0,08b	0,51±0,05b	1,39±0,12b	0,49±0,04
S2	2,31±0,18a	1,20±0,19a	2,55±0,20a	1,42±0,17a	3,07±0,30a	1,18±0,15
Sistema	***	**	***	***	***	*
Salinidad	***	***	***	***	***	***
Sist x Sal	***	**	***	***	***	*

*, ** y *** indican diferencias significativas a $p < 0,05$, $p < 0,01$ y $p < 0,001$ respectivamente. Para cada columna, valores con diferentes letras presentan diferencias significativas al 95% según el test de Rango múltiple de Duncan. Los valores de cada uno de los parámetros son valores medios \pm error estándar ($n=24$).

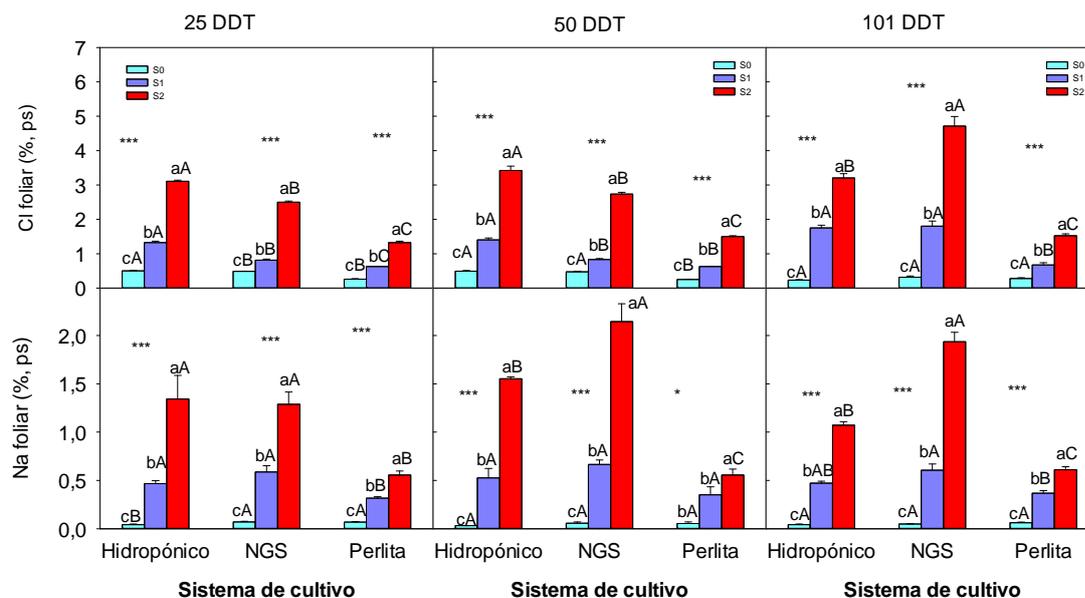


Figura 3.17. Efecto de la salinidad (S0, control; S1, 40 mM NaCl; S2, 80 mM NaCl) sobre la concentración de Cl⁻ y Na en tres fechas de muestreo en hojas de plantas de tomate cultivadas en tres sistemas de cultivo sin suelo. La barra de error indica el error estándar de la media (n=8). * y *** indica diferencias significativas a p<0,05 y p<0,001; entre los tratamientos salinos para cada sistema de cultivo. Valores con diferentes letras presentan diferencias significativas al 95 % según el test de Rango múltiple de Duncan. Letras minúsculas comparan los tratamientos salinos para cada sistema de cultivo. Letras mayúsculas comparan los sistemas de cultivo para cada tratamiento salino.

Independientemente del tratamiento salino, la mayor concentración de Ca se dio en hojas de plantas cultivadas en hidropónico; y para el P y Mg se dio en plantas cultivadas en perlita. En el tratamiento S0 las plantas en NGS tuvieron la mayor concentración de K, y las plantas en hidropónico y perlita tuvieron la mayor concentración de S. La salinidad disminuyó la concentración de P y Mg en un mismo porcentaje en todos los sistemas de cultivos ensayados. En el caso del P hubo diferencias significativas entre los tratamientos S1 y S2, pero en el Mg no se observaron diferencias entre estos dos tratamientos salinos (Tabla 3.13) y (Fig. 3.18, 3.19). En el caso del K al incrementar la salinidad en la SN disminuyó progresivamente su concentración en plantas cultivadas en hidropónico. El tratamiento salino S2 también disminuyó el K en plantas cultivadas en NGS. La salinidad también disminuyó la concentración de S en plantas de NGS pasando de 1,39 % en el tratamiento S0 a 0,77 % en ambos tratamientos S1 y S2.

Tabla 3.13. Efecto del sistema de cultivo y la salinidad a los 101 DDT, sobre la concentración de Ca, K, P, S y Mg en las hojas de plantas de tomate.

	Ca (%)	K (%)	P (%)	S (%)	Mg (%)
Factor principal:					
Hidropónico	5,83±0,18a	2,47±0,10b	0,88±0,09b	1,61±0,07b	0,37±0,01b
NGS	4,15±0,28c	3,49±0,30a	0,94±0,07b	0,98±0,09c	0,23±0,01c
Perlita	5,08±0,10b	2,74±0,11b	1,38±0,06a	2,07±0,07a	0,58±0,03a
Factor principal:					
S0	5,13±0,21	3,44±0,17a	1,36±0,08a	1,74±0,09a	0,46±0,05a
S1	4,71±0,36	3,16±0,28a	1,08±0,07b	1,52±0,17b	0,37±0,03b
S2	4,76±0,14	2,31±0,12b	0,84±0,08c	1,37±0,14b	0,37±0,03b
Sistema	***	**	***	***	***
Salinidad	ns	**	***	**	*
Sistema x Sal	ns	*	ns	*	ns

*, **, *** y “ns” indican diferencias significativas a $p < 0,05$, $p < 0,01$, $p < 0,001$ y no significativas, respectivamente. Para cada columna, valores con diferentes letras presentan diferencias significativas al 95% según el test de Rango múltiple de Duncan. Los valores de cada uno de los parámetros son valores medios \pm error estándar (n=24).

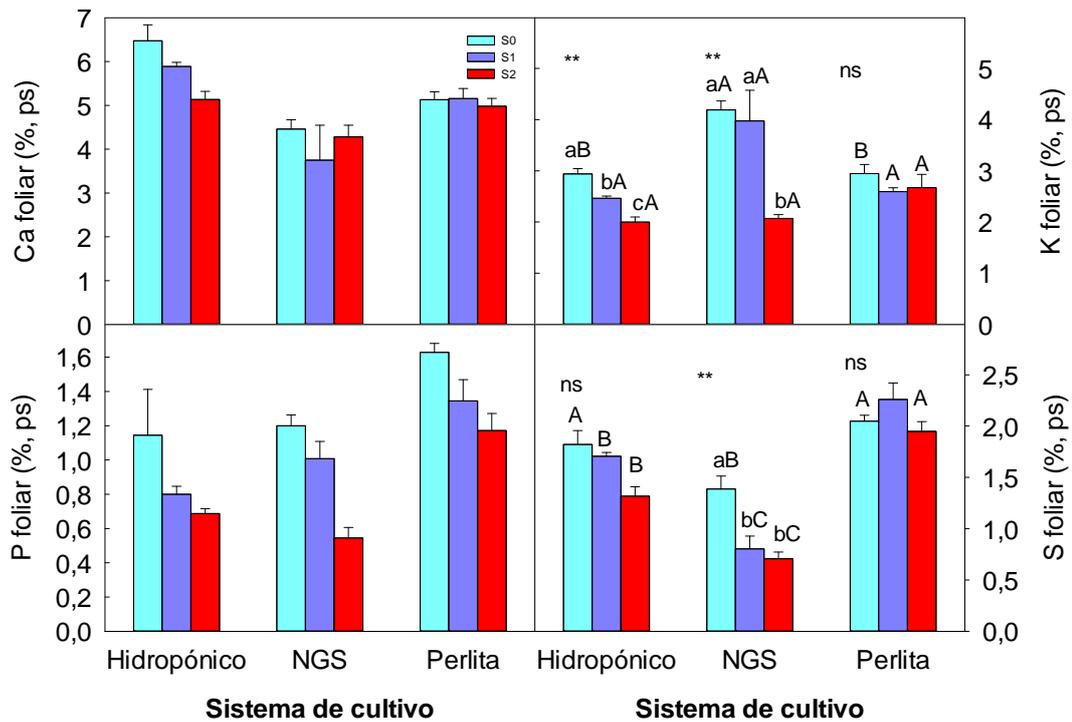


Figura 3.18. Efecto de la salinidad (S0, control; S1, 40 mM NaCl; S2, 80 mM NaCl) sobre la concentración de Ca, K⁺, P y S en tres fechas de muestreo en hojas de plantas de tomate cultivadas en tres sistemas de cultivo sin suelo. La barra de error indica el error estándar de la media (n=8). ** y “ns” indica diferencias significativas a $p < 0,01$ y no significativas entre los tratamientos salinos para cada sistema de cultivo. Valores con diferentes letras presentan diferencias significativas al 95 % según el test de Rango múltiple de Duncan. Letras minúsculas comparan los tratamientos salinos para cada sistema de cultivo. Letras mayúsculas comparan los sistemas de cultivo para cada tratamiento salino.

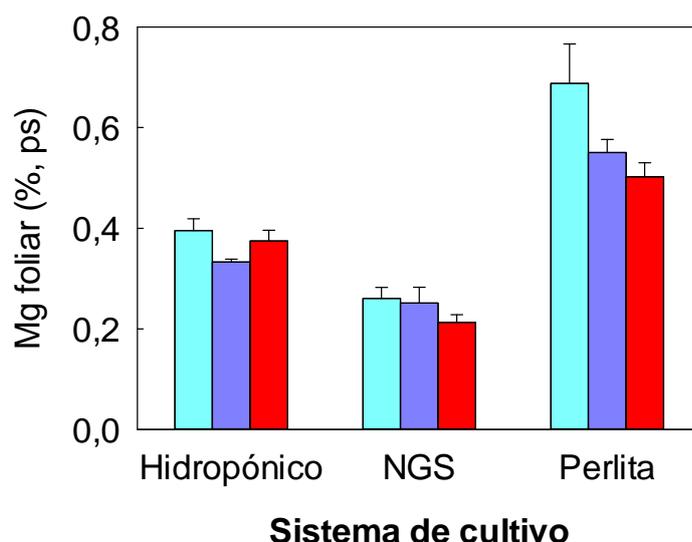


Figura 3.19. Efecto de la salinidad (S0, control; S1, 40 mM NaCl; S2, 80 mM NaCl) sobre la concentración de Mg^{2+} . Las barras verticales indican el error estándar de la media ($n=8$).

En el tratamiento control la concentración de Fe y Mn fue mayor en plantas en NGS y perlita que en plantas cultivadas en hidropónico, sin embargo, la concentración de Cu fue mayor en plantas cultivadas en este sistema que en los otros dos (Tabla 3.14). Los tratamientos salinos disminuyeron la concentración de Cu, Fe y Mn pero solo en las plantas cultivadas en NGS. En el caso del Cu y Fe no hubo diferencias entre los dos tratamientos salinos, pero en la concentración de Mn si se observó que la concentración fue menor en S2 que en S1 (Fig. 3.20).

Tabla 3.14. Efecto del sistema de cultivo y la salinidad sobre la concentración de Cu, Fe, Mn y Zn en las hojas de plantas de tomate en tres diferentes fechas de muestreo.

	Cu ($mg\ kg^{-1}$)	Fe ($mg\ kg^{-1}$)	Mn ($mg\ kg^{-1}$)	Zn ($mg\ kg^{-1}$)
Factor principal: Sistema				
Hidropónico	9,77±0,52a	77,95±2,17b	87,15±5,03c	21,41±1,83
NGS	4,34±1,04b	87,16±4,69b	115,4±8,34b	24,83±3,12
Perlita	5,64±0,48c	109,3±3,88a	140,7±6,54a	18,58±1,01
Factor principal: Salinidad				
S0	5,75±0,44	101,37±4,36	138,5±8,74a	20,71±1,30
S1	6,38±1,26	90,62±5,97	115,2±8,10b	24,20±3,44
S2	5,86±0,52	89,62±4,19	103,4±6,37b	20,09±1,57
Sistema	***	***	***	ns
Salinidad	ns	ns	**	ns
Sistema x Sal	***	***	**	ns

, * y "ns" indican diferencias significativas a $p<0,01$, $p<0,001$ y no significativas, respectivamente. Para cada columna, valores con diferentes letras presentan diferencias significativas al 95% según el test de Rango múltiple de Duncan. Los valores de cada uno de los parámetros son valores medios \pm error estándar ($n=24$).

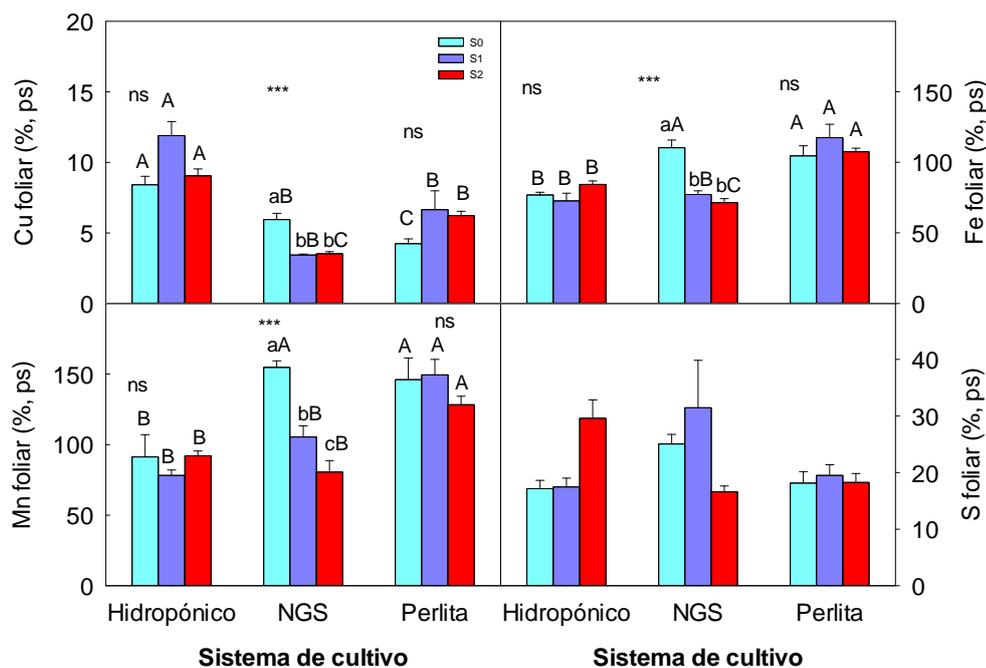


Figura 3.20. Efecto de la salinidad (S0, control; S1, 40 mM NaCl; S2, 80 mM NaCl) sobre la concentración de Cu, Fe, Mn y S en hojas de plantas de tomate cultivadas en tres sistemas de cultivo sin suelo. La barra de error indica el error estándar de la media (n=8). ***, y “ns” indican diferencias significativas a p<0,001 o no significativas entre los tratamientos salinos para cada sistema de cultivo. Valores con diferentes letras presentan diferencias significativas al 95% según el test de Rango múltiple de Duncan. Letras minúsculas comparan los tratamientos salinos para cada sistema de cultivo. Letras mayúsculas comparan los sistemas de cultivo para cada tratamiento salino.

Al igual que ocurrió en las hojas, la concentración de Cl y Na en el tallo aumentó al incrementar la concentración de NaCl en la SN. Para el tratamiento salino S1, la concentración de Cl fue igual en las plantas cultivadas en hidropónico y NGS, y estos valores fueron significativamente mayores que en las plantas en perlita (Tabla 3.15). En el tratamiento salino más alto S2, la mayor concentración se dio en las plantas en hidropónico seguido de NGS y perlita. Entre las dos fechas de muestreo 50 DDT y 101 DDT no se apreciaron diferencias significativas.

En el caso del Na⁺ para el tratamiento salino S1 la mayor concentración se dio en los tallos de plantas cultivadas en NGS, aunque no hubo diferencias significativas con las plantas de hidropónico para el primer muestreo. En el segundo muestreo a los 101 DDT no hubo diferencias significativas entre los tres sistemas de cultivo, alcanzó un valor medio de 0,62 % (Fig. 3.21). En el tratamiento salino S2 para las dos fechas de muestreo, que el tallo de las plantas cultivadas en hidropónico y NGS tuvieron valores iguales, y estos fueron mayores significativamente que para las plantas de perlita.

Tabla 3.15. Efecto del sistema de cultivo y la salinidad sobre la concentración de Cl y Na en el tallo de plantas de tomate en dos diferentes fechas de muestreo.

Fecha:	50 DDT		101 DDT	
	Cl (%)	Na (%)	Cl (%)	Na (%)
Factor principal: Sistema				
Hidropónico	1,87±0,07a	0,52±0,10a	1,87±0,28a	0,68±0,17a
NGS	1,44±0,10b	0,62±0,10a	1,43±0,16b	0,60±0,11a
Perlita	1,15±0,07c	0,35±0,04b	1,14±0,08c	0,38±0,06b
Factor principal: Salinidad				
S0	0,46±0,03	0,08±0,01c	0,47±0,03c	0,07±0,00c
S1	1,68±0,09	0,56±0,06b	1,64±0,08b	0,61±0,05b
S2	2,31±0,12	0,83±0,06a	2,19±0,14a	0,92±0,09a
Sistema	***	**	***	***
Salinidad	***	**	***	***
Sistema x Salinidad	***	*	***	**

*, **, *** y “ns” indican diferencias significativas a $p < 0,05$, $p < 0,01$, $p < 0,001$ y no significativas, respectivamente. Para cada columna, valores con diferentes letras presentan diferencias significativas al 95% según el test de Rango múltiple de Duncan. Los valores de cada uno de los parámetros son valores medios \pm error estándar ($n=24$).

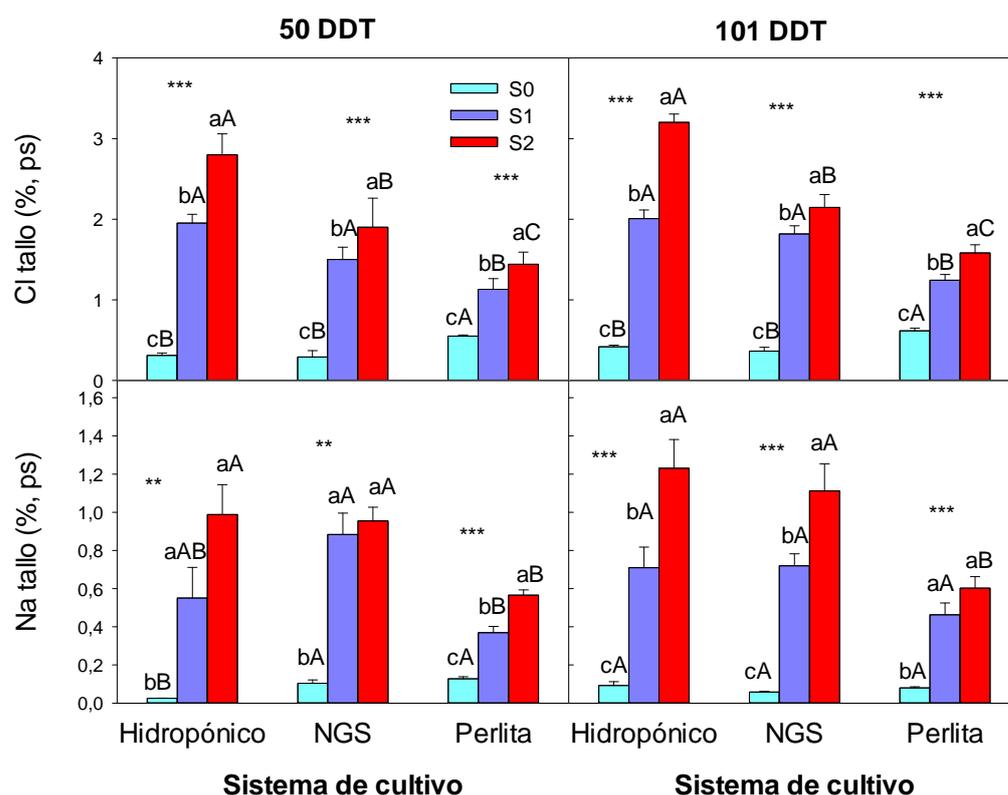


Figura 3.21. Efecto de la salinidad (S0, control; S1, 40 mM NaCl; 80 mM NaCl) sobre la concentración de Cl⁻ y Na⁺ en el tallo de plantas de tomate cultivadas en tres sistemas de cultivo sin suelo. La barra de error indica el error estándar de la media ($n=8$). ** y *** indican diferencias significativas a $p < 0,05$ y $p < 0,001$, respectivamente entre los tratamientos salinos para cada sistema de cultivo. Valores con diferentes letras presentan diferencias significativas al 95% según el test de Rango múltiple de Duncan. Letras minúsculas comparan los tratamientos salinos para cada sistema de cultivo. Letras mayúsculas comparan los sistemas de cultivo para cada tratamiento salino.

En el tallo la mayor concentración de Ca, K y Mg, para cada tratamiento salino, se dio en las plantas cultivadas en hidropónico. En cambio las plantas en hidroponía y perlita tuvieron una mayor concentración de S y P que las plantas procedentes de NGS (Tabla 3.16). En los tres sistemas estudiados, al incrementar la concentración de NaCl en la SN disminuyó progresivamente la concentración de K y S. En el caso del Mg, la concentración fue parecida para los tratamientos S0 y S1, pero mayor significativamente que para el nivel más salino, S2 (Tabla 3.16; Fig. 3.22; 3.23). En el caso del P, los tratamientos salinos S1 y S2 redujeron similarmente la concentración en relación al tratamiento control en plantas cultivadas en NGS e hidropónico, sin embargo, la salinidad no afectó al P de plantas procedentes de perlita. En el caso del Ca los efectos de la salinidad en los diferentes sistemas estudiados no siguieron una tendencia clara (Fig. 3.22). Para plantas en hidropónico el tratamiento S2 redujo la concentración de Ca con respecto al tratamiento control; en NGS fue el tratamiento S1 quien redujo este nutriente en relación a S0; y en perlita el tratamiento S2 redujo el Ca significativamente con respecto al tratamiento S1.

Tabla 3.16. Efecto del sistema de cultivo y la salinidad sobre la concentración de Cl y Na en el tallo de plantas de tomate en dos diferentes fechas de muestreo.

	Ca (%)	K (%)	P (%)	S (%)	Mg (%)
Factor Principal: Sistema					
Hidropónico	2,21±0,09a	3,76±0,19a	0,94±0,03a	0,32±0,01a	0,34±0,01a
NGS	1,52±0,05b	2,75±0,24c	0,77±0,06b	0,24±0,02b	0,18±0,01c
Perlita	1,60±0,05b	3,21±0,13b	0,96±0,02a	0,35±0,01a	0,31±0,01b
Factor Principal: Salinidad					
S0	1,79±0,10a	3,88±0,16a	1,02±0,04a	0,35±0,02a	0,27±0,02a
S1	1,70±0,09ab	3,06±0,13b	0,88±0,04b	0,30±0,02b	0,28±0,02a
S2	1,58±0,07b	2,45±0,18c	0,73±0,04c	0,25±0,02c	0,24±0,02b
Sistema	***	***	***	***	***
Salinidad	***	***	***	***	*
Sistema x Salinidad	**	ns	*	ns	ns

*, **, *** y “ns” indican diferencias significativas a $p < 0,05$, $p < 0,01$, $p < 0,001$ y no significativas, respectivamente. Para cada columna, valores con diferentes letras presentan diferencias significativas al 95% según el test de Rango múltiple de Duncan. Los valores de cada uno de los parámetros son valores medios \pm error estándar ($n=24$).

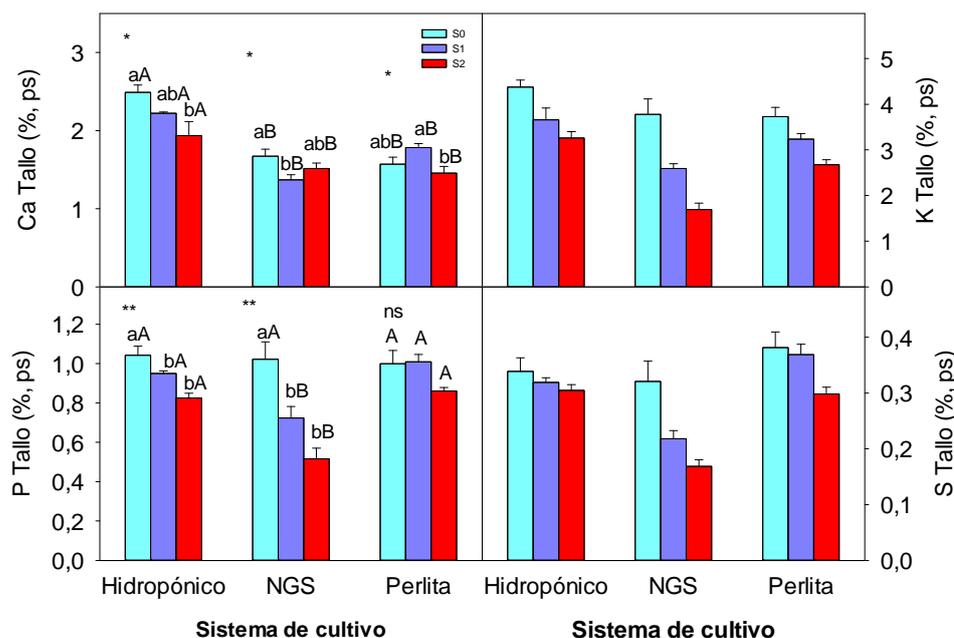


Figura 3.22. Efecto de la salinidad (S0, control; S1, 40 mM NaCl; S2, 80 mM NaCl) sobre la concentración de Ca, K⁺, P y S en el tallo de plantas de tomate cultivadas en tres sistemas de cultivo sin suelo. La barra de error indica el error estándar de la media (n=8). *, ** y ns indican diferencias significativas a p<0,05; p<0,001 y no significativas, respectivamente, entre los tratamientos salinos para cada sistema de cultivo. Valores con diferentes letras presentan diferencias significativas al 95% según el test de Rango múltiple de Duncan. Letras minúsculas comparan los tratamientos salinos para cada sistema de cultivo. Letras mayúsculas comparan los sistemas de cultivo para cada tratamiento salino.

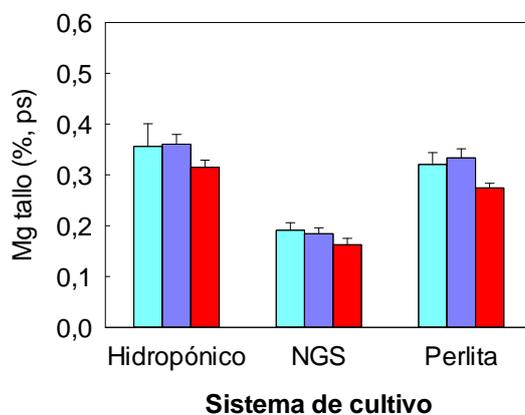


Figura 3.23. Efecto de la salinidad (S0, control; S1, 40 mM NaCl; S2, 80 mM NaCl) sobre la concentración de Mg en tallo de plantas de tomate cultivadas en tres sistemas de cultivo sin suelo. La barra de error indica el error estándar de la media (n=8).

Independientemente del tratamiento salino, la concentración de Cu, Fe y Zn en el tallo fue siempre mayor en las plantas cultivadas en hidroponía que en los otros dos sistemas. Aunque en el caso del Fe no se observaron diferencias significativas entre las plantas de NGS y perlita. En el tratamiento S0 la concentración de Mn no fue afectada por el sistema de cultivo (Tabla 3.17; Fig. 3.24).

Los tratamientos salinos S1 y S2 redujeron la concentración de Cu y Mn con respecto al tratamiento control en plantas de NGS, y aumentaron la concentración de Cu en las plantas cultivadas en perlita y NGS la concentración de Fe no fue afectada por la salinidad

Tabla 3.17. Efecto del sistema de cultivo y la salinidad sobre la concentración de Cu, Fe, Mn y Zn en el tallo de plantas de tomate.

	Cu (mg kg ⁻¹)	Fe (mg kg ⁻¹)	Mn (mg kg ⁻¹)	Zn (mg kg ⁻¹)
Factor principal: Sistema				
Hidropónico	17,11±0,92a	61,68±8,01a	35,53±2,77ab	210,64±14,15a
NGS	5,31±0,74c	44,85±3,07b	30,85±3,03b	48,34±8,90b
Perlita	9,56±0,33b	52,21±2,27ab	40,64±1,77a	39,70±3,48b
Factor principal: Salinidad				
S0	10,19±1,08a	55,65±5,20	40,44±2,78a	82,10±20,7
S1	9,39±1,54a	51,58±3,86	35,99±2,87ab	75,61±19,9
S2	8,75±1,28b	46,35±2,37	30,65±2,11b	76,17±18,9
Sistema	***	*	**	***
Salinidad	*	ns	*	ns
Sistema x Salinidad	***	ns	**	ns

*, **, *** y “ns” indican diferencias significativas a $p < 0,05$, $p < 0,01$, $p < 0,001$ y no significativas, respectivamente. Para cada columna, valores con diferentes letras presentan diferencias significativas al 95% según el test de Rango múltiple de Duncan. Los valores de cada uno de los parámetros son valores medios ± error estándar (n=24).

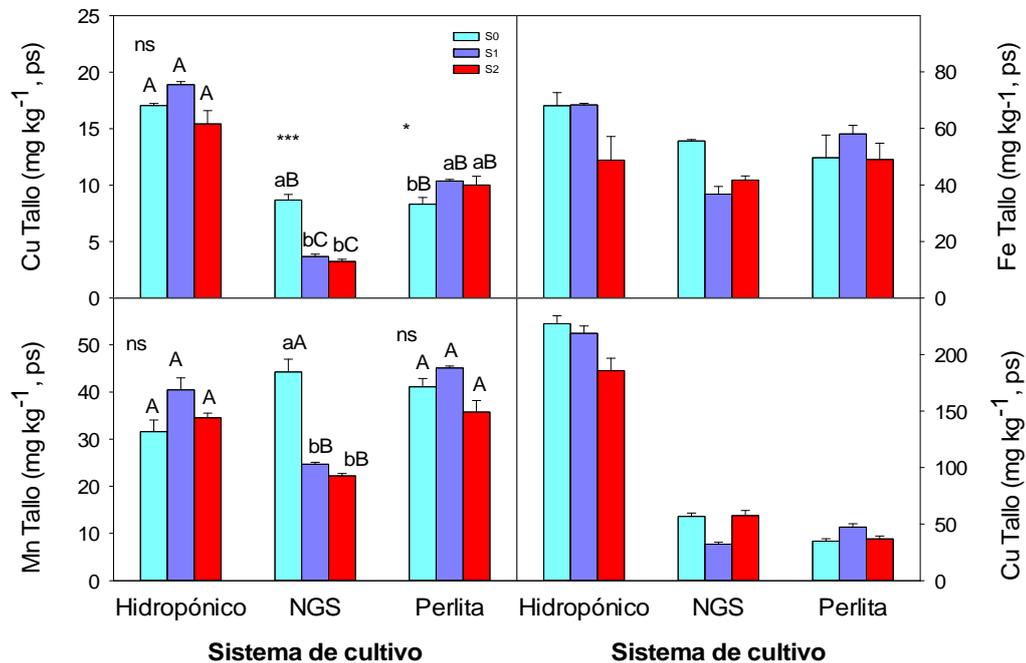


Figura 3.24. Efecto de la salinidad (S0, control; S1, 40 mM NaCl; S2, 80 mM NaCl) sobre la concentración de Cu, Fe, Mn y Cu en el tallo de plantas de tomate cultivadas en tres sistemas de cultivo sin suelo. La barra de error indica el error estándar de la media (n=8). *, *** y ns indican diferencias significativas a $p < 0,05$; $p < 0,001$ y diferencias no significativas, respectivamente, entre los tratamientos salinos para cada sistema de cultivo. Valores con diferentes letras presentan diferencias significativas al 95% según el test de Rango múltiple de Duncan. Letras minúsculas comparan los tratamientos salinos para cada sistema de cultivo. Letras mayúsculas comparan los sistemas de cultivo para cada tratamiento salino.

En la raíz, al igual que en las hojas y el tallo, al incrementar la concentración de NaCl en la SN, aumentó progresivamente la concentración de Cl. Para las dos fechas de muestreo se observó que el tratamiento S2 siempre dio valores significativamente mayores que para el tratamiento S1, y que las plantas en NGS tuvieron la mayor concentración seguida de aquellas procedentes de perlita e hidropónico (Tabla 3.18; Fig. 3.25). En el caso del Na, en la primera fecha de muestreo (50 DDT), en el tratamiento S1 todos los sistemas de cultivo tuvieron una concentración similar, alrededor de 1,8 % ps. Sin embargo en el tratamiento S2 las plantas en hidropónico tuvieron la mayor concentración. Cabe destacar que al pasar de S1 y S2 en plantas en hidropónico no se afectó la concentración significativamente, e incluso disminuyó en plantas en NGS.

Al final del experimento (101 DDT), se observó que tanto en el tratamiento S2 como en el S1 no hubo diferencias significativas en la concentración de Na entre los sistemas de cultivo, alcanzando valores de concentración superiores al 2,8 % para el tratamiento de mayor nivel salino (S2, 80 Mm) y valores de 2,0 % para el tratamiento salino de menor nivel (S1, 40 mM). Para los sistemas de cultivo de perlita e hidropónico las plantas regadas con el tratamiento S2 tuvieron una mayor concentración de Na que aquellas tratadas con el tratamiento S1, difiriendo significativamente entre ellas; sin embargo, no hubo diferencias significativas entre los tratamientos S1 y S2 en plantas de NGS.

Tabla 3.18. Efecto del sistema de cultivo y la salinidad sobre la concentración de Cl y Na en dos fechas de muestreo en la raíz de plantas de tomate.

Fecha:	Cl	50 DDT Na	Cl	101 DDT Na
Factor principal: Sistema				
Hidropónico	0,28±0,12c	1,82±0,46	2,28±0,34b	1,60±0,39
NGS	2,81±0,13a	1,70±0,15	2,74±0,36a	1,94±0,35
Perlita	0,86±0,08b	1,74±0,11	0,86±0,07c	1,74±0,15
Factor principal: Salinidad				
S0	0,42±0,04c	0,76±0,17b	0,42±0,02c	0,67±0,14b
S1	2,37±0,13b	2,15±0,11a	2,33±0,26b	2,09±0,13a
S2	3,16±0,15a	2,36±0,22a	3,03±0,32a	2,82±0,14a
Sistema	***	ns	***	ns
Salinidad	***	***	***	***
Sistema x Sal	***	***	***	**

, * y “ns” indican diferencias significativas a $p < 0,01$, $p < 0,001$ y no significativas, respectivamente. Para cada columna, valores con diferentes letras presentan diferencias significativas al 95% según el test de Rango múltiple de Duncan. Los valores de cada uno de los parámetros son valores medios \pm error estándar ($n=24$).

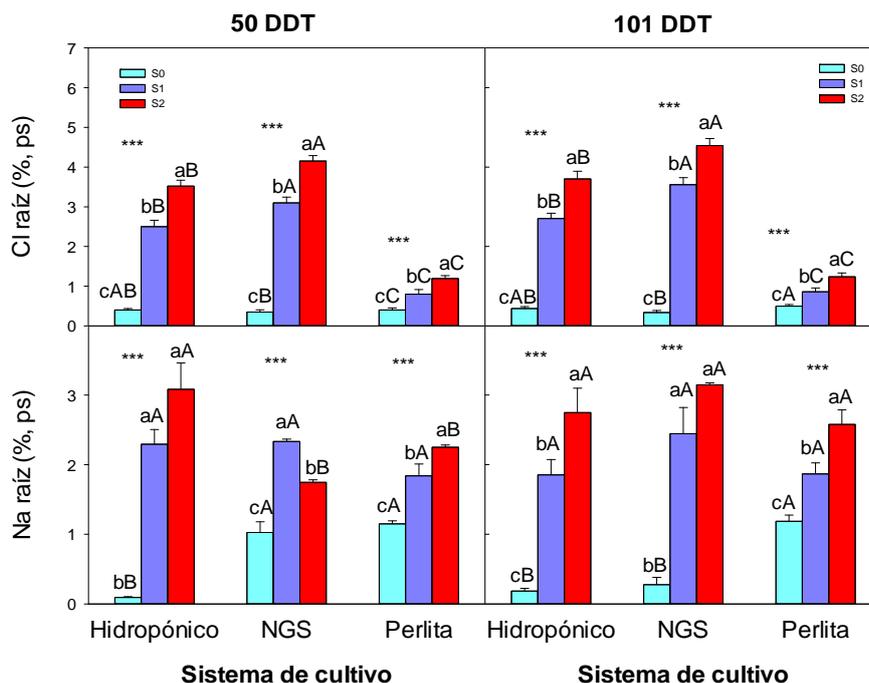


Figura 3.25. Efecto de la salinidad (S0, control; S1, 40 mM NaCl; S2, 80 mM NaCl) sobre la concentración de Cl y Na en las raíces de plantas de tomate cultivadas en tres sistemas de cultivo sin suelo. La barra de error indica el error estándar de la media (n=8). *** indican diferencias significativas a $p < 0,001$, entre los tratamientos salinos para cada sistema de cultivo. Valores con diferentes letras presentan diferencias significativas al 95% según el test de Rango múltiple de Duncan. Letras minúsculas comparan los tratamientos salinos para cada sistema de cultivo. Letras mayúsculas comparan los sistemas de cultivo para cada tratamiento salino.

Independientemente del tratamiento salino, la concentración de Ca y P en la raíz fue mayor para plantas cultivadas en NGS que para aquellas procedentes de los otros dos sistemas. La concentración de S fue también mayor en NGS e hidroponía que en perlita (Tabla 3.19; Fig. 3.26). En el tratamiento S0 en la concentración de Mg y K no se observaron diferencias entre la hidroponía y NGS, pero estos valores sí que fueron significativamente mayores que para perlita.

Los tratamientos salinos S1 y S2 disminuyeron la concentración de K en las plantas de NGS, pero este nutriente no fue afectado por la salinidad en los otros dos sistemas de cultivo. En el caso del Mg se observó que en hidropónico el tratamiento S1 aumentó significativamente la concentración con respecto al tratamiento control; en NGS el tratamiento S2 tuvo una mayor concentración que en el tratamiento control y S1 donde no se observaron diferencias significativas entre ellos; y en perlita no se observaron diferencias significativas con la salinidad (Fig. 3.27).

Tabla 3.19. Efecto del sistema de cultivo y la salinidad sobre la concentración de Ca, K, P, S y Mg muestreo en la raíz de plantas de tomate.

	Ca (%)	K (%)	P (%)	S (%)	Mg (%)
Factor Principal: Sistema					
Hidropónico	0,72±0,03b	5,26±0,20a	1,06±0,05b	0,56±0,03a	0,25±0,01a
NGS	1,46±0,06a	4,38±0,43b	1,39±0,12a	0,53±0,02a	0,24±0,01a
Perlita	0,91±0,07b	1,89±0,18c	0,38±0,03c	0,33±0,04b	0,12±0,01b
Factor Principal: Salinidad					
S0	1,03±0,11	4,19±0,57a	0,72±0,10	0,39±0,04	0,16±0,04b
S1	1,02±0,10	3,26±0,39b	0,98±0,17	0,45±0,04	0,20±0,05a
S2	1,14±0,10	3,24±0,58b	1,03±0,13	0,55±0,04	0,23±0,07a
Sistema	***	***	***	***	***
Salinidad	ns	**	ns	ns	**
Sistema x Salinidad	ns	*	ns	ns	**

*, **, *** y “ns” indican diferencias significativas a $p<0,05$, $p<0,01$, $p<0,001$ y no significativas, respectivamente. Para cada columna, valores con diferentes letras presentan diferencias significativas al 95% según el test de Rango múltiple de Duncan. Los valores de cada uno de los parámetros son valores medios \pm error estándar ($n=24$).

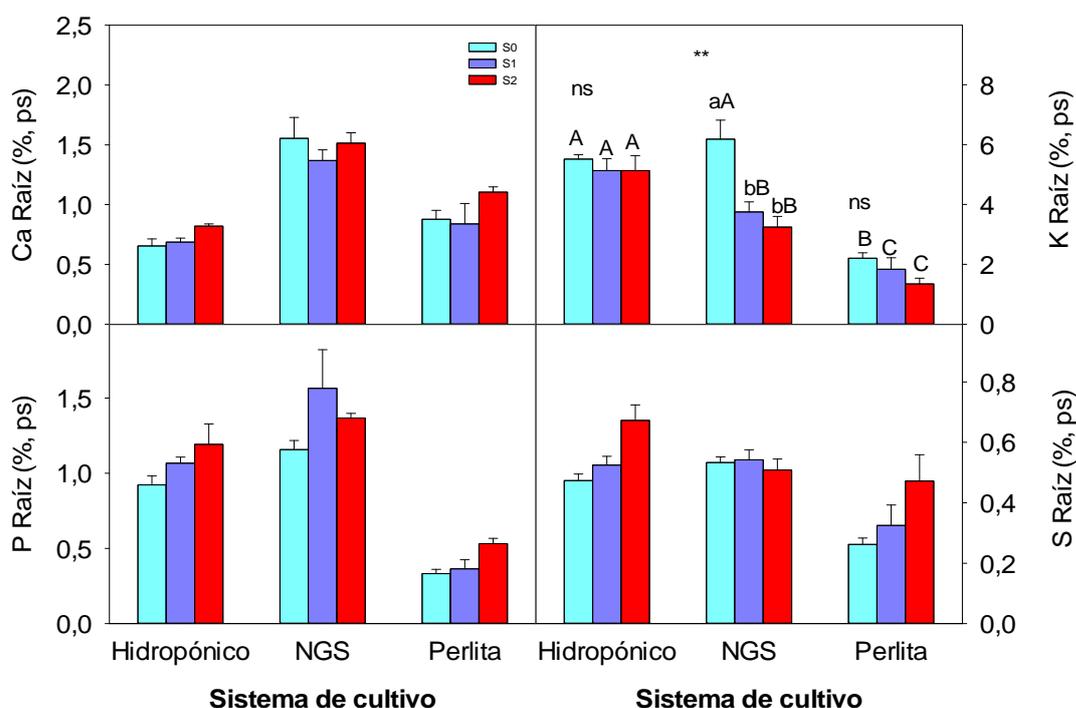


Figura 3.26. Efecto de la salinidad (S0, control; S1, 40 mM NaCl; S2, 80 mM NaCl) sobre la concentración de Ca, K, P y S en las raíces de plantas de tomate cultivadas en tres sistemas de cultivo sin suelo. La barra de error indica el error estándar de la media ($n=8$). ** y “ns” indican diferencias significativas a $p<0,01$ y diferencias no significativas, respectivamente, entre los tratamientos salinos para cada sistema de cultivo. Valores con diferentes letras presentan diferencias significativas al 95% según el test de Rango múltiple de Duncan. Letras minúsculas comparan los tratamientos salinos para cada sistema de cultivo. Letras mayúsculas comparan los sistemas de cultivo para cada tratamiento salino.

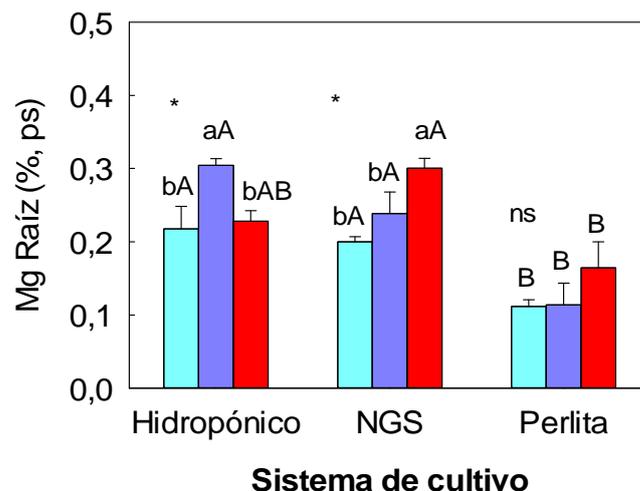


Figura 3.27. Efecto de la salinidad (S0, control; S1, 40 mM NaCl; S2, 80 mM NaCl) sobre la concentración de Mg en las raíces de plantas de tomate cultivadas en tres sistemas de cultivo sin suelo. La barra de error indica el error estándar de la media (n=8). * y “ns” indican diferencias significativas a $p < 0,05$ y no diferencias significativas, respectivamente, entre los tratamientos salinos para cada sistema de cultivo. Valores con diferentes letras presentan diferencias significativas al 95% según el test de Rango múltiple de Duncan. Letras minúsculas comparan los tratamientos salinos para cada sistema de cultivo. Letras mayúsculas comparan los sistemas de cultivo para cada tratamiento salino.

La mayor concentración de Cu (por encima de 50 mg kg^{-1}) y Zn (por encima de 200 mg kg^{-1}) en la raíz, se observó en las plantas cultivadas en hidropónico, y la mayor concentración de Mn en las plantas de NGS, independientemente del tratamiento salino. En el tratamiento S0, la concentración de Fe fue similar para hidropónico y NGS pero mayor significativamente que para perlita, alcanzando los valores de 3500, 4500 y 2200 mg kg^{-1} respectivamente. En el Cu, la salinidad no afectó su concentración en plantas en hidropónico; en NGS la concentración en plantas tratadas con S1 fue menor que en plantas del tratamiento control o S2; y en perlita el tratamiento S2 aumentó la concentración con respecto a S0 y S1. La concentración de Fe disminuyó con los tratamientos S1 y S2, no observándose diferencias significativas entre ellos, en las plantas en hidropónico y NGS, pero no en las plantas en perlita donde la salinidad no afectó a este nutriente. En cambio, la concentración de Mn aumentó con la salinidad (no de forma significativa entre S1 y S2) para plantas en NGS y perlita. En el Zn se observó un aumento significativo de la concentración al pasar del tratamiento S1 al S2 (Tabla 3.20) y (Fig. 3.28).

Tabla 3.20. Efecto del sistema de cultivo y la salinidad sobre la concentración de Cu, Fe, Mn y Zn en la raíz de plantas de tomate.

	Cu (mg kg ⁻¹)	Fe (g kg ⁻¹)	Mn (mg kg ⁻¹)	Zn (mg kg ⁻¹)
Factor principal: Sistema				
Hidropónico	57,51±7,82a	1,85±0,25c	112,7±20,99a	310,50±17,82a
NGS	15,91±0,89b	2,96±0,11a	137,8±12,13a	33,22±1,23b
Perlita	12,24±0,48b	2,21±0,09b	72,53±4,953b	36,13±2,61b
Factor principal: Salinidad				
S0	33,93±10,14a	2,51±0,13a	118,12±16,45	128,1±44,8ab
S1	31,75±9,69b	2,45±0,17a	109,8±15,01	142,0±55,3a
S2	19,97±2,99b	2,08±0,31b	95,13±18,82	109,6±39,2b
Sistema	***	***	**	***
Salinidad	**	*	ns	*
Sistema x Salinidad	***	**	**	*

*, **, *** y “ns” indican diferencias significativas a $p < 0,05$, $p < 0,01$, $p < 0,001$ y no significativas, respectivamente. Para cada columna, valores con diferentes letras presentan diferencias significativas al 95% según el test de Rango múltiple de Duncan. Los valores de cada uno de los parámetros son valores medios ± error estándar (n=24).

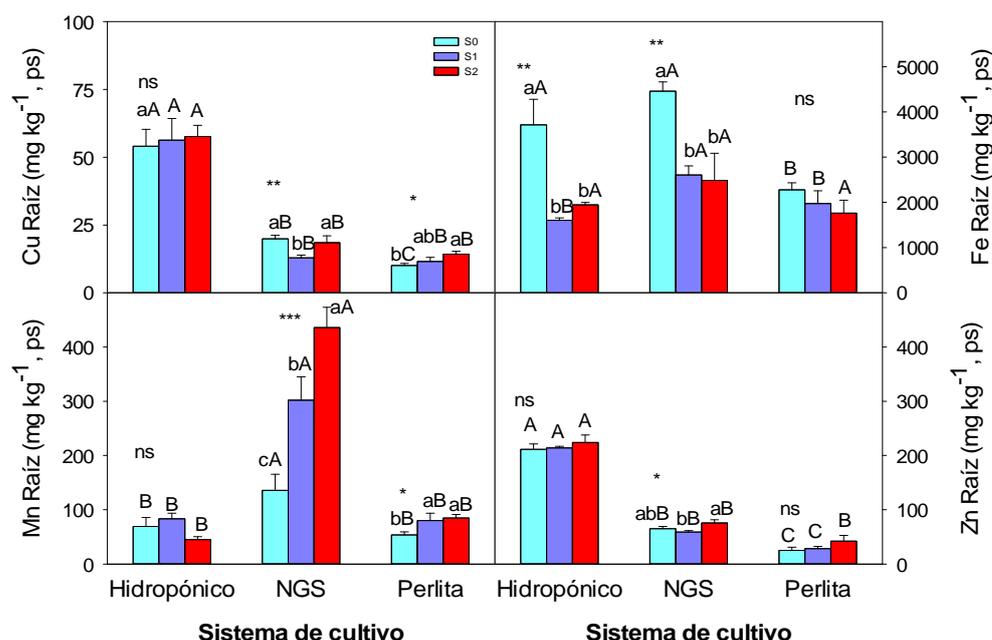


Figura 3.28. Efecto de la salinidad (S0, control; S1, 40 mM NaCl; S2, 80 mM NaCl) sobre la concentración de Cu, Fe, Mn y Zn en las raíces de plantas de tomate cultivadas en tres sistemas de cultivo sin suelo. La barra de error indica el error estándar de la media (n=8). *, **, *** y “ns” indican diferencias significativas a $p < 0,05$; $p < 0,01$; $p < 0,001$ y no diferencias significativas, respectivamente, entre los tratamientos salinos para cada sistema de cultivo. Valores con diferentes letras presentan diferencias significativas al 95% según el test de Rango múltiple de Duncan. Letras minúsculas comparan los tratamientos salinos para cada sistema de cultivo. Letras mayúsculas comparan los sistemas de cultivo para cada tratamiento salino.

3.3.4 Relaciones hídricas, y parámetros de fotosíntesis y fluorescencia de clorofilas.

Al final de experimento se realizaron medidas de relaciones hídricas, intercambio gaseoso y fluorescencia de clorofilas para caracterizar las respuestas fisiológicas de las plantas de tomate a la salinidad en función de los tres sistemas ensayados. En el tratamiento sin sal (S0) el sistema de cultivo no afectó a los parámetros de relaciones hídricas dando valores medios de -0.31, -1.13 y 0.80 MPa para el Ψ_w , Ψ_π y Ψ_p , respectivamente. En hidropónico, al incrementar la salinidad en la SN disminuyó progresivamente el potencial osmótico, en cambio el turgor solo aumentó con el tratamiento salino más alto S2; esto hizo que el potencial hídrico de las hojas disminuyera al pasar del tratamiento control (-0.31 MPa) al S1 (-0.43 MPa) y que el tratamiento S2 tuviera valores parecidos a los del tratamiento control. En NGS, la salinidad disminuyó el potencial osmótico pero solo el tratamiento S2, mientras que el turgor no fue afectado por los tratamientos salinos; esto hizo que el potencial hídrico de las hojas disminuyera significativamente con la salinidad, aunque no se observaron diferencias significativas entre los tratamientos S1 y S2. En perlita, la salinidad disminuyó el potencial osmótico progresivamente al incrementar la concentración de NaCl en la SN, esta respuesta fue también parecida en el turgor, aunque no se observaron diferencias entre el tratamiento control y el S1; esto hizo que el potencial hídrico de los tratamientos salinos fuera menor que el del control, aunque no hubo diferencias entre los tratamientos salinos S1 y S2 (Tabla 3.21 y Fig. 3.29)

Tabla 3.21. Efecto del sistema de cultivo y la salinidad sobre los parámetros de relaciones hídricas Ψ_w (potencial hídrico), Ψ_π (potencial osmótico) y Ψ_p (potencial de turgor) en hojas de plantas de tomate.

	Ψ_w (MPa)	Ψ_π (MPa)	Ψ_p (MPa)
Factor principal: Sistema			
Hidropónico	-0,32±0,03a	-1,25±0,05	0,93±0,06a
NGS	-0,47±0,04b	-1,22±0,04	0,75±0,03c
Perlita	-0,36±0,02a	-1,20±0,04	0,83±0,03b
Factor principal: Salinidad			
S0	-0,27±0,01a	-1,02±0,03a	0,75±0,02b
S1	-0,45±0,02b	-1,21±0,02b	0,75±0,03b
S2	-0,44±0,04b	-1,44±0,03c	1,0±0,05a
Sistema	***	ns	**
Salinidad	***	***	***
Sistema x Salinidad	*	*	**

*, **, *** y “ns” indican diferencias significativas a $p < 0,05$, $p < 0,01$, $p < 0,001$ y no significativas, respectivamente. Para cada columna, valores con diferentes letras presentan diferencias significativas al 95% según el test de Rango múltiple de Duncan. Los valores de cada uno de los parámetros son valores medios \pm error estándar ($n=24$).

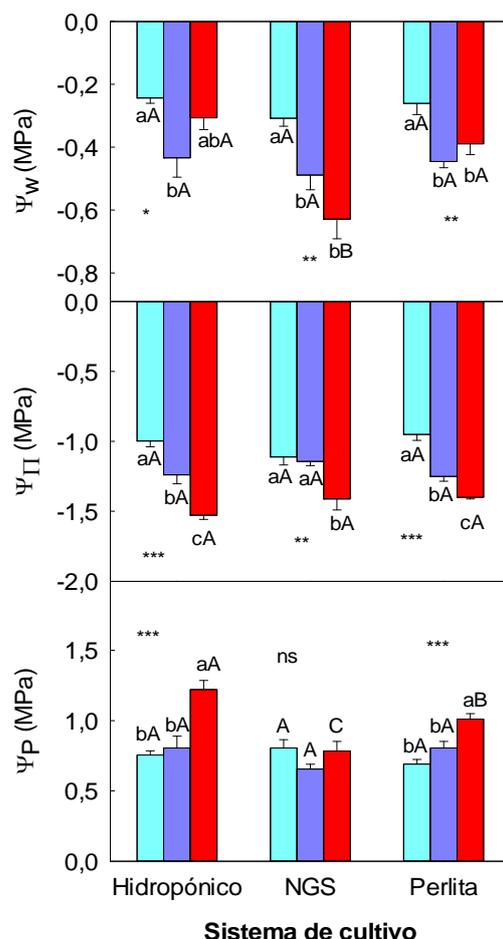


Figura 3.29. Efecto de la salinidad (S0, control; S1, 40 mM NaCl; S2, 80 mM NaCl) sobre los parámetros de relaciones hídricas Ψ_w (potencial hídrico), Ψ_π (potencial osmótico) y Ψ_p (potencial de turgor) en hojas de plantas de tomate cultivadas en tres sistemas de cultivo sin suelo. La barra de error indica el error estándar de la media (n=8). *, **, *** y “ns” indican diferencias significativas a $p < 0,05$, $p < 0,01$, $p < 0,001$ y no diferencias significativas, respectivamente, entre los tratamientos salinos para cada sistema de cultivo. Valores con diferentes letras presentan diferencias significativas al 95% según el test de Rango múltiple de Duncan. Letras minúsculas comparan los tratamientos salinos para cada sistema de cultivo. Letras mayúsculas comparan los sistemas de cultivo para cada tratamiento salino.

En cuanto a los parámetros de intercambio gaseoso, independientemente de la salinidad, la conductancia estomática (g_s) fue más alta en plantas de perlita seguido de NGS e hidropónico; el uso eficiente del agua (UEA) fue significativamente más alto para plantas en NGS que en hidropónico; y la concentración de CO_2 subestomático (C_i) fue mayor en plantas de perlita que aquellas cultivadas en hidropónico (Tabla 3.22). En la asimilación neta de CO_2 (A_{CO_2}), en el tratamiento S0 no se observaron diferencias significativas entre los diferentes sistemas de cultivo.

La A_{CO_2} , al incrementar la salinidad en la SN, disminuyó progresivamente en las plantas en hidropónico; en plantas de NGS también disminuyó con la salinidad pero esta disminución fue parecida en los dos tratamientos salinos S1 y S2, y con una

reducción parecida a la observada para el tratamiento S1 de las plantas en hidroponía; y en perlita la salinidad no afectó este parámetro (Fig. 3.30).

Tabla 3.22. Efecto del sistema de cultivo y la salinidad sobre los parámetros de intercambio gaseoso asimilación neta de CO₂ (A_{CO2}), conductancia estomática (g_s), uso eficiente del agua (UEA), y concentración subestomática de CO₂ (C_i) en hojas de plantas de tomate.

	A _{CO2} ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	g _s ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	UEA ($\mu\text{mol mol}^{-1}$)	C _i ppm
Factor principal: Sistema				
Hidropónico	9,13±1,00c	198,8±28,0c	3,86±0,30b	232,4±10,3b
NGS	11,0±0,54b	260,7±28,4b	4,61±0,23a	249,1±6,2ab
Perlita	14,18±0,26a	354,7±18,4a	4,06±0,14ab	266,4±8,7a
Factor principal: Salinidad				
S0	13,43±0,43a	338,3±26,0a	4,23±0,18	259,2±8,0
S1	10,96±0,58b	260,8±24,4b	4,27±0,23	245,4±9,0
S2	9,63±1,16c	204,8±31,3b	4,04±0,33	241,4±10,2
Sistema	***	***	*	*
Salinidad	***	***	ns	ns
Sistema x Salinidad	***	ns	ns	ns

*, *** y “ns” indican diferencias significativas a $p < 0,05$, $p < 0,001$ y no significativas, respectivamente. Para cada columna, valores con diferentes letras presentan diferencias significativas al 95% según el test de Rango múltiple de Duncan. Los valores de cada uno de los parámetros son valores medios ± error estándar (n=24).

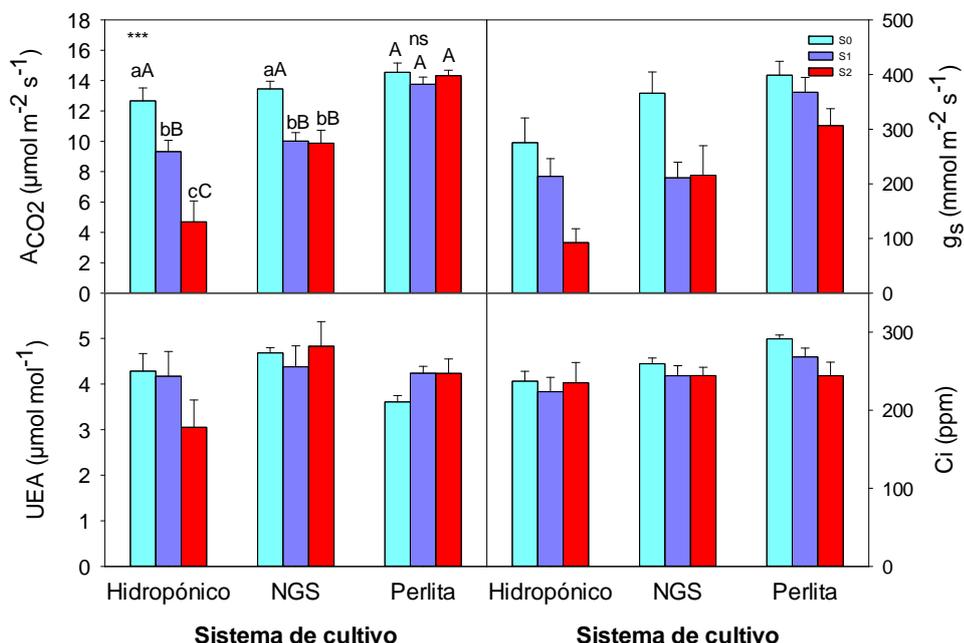


Figura 3.30. Efecto de la salinidad (S0, control; S1, 40 mM NaCl; S2, 80 mM NaCl) sobre los parámetros de intercambio gaseoso asimilación neta de CO₂ (A_{CO2}), conductancia estomática (g_s), uso eficiente del agua (UEA), y concentración subestomática de CO₂ (C_i) en hojas de plantas de tomate cultivadas en tres sistemas de cultivo sin suelo. La barra de error indica el error estándar de la media (n=8). *** y “ns” indican diferencias significativas a $p < 0,001$ y no diferencias significativas, respectivamente, entre los tratamientos salinos para cada sistema de cultivo. Valores con diferentes letras presentan diferencias significativas al 95% según el test de Rango múltiple de Duncan. Letras minúsculas comparan los tratamientos salinos para cada sistema de cultivo. Letras mayúsculas comparan los sistemas de cultivo para cada tratamiento salino.

En los parámetros de fluorescencia de clorofilas Φ SII (eficiencia fotoquímica del PSII), F_v'/F_m' (eficiencia de las antenas en los centros de reacción del PSII), qP (quenching fotoquímico), y F_v/F_v (Máxima eficiencia cuántica de los centros de reacción del PSII) no se observaron efectos significativos ni con la salinidad ni con los sistemas de cultivo (Tabla 3.23 y Fig. 3.31).

Tabla 3.23. Efecto del sistema de cultivo y la salinidad sobre los parámetros de fluorescencia de clorofilas Φ SII (Eficiencia fotoquímica del PSII), F_v'/F_m' (eficiencia de las antenas en los centros de reacción del PSII), qP (quenching fotoquímico), y F_v/F_v (máxima eficiencia cuántica de los centros de reacción del PSII) en hojas de plantas de tomate.

	Φ SII	F_v'/F_m'	qP	F_v/F_v
Factor principal: Sistema				
Hidropónico	0,45±0,01	0,69±0,002	0,65±0,02	0,84±0,01
NGS	0,45±0,01	0,71±0,002	0,64±0,02	0,86±0,02
Perlita	0,50±0,01	0,70±0,001	0,71±0,01	0,85±0,01
Factor principal: Salinidad				
S0	0,44±0,01b	0,69±0,004b	0,64±0,01	0,85±0,04
S1	0,47±0,01ab	0,70±0,004b	0,67±0,02	0,85±0,01
S2	0,50±0,01a	0,72±0,01a	0,69±0,02	0,85±0,02
Sistema	ns	ns	ns	ns
Salinidad	ns	ns	ns	ns
Sistema x Salinidad	ns	ns	ns	ns

“ns” indican diferencias no significativas, respectivamente. Los valores de cada uno de los parámetros son valores medios \pm error estándar ($n=24$).

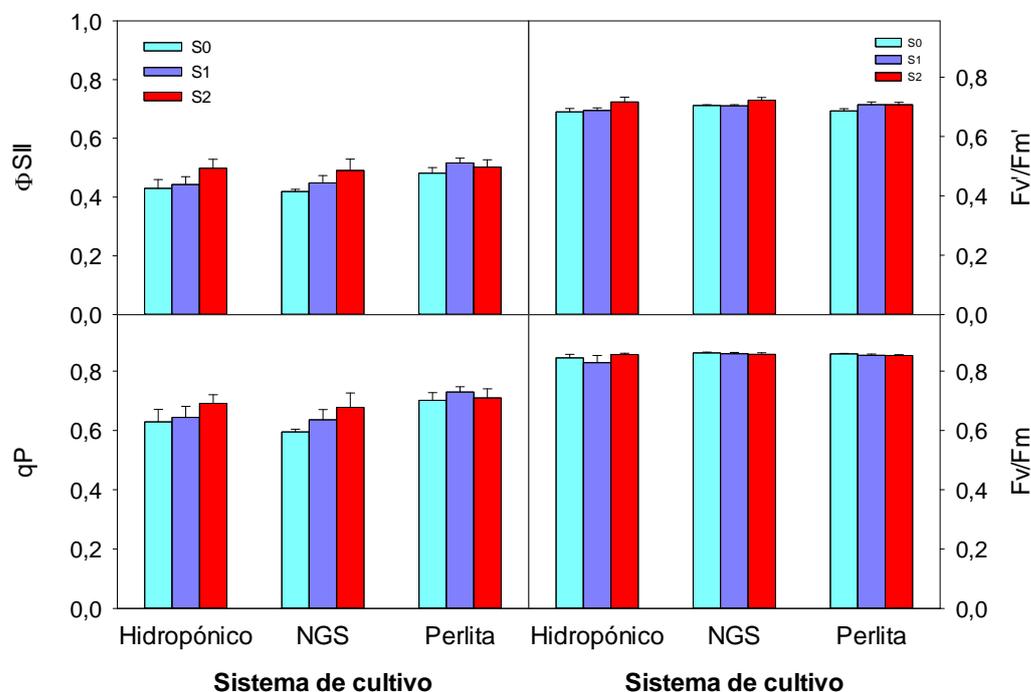


Figura 3.31. Efecto de la salinidad (S0, control; S1, 40 mM NaCl; S2, 80 mM NaCl) sobre los parámetros de fluorescencia de clorofilas Φ SII (eficiencia fotoquímica del PSII), F_v'/F_m' (eficiencia de las antenas en los centros de reacción del PSII), qP (quenching fotoquímico), y F_v/F_v (máxima eficiencia cuántica de los centros de reacción del PSII) en hojas de plantas de tomate cultivadas en tres sistemas de cultivo sin suelo. La barra de error indica el error estándar de la media ($n=8$).

3.3.5 Matriz de correlación de Pearson

Con los datos de concentración foliar de Cl y Na en las hojas, asimilación neta de CO₂ (A_{CO2}), conductancia estomática (g_s), concentración de CO₂ subestomática (C_i), peso seco de hojas (ps hojas), producción comercial de frutos, y potencial hídrico (Ψ_w) medidos se realizó una matriz de correlación de Pearson (Tabla 3.24), para estudiar posibles relaciones entre parámetros de producción, crecimiento vegetativo, relaciones hídricas, parámetros de intercambio gaseoso y concentración de Cl y Na. La asimilación neta de CO₂ (A_{CO2}) fue correlacionado negativamente con la concentración de Cl y positivamente con la g_s. La producción comercial de los frutos fue correlacionado positivamente con Ψ_w y la biomasa seca foliar, y negativamente con el Cl y Na (Tabla 3.24).

Tabla 3.24. Matriz de correlación de Pearson para los parámetros concentración foliar de Cl y Na en hoja, asimilación neta de CO₂ (A_{CO2}), conductancia estomática (g_s), concentración de CO₂ subestomática (C_i), peso seco de hojas (ps hojas), producción comercial de frutos, y potencial hídrico (Ψ_w).

	Cl	g _s	PS hojas	Na	A _{CO2}	Producción
g _s	0,72*					
PS hojas	-0,84**	ns				
Na ⁺	0,98***	ns	-0,89**			
Pnet	-0,69*	0,95***	ns	ns		
Producción	-0,77*	ns	0,82**	-0,83**	ns	
Ψ _w	-0,70*	ns	0,77*	-0,75*	ns	0,84**
C _i	ns	ns	ns	ns	ns	ns

ns, *, ** y *** indican diferencias no significativas o diferencias significativas a $p < 0.05$, $p < 0.01$ o $p < 0.001$, respectivamente.

3.4 Discusión

3.4.1. Efecto del sistema de cultivo y la salinidad sobre la producción y calidad de los frutos

En nuestro ensayo, con los datos de la producción total y comercial se puede concluir que para nuestras condiciones de cultivo con SN sin salinidad las plantas de la variedad “Óptima” cultivadas en hidropónico son más productivas que los otros dos sistemas. NGS, sin embargo, fue el sistema que tuvo la menor producción. Esto ocurrió porque los frutos de plantas en NGS tuvieron un menor peso fresco que aquellos de los otros dos sistemas, mientras que los números de frutos por planta fueron similares para todos los sistemas. Teniendo en cuenta que las plantas en NGS tuvieron la menor

biomasa foliar, la disminución del peso de los frutos en este tratamiento podría haber sido por una disminución en el contenido total de carbohidratos que le llegan procedentes de las hojas.

En cuanto a los parámetros de calidad de los frutos prácticamente no hay diferencias significativas entre los diferentes sistemas, salvo en hidropónico donde el índice de madurez incrementó y la firmeza disminuyó en comparación con los otros dos sistemas. En cuanto a la nutrición mineral, todos los nutrientes se mantuvieron en un rango de normalidad Ca (6,0-4.5 %), K (4,2-2,9 %), P (1,6-1,1 %), S (2,0-1,4 %) y Mg (0,7-0,25 %). La fotosíntesis también fue similar para las plantas en los tres sistemas con valores de $12 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Todos estos datos sugieren que la mayor producción observada en hidropónico se debe a que las plantas tienen en todo momento agua y nutrientes disponibles, mientras que en el caso de la perlita y el NGS, aunque se regó a demanda según las necesidades de las plantas, durante los periodos entre riegos las plantas podrían haber sufrido algún tipo de estrés osmótico y/o hídrico que tendría efectos negativos sobre el rendimiento total y el desarrollo vegetativo del cultivo.

En otros experimentos, donde se comparan diferentes tipos de sustratos en plantas de tomate, Voca y *col*, (2007) no encontraron diferencias entre los sistemas de cultivo basados en suelo, perlita, arcilla expandida y lana de roca. Borowski y Nurzyński (2012) tampoco encontraron diferencias cuando compararon los sustratos de lana de roca, paja de canola, paja de canola + turba (3:1), paja de canola + corteza de pino (3:1), paja de triticale, paja de triticale + turba (3:1), y paja de triticale + corteza de pino (3:1). Hay que tener en cuenta que en todos estos sistemas de cultivo el manejo del riego es parecido, donde se aplican una serie de riegos diarios siguiendo una frecuencia determinada por las necesidades hídricas de las plantas. Mientras tanto en nuestro experimento nosotros estamos comparando sistemas muy diferentes entre sí, en hidropónico las raíces de las plantas siempre están sumergidas en la SN disponiendo por tanto de agua y nutrientes fácilmente asimilables; en NGS, aunque es un sistema parecido al hidropónico, las raíces están en contacto con la SN cuando se aplican los riegos, pero el resto del tiempo la raíz permanece desnuda; y en perlita es un sustrato sólido e inerte donde tanto el contenido de agua como la concentración de sales puede oscilar ampliamente entre cada evento de riego. Por otro lado, otro aspecto importante a la hora de elegir un sistema de cultivo es el uso eficaz del agua ya que es uno de los factores que determinará la viabilidad económica del cultivo. En nuestro experimento, como ya vimos en la sección de “Material y Métodos”, la cantidad total de SN empleada

en el tratamiento control fue de 181,2; 195,0 y 176,4 litros por planta, para los sistemas de hidroponía, NGS y perlita, respectivamente. Esto supone que para obtener 1 kg de fruto se necesita 32 L para hidroponía, 51 L para NGS y 42 L para perlita. Esto sugiere que desde un punto de vista económico los sistemas de hidroponía y perlita serían los más rentables al disminuir el consumo tanto de agua como de nutrientes. En el caso específico de este sistema hidropónico (cubos de 120 L de capacidad), debido a su bajo aprovechamiento del de la superficie del invernadero se suele utilizar más con fines investigativos que productivos, por lo que nuestros datos sugieren que la perlita es el sistema de cultivo más idóneo de los tres ensayados. Además, el sistema de NGS requiere de una alta frecuencia de riego, ya que es necesario llegar a aplicar riegos de 5 minutos cada 5 minutos por lo que el gasto consumido por electricidad es mayor que para los otros dos sistemas de cultivo.

Con respecto a la salinidad, la producción comercial de plantas de tomate de la variedad “Óptima” disminuyó progresivamente al incrementar la conductividad eléctrica (CE) en la solución nutritiva (SN), y esta reducción fue similar en los tres sistemas de cultivo ensayados, con una media de 35 % y 58 % en los tratamientos de 40 mM (6 dS/m) y 80 mM NaCl (10 dS/m), respectivamente, con respecto al tratamiento control (S0). Esto representa un descenso lineal de la producción ($r^2 = 0,98$) de aproximadamente un 7,3 % por cada incremento de 1 dS/m en la CE de la SN a partir de 2 dS/m, que es la CE de la SN del tratamiento control. Esto indica que el grado de tolerancia de la variedad ‘Optima’ a la salinidad es parecido a tomates cherry (Serio y *col*, 2004) o ‘Clarence’ (Ehret y *col*, 2013), variedades que muestran una reducción de la producción de 7,5 y 10 %, respectivamente, por cada dS/m que aumenta la CE de la SN. Sin embargo, la variedad ‘Optima’ parece ser más vulnerable a la salinidad que otras como el híbrido ‘HC01’ (De Pascale y *col*, 2001) o ‘Durinta’ (Krauss y *col*, 2006) donde apenas se observaron efectos de la salinidad cuando fueron cultivadas con SN comprendidas entre 0.5-8.5 dS/m. En nuestro experimento la reducción de la producción comercial por la salinidad se debió a una disminución de peso medio de los frutos, pasando de 188 g del tratamiento control a 142 y 123 g para el tratamiento S1 y S2, respectivamente. Sin embargo el número de frutos solo se vio reducido en las plantas de tomate cultivadas en NGS pasando de 23, 17 y 9 frutos para el tratamiento S0, S1 y S2, respectivamente. En general se sabe que la reducción de la producción de plantas de tomate cuando son regadas con aguas de salinidad moderada se debe principalmente a la disminución del peso medio de los frutos, y con salinidad alta se debe a la disminución

tanto del peso medio de los frutos como al número de frutos (Van Ieperen, 1996 y Cuartero y Soria, 1998). Cuartero y *col* (2006) sugirió que una alta CE en la SN afecta directamente a la floración y el cuaje de los frutos, produciendo una disminución en su número. Ehret y *col* (2013) indicó que la disminución del peso medio de los frutos se debe a que los frutos cultivados en salinidad tienen menos agua aunque mantienen el peso seco (materia orgánica), comparados con frutos regados con aguas sin salinidad, lo que indicaría que el efecto osmótico de la salinidad conduciría a una disminución del contenido de agua del fruto (Belda y Ho, 1993).

Además de la reducción en el rendimiento, la salinidad tiene una gran influencia en la calidad de los frutos. Ha sido descrito que la salinidad es uno de los factores más importantes que producen la incidencia de podredumbre apical en el fruto, fisiopatía también conocida como BER (blossom-end-rot; Adams y Ho, 1992). El BER se produce cuando en el momento de máxima expansión celular del fruto el suministro de calcio se ve limitado por condiciones ambientales como pueden ser salinidad, altas temperaturas o alta radiación (Adams y Ho, 1993). En nuestro ensayo las plantas cultivadas en hidropónico y perlita tuvieron una mayor incidencia de BER que aquellas cultivadas en el sistema NGS para el tratamiento salino S2.

Dentro de las características físicas de los frutos de tomate una de las que más está relacionada con la calidad es la firmeza (Cuartero y Fernández 1999). La disminución de la firmeza está asociada al proceso de maduración relacionado con la actividad poligacturonasa (Riquelme, 1995). En este experimento los frutos se escogieron en el mismo estado de madurez, lo cual queda reflejado en el índice de color y la relación a^*/b^* de los frutos. La salinidad disminuyó progresivamente la firmeza, y esto podría estar relacionado con las relaciones hídricas y con la capacidad del sistema de cultivo para garantizar un suministro adecuado de agua al fruto. Al incrementar la concentración de NaCl en la SN incrementa el efecto osmótico de la salinidad, y por tanto la dificultad que tiene la planta para absorber agua es mucho mayor.

En cuanto a los parámetros de calidad química de los frutos, estos mejoraron con la salinidad ya que se observó un incremento en los sólidos solubles totales (SST), los cuales están relacionados con la concentración de azúcares reductores, principalmente glucosa y fructosa, y la acidez valorable (TA), relacionada con los contenidos en ácidos orgánicos en el fruto (Grierson y Kader, 1986). Este incremento de la calidad con la salinidad es consistente con los datos observados en otros estudios en tomate (Cornish, 1992; Petersen y *col* 1998; Tüzel y *col* 2003). Además, se sabe que el

incremento de solutos orgánicos como azúcares, ácidos orgánicos, etc, en condiciones de salinidad se debe a que las plantas deben ajustarse osmóticamente para evitar el efecto osmótico de la salinidad, y así mantener un buen estado hídrico en los diferentes tejidos de la planta (Verslues y *col.*, 2006). El hecho de que los SST y la TA incrementaron mucho más con la salinidad en los frutos de plantas cultivadas en NGS podrían estar relacionados con dos motivos principalmente: i) los frutos de las plantas en NGS fueron más pequeños por lo que se podría haber producido un efecto de concentración y ii) el efecto osmótico de la salinidad combinado con la falta de agua entre los eventos de riego podrían haber causado un mayor incremento en la síntesis de solutos orgánicos en estas plantas.

3.4.2. Efecto de la salinidad y el sistema de cultivo sobre la nutrición mineral

En este experimento se observó que al incrementar la concentración de NaCl en la SN incrementó progresivamente la concentración de estos elementos en las hojas, y este incremento fue mayor en la concentración de Cl que de Na. Además, las plantas cultivadas en NGS tuvieron una mayor concentración que las plantas en hidropónico y perlita. Uno de los efectos de la salinidad es el efecto específico provocado por la acumulación de estos iones tóxicos (Goyal y *col.*, 2003; Zhu, 2003). Para la mayoría de las especies el Na suele alcanzar una concentración tóxica antes que el Cl. Sin embargo, para algunas especies como cítricos y vid, puede ocurrir lo contrario siendo el Cl quien se encuentre en una mayor concentración. Esto se debe a que en las raíces y el tallo de las especies leñosas el Na puede quedar retenido, mientras que el Cl no encuentra ningún tipo de barrera en estos tejidos y por tanto se acumula más rápidamente en las hojas (Läuchli, 1984; Storey y Walker y *col.*, 1999). Pero además de la desigual distribución del Cl y Na en los diferentes tejidos de las plantas, la tolerancia a la salinidad puede venir determinada por la capacidad que tengan las plantas para compartimentar el Cl, Na o ambos y así mantener un baja concentración de estos iones en el citosol, especialmente de las células del mesófilo (Munn y Tester, 2008). Con los datos de nuestro experimento no se puede concluir cuál de los dos iones fue el más tóxico en plantas de la variedad 'Optima' porque los dos incrementaron paralelamente al incrementar la concentración de NaCl en los tratamientos salinos, observándose una relación lineal significativa del Cl ($r^2 = 0.81^{***}$) y Na ($r^2 = 0.83^{***}$) con el rendimiento comercial. Además, aunque la concentración de Cl y Na fue mayor para plantas en NGS (4,7 y 1,9 %) seguido de hidroponía (3,2 y 1,1 %) y perlita (1,52 y 0,6 %; datos para el

tratamiento S2), los efectos de la salinidad en la producción comercial fue similar en los tres sistemas, lo que indicaría que el efecto tóxico por sí mismo no es el principal responsable de la reducción de la producción, sino que en cada sistema la acción combinada del efecto tóxico y osmótico de la salinidad habría producido que los tres sistemas tuvieran una respuesta parecida. Sin embargo, en el desarrollo vegetativo de las plantas sí que se observa un efecto importante de la toxicidad de Cl y/o Na, ya que la reducción del desarrollo vegetativo se produjo solamente en las plantas de NGS que son las que alcanzaron los valores más altos de estos elementos, como hemos comentado anteriormente. Fan y *col.*, (2011) estudió en plantas de tomate el efecto tóxico y osmótico de la salinidad utilizando diferentes soluciones nutritivas isotónicas, y también llegó a la conclusión que el efecto osmótico de la salinidad es el principal responsable de la reducción del crecimiento vegetativo y de la producción; aunque en el experimento de Fan y *col.* la máxima concentración de Na en las hojas no sobrepasó el 0,85 %; mientras que en nuestro experimento la concentración de las plantas en NGS como hemos visto anteriormente llegaron a 1,9 %.

La presencia en la solución del suelo de iones salinos también puede alterar el equilibrio nutricional de las plantas, resultando en una elevada relación de Na/Ca, Na/K, Na/Mg, Cl/NO₃, Cl/H₂PO₄. Esto es debido a que el Na y/o Cl puede afectar la absorción de nutrientes por la planta bien por interacciones, competiciones entre nutrientes o alterando la permeabilidad de las membranas (Grattan y Grieve, 1992). En nuestro experimento, aunque las concentraciones de nutrientes esenciales están dentro de un rango de normalidad en los tratamientos salinos S1 y S2, la salinidad si provocó alteraciones nutricionales que podrían haber contribuido de forma negativa a la reducción de la producción y desarrollo vegetativo. Así la salinidad aumentó la relación Na/K en las plantas de los tres sistemas, pero en el caso de hidropónico y NGS fue debido tanto al incremento del Na como a la disminución de la concentración de K lo que hizo que esta relación pasará de 0,22 para plantas en perlita a 0,53 y 0,93 para hidropónico y NGS (datos tratamiento S2; tratamiento control Na/K = 0.014). Se sabe la reducción en la absorción de K en la planta por el Na es un proceso competitivo. Aunque las plantas tienen una selectividad alta de K con respecto a Na, cantidades excesivas de Na pueden tener un efecto negativo sobre las plantas (Hu y Schmidhalter, 2005). La concentración de P y Mg fue también afectada por la salinidad disminuyendo de forma similar para los tres sistemas de cultivo, observando la menor concentración de estos nutrientes de nuevo en las plantas de NGS. En general, la interacción de la

nutrición de P y Mg con la salinidad es muy compleja. En el caso del P se observa que la salinidad puede inhibir su absorción de (Grattan y Grieve, 1999). Una deficiencia de fósforo en condiciones de salinidad puede influir en los procesos metabólicos, principalmente en el metabolismo de nitrógeno, lo que ocasiona un incremento en aminoácidos libres, especialmente de proteínas (Al-Karaki y *col* 1996; Kabir y *col* 2004). El Mg en la literatura consultada también se encuentra respuestas contradictorias para plantas de tomate, Giuffridaasi y *col* (2009) no encontraron diferencias significativas en la concentración de Mg en hojas de tomate regadas con SN en un rango de CE comprendidas entre 2,7-8,0 dS/m. En cualquier caso la concentración de un determinado nutriente en condiciones salinas va a depender tanto de la absorción de este nutriente por las raíz (con el correspondiente antagonismo con el Na y Cl) y el transporte desde la raíz a la parte aérea, como del crecimiento vegetativo de la parte aérea y el tallo, y su relación entre ellos (parte aérea/raíz).

3.4.3. Efecto de la salinidad y el sistema de cultivo sobre los parámetros de intercambio gaseoso, relaciones hídricas y fluorescencia de clorofilas

La asimilación neta de CO₂ (A_{CO_2}) en plantas de tomate puede ser afectada negativamente por la salinidad (Wu y Kubota, 2008). En nuestro experimento se observa que la A_{CO_2} disminuyó con la salinidad en plantas cultivadas en hidropónico y NGS, pero no perlita. En la tabla 3.24 se observa una correlación significativa de la A_{CO_2} , con la concentración de Cl⁻ en las hojas y la conductancia estomática (g_s); sin embargo no se observaron diferencias significativas ni con la concentración de Na ni con la concentración de CO₂ subestomática. Estos datos sugieren que la reducción de la A_{CO_2} por la salinidad fue debida a alteraciones en los procesos metabólicos de la fotosíntesis y no a factores estomáticos. Aunque la A_{CO_2} y g_s fueron reducidos por la salinidad, como la concentración de CO₂ subestomático (C_i) fue similar a las plantas del tratamiento control, quiere decir que la A_{CO_2} no estuvo limitada por una baja concentración de CO₂ en las células del mesófilo causada por el cierre estomático (Farquhar y Sharkey, 1982). Este tipo de respuestas de la A_{CO_2} en relación con factores estomáticos y no estomáticos en plantas de tomate parece ser que depende de la variedad. Se ha observado que en tomates de la variedad ‘RAF’ y ‘Leader’ los factores metabólicos son más importantes que los estomáticos, pero en tomates de la variedad ‘Daniela’ el factor estomático es el responsable de la reducción de A_{CO_2} (Nebauer y *col*, 2013). La disminución de la A_{CO_2} debido a factores no estomáticos incluye cambios en

la eficiencia de la carboxilación, eficiencia fotoquímica del fotosistema II, concentración de clorofilas, actividad de enzimas involucrados en los procesos fotosintéticos, etc. En nuestro experimento con los datos de la fluorescencia de clorofilas, donde no se observó cambios de estos parámetros con la salinidad, se puede concluir que la maquinaria fotoquímica de las hojas no fue dañada. La reducción de la A_{CO_2} con la salinidad estuvo ligada a la toxicidad del Cl más que a la del Na, ya que se obtuvo una correlación negativa y significativa entre la A_{CO_2} y Cl, pero no con el Na, como ya hemos comentado anteriormente. Además, la A_{CO_2} de las plantas cultivadas en perlita no fue afectada por la salinidad, y fueron estas plantas las que tuvieron una menor concentración de Cl. Por lo que comparando los datos de A_{CO_2} y Cl podemos concluir que concentraciones de Cl en las plantas de tomate “Optima” superiores a 1,5 % producen alteraciones en fotosíntesis.

En nuestro experimento tampoco encontramos una relación directa en la A_{CO_2} y el crecimiento vegetativo y la producción de frutos ni en condiciones control ni en condiciones salinas. La economía del carbono de una planta, es decir la ganancia neta de biomasa, no solo depende de la fotosíntesis (ganancia de carbono), sino también de la utilización de los fotoasimilados en procesos respiratorios (perdidas de carbono). Una gran proporción de esta respiración se da en las raíces, ya que estas respiran entre un 20 y 40 % del total de los fotoasimilados producidos por la planta durante el día. Hay dos tipos de respiración: i) respiración de crecimiento, que refleja los costes de carbono asociados a la producción de energía metabólica utilizada durante la biosíntesis y el crecimiento; y ii) la respiración de mantenimiento, son los gastos de energía que se invierten en procesos que no determinan un ganancia neta de biomasa orgánica. En condiciones no favorables para el crecimiento de una planta, salinidad, falta de nutrientes etc, la relación entre respiración de mantenimiento y respiración de crecimiento se incrementa, permitiendo a la planta adaptarse a esas condiciones medioambientales adversas. Por ejemplo en nuestro experimento, aunque en el tratamiento control la A_{CO_2} fue similar en plantas de los tres sistemas, parece ser que las plantas en NGS tienen una menor rentabilidad en cuanto a la ganancia neta de biomasa, quizás debido a que las raíces en este sistema tienen algún factor limitante como estrés hídrico, osmótico etc. En otros experimentos de tomate Balibrea y *col*, (2003) observó una correlación positiva entre la fotosíntesis y el crecimiento vegetativo en plantas de la variedad “Pera”, pero no en la variedad ‘Volgogradskij’. Además estos autores observaron un diferente comportamiento de estas dos variedades en términos de

distribución y uso de fotoasimilados en condiciones de salinidad que marcaron su diferente tolerancia.

Uno de los efectos perjudiciales de la salinidad sobre las plantas es el efecto osmótico que provoca la deshidratación de las plantas. Los datos de relaciones hídricas medidos en este experimento apuntan a que el efecto osmótico de la salinidad no produjo la deshidratación de las hojas como indica el contenido relativo de agua de las hojas y del potencial de turgor. Estas plantas podrían haber evitado la deshidratación de las hojas a través del cierre estomático, y del ajuste osmótico que permiten a las plantas reducir el potencial hídrico de las hojas por acumulación de iones y solutos orgánicos. Sin embargo, la síntesis de osmolitos orgánicos suele ser desfavorable para la planta ya que requiere un gasto extra en términos de energía metabólica.

3.5. CONCLUSIONES

En resumen, las plantas cultivadas en hidropónico tuvieron la mayor producción comercial en el tratamiento control. La salinidad disminuyó la producción en los tres sistemas de cultivo. Por tanto, según nuestras condiciones de cultivo, el sistema hidropónico es el más idóneo para cultivar plantas de tomate de la variedad 'Optima' en condiciones de salinidad en el rango ensayado de 2-10 dSm⁻¹. Sin embargo atendiendo al manejo y a la baja densidad de plantación que requiere este sistema, nosotros aconsejamos que el sistema más económico sería el de perlita. A pesar de estos resultados negativos obtenidos para el sistema NGS, investigaciones relacionadas con su manejo podrían optimizar este sistema consiguiendo mejores resultados. Ya que medioambientalmente este sistema reduciría considerablemente la contaminación de suelos por aportes de fertilizantes indiscriminados. La calidad química de los frutos (SST y TA) mejora con la salinidad, pero en una mayor medida en los frutos del sistema de NGS. La concentración de Cl y Na fue mayor para plantas en NGS seguido de hidroponía y perlita; y estos valores se correlacionaron con la reducción en el desarrollo vegetativo pero no con la producción. En cuanto a la nutrición, la concentración de K, P y Mg fue también afectada por la salinidad disminuyendo de forma similar para los tres sistemas de cultivo. La asimilación neta de CO₂ (A_{CO2}) disminuye con la salinidad cuando la concentración de Cl en las hojas es superior al 1,5 %, y esta reducción se debe principalmente a desajustes metabólicos de la fotosíntesis más que a factores no estomáticos o procesos relacionados con la captación de la luz.

3.6. BIBLIOGRAFÍA

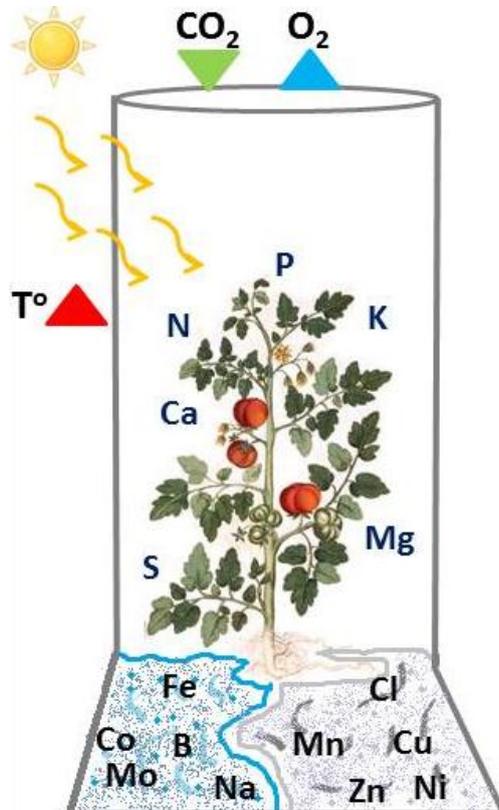
- Adams, P.; Ho, L.C. (1993). Effects of environment on the uptake and distribution of calcium in tomato and on the incidence of blossom-end rot. *Plant Soil* 154, 127-132.
- Adams, P.; Ho, L.C. (1992). The susceptibility of modern tomato cultivars to blossom-end rot in relation to salinity. *Journal of Horticultural Science* 67, 827-839.
- Al-Karaki G.N., Clark R.B., Sullivan C.Y. (1996). Phosphorus nutrition and stress effects on proline accumulation in sorghum and bean. *Plant Physiology* 148, 745-751.
- Balibrea M.E., Dell'Amico J., Bolarin M.C., Pérez-Alfocea F. (2000). Carbon partitioning and sucrose metabolism in tomato plants growing under salinity, *Physiology* 110, 503-511.
- Belda, R.M., Ho, L.C., (1993). Salinity effects on the network of vascular bundles during tomato fruit development. *Journal of Horticultural Science* 68, 557-564.
- Borowski E.; Nurzyński J. (2012). Effect of different growing substrates on the plant water relations and marketable fruit yield greenhouse-grown tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) *Acta Agrobotánica* 65, 49-56.
- Cornish, P.S. (1992). Use of high electrical conductivity of nutrient solution to improve the quality of salad tomatoes (*Lycopersicon esculentum*) grown in hydroponic culture. *Aust. Journal of Experimental Agriculture* 32, 513-520.
- Cuartero, J., Bolarin, M.C., Asins, M.J., Moreno, V. (2006). Increasing salt tolerance in the tomato. *Journal of Experimental Botany* 57, 1045-1058.
- Cuartero, J., Fernández-Muñoz, R. (1999). Tomato and salinity. *Sci. Hortic.* 78, 83-125.
- De Pascale S., Maggio A., Fogliano V., Ambrosino P. and Ritieni A. (2001). Irrigation with saline water improves carotenoids content and antioxidant activity of tomato. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology* 76, 447-453.
- Ehret D. L., Usher K., Helmer T., Block G., Steinke D., Frey B., Kuang T. (2012). Tomato Fruit Antioxidants in Relation to Salinity and Greenhouse Climate and Moussa Diarra. *Journal of Agricultural Food and Chemistry*
- Fan Molin, Biea Zhilong, Krumbeinb Angelika, Schwarzb Dietmar, (2011). Salinity stress in tomatoes can be alleviated by grafting and potassium depending on the rootstock and K⁺ concentration employed. *Scientia Horticulturae* 130, 615-623
- Farquhar G.D., Von Caemmerer S., Berry J.A. (1980). A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species, *Planta* 149, 78-90.

- Giuffrida F., Martorana M.; Leonardi C. (2009). How Sodium Chloride Concentration in the Nutrient Solution Influences the Mineral Composition of Tomato. *Leaves and Fruits Hortscience* 44, 707-711.
- Goyal, S. S., Sharma, S. K.; Rains, D. W. (2003) Crop production in saline environments: global and integrative perspectives, *New York-London-Oxford Food Products Press*, an Imprint of the Haworth Press).
- Grattan S.R., Grieve C.M. (1999). Salinity mineral nutrient relations in horticultural crops. *Scientia Horticulturae* 78, 127-157.
- Grattan, S.R., Grieve, C.M. (1992). Mineral acquisition and growth response of plants grown in saline environments. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 38, 275-300.
- Grierson, D., Kader, A.A., (1986). Fruit ripening and quality. In: Atherton, J.G., Rudich, J. (Eds.), *The Tomato Crop. A Scientific Base for Improvement*. Chapman & Hall, London, 241-280.
- Krauss, S.; Schnitzler, W. H.; Grassmann, J.; Woißke, M. (2006). The influence of different electrical conductivity values in a simplified recirculating soilless system in inner and outer fruit quality characteristics of tomato. *Journal of Agricultural Food Chemistry*. 54, 44-448.
- Läuchli, A. (1984). Salt exclusion: An adaptation of legumes for crops and pastures under saline conditions. En: *Salinity tolerance in plants. Strategies for crop improvement John Wiley and Sons*, New York 171-187.
- Munns, R. M. Tester. (2008). Mechanisms of salinity tolerance. *Annu. Plant Biology* 59, 651-681.
- Nebauer S. G., Sánchez Manuel, Martínez L., Lluch Y., Renau-Morata B., Victoria Molina R. (2013). Differences in photosynthetic performance and its correlation with growth amongstomato cultivars in response to different salts. *Plant Physiology and Biochemistry*. 63, 61-69.
- Riquelme, F. (1995). Postcosecha. In *El cultivo del tomate. Edit Mundi Prensa. Madrid, España*. 793 .
- Serio, F.; De Gara, L.; Caretto, S.; Leo, L.; Santamaria, P. (2004). Influence of an increased NaCl concentration on yield y quality of cherry tomato grown in posidonia (*Posidonia oceanica* (L) Delile). *Journal Science Food Agricultural* 84, 1885-1890.

- Soria T., Cuartero J. (1998). Tomato fruit yield and water consumption with salty water irrigation, Int. Symp. Water Qual. *Quantity Greenhouse Horticultural*. 458, 215-219.
- Storey R, Walker R. R. (1999). Citrus y salinity. *Science Horticultural*. 78:39-81.
- Stewart, I. Wheaton Y, T. A. (1973). Conversion of β -citaurin to reticulataxanthin and β -apo-8'-carotenal to citranaxanthin during isolation of carotenoids from citrus. *Phytochemistry*. 12, 2947-2951.
- Tüzel, Y., Tüzel I. H., Ücer F. (2003). Effects of salinity on tomato growing in substrate culture. *Acta Horticulturae* 609, 329-335.
- Van Ieperen, W. (1996). Effects of different day and night salinity levels on vegetative growth, yield and quality of tomato. *Journal Horticultural Science*. 71, 99-111.
- Verslues, P.E.; Agarwal, M.; Katiyar-Agarwal, S. (2006). Methods and concepts in quantifying resistance to drought, salt and freezing, abiotic stresses that affect plant water status . *Plant Journal* 45(4), 523-539.
- Vocá S., Dobricevic N., Sindrak Z., Borosic J. Benko B. (2007). Quality of Tomatoes Grown on Different Substrates and Harvested in Three Harvest Periods. *Vegetable Crops Department, Svetosimunska* 25, 10000 Zagreb, Croatia.
- Wu M., Kubota C. (2008). Effects of electrical conductivity of hydroponic nutrient solution on leaf gas exchange of five greenhouse tomato cultivars. *Horticultural Technique* 18, 271-277.
- Zhu, J. K. (2003). Regulation of ion homeostasis under salt stress. *Current Opinion in Plant Biology* 6, 441-445.

CAPITULO 4:

Estudio del comportamiento de plantas de tomate (*Solanum lycopersicum*) bajo invernadero a altas temperaturas medioambientales cultivadas con tres diferentes frecuencias de riego



4.1 INTRODUCCIÓN

Las zonas productivas de tomate en España son principalmente la Región de Murcia, y la Comunidad de Andalucía. En estas zonas la temperatura que se alcanzan en los invernaderos durante los meses de primavera y verano sobrepasan la temperatura óptima para el cultivo de tomate que suele estar entre 25 y 30 °C, dependiendo de la variedad. Por lo tanto, los invernaderos deben estar equipados con un sistema de refrigeración que impida que durante el día se llegue a temperaturas superiores a 30 °C. Sin embargo, mantener la temperatura del invernadero por debajo de la temperatura óptima requiere un coste adicional tanto de agua como de electricidad que suele encarecer el coste de producción.

La variedad “Anairis” es una de las más cultivadas en la Región de Murcia, sin embargo, no se conoce aún su respuesta a determinados factores medioambientales entre ellos la temperatura.

Por otra parte, recientemente se está incrementando el interés por la producción de hortalizas en sistemas sin suelo. El adecuado suministro de agua y nutrientes en estos sistemas es fundamental para optimizar la economía del agua, ahorrar fertilizantes, evitar situaciones de estrés y obtener producciones estables. La automatización del control de riego con la aplicación de nuevas tecnologías basadas en tomar datos en tiempo real sobre la radiación acumulada, temperatura y humedad ambiental, volumen de riego aplicado, volumen y conductividad eléctrica del drenaje, permite desarrollar programas de riego inteligente que son capaces de decidir de forma automática cuando y cuanto regar a partir de una serie de variables determinadas por el agricultor. Un manejo de riego adecuado según las condiciones tanto de cultivo como medioambientales pueden mejorar el uso eficaz del agua y los fertilizantes obteniendo una óptima producción con una cualidades idóneas para la comercialización de los frutos.

Por lo tanto, este experimento tiene como objetivo evaluar las respuestas agronómicas y fisiológicas de las plantas de tomate “Anairis” cultivadas en perlita con dos temperaturas ambientales (25 °C y 35 °C) combinándolas con tres frecuencias de riego (alta, FR1; moderada, FR2; baja, FR3) donde para cada frecuencia la cantidad de agua que se aplica en cada evento de riego depende de la CE del porcentaje de la solución de drenaje y de la radiación acumulada entre riegos.

4.2 MATERIAL Y MÉTODOS

4.2.1 Material vegetal y condiciones de cultivo

El experimento se llevó a cabo en el año 2012 en los invernaderos de la finca experimental “Tres Caminos” del Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura (CEBAS, Santomera, Murcia) durante un período de 5 meses comprendido entre Abril y Agosto, ambos incluidos. Se emplearon plantas de tomate (*Lycopersicum esculentum*) variedad “Anairis”, provenientes del semillero “Semilleros José y Belén” en Albaterra (Alicante).

El invernadero está dividido en tres módulos independientes. Cada uno de estos módulos tiene una superficie de 462,5 m² (25 x 18.5 m) y está formado por 2 naves tipo capilla. La altura es de 5 metros a la canal y de 7,5 a la cumbre. Está construido con policarbonato. A su vez los módulos están separados por una doble pared interna del mismo material (Foto 4.1).

En el modelo 1 se fijó la temperatura a 25 °C y el 2 se fijó a 35 °C. Cuando la temperatura sobrepasaba este valor, el software que controla el invernadero ponía en marcha una serie de acciones para mantener estas temperaturas. Así, el invernadero a 25 °C registró una temperatura media de 27 °C y de 20 °C durante el día y la noche, respectivamente. Y el invernadero a 35 °C registró valores de 33 °C y 20 °C. Las horas de luz diarias y la intensidad lumínica fueron variables dependiendo del mes en curso pero se pueden considerar como válidos valores de media de 13 horas de luz diarias y de 400 W/m² de intensidad lumínica.



Fotografía 4.1. Vista parcial del invernadero donde se realizó el experimento y de los sistemas de riego y sensores de temperatura, humedad y radiación.

Las técnicas de cultivo empleadas en el tomate, fueron similares a las utilizadas en los invernaderos comerciales. Las plantas fueron entutoradas con hilo de rafia y la poda

consistió en dejar una sola guía, eliminando los tallos secundarios conforme iban saliendo. El agua utilizada fue del Taibilla, con una composición de 1,2 mM de Ca, 0,7 mM de Mg y 1,1 mM de S, a la cual se le agregaron las concentraciones necesarias de macro y micro nutrientes hasta lograr una solución Hoagland (ver experimento anterior) que fue la utilizada para el riego en todo el experimento.

En la solución nutritiva de riego se controlaba diariamente el pH manteniéndolo en un rango entre 5,5 y 6 y la CE entre 2,00 y 2,50 dS/m². Se tomaban dos mediciones semanales del pH y la CE del drenaje mediante la cual podíamos conocer la necesidad de una mayor o menor frecuencia de riego debido al posible incremento de la CE. Semanalmente se realizaron análisis de nutrientes a las cubas de riego y se reincorporaban los nutrientes que se necesitaba hasta reajustar nuevamente la solución nutritiva.

Las condiciones de temperatura medias fueron de 27 °C y 20 °C de media, de día y de noche respectivamente para el invernadero de 25 °C y de 33 °C y 20 °C en el de 35. Las horas de luz y la intensidad lumínica fueron variables dependiendo el mes del año, ya que el cultivo abarcó desde abril a agosto, de media se podrían dar valores de 13 horas de luz diarias y 400 w/m² de intensidad lumínica.

El control fitosanitario se realizó mediante colocación de trampas cromatópicas de color amarillo para mosca blanca (*Trialeurodes vaporariorum* y *Bemisia tabaci*), pulgones (*Myzus persicae* y *Aphis gossypii*), y de color azul para los trips (*Frankliniella occidentalis*) principales vectores de virosis, combinado con aplicaciones foliares de las siguientes materias activas: metil-clorpirifos (Redlan E), ciromazina (Trigard) para minador y para tuta, benzoato (Affirm).

Para el control de los diferentes parámetros de temperatura, humedad, ventilación y radiación se contaban con varios dispositivos:

- **Sistema de Ventilación:** Consiste en 1/4 de arco mariposa motorizada en todos los bloques.
- **Pantalla de sombrero:** La pantalla del techo es el modelo IC50, cuyas especificaciones técnicas son 48 % de sombreado y 55 % de ahorro energético. En los canalones hay pantalla transparente, cuyas especificaciones técnicas son 22 % de sombrero y 43 % de ahorro energético. La pantalla del techo posee un sistema de tracción mecánica y automático para la apertura y cierre de la pantalla.
- **Sistema de Refrigeración** Para la refrigeración del invernadero, se cuenta con el sistema “AirCooling”. Está formado por un módulo de humectación, nueve extractores

tipo axial (helicoidal), con persiana de apertura-cierre automático por sistema mecánico (centrifugo de empuje). Los extractores tienen un caudal de 38000 m³/h. También cuenta con malla anti insectos.

- **Sistema de Humidificación. AIR-FOG** Para el control de la humedad interior y aplicación de fitosanitarios se dispone de este sistema. Las conducciones de aire y agua son de PE _63 de uso alimentario con una densidad de boquillas 1 Ud/18 m² con caudal de aire 0.83 m³/h y caudal de agua 5.94 L/h. Tiene un grupo de presión JH 15 5M de 25 L (1CV) con acumulador de 25 L. Un compresor de aire de 4 CV con calderín de 50 L AIRFOG 2.5-4.12 de 5,5 CV con capacidad para proporcionar la presión y caudal de aire necesario para el trabajo en 2 sectores.

- **Sistema de Calefacción.** Formado por caldera de 100000 Kcal con quemador de gasoil de 1 etapa. Electrobomba aceleradora de 1 CV Inox y calderín de expansión de 25L. Intercambiador de placas de acero inoxidable. Electrobombas aceleradoras de 1 CV para 3 unidades de distribución. Circuito de conducción invernadero de PVC_n50 mm Pn10 bar. Circuitos de emisión de calor con tubería de PE _n16mm con 40 líneas de ida y 40 de retorno. Calderín de presión de 100 L para circuito secundario.

El invernadero incluye un sistema de sensores de radiación, de temperatura y de humedad relativa colocados a una altura de 1.5 m. Todos los valores se recogen periódicamente y son almacenados en una base de datos para su posterior procesamiento.

4.2.2 Diseño experimental

El diseño experimental fue bifactorial (2 temperaturas x 3 tratamientos de manejo de riego) en dos bloques para cada módulo, cuyos tratamientos estaban distribuidos al azar. Las dos temperaturas fueron de 25°C y 35°C y se combinaron factorialmente con los tres manejos de riego: Frecuencia de Riego Alta (FR1), Frecuencia de Riego Media (FR2) y Frecuencia de Riego Baja (FR3). En cada uno de los módulos se cultivaron 54 plantas de tomate (27 plantas/bloque) en sacos de 40 L sobre sustrato de perlita y con solución nutritiva Hoagland (Fig. 4.1). Los tratamientos tanto de temperatura como de manejo, comenzaron una semana después del trasplante para evitar que un posible choque osmótico pudiese ocasionar que los tratamientos se vieran falseados por el proceso de adaptación de las plantas a su nuevo sustrato.

En la tabla 4.1 se muestran los valores de temperatura, humedad relativa e irradiación en el interior del invernadero registrados durante el período de tiempo en se desarrolló el experimento (abril-agosto, 2012).

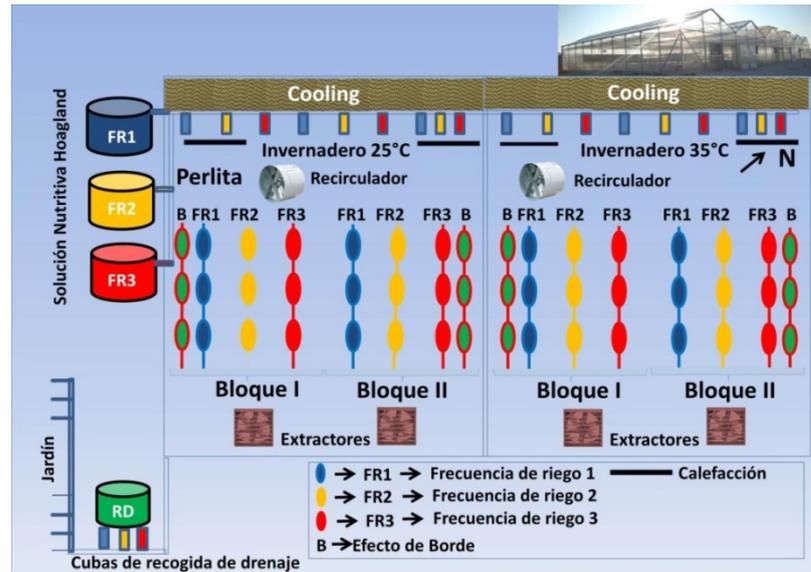


Figura 4.1. Diseño experimental, fotografía y planta del invernadero, con la disposición de los experimentos en sustrato de perlita, con sistemas de aporte de solución nutritiva (SN), cuba azul (frecuencia de riego 1, FR1), cuba amarilla (frecuencia de riego 2, FR2), cuba roja (frecuencia de riego 3, FR3) y cuba verde sistema de recogida de drenaje (RD).

Tabla 4.1. Valores medios, mínimos y máximos de temperatura, humedad relativa e irradiación en el interior del invernadero durante el experimento.

Invernadero	T ^a Mínima (°C)		T ^a Media (°C)		T ^a Máxima (°C)	
	Día	Noche	Día	Noche	Día	Noche
25 °C	20,52	17,52	26,20	21,38	32,60	25,39
35 °C	21,47	17,82	31,05	21,89	37,31	28,63
Humedad Relativa (%)			Irradiación (W/m ²)			
	Mínima	Media	Máxima	Mínima	Media	Máxima
25 °C	45,41	66,78	89,82	322	419	480
35 °C	44,33	62,19	85,64	331	415	491

4.2.3 Descripción del sistema de cultivo

El sustrato de cultivo utilizado fue perlita, en sacos con las mismas características descritas en el Capítulo 3 para el experimento realizado en el año 2010. Para cada fila se utilizaron 3 sacos. La densidad de plantación utilizada fue de 2.5 plantas/m² colocando tres plantas por saco (Foto 4.2).



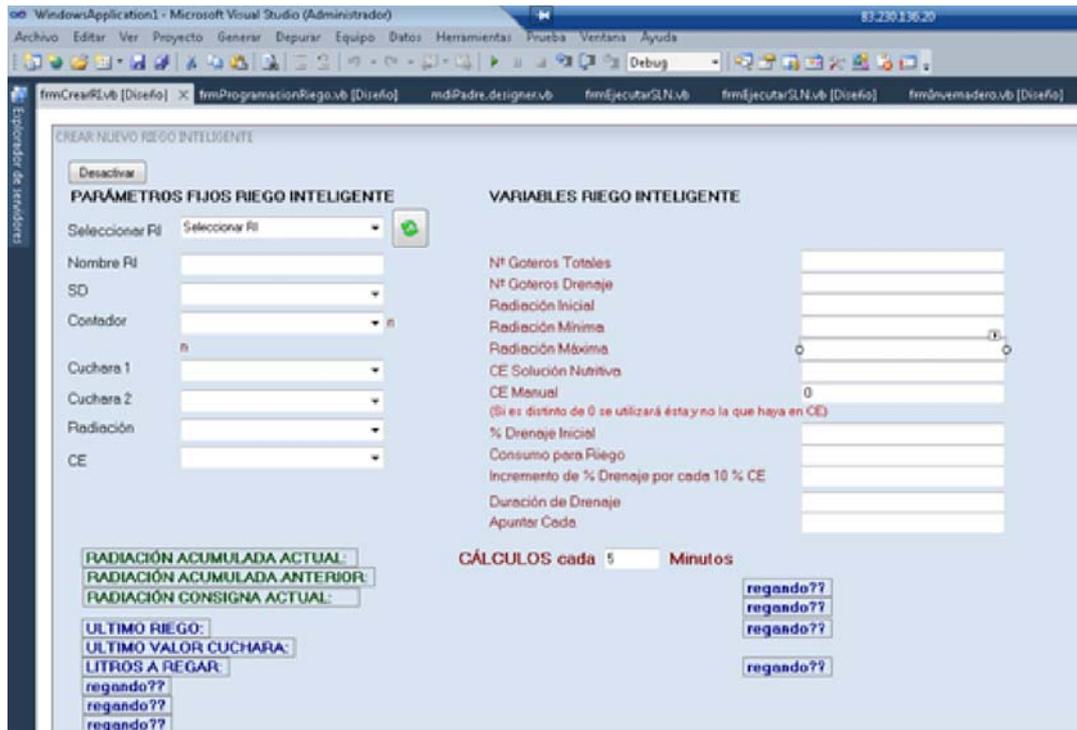
Fotografía 4.2. *Detalle del sistema de cultivo utilizado.*

Manejo del riego

Para la determinación del momento y la cantidad de riego, se utilizaron los parámetros de radiación acumulada (Rad_{ACUM}), volumen de solución nutritiva drenado y la CE de la solución de drenaje. En base al agua consumida por la planta en función de la Rad_{ACUM} se establecieron las diferentes estrategias de riego. Dando como consigna que el software (Foto 4.3) activara el riego cuando la planta consumía 0,4; 0,8 y 1,2 litro. Mediante los datos de volumen regado, volumen drenado y Rad_{ACUM} entre riegos, el programa ajustaba matemáticamente la Rad_{ACUM} y el agua consumida por la planta.

La cantidad regada por planta, también tenía en cuenta la CE de la $SN_{DRENAJE}$. Así como cada vez que en la $SN_{DRENAJE}$ se observaba un incremento del 10 % de la CE del drenaje del riego anterior, se incrementaba en un 15 % la cantidad a regar.

Como consecuencia, se producía un lavado de las sales acumuladas y por tanto una disminución de la CE de la solución del sustrato. El consumo de agua fue evaluado como consumo total por planta para cada tratamiento. Las medidas de conductividad eléctrica del drenaje se realizaron de forma ininterrumpida durante todo el desarrollo del experimento (Tabla 4.2).



Fotografía 4.3. Detalle del software controlador del manejo del riego.

Tabla 4.2. Consumo total por plantas y conductividad eléctrica del drenaje.

Temperatura	Frecuencia de riego	Consumo total por planta (Litros)	CE Drenaje (dS m ⁻¹)
25 °C	FR1	243	4,82
	FR2	218	4,92
	FR3	163	7
35 °C	FR1	257	5,04
	FR2	243	5,14
	FR3	211	8,2

4.2.4 Determinaciones analíticas

El rendimiento de frutos, los parámetros de calidad del fruto (color, índice de forma, dureza, firmeza, pH, CE, sólidos solubles totales y acidez valorable), el análisis mineral en el tejido vegetal, raíces y frutos, los parámetros de intercambio gaseoso, parámetros de fluorescencia de clorofilas y relaciones hídricas se realizaron igual que en el Capítulo 3 del Experimento realizado en el 2010 (Ver apartado 3.2.4).

Los frutos se recolectaron cuando comenzaron a madurar y alcanzaban la etapa de pintón a maduro. Todos los frutos fueron pesados individualmente y clasificados por categorías comerciales, según su peso, longitud, diámetro e incidencia de podredumbre apical, rajado o algún tipo de daño mecánico con el objetivo de determinar el rendimiento total y comercial. Las categorías comerciales se establecieron identificando como frutos comerciales a todos los frutos mayores de 70 gramos y sin daños

mecánicos, rajado o podredumbre apical. Así mismo todos los frutos exentos de estas características se clasificaron como frutos no comerciales.

Además de los mencionados en el capítulo 3 también se analizaron en los frutos otros parámetros de calidad como el contenido de ácidos orgánicos, azúcares y fenoles totales.

Los ácidos orgánicos phytico, oxálico, ascórbico, cítrico, málico, succínico, acético y fumárico se evaluaron mediante el método descrito por Carvajal y *col.*, (1997). El análisis de estos compuestos se llevó a cabo mediante cromatografía de fase reversa en un equipo Merck-Hitachi acoplado a un detector UV a longitud de onda 245 nm. Como fase estacionaria se empleó una columna Khromasil C18 5 μm 4x250 mm. Como fase móvil se utilizó una solución 20g/L de hidrógeno fosfato diamónico a pH 2.8 ajustado con ácido ortofosfórico. Previo a su inyección en el HPLC el zumo se pasó a través de un Sep-Pak C-18.

Los azúcares evaluados fueron las hexosas glucosa y fructosa. El análisis de estos compuestos se llevó a cabo mediante cromatografía iónica en un equipo Dionex modelo DX-600 acoplado a un detector de conductividad ED50A. Como fase estacionaria se empleó una columna Dionex CarboPac PA10 4x250 mm. Para preservar la integridad de la columna se instaló además una precolumna Dionex IonPac AG11-HC 4x50 mm. Como fase móvil se empleó una solución 100 mM de NaOH diluidos al 52 % a un flujo de 1 mL min⁻¹. El extracto de zumo fue centrifugado a 5000 g durante 5 min a 4°C y conservado a -80°C hasta su análisis por HPLC. Para la determinación de dichos azúcares, el extracto se diluyó apropiadamente, se pasó a través de un Sep-Pak C-18 y se filtró a través de una membrana Millipore de 0.45 μm de diámetro de poro.

Los datos se registraron y procesaron mediante el software Chromeleon. La cuantificación se realizó mediante comparación del área del pico con respecto a una muestra patrón.

Por su parte, para la determinación del contenido de fenoles totales se utilizó el método Folin-Ciocalteu adaptado a microescala (Waterman, 1994). En cada medición se incluyó una curva de calibración del patrón ácido gálico. La ecuación de dicha curva se empleó para el cálculo de la concentración en las muestras problema según el valor obtenido de absorbancia a 750 nm. Por tanto, los resultados se expresaron en equivalentes de ácido gálico por litro de zumo.

Finalmente las plantas de tomate se dejaron crecer hasta la maduración del décimo racimo y entonces se decapitaron, y se separaron en hojas, tallos, raíz y frutos para posteriormente pesarlos en fresco y posteriormente se guardó material vegetal fresco (hojas, tallos, raíz y frutos) en una estufa a 65°C para peso seco y análisis mineral.

4.2.5 Análisis estadístico

Para el análisis de los datos se aplicó el ANOVA a un diseño bifactorial, dos temperaturas (25°C y 35°C respectivamente) x tres frecuencias de riego (Frecuencia de Riego Alta (FR1), Frecuencia de Riego Moderada (FR2) y Frecuencia de Riego Baja (FR3). Cuando uno de los factores principales temperatura o frecuencia de riego fue significativo, $p < 0,05$ las medias fueron separadas por el Test de Rango Múltiple de Duncan. Cuando la interacción fue significativa, se realizó el Test de separación de medias de Duncan de dos formas diferentes: i) comparando los efectos de la frecuencia de riego para cada tratamiento de temperatura utilizando letras minúsculas para identificar diferencias significativas entre las frecuencias de riego.; ii) comparando el efecto de la temperatura para cada frecuencia de riego, utilizando letras mayúsculas para identificar diferencias significativas entre los tratamientos de temperatura.

4.3 Resultados

4.3.1 Producción y calidad de frutos

4.3.1.1 Rendimiento total, comercial y no comercial

La producción total de frutos fue mayor en plantas de tomate cultivadas en el invernadero a 25 °C que aquellas cultivadas a 35 °C, pasando de 6,0 kg a 3,8 kg por planta, respectivamente. Esta pérdida de producción con temperaturas altas fue debida a que los frutos pesaron 50 g menos en relación a los frutos del invernadero a 25 °C; sin embargo, el número de frutos por planta no fue afectado por la temperatura. La frecuencia de riego también afectó significativamente a la producción, así el tratamiento de menor frecuencia de riego (FR3) tuvo una menor producción que los otros dos tratamientos, FR1 y FR2, debido a que las plantas con el tratamiento FR3 tuvieron 7 frutos menos con una pérdida de peso de 30 g por fruto con respecto al resto de tratamientos. Por lo tanto, la mayor producción de tomates se dieron en las plantas cultivadas a 25 °C y con la frecuencia FR1 y FR2; mientras que la menor producción se dio a la temperatura de 35 °C y con una baja frecuencia de riego (FR3) (Tabla 4.3 y Fig 4.1).

Tabla 4.3. Efectos de la temperatura y la frecuencia de riego sobre parámetros de rendimiento total en plantas de tomate.

		Peso total frutos (kg planta ⁻¹)	Nº frutos	P. medio fruto (g)
Factor principal: T^a				
	25 °C	6,0±0,2	40±5	154±26
	35 °C	3,8±0,2	37±6	105±17
Factor principal: Riego				
	FR1	5,7±0,42a	41±1a	141,5±10a
	FR2	5,3±0,38a	40±1a	134,4±9a
	FR3	3,3±0,31b	34±1b	112,9±27b
ANOVA				
	T ^a	***	ns	***
	Riego	***	**	**
	T ^a x Riego	ns	ns	ns

, * y “ns” indican diferencias significativas a $p < 0,01$, $p < 0,001$ y no significativas, respectivamente. Para cada columna, valores con diferentes letras presentan diferencias significativas al 95% según el test de Rango múltiple de Duncan. Los valores de cada uno de los parámetros son valores medios \pm error estándar.

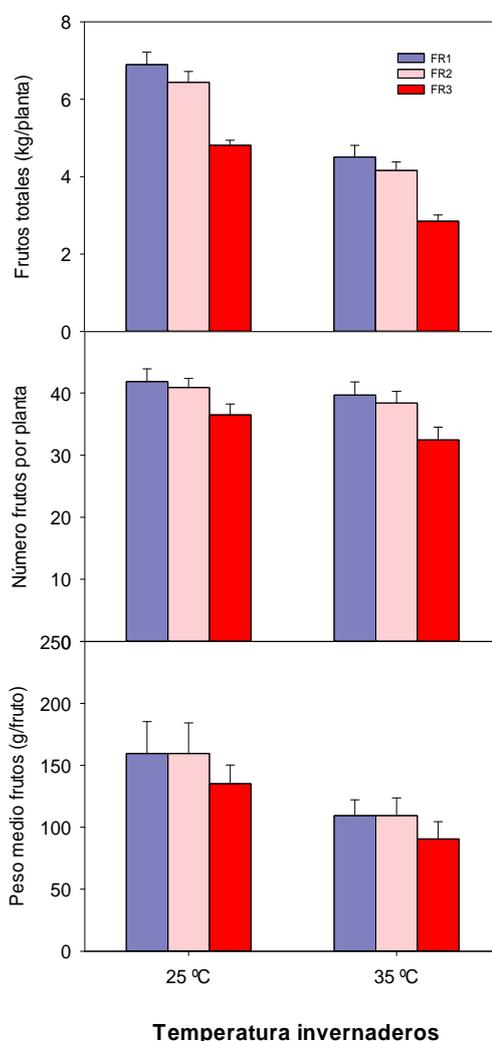


Figura 4.1. Efecto de la temperatura de los invernaderos (25 °C y 35 °C) sobre parámetros de rendimiento total en plantas de tomate cultivadas con tres frecuencias de riego (FR1, alta; FR2, mediana; FR3 baja). La barra de error indica el error estándar de la media (n=8).

En la producción comercial de frutos no se tienen en cuenta los frutos afectados por BER con síntomas superiores al 10 % de la superficie total del fruto, los frutos con un peso menor de 70 g, y frutos con síntomas de rajado. Los datos muestran que la producción comercial disminuyó 3 kg por planta con la temperatura de 35 °C con respecto al invernadero de 25 °C, y esto fue debido tanto a la disminución del número de frutos como a la pérdida de peso de los mismos (Tabla 4.4; Fig. 4.2). La baja frecuencia de riego (FR3) también disminuyó la producción comercial en 2 kg por planta con respecto a la alta y mediana frecuencia de riego, FR1 y FR2, ya que tanto el número de frutos como el peso medio de los mismos fueron afectados negativamente. Por lo tanto, igual que observamos en la producción total, la mayor producción de tomates se dieron en las plantas cultivadas a 25 °C cultivadas con la frecuencia de riego FR1 y FR2 (6,3 kg por planta); mientras que la menor producción se dio a temperaturas altas y con la baja frecuencia de riego (1,7 kg por planta).

El aumento del número de frutos no comerciales por la temperatura fue debida a un aumento tanto en el número de frutos pequeños (no superiores a 70 g) como en el número de frutos rajados, sin embargo, el porcentaje de frutos afectados por BER fue mayor en el invernadero a 25 °C (Tabla 4.5; Fig. 4.3). La disminución del número de frutos no comerciales por la frecuencia de riego FR3 con relación a las otras dos frecuencias fue debida solamente al aumento del número de frutos con peso menor de 70 g.

Tabla 4.4. Efectos de la temperatura y la frecuencia de riego sobre parámetros producción comercial en plantas de tomate.

	Peso total frutos (kg planta ⁻¹)	Nº frutos	P. medio fruto (g)
Factor principal: T^a			
25 °C	5,5±3,5	32±1	169,4±6
35 °C	2,5±1,7	18±1	137,2±3
Factor principal: Riego			
FR1	4,70±0,6a	28±3a	163,7±8a
FR2	4,4±0,5a	27±2a	157,9±7a
FR3	2,8±0,4b	19±2b	138,4±6b
ANOVA			
T ^a	***	***	***
Riego	***	***	**
T ^a x Riego	*	ns	ns

*, **, *** y “ns” indican diferencias significativas a $p < 0,05$, $p < 0,01$, $p < 0,001$ y no significativas, respectivamente. Para cada columna, valores con diferentes letras presentan diferencias significativas al 95% según el test de Rango múltiple de Duncan. Los valores de cada uno de los parámetros son valores medios ± error estándar.

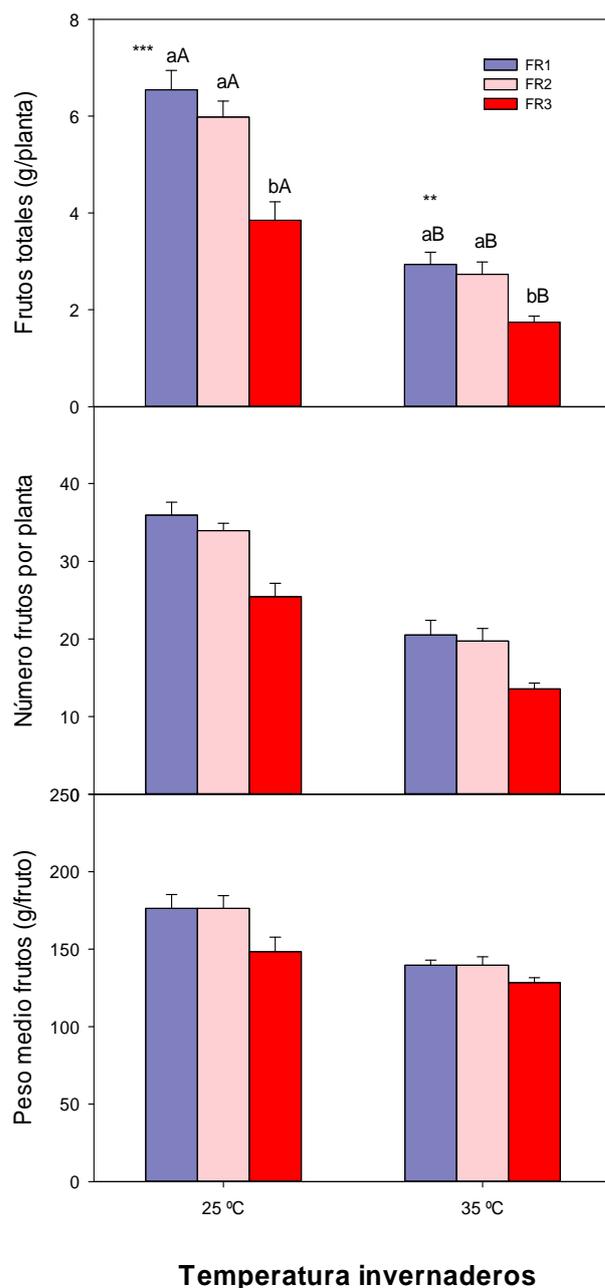


Figura 4.2. Efecto de la temperatura de los invernaderos (25 °C y 35 °C) sobre parámetros de rendimiento comercial en plantas de tomate cultivadas con tres frecuencias de riego (FR1, alta; FR2, mediana; FR3 baja). La barra de error indica el error estándar de la media (n=8). ** y *** indican diferencias significativas a $p < 0,01$ y $p < 0,001$ entre los tratamientos de riego para cada invernadero. Valores con diferentes letras presentan diferencias significativas al 95% según el test de Rango múltiple de Duncan. Letras minúsculas comparan los tratamientos de frecuencia de riego para cada temperatura. Letras mayúsculas comparan las temperaturas para cada frecuencia de riego.

Tabla 4.5. Efectos de la temperatura y la frecuencia de riego sobre parámetros producción no comercial en plantas de tomate. El % representa el porcentaje de frutos cuyo peso es menor de 70 g, frutos rajados o frutos con BER en relación al número total de frutos.

	Peso total frutos (kg)	Nº frutos	% frutos < 70 g	% frutos rajados	% frutos BER
Factor principal: Temperatura					
25 °C	0,54±0,1	8±1	19±4	2±0.65	13±1
35 °C	1,3±0,1	19±1	35±4	17±1	8±0.8
Factor principal: Frecuencia					
FR1	0,96±0,2	12±2	18±3b	10±3	10±1
FR2	0,86±0,1	13±2	24±6b	8±2	9±1
FR3	0,95±0,1	16±2	39±5a	11±2	12±2
ANOVA					
Tª	***	***	***	***	*
Riego	ns	ns	*	ns	ns
Tª x Riego	**	ns	ns	ns	ns

*, **, *** y “ns” indican diferencias significativas a $p < 0,05$, $p < 0,01$, $p < 0,001$ y no significativas, respectivamente. Para cada columna, valores con diferentes letras presentan diferencias significativas al 95% según el test de Rango múltiple de Duncan. Los valores de cada uno de los parámetros son valores medios ± error estándar.

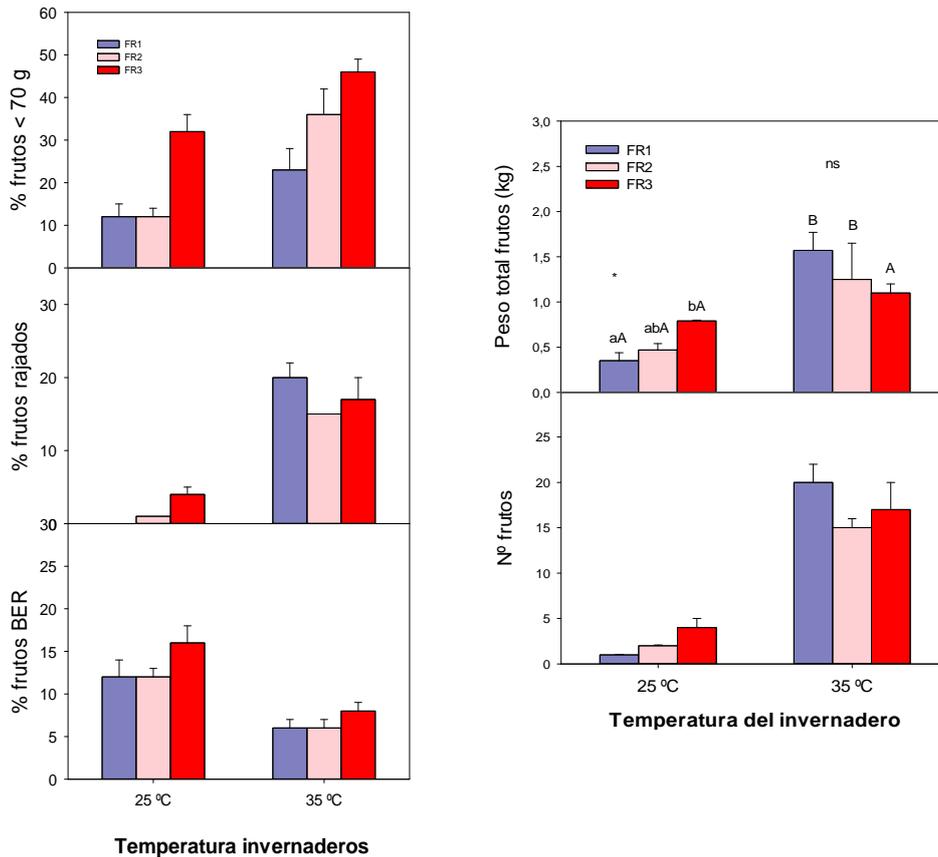


Figura 4.3. Efecto de la temperatura de los invernaderos (25 °C y 35 °C) sobre parámetros de rendimiento no comercial en plantas de tomate cultivadas con tres frecuencias de riego (FR1, alta; FR2, mediana; FR3 baja). La barra de error indica el error estándar de la media (n=8). El % representa el porcentaje de frutos cuyo peso es menor de 70 g, frutos rajados o frutos con BER en relación al número total de frutos. * y “ns” indican diferencias significativas a $p < 0,01$ y diferencias no significativas entre los tratamientos de riego para cada invernadero. Valores con diferentes letras presentan diferencias significativas al 95% según el test de Rango múltiple de Duncan. Letras minúsculas comparan los tratamientos de frecuencia de riego para cada temperatura. Letras mayúsculas comparan las temperaturas para cada frecuencia de riego.

4.3.1.2 Calidad de frutos

Los frutos de las plantas de tomate variedad “Anairis” se caracterizaron por un diámetro ecuatorial de 77,2 mm, diámetro longitudinal de 56,9, índice de forma de 0,73, dureza de 9,56 N m⁻², y firmeza de 30,6 (N) (Tabla 4.6; Fig. 4.4). Estos parámetros no fueron afectados ni por la temperatura ni por la frecuencia de riego. En los parámetros de color los frutos cultivados en el invernadero de alta temperatura tuvieron un valor de a*, a*/b* e índice de color menor que los frutos cultivados a 25 °C. Por otro lado, la frecuencia de riego más baja (tratamiento FR3) dio frutos con un mayor valor de b*, y por tanto una menor relación a*/b* e índice de color (Tabla 4.7; Fig. 4.5), comparado a las otras dos frecuencias de riego.

Tabla 4.6. Efectos de la temperatura y la frecuencia de riego sobre las características físicas diámetro ecuatorial, diámetro longitudinal, índice de forma, dureza y firmeza de frutos de tomate.

	D. Ecuatorial (mm)	D. Longitudinal (mm)	I. Forma	Dureza (N/m ²)	Firmeza (N)
Factor principal: T^a					
25 °C	78,8±1,1	58,1±0,8	0,74±0,01	9,43±0,3	31,1±0,8
35 °C	75,6±1,5	55,7±0,8	0,73±0,01	9,70±0,3	30,1±1,4
Factor principal: Riego					
FR1	76,5±1,9	57,2±1,1	0,75±0,009	9,74±0,5	30,9±1,4
FR2	80,2±1,3	58,0±1,1	0,72±0,008	9,62±0,3	32,2±1,6
FR3	74,4±1,3	55,2±0,9	0,74±0,012	9,32±0,4	28,3±1,3
ANOVA					
T ^a	ns	ns	ns	ns	ns
Riego	ns	ns	ns	ns	ns
T ^a x Riego	ns	ns	ns	ns	ns

ns indican diferencias no significativas. Los valores de cada uno de los parámetros son valores medios ± error estándar.

Tabla 4.7. Efectos de la temperatura y la frecuencia de riego sobre las coordenadas de luminosidad L, a*, b*, a*/b* e índice de color de frutos de tomate.

	L	a*	b*	a*/b*	Índice color
Factor principal: T^a					
25 °C	43,3±0,3	18,9±0,4	27,4±0,3	0,69±0,02	16,1±0,5
35 °C	44,2±0,3	16,9±0,4	27,7±0,4	0,61±0,02	14,0±0,5
Factor principal: Riego					
FR1	43,6±0,3	17,9±0,7	26,7±0,3b	0,67±0,02a	15,5±0,7a
FR2	43,2±0,4	18,6±0,5	27,3±0,6ab	0,68±0,02a	15,9±0,7a
FR3	44,6±0,3	17,1±0,6	28,7±0,4a	0,59±0,02b	13,5±0,6b
ANOVA					
T ^a	ns	**	ns	**	*
Riego	ns	ns	*	*	*
T ^a x Riego	ns	ns	ns	ns	ns

*, **, y “ns” indican diferencias significativas a $p < 0,05$, $p < 0,01$, y no significativas, respectivamente. Para cada columna, valores con diferentes letras presentan diferencias significativas al 95% según el test de Rango múltiple de Duncan. Los valores de cada uno de los parámetros son valores medios ± error estándar.

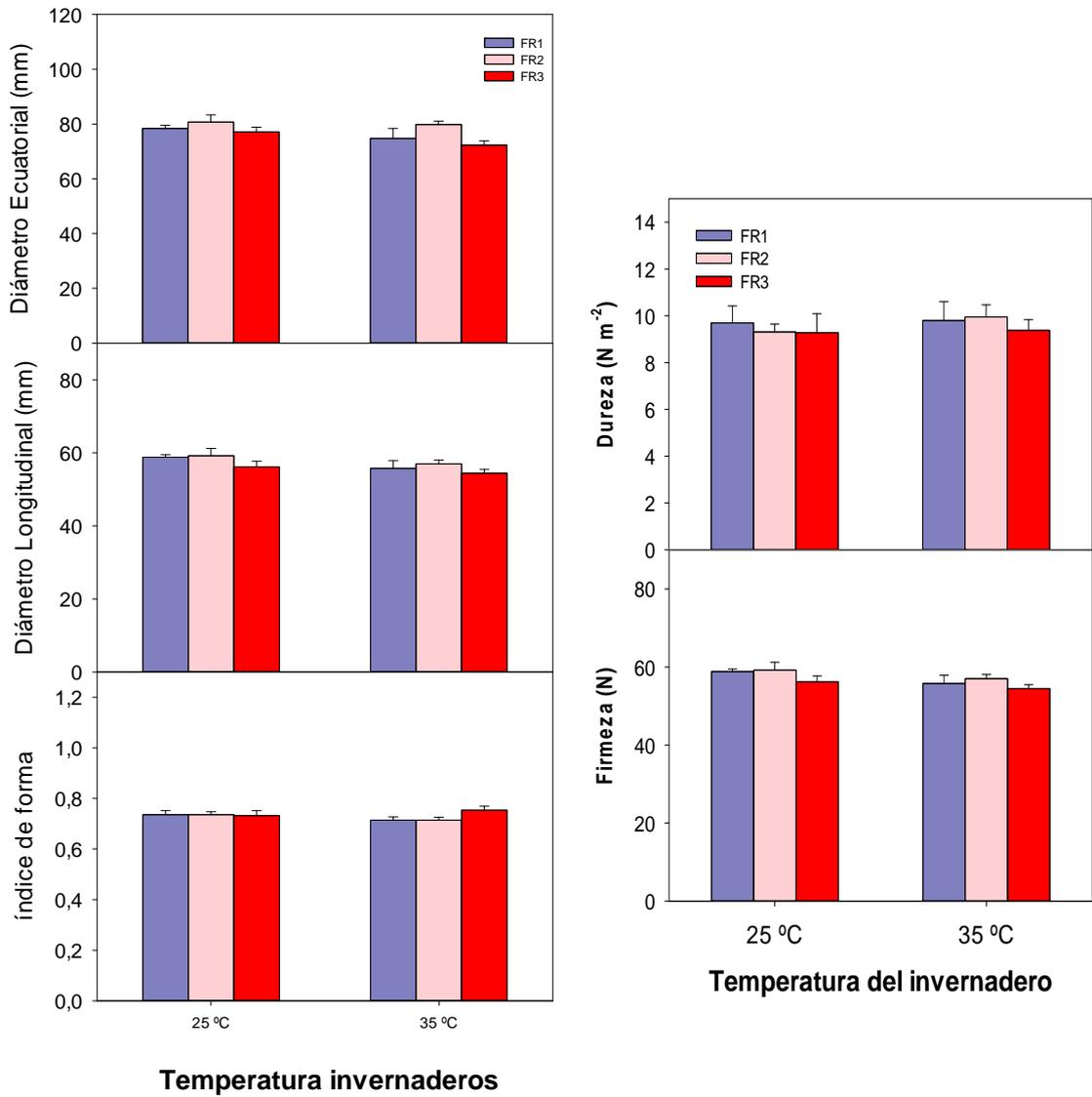


Figura 4.4. Efecto de la temperatura de los invernaderos (25 °C y 35 °C) sobre sobre las características físicas diámetro ecuatorial, diámetro longitudinal, índice de forma, dureza y firmeza de frutos de plantas de tomate cultivadas con tres frecuencias de riego (FR1, alta; FR2, mediana; FR3 baja). La barra de error indica el error estándar de la media (n=8).

La temperatura alta también afectó a las características químicas de los frutos, disminuyendo el pH y la conductividad eléctrica, y aumentando los SST. La alta frecuencia de riego aumentó los SST y disminuyó el pH con respecto a las frecuencias FR1 y FR2. Entonces, los frutos que fueron cultivados a 35 °C y con una baja frecuencia de riego (FR3) tuvieron la mayor concentración en SST (Tabla 4.8 y Figura 4.6).

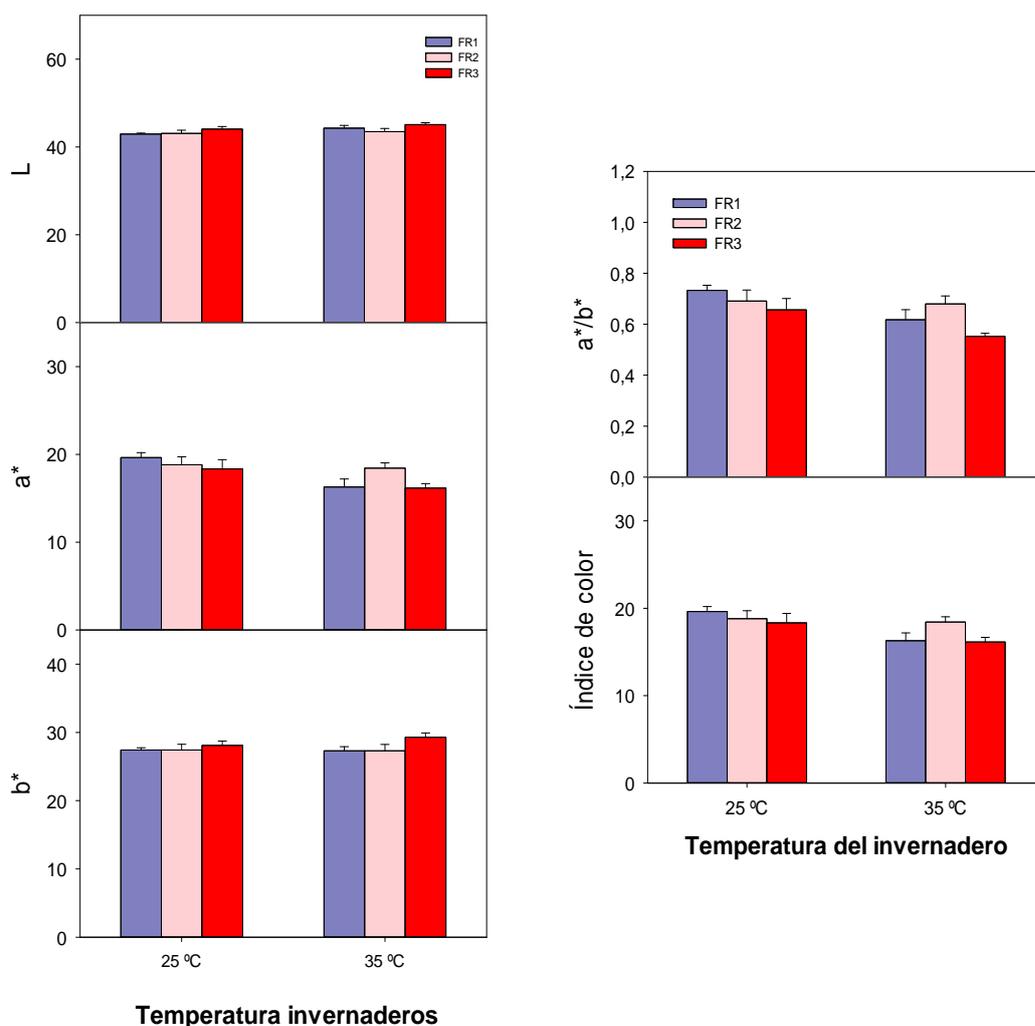


Figura 4.5. Efecto de la temperatura de los invernaderos (25 °C y 35 °C) sobre las coordenadas de luminosidad L, a*, b*, a*/b* e índice de color de frutos de plantas de tomate cultivadas con tres frecuencias de riego (FR1, alta; FR2, mediana; FR3 baja). La barra de error indica el error estándar de la media (n=8).

La concentración de glucosa y fructosa incrementó tanto con la temperatura como con la baja frecuencia de riego (FR3), así que los valores más altos se observaron en el tratamiento de 35 °C para la frecuencia de riego FR3 (Tabla 4.9, Fig. 4.7). La concentración de fenoles fue similar en frutos cultivados en ambas temperaturas para el riego FR1; sin embargo al disminuir la frecuencia de riego la concentración se incrementó en el invernadero a 25 °C, no hubo diferencias significativas entre el tratamiento FR1 y los tratamientos FR2 y FR3 a 35 °C.

La concentración de ácidos phytico, oxálico, succínico y acético fue mayor en los frutos de las plantas desarrolladas a temperatura de 25 °C, mientras que los ácidos cítrico, málico y ascórbico aumentaron sus concentraciones en frutos de plantas sometidas a la temperatura alta (35 °C). El ácido fumárico, no fue afectado por la temperatura. En relación a la frecuencia del riego se observaron diferencias significativas solo en los ácidos phytico y cítrico, aumentando la concentración de éstos en la medida en que la planta recibía SN menos frecuentemente. Los datos del análisis de la varianza muestran que en los ácidos medidos no hubo una interacción significativa entre la temperatura y la frecuencia de riego (tabla 4.10, fig. 4.8 y fig 4.9).

Tabla 4.8. Efectos de la temperatura y la frecuencia de riego sobre el pH, conductividad eléctrica (CE), sólidos solubles totales (SST), acidez valorable (TA) e índice de madurez (IM) en frutos de tomate.

	pH	CE (dS m ⁻²)	SST (°Brix)	TA (ac. Cítrico g/l)	IM
Factor principal: T^a					
25 °C	4,46±0,01	4,27±0,0	5,33±0,1	42,91±1,75	1,24±0,21
35 °C	4,36±0,01	3,78±0,1	5,67±0,1	42,12±1,56	1,35±0,21
Factor principal: Riego					
FR1	4,45±0,02a	3,81±0,1	5,28±0,11b	43,29±1,95	1,21±0,20
FR2	4,41±0,02ab	4,01±0,1	5,37±0,09b	41,15±1,95	1,31±0,22
FR3	4,36±0,01b	4,24±0,1	5,89±0,14a	43,29±1,95	1,36±0,20
ANOVA					
T ^a	***	**	*	ns	ns
Riego	**	ns	**	ns	ns
T ^a x Riego	ns	ns	ns	ns	ns

*, **, *** y “ns” indican diferencias significativas a $p < 0,05$, $p < 0,01$, $p < 0,001$ y no significativas, respectivamente. Para cada columna, valores con diferentes letras presentan diferencias significativas al 95 % según el test de Rango múltiple de Duncan. Los valores de cada uno de los parámetros son valores medios ± error estándar.

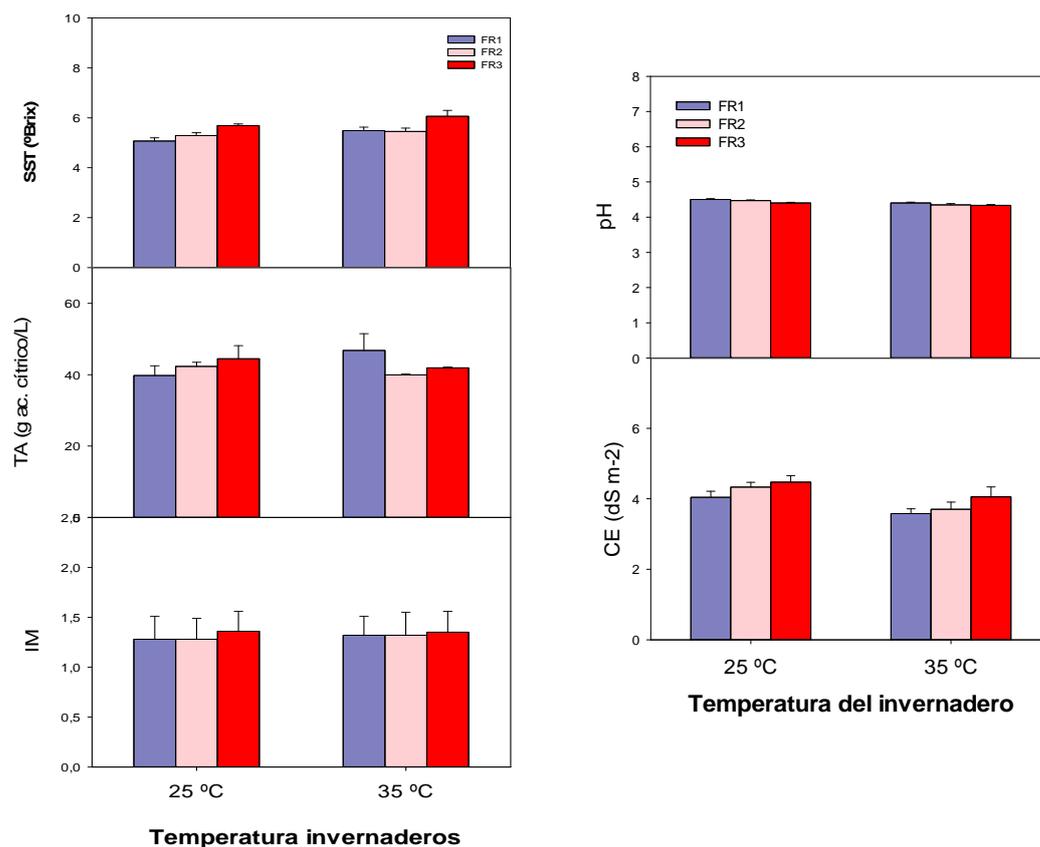


Figura 4.6. Efecto de la temperatura de los invernaderos (25 °C y 35 °C) sobre el pH, conductividad eléctrica (CE), sólidos solubles totales (SST), acidez valorable (TA) e índice de madurez (IM) en frutos de tomate cultivadas con tres frecuencias de riego (FR1, alta; FR2, mediana; FR3 baja). La barra de error indica el error estándar de la media (n=8).

Tabla 4.9. Efectos de la temperatura y la frecuencia de riego sobre la concentración de glucosa, fructosa y fenoles en frutos de tomate.

	Glucosa (g/L)	Fructosa (g/L)	Fenoles (mg/L ác gálico)
Factor principal: T^a			
25 °C	8,78±0,20	1,08±0,29	88,38±2,66
35 °C	9,81±0,27	1,19±0,36	75,10±1,92
Factor principal: Riego			
FR1	8,72±0,28b	1,06±0,40b	73,23±2,32b
FR2	8,99±0,27b	1,09±0,37b	82,61±2,95b
FR3	1,029±0,28a	1,26±0,36a	90,26±3,24a
ANOVA			
T ^a	**	*	***
Riego	**	**	***
T ^a x Riego	ns	ns	***

*, **, *** y "ns" indican diferencias significativas a $p < 0,05$, $p < 0,01$, $p < 0,001$ y no significativas, respectivamente. Para cada columna, valores con diferentes letras presentan diferencias significativas al 95 % según el test de Rango múltiple de Duncan. Los valores de cada uno de los parámetros son valores medios \pm error estándar.

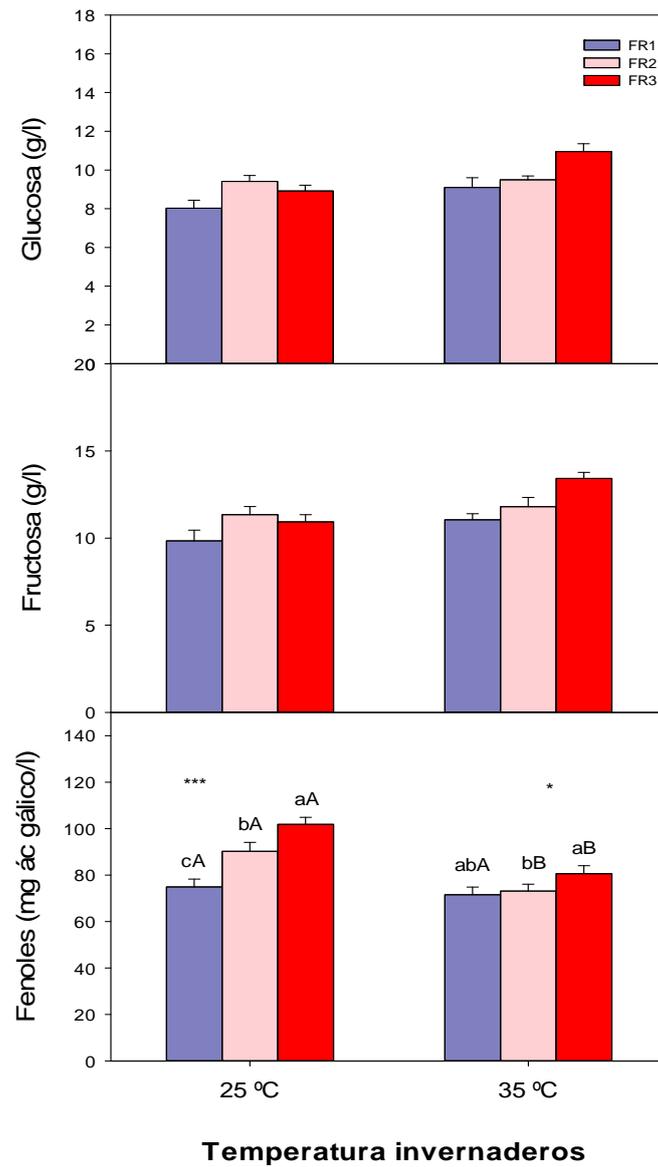


Figura 4.7. Efecto de la temperatura de los invernaderos (25 °C y 35 °C) sobre la concentración de glucosa, fructosa y fenoles en frutos de tomate cultivados con tres frecuencias de riego (FR1, alta; FR2, mediana; FR3 baja). La barra de error indica el error estándar de la media (n=8). * y *** indican diferencias significativas a $p < 0,05$ y $p < 0,001$ respectivamente, entre los tratamientos de riego para cada invernadero. Valores con diferentes letras presentan diferencias significativas al 95% según el test de Rango múltiple de Duncan. Letras minúsculas comparan los tratamientos de frecuencia de riego para cada temperatura. Letras mayúsculas comparan las temperaturas para cada frecuencia de riego.

Tabla 4.10. Efecto de la temperatura y el manejo de la frecuencia del riego sobre los ácidos orgánicos, fítico, oxálico, cítrico, málico, ascórbico, succínico, acético y fumárico de frutos de tomate.

	Ac. Fítico (mg/100 g)	Ac. Oxálico (mg/100 g)	Ac. Cítrico (mg/100 g)	Ac. Málico (mg/100 g)
Factor principal: T^a				
25 °C	37,6±1,07	29,0±1,37	397,±7,88	112,±3,23
35 °C	33,1±2,08	10,9±0,60	435,±18,1	137,±3,65
Factor principal: Riego				
FR1	32,3±5,69b	21,0±4,58	385,±19,6b	126,±11,2
FR2	34,2±5,85ab	20,3±4,51	399,±19,9b	126,±11,2
FR3	40,2±6,34a	18,9±4,34	470,±21,6a	121,±11,0
ANOVA				
T^a	*	***	*	***
Riego	*	ns	**	ns
T^a x Riego	ns	ns	ns	ns
	Ac. Ascórbico (mg/100 g)	Ac. Succínico (mg/100 g)	Ac. Acético (mg/100 g)	Ac. Fumárico (mg/100g)
Factor principal: T^a				
25 °C	8,06±0,74	16,9±0,33	8,32±0,56	1,72±0,05
35 °C	15,7±1,31	12,9±0,23	3,26±0,41	1,72±0,20
Factor principal: Riego				
FR1	10,2±3,20	15,0±3,88	5,58±2,36	1,85±1,36
FR2	10,8±3,29	15,2±3,89	5,83±2,41	1,87±1,37
FR3	14,8±3,85	14,6±3,82	6,10±2,47	1,39±1,17
ANOVA				
T^a	***	***	***	ns
Riego	ns	ns	ns	ns
T^a x Riego	ns	ns	ns	ns

*, **, *** y "ns" indican diferencias significativas a $p < 0,05$, $p < 0,01$, $p < 0,001$ y no significativas, respectivamente. Para cada columna, valores con diferentes letras presentan diferencias significativas al 95 % según el test de Rango múltiple de Duncan. Los valores de cada uno de los parámetros son valores medios \pm error estándar.

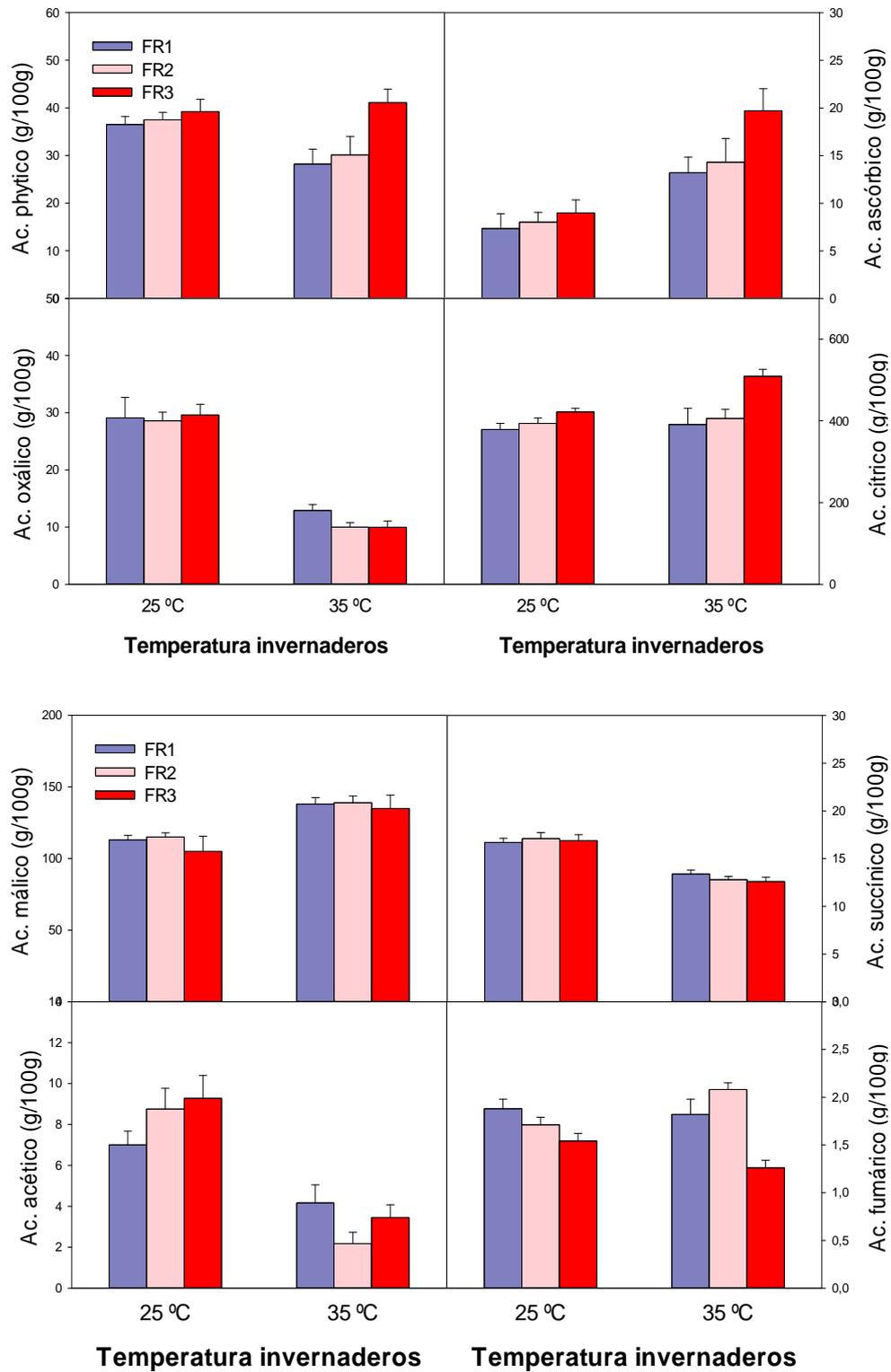


Figura 4.8. Efecto de la temperatura de los invernaderos (25 °C y 35 °C) sobre la concentración de ácidos fítico, oxálico, ascórbico, cítrico málico, succínico, acético y fumárico en frutos de tomate cultivadas con tres frecuencias de riego (FR1, alta; FR2, mediana; FR3 baja). La barra de error indica el error estándar de la media (n=8).

En la composición mineral se observó que aquellos frutos cultivados a 35 °C tuvieron una menor concentración de K, Mg, S, Fe, Mn y Mo; y una mayor concentración de P y Zn (Tabla 4.11; Fig. 4.9, 4.10). La concentración de Ca, Na, B y Cu no fu afectada por la temperatura. La baja frecuencia de riego FR3 disminuyó la concentración de P, Mn y Zn; y aumentó la de Na y Mo en comparación con las otras dos frecuencias de riego. En el caso del Fe se observó la mayor concentración para la frecuencia FR2 y la menor para la frecuencia FR1.

Tabla 4.11. Efectos de la temperatura y la frecuencia de riego en la concentración mineral de frutos de tomate.

	Ca (% ps)	K (% ps)	Mg (% ps)	P (% ps)	Na (% ps)	S (% ps)
Factor principal: T^a						
25 °C	0,10±0,002	3,77±0,07	0,14±0,002	0,51±0,01	0,06±0,003	0,18±0,003
35 °C	0,10±0,002	3,54±0,03	0,12±0,001	0,55±0,01	0,06±0,004	0,16±0,002
Factor principal: Riego						
FR1	0,10±0,003	3,70±0,10	0,13±0,004	0,56±0,01a	0,05±0,002b	0,17±0,005
FR2	0,09±0,003	3,67±0,07	0,12±0,003	0,54±0,01ab	0,07±0,004b	0,17±0,003
FR3	0,10±0,003	3,58±0,06	0,12±0,002	0,51±0,01b	0,08±0,002a	0,16±0,002
ANOVA						
T ^a	ns	*	***	**	ns	*
Riego	ns	ns	ns	*	**	ns
T ^a x Riego	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	B (mg kg ⁻¹)	Cu (mg kg ⁻¹)	Fe (g kg ⁻¹)	Mn (mg kg ⁻¹)	Mo (mg kg ⁻¹)	Zn (mg kg ⁻¹)
Factor principal: T^a						
25 °C	13,7±0,2	5,00±0,18	155,4±9,76	44,5±2,8	1,87±0,19	30,8±0,8
35 °C	14,2±1,1	5,10±0,18	96,9±8,71	31,6±2,1	1,05±0,44	32,9±0,9
Factor principal: Riego						
FR1	15,0±1,6	5,15±0,32	132,5±15,0c	39,4±3,6a	0,78±0,24b	33,2±1,3a
FR2	13,3±0,3	5,22±0,13	141,4±14,3a	42,1±3,5a	1,72±0,48a	32,2±0,7ab
FR3	13,7±0,3	4,75±0,13	100,7±10,7b	31,5±2,6b	1,89±0,50a	30,1±1,0b
ANOVA						
T ^a	ns	ns	***	***	***	**
Riego	ns	ns	***	**	*	**
T ^a x Riego	ns	ns	ns	ns	ns	ns

*, **, *** y “ns” indican diferencias significativas a $p < 0,05$, $p < 0,01$, $p < 0,001$ y no significativas, respectivamente. Para cada columna, valores con diferentes letras presentan diferencias significativas al 95 % según el test de Rango múltiple de Duncan. Los valores de cada uno de los parámetros son valores medios ± error estándar.

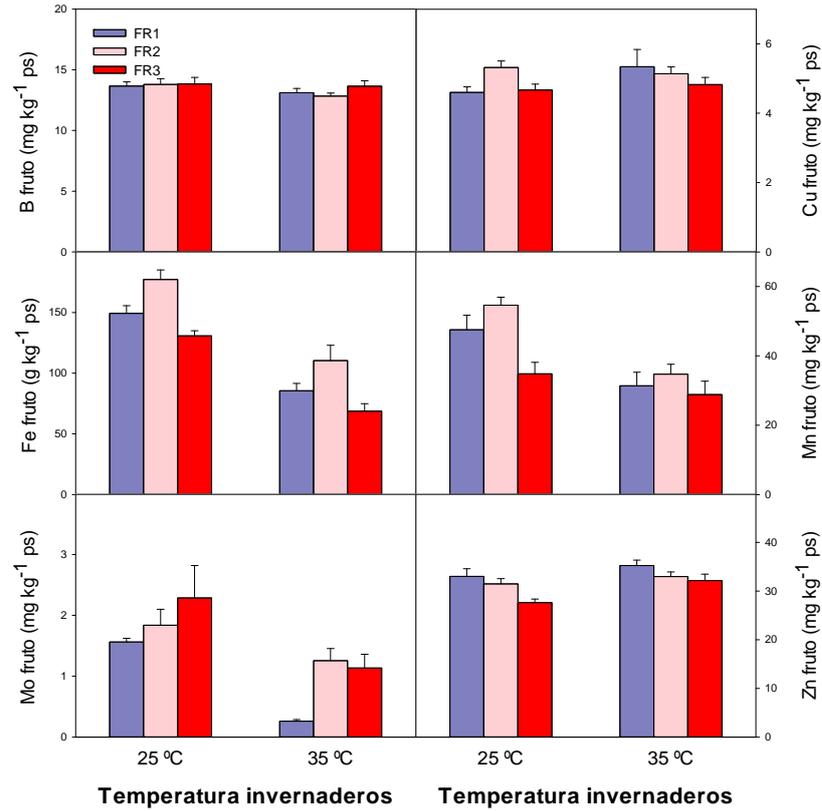


Figura 4.9. Efecto de la temperatura de los invernaderos (25 °C y 35 °C) sobre la concentración de Ca, K, Mg, P, Na, S en frutos de tomate cultivadas con tres frecuencias de riego (FR1, alta; FR2, mediana; FR3 baja). La barra de error indica el error estándar de la media (n=8).

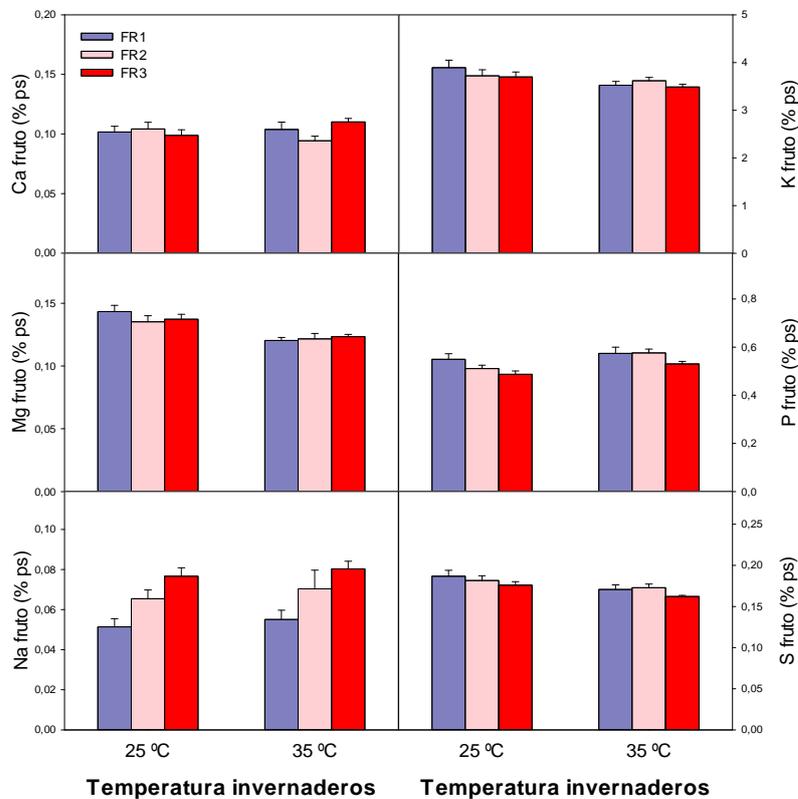


Figura 4.10. Efecto de la temperatura de los invernaderos (25 °C y 35 °C) sobre la concentración de Ca, K, Mg, P, Na, S en frutos de tomate cultivadas con tres frecuencias de riego (FR1, alta; FR2, mediana; FR3 baja). La barra de error indica el error estándar de la media (n=8).

4.3.2 Parámetros de desarrollo vegetativo

La alta temperatura aumentó el peso seco total de hojas y de tallo un 44 % y 18 %, respectivamente. La frecuencia de riego no afectó estos parámetros. La altura de la planta tampoco fue afectada ni por la temperatura del invernadero ni por la frecuencia de riego (Tabla 4.12 y Fig. 4.11).

Tabla 4.12. Efectos de la temperatura y la frecuencia de riego en los parámetros de crecimiento vegetativo de plantas de tomate.

	Peso total hojas (g ps)	Peso total tallo (g ps)	Altura planta (cm)
Factor principal: T^a			
25 °C	108,3±7	124,9±4	230,2±2
35 °C	156,5±13	147,6±6	225,2±3
Factor principal: Riego			
FR1	114,8±8	135,2±6	231,6±4
FR2	130,2±15	137,0±7	229,5±3
FR3	152,2±18	136,7±9	222,0±4
T ^a	**	**	ns
Riego	ns	Ns	ns
T ^a x Riego	ns	Ns	ns

** y “ns” indican diferencias significativas a $p < 0,01$ y no significativas, respectivamente. Para cada columna, valores con diferentes letras presentan diferencias significativas al 95 % según el test de Rango múltiple de Duncan. Los valores de cada uno de los parámetros son valores medios \pm error estándar.

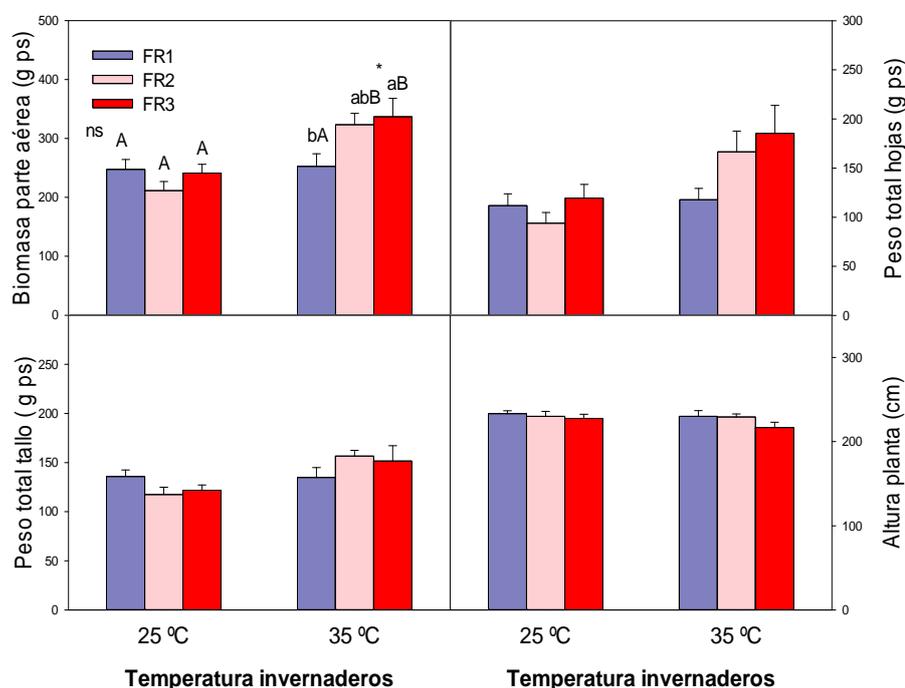


Figura 4.11. Efecto de la temperatura de los invernaderos (25 °C y 35 °C) sobre los parámetros de crecimiento vegetativo de plantas de tomate cultivadas con tres frecuencias de riego (FR1, alta; FR2, mediana; FR3 baja). La barra de error indica el error estándar de la media (n=8). * y ns indican diferencias significativas a $p < 0,05$ y no significativas, respectivamente, entre los tratamientos de riego para cada invernadero. Valores con diferentes letras presentan diferencias significativas al 95% según el test de Rango múltiple de Duncan. Letras minúsculas comparan los tratamientos de frecuencia de riego para cada temperatura. Letras mayúsculas comparan las temperaturas para cada frecuencia de riego.

4.3.3 Nutrición mineral de hojas, tallo y raíces

En Junio, Julio y Agosto se tomaron muestras foliares en los diferentes tratamientos ensayados. El análisis de la varianza (Tabla 4.13) mostró que no hubo interacciones significativas entre la temperatura y la frecuencia de riego. Para simplificar los datos, ya que aquí tenemos una variable más como es el mes de muestreo, no se van a mostrar los valores de la interacción sino solamente las medias correspondientes a los factores principales por separado. En cuanto a la temperatura se observó que la concentración de Na y B incrementó y el Fe disminuyó con el tratamiento de 35 °C en los tres muestreos analizados en relación al tratamiento de 25 °C (Fig. 4.12, Fig 4.13). En el resto de nutrientes Ca, K, P, S, Mo y Zn la tendencia general fue también una disminución, aunque en algunos casos se observó un aumento en la concentración como de Ca en julio, de Mo en junio y julio; o no se observaron diferencias significativas como en el K y P en junio y julio, en S en julio, y de Zn en junio y agosto. La concentración de Mg aumentó en junio y julio, y disminuyó en agosto.

En la frecuencia de riego, se observaron diferencias significativas en el P, Na, S, Cu, Mn y Zn (Tabla 4.14). La tendencia general de estos nutrientes, excepto el Na, fue una disminución de la concentración al disminuir la frecuencia de riego, y esta disminución fue significativa en agosto para todos ellos, y en julio solo para el P. En junio se observó un aumento de la concentración del Zn con el tratamiento FR3 con respecto a FR1 y FR2 (Fig. 4.14). La concentración de Na aumentó al disminuir la frecuencia de riego en agosto, aunque este aumento no fue significativa entre el tratamiento FR1 y FR2.

Tabla 4.13. Análisis de la varianza de los factores principales (temperatura y frecuencia de riego) y de la interacción en la concentración de nutrientes en las hojas de plantas de tomate en tres fechas diferentes.

	Ca	K	Mg	P	Na	S	B	Cu	Fe	Mn	Mo	Zn
Junio												
T^a	***	ns	*	ns	***	***	***	ns	***	ns	***	ns
Riego	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**
T^a x R	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Julio												
T^a	*	*	**	ns	*	ns	***	ns	*	ns	*	***
Riego	ns	ns	ns	**	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns
T^a x R	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Agosto												
T^a	***	ns	*	**	***	***	*	ns	***	ns	**	ns
Riego	ns	ns	ns	**	*	**	ns	*	ns	***	ns	*
T^a x R	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

*, **, *** y “ns” indican diferencias significativas a $p < 0,05$, $p < 0,01$, $p < 0,001$ y no significativas, respectivamente.

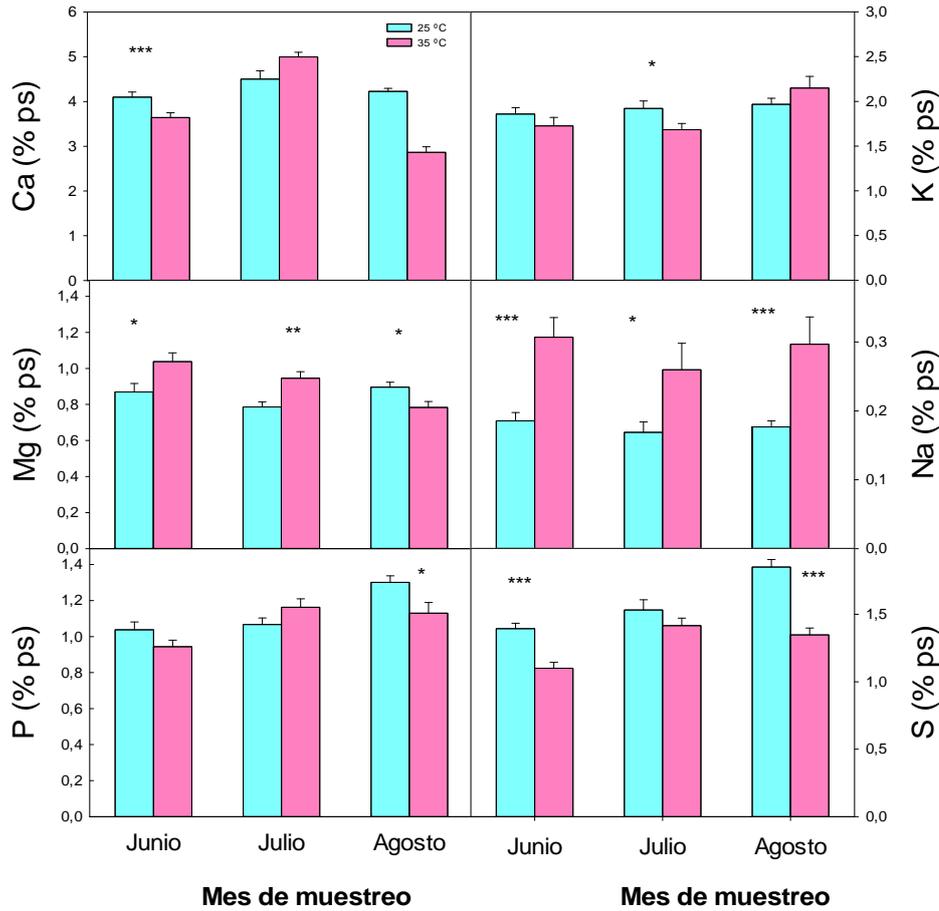


Figura 4.12. Efecto de la temperatura de los invernaderos (25 °C y 35 °C) sobre la concentración de Ca, K, Mg, Na, P y S en hojas de tomate. La barra de error indica el error estándar de la media. *, **, *** y “ns” indican diferencias significativas a $p < 0,05$, $p < 0,01$, $p < 0,001$ y no significativas, respectivamente para cada nutriente y mes de muestreo.

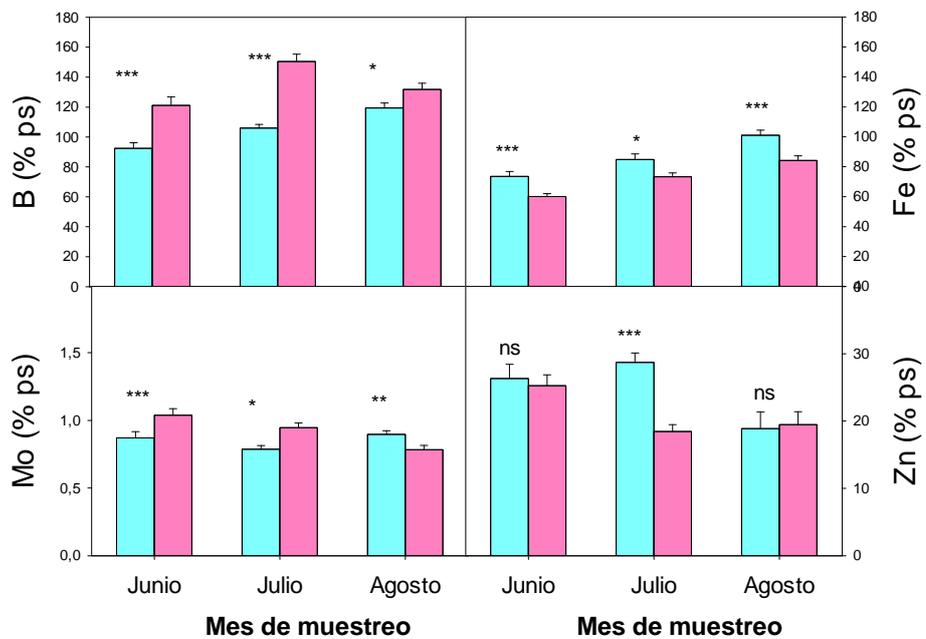


Figura 4.13. Efecto de la temperatura de los invernaderos (25 °C y 35 °C) sobre la concentración de B, Fe, Mo y Zn en hojas de tomate. La barra de error indica el error estándar de la media. *, **, *** y “ns” indican diferencias significativas a $p < 0,05$, $p < 0,01$, $p < 0,001$ y no significativas, respectivamente para cada nutriente y mes de muestreo.

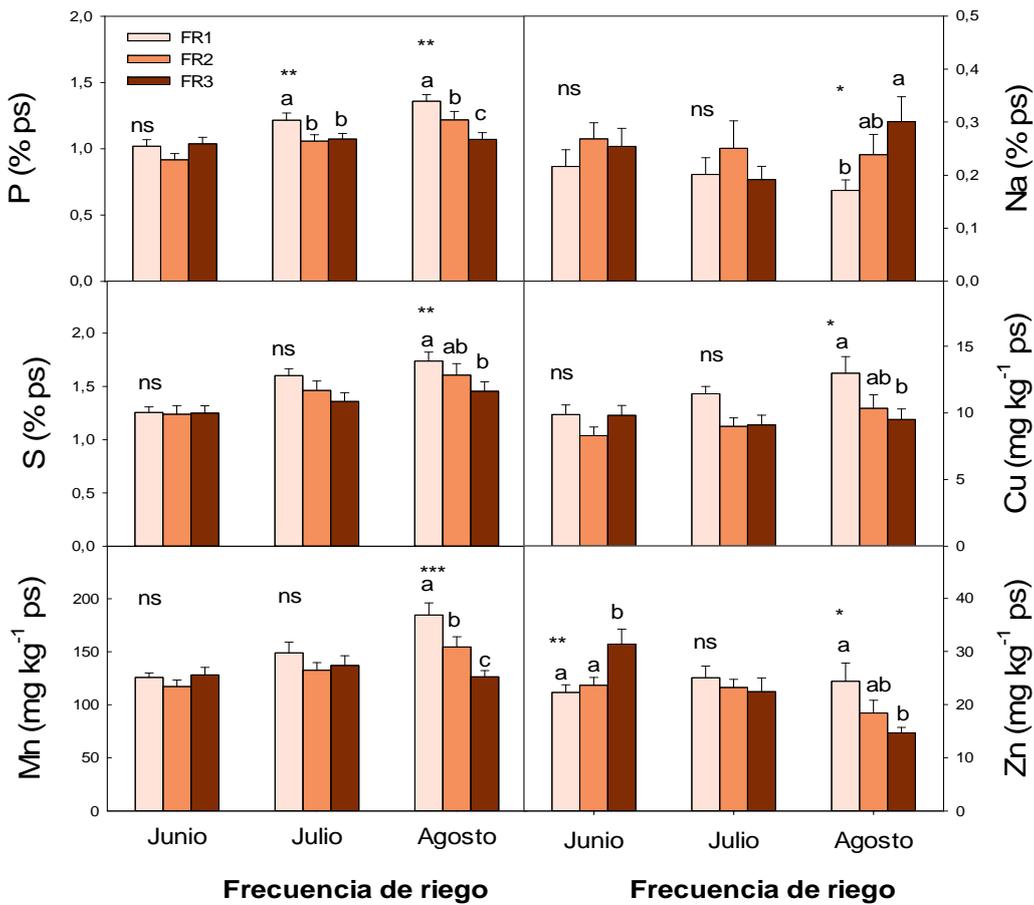


Figura 4.14. Efecto de la frecuencia de riego (FR1, alta; FR2, mediana; FR3, baja) sobre la concentración de P, Na, S, Cu, Mn y Zn. La barra de error indica el error estándar de la media. *, **, *** y “ns” indican diferencias significativas a $p < 0,05$, $p < 0,01$, $p < 0,001$ y no significativas, respectivamente para cada nutriente y mes de muestreo. Valores con diferentes letras presentan diferencias significativas al 95% según el test de Rango múltiple de Duncan. Letras minúsculas comparan los tratamientos de frecuencia de riego para cada nutriente y mes de muestreo.

La concentración mineral en el tallo sigue una tendencia similar a la que hemos observado en las hojas para el caso de la temperatura. A 35 °C disminuyó la concentración de Ca, K, Mg, P, B, Fe, Zn, Mn, Mo y S; e incrementó la concentración de Na con respecto a las plantas cultivadas en el invernadero a 25 °C (Tabla 4.12; Fig. 4.15, 4.16). La mayor reducción se observó en el Mo y S con un 46 y 41 %, respectivamente, en relación a las plantas cultivadas a 25 °C. En cuanto al riego, se observa una disminución de la concentración en el Cu, Fe, Na, Mn, Mo y Zn, aunque solamente se observaron diferencias significativas entre el tratamiento FR1 y FR2 en el caso del Mo. En el caso del Na se observó un aumento de la concentración al pasar del tratamiento FR1 (0,14 % ps) en relación a las plantas FR2 y FR3 (0,24 % ps).

En el caso de la raíz, se observó un incremento de Ca, P, Na, Fe, Mn y Zn al incrementar la temperatura del invernadero, siendo el mayor incremento observado en el caso del Zn con un 136 % con respecto al tratamiento de 25 °C (Tabla 4.15, Fig. 4.17, 4.18). En cuanto al riego, independientemente de la temperatura, se observó una disminución de la concentración de Fe con el tratamiento de una menor frecuencia de riego (FR3) en relación a FR2 y FR1. Por otro lado, el efecto del riego dependió de la temperatura en el caso del Mg y S. En el caso del Mg, a la temperatura de 25 °C se observó un incremento significativo de la concentración con el tratamiento de baja frecuencia (FR3) en relación a los otros dos tratamientos (FR1 y FR2), sin embargo, la frecuencia de riego no tuvo ningún efecto en las plantas a 35 °C. De forma parecida se observó en la concentración de S que a la temperatura de 25 °C las plantas regadas con FR2 y FR3 tuvieron una mayor concentración; sin embargo, los tratamientos de riego no afectaron la concentración a 35 °C.

Tabla 4.14. Efectos de la temperatura y la frecuencia de riego en la concentración de Ca, K, Mg, P, Na, S, B, Cu, Fe, Mn, Mo y Zn en el tallo de plantas de tomate.

	Ca (% ps)	K (% ps)	Mg (% ps)	P (% ps)	Na (% ps)	S (% ps)
Factor principal: T^a						
25 °C	1,00±0,05	3,52±0,10	0,40±0,02	0,97±0,05	0,18±0,01	0,31±0,02
35 °C	0,82±0,03	3,10±0,07	0,31±0,01	0,67±0,02	0,24±0,02	0,18±0,01
Factor principal: Riego						
FR1	0,99±0,07	3,38±0,11	0,38±0,03	0,92±0,08	0,14±0,01b	0,27±0,02
FR2	0,90±0,05	3,24±0,13	0,35±0,02	0,81±0,05	0,24±0,03 a	0,23±0,02
FR3	0,84±0,05	3,30±0,13	0,35±0,03	0,74±0,06	0,25±0,02 a	0,23±0,02
ANOVA						
T ^a	***	*	*	***	*	***
Riego	ns	ns	ns	ns	*	ns
T ^a x Riego	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	B (mg kg ⁻¹)	Cu (mg kg ⁻¹)	Fe (mg kg ⁻¹)	Mn (mg kg ⁻¹)	Mo (mg kg ⁻¹)	Zn (mg kg ⁻¹)
Factor principal: T^a						
25 °C	18,6±0,62	10,0±0,64	47,3±3,87	59,0±3,66	3,38±0,25	142,7±10,8
35 °C	15,6±0,45	9,17±0,41	37,4±2,61	33,7±1,94	1,82±0,14	97,54±11,9
Factor principal: Riego						
FR1	17,6±0,7	10,9±0,8a	50,8±5,1a	53,7±4,9a	3,30±0,4a	151,7±13,5a
FR2	16,9±1,0	9,74±0,4ab	41,4±3,6ab	45,2±5,0ab	2,35±0,3b	118,4±10,1ab
FR3	16,8±0,7	8,14±0,5b	34,9±2,6b	40,2±5,1b	2,15±0,3b	90,2±16,8b
ANOVA						
T ^a	**	ns	*	***	***	***
Riego	ns	***	*	*	**	**
T ^a x Riego	ns	ns	ns	ns	ns	ns

*, **, *** y "ns" indican diferencias significativas a $p < 0,05$, $p < 0,01$, $p < 0,001$ y no significativas, respectivamente, para cada nutriente. Los valores de cada uno de los parámetros son valores medios ± error estándar.

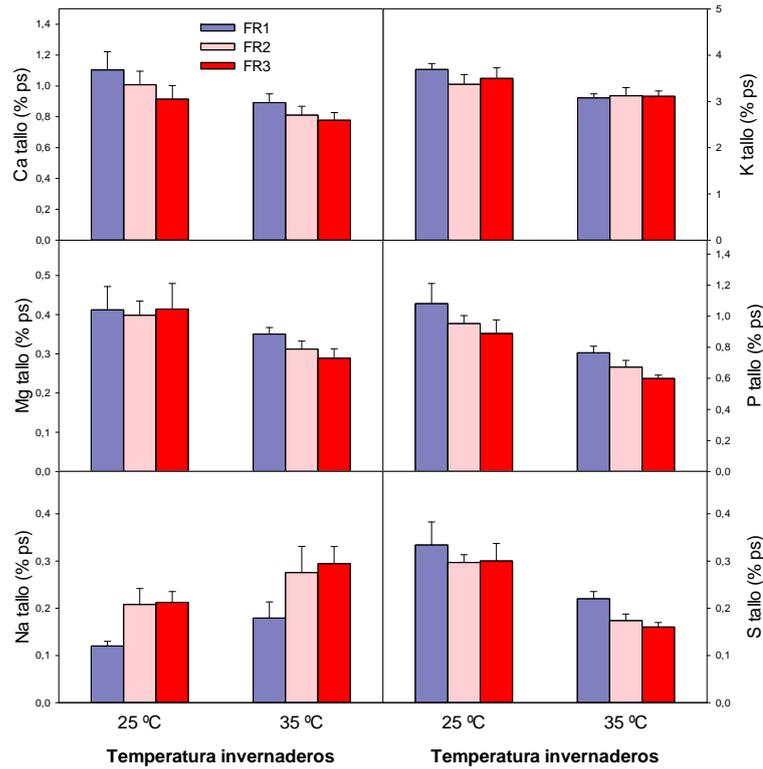


Figura 4.15. Efecto de la temperatura de los invernaderos (25 °C y 35 °C) sobre la concentración de Ca, K, Mg, P, Na, S en frutos de tomate cultivadas con tres frecuencias de riego (FR1, alta; FR2, mediana; FR3 baja). La barra de error indica el error estándar de la media (n=8).

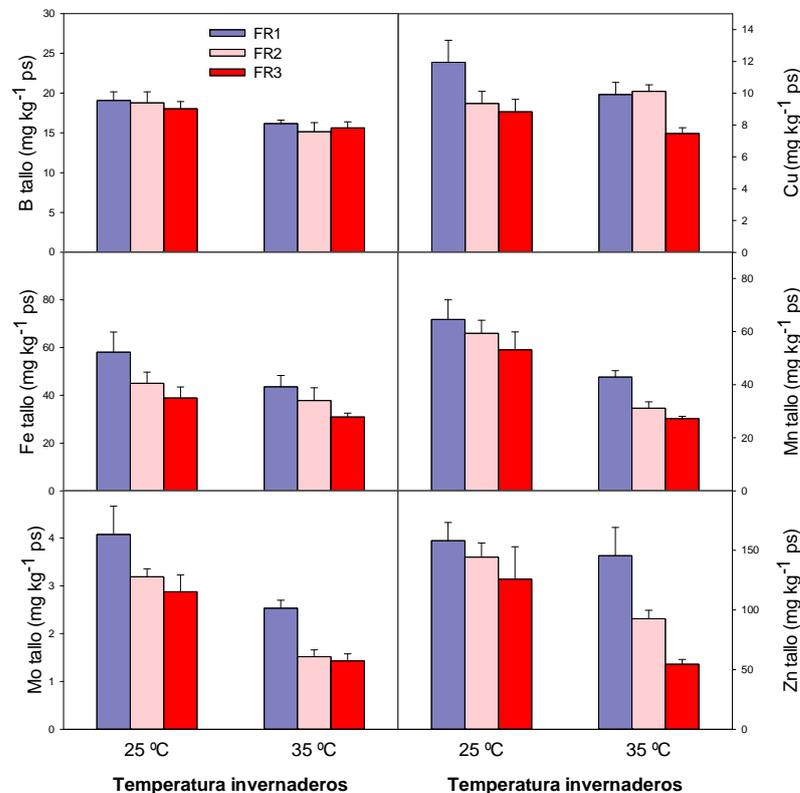


Figura 4.16. Efecto de la temperatura de los invernaderos (25 °C y 35 °C) sobre la concentración de B, Cu, Fe, Mn, Mo y Zn en frutos de tomate cultivados con tres frecuencias de riego (FR1, alta; FR2, mediana; FR3 baja). La barra de error indica el error estándar de la media (n=8).

Tabla 4.15. Efectos de la temperatura y la frecuencia de riego en la concentración de Ca, K, Mg, P, Na, S, B, Cu, Fe, Mn, Mo y Zn en la raíz de plantas de tomate.

	Ca (% ps)	K (% ps)	Mg (% ps)	P (% ps)	Na (% ps)	S (% ps)
Factor principal: T^a						
25 °C	1,47±0,08	1,98±0,11	0,25±0,01	0,81±0,04	0,66±0,03	0,355±0,08
35 °C	1,95±0,13	1,67±0,14	0,24±0,01	1,21±0,09	0,86±0,05	0,341±0,08
Factor principal: Riego						
FR1	1,55±0,12	1,64±0,14	0,24±0,01	0,88±0,08	0,78±0,06	0,35±0,03
FR2	1,79±0,12	1,83±0,10	0,24±0,01	1,07±0,08	0,71±0,05	0,33±0,02
FR3	1,81±0,20	2,00±0,21	0,25±0,01	1,07±0,13	0,80±0,07	0,37±0,03
ANOVA						
T ^a	**	ns	ns	**	**	ns
Riego	ns	ns	ns	ns	ns	ns
T ^a x Riego	ns	ns	**	ns	ns	*
	B (mg kg ⁻¹)	Cu (mg kg ⁻¹)	Fe (g kg ⁻¹)	Mn (mg kg ⁻¹)	Mo (mg kg ⁻¹)	Zn (mg kg ⁻¹)
Factor principal: T^a						
25 °C	11,5±0,70	14,2±0,81	1,85±0,20	70,3±3,11	7,48±0,31	135,6±9,80
35 °C	9,33±1,11	13,5±0,76	2,63±0,25	109,2±7,91	7,70±0,42	321,3±20,9
Factor principal: Riego						
FR1	10,7±1,44	14,1±0,98	2,82±0,27a	86,0±8,00	7,65±0,46	229,9±35,6
FR2	10,7±0,62	13,4±0,55	2,25±0,20ab	94,0±8,62	7,57±0,39	220,8±28,8
FR3	9,89±1,35	14,0±1,27	1,65±0,32b	89,0±11,3	7,55±0,52	234,7±38,5
ANOVA						
T ^a	ns	ns	*	***	ns	***
Riego	ns	ns	**	ns	ns	ns
T ^a x Riego	ns	ns	ns	ns	ns	ns

*, **, *** y "ns" indican diferencias significativas a $p < 0,05$, $p < 0,01$, $p < 0,001$ y no significativas, respectivamente, para cada nutriente. Los valores de cada uno de los parámetros son valores medios \pm error estándar.

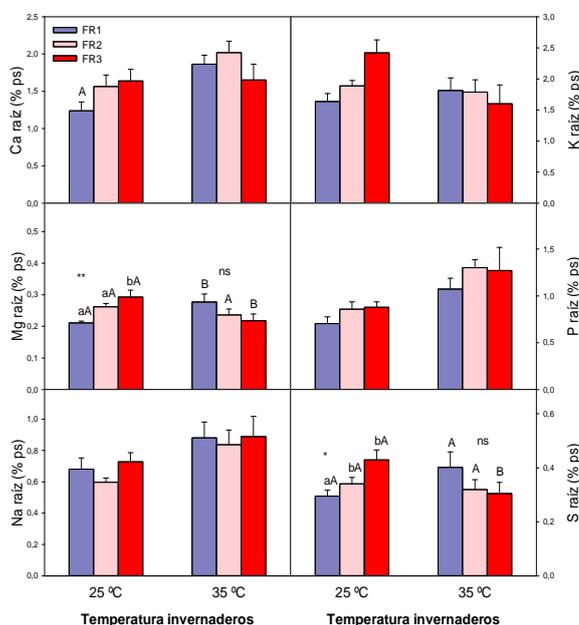


Figura 4.17. Efecto de la temperatura de los invernaderos (25 °C y 35 °C) sobre la concentración de Ca, K, Mg, P, Na, S en frutos de tomate cultivadas con tres frecuencias de riego (FR1, alta; FR2, mediana; FR3 baja). La barra de error indica el error estándar de la media (n=8). Valores con diferentes letras presentan diferencias significativas al 95% según el test de Rango múltiple de Duncan. Letras minúsculas comparan los tratamientos de frecuencia de riego para cada temperatura. Letras mayúsculas comparan las temperaturas para cada frecuencia de riego.

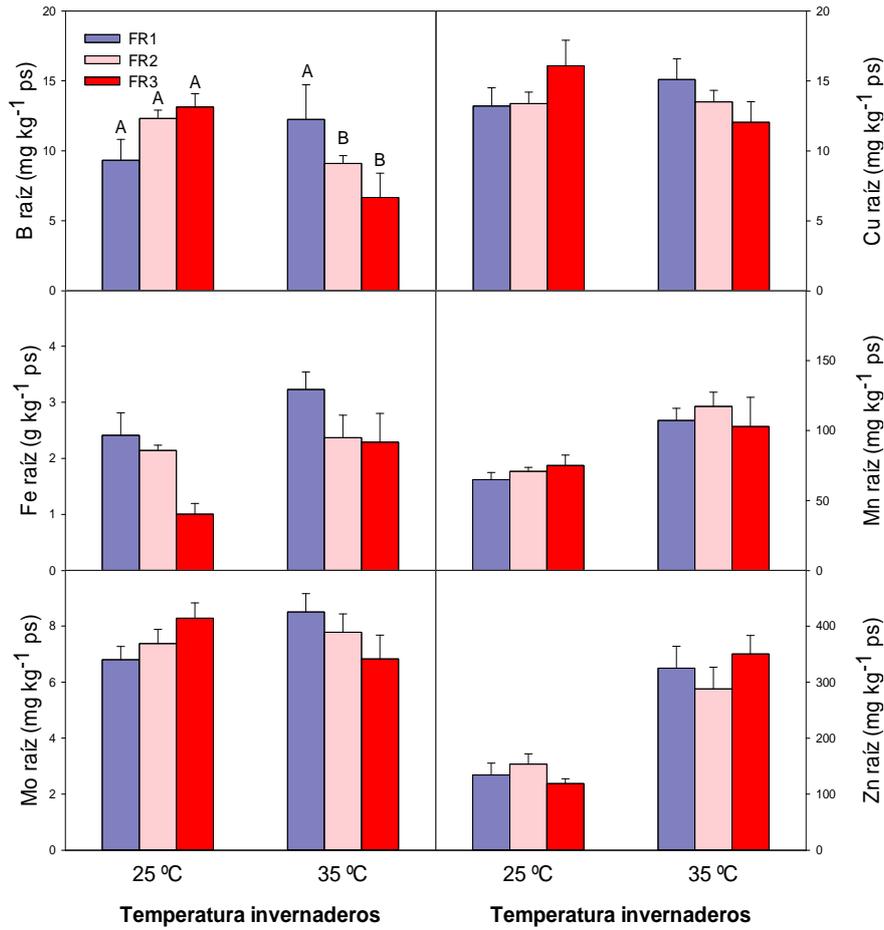


Figura 4.18. Efecto de la temperatura de los invernaderos (25 °C y 35 °C) sobre la concentración de B, Cu, Fe, Mn, Mo y Zn en frutos de tomate cultivadas con tres frecuencias de riego (FR1, alta; FR2, mediana; FR3 baja). La barra de error indica el error estándar de la media (n=8).

4.3.4 Parámetros de relaciones hídricas, intercambio gaseoso y fluorescencia de clorofilas.

A los 105 DDT se realizaron las medidas de relaciones hídricas, intercambio gaseoso y fluorescencia de clorofilas. En las medidas de relaciones hídricas se observó una disminución del Ψ_w con la alta temperatura, pasando de -0,9 MPa (25 °C) a -1.1 MPa (35 °C; Tabla 4.16; Fig. 4.19). Esta disminución del Ψ_w se debió a un descenso del Ψ_π en -0,9 MPa a pesar de que el Ψ_p aumentó un 0,62 MPa. No se observó una interacción significativa entre la temperatura y la frecuencia de riego. El tratamiento de frecuencia FR3 disminuyó el Ψ_w en 0,6 MPa, debido a un descenso de 0,3 MPa del Ψ_π y de 0,25 MPa del Ψ_p . El potencial osmótico a plena turgencia (Ψ_π^{100}) y el contenido relativo de agua (CRA) no fueron afectados por la temperatura. Pero el CRA fue afectado por la frecuencia de riego. Aquellas plantas tratadas con la frecuencia de riego más baja (FR3) pasaron a tener 77,8 % CRA frente al 87,7 % de las plantas del tratamiento control.

Tabla 4.16. Efectos de la temperatura y la frecuencia de riego en los parámetros de relaciones hídricas potencial hídrico (Ψ_w), potencial osmótico (Ψ_π), potencial de turgor (Ψ_p), potencial osmótico a plena turgencia (Ψ_π^{100}) y contenido relativo de agua (CRA) en plantas de tomate. Los parámetros fueron medidos a los 105 DDT.

	Ψ_w (MPa)	Ψ_π (MPa)	Ψ_p (MPa)	Ψ_π^{100} (MPa)	CRA (%)
Factor principal: T^a					
25 °C	-0.90±0.05	-1.6±0.04	0.73±0.04	-1,09±0,05	85,3±1,8
35 °C	-1.1±0.06	-2.5±0.05	1.35±0.05	-1,20±0,02	83,8±1,5
Factor principal: Riego					
FR1	-0.8±0.05a	-1.9±0.05b	1.08±0.06a	-1,1±0,02	87,7±1,14a
FR2	-0.9±0.07a	-2.1±0.07b	1.20±0.04a	-1,1±0,04	87,9±1,21a
FR3	-1.4±0.10b	-2.2±0.05a	0.83±0.01b	-1,2±0,06	77,8±1,87b
ANOVA					
T ^a	***	***	***	ns	ns
Riego	***	*	**	ns	**
T ^a x Riego	ns	ns	ns	ns	ns

*, *** y “ns” indican diferencias significativas a $p < 0,05$, $p < 0,001$ y no significativas, respectivamente, para cada nutriente. Los valores de cada uno de los parámetros son valores medios \pm error estándar.

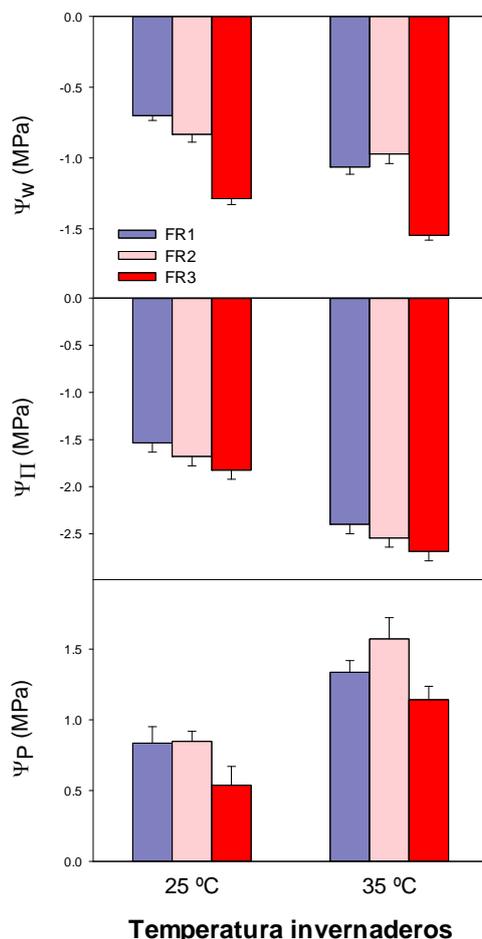


Figura 4.19. Efecto de la temperatura de los invernaderos (25 °C y 35 °C) sobre los parámetros de relaciones hídricas potencial hídrico (Ψ_w), potencial osmótico (Ψ_π) y potencial de turgor (Ψ_p) en plantas de tomate cultivadas con tres frecuencias de riego (FR1, alta; FR2, mediana; FR3 baja). La barra de error indica el error estándar de la media (n=8).

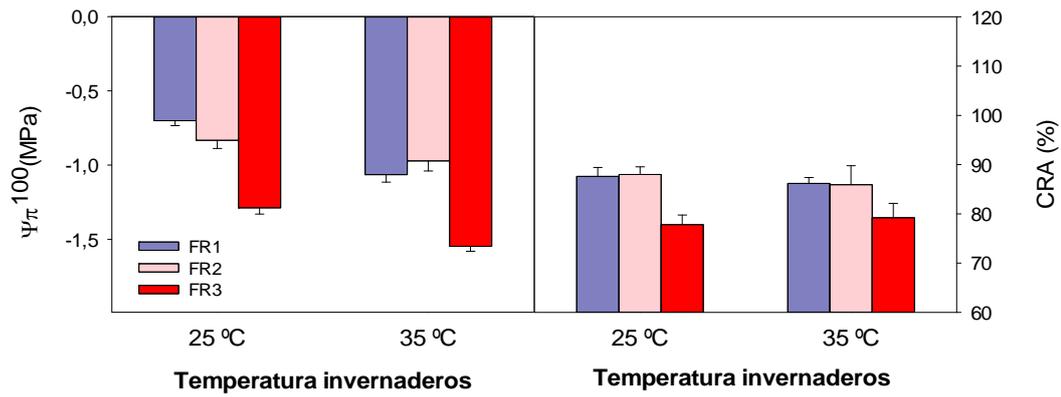


Figura 4.20. Efecto de la temperatura de los invernaderos (25 °C y 35 °C) sobre los parámetros de relaciones hídricas potencial osmótico a plena turgencia (Ψ_{π}^{100}) y contenido relativo de agua (CRA) en plantas de tomate cultivadas con tres frecuencias de riego (FR1, alta; FR2, mediana; FR3 baja). Los datos corresponden al muestreo del 15 de Agosto. La barra de error indica el error estándar de la media (n=8).

Los parámetros de intercambio gaseoso A_{CO_2} , la g_s y la T_{hoja} disminuyeron con la temperatura, pasando de 9,7 a 4,5 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, 357,1 a 130,1 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, y de 5,3 a 2,6 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, respectivamente (Tabla 4.17). Independientemente de la temperatura, la frecuencia de riego FR2 y FR3 disminuyó la A_{CO_2} en relación a las plantas del tratamiento FR1, y la frecuencia de riego FR3 disminuyó la g_s y T_{hoja} en relación a los tratamientos FR1 y FR2. La concentración de CO_2 subestomático (C_i) y el uso eficaz del agua (A_{CO_2}/T_{hoja}) no fueron afectados por la frecuencia de riego a la temperatura de 25 °C, pero a la temperatura de 35 °C estos parámetros aumentaron y disminuyeron, respectivamente, en las frecuencias de riego FR2 y FR3 en relación al tratamiento FR1 (Fig. 4.22). La relación A/g_s en plantas a 25 °C fue mayor en el tratamiento FR3 que en los otros dos tratamientos; mientras que a 35 °C se observó el efecto contrario, la frecuencia de riego FR2 y FR3 disminuyó este parámetro en relación al riego FR1.

Algunos parámetros de la frecuencia de riego fueron afectados tanto por la frecuencia de riego como por la temperatura. Así, se observó que, independientemente del manejo de riego, la alta temperatura disminuyó F_v/F_m y F_v'/F_m' , y aumentó los parámetros F_o y qP . El manejo de riego afectó significativamente a Φ_{PSII} y F_v'/F_m' , observándose una disminución significativa para las plantas del tratamiento FR3 en relación a FR2 y FR1 (Tabla 4.18).

Tabla 4.17. Efectos de la temperatura y la frecuencia de riego en los parámetros de intercambio gaseoso asimilación neta de CO₂ (A_{CO2}, μmol m⁻² s⁻¹), conductancia estomática (g_s, mmol m⁻² s⁻¹), concentración de CO₂ subestomático (C_i, ppm), uso eficaz del agua (UEA = A_{CO2}/T_{hoja}, μmol mmol⁻¹), transpiración foliar (T_{hoja}, mmol m⁻²-s⁻¹), y relación A/g_s (μmol mol⁻¹) en plantas de tomate. Los parámetros fueron medidos 15 de Agosto del 2012.

	A _{CO2}	g _s	C _i	UEA	T _{hoja}	A/g _s
Factor principal: T^a						
25 °C	9,7±0,78	357,1±46,4	312,4±4,13	2,2±0,18	5,3±0,53	30,4±2,1
35 °C	4,5±0,90	130,1±19,0	303,2±10,4	1,6±0,31	2,6±0,26	33,2±6,4
Factor principal: Riego						
FR1	10,4±0,82a	333,1±66,3a	288,4±11,8	2,46±0,29	5,02±0,74a	43,0±7,3a
FR2	6,61±1,21b	278,4±54,4a	320,0±6,84	1,60±0,29	4,21±0,56a	24,3±3,4b
FR3	5,19±1,28b	149,5±29,2b	315,2±6,23	1,51±0,28	2,96±0,57b	28,2±4,1b
T ^a	***	***	ns	ns	***	ns
Riego	***	*	**	*	*	*
T ^a x Riego	ns	ns	**	*	ns	*

*, **, *** y “ns” indican diferencias significativas a $p < 0,05$, $p < 0,01$, $p < 0,001$ y no significativas, respectivamente, para cada nutriente. Los valores de cada uno de los parámetros son valores medios ± error estándar.

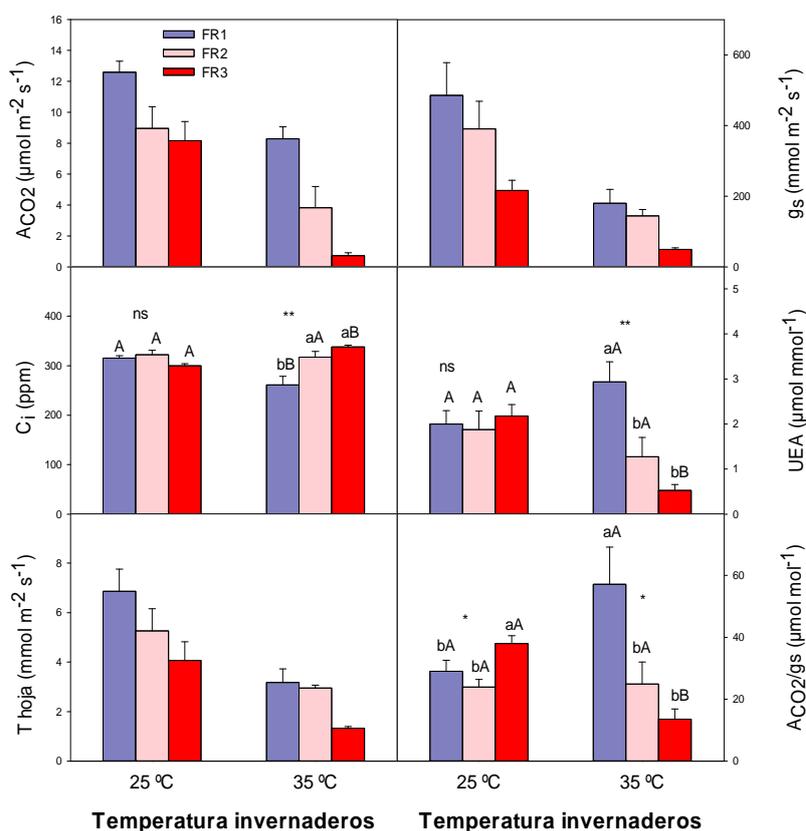


Figura 4.22. Efecto de la temperatura de los invernaderos (25 °C y 35 °C) sobre los parámetros de intercambio gaseoso asimilación neta de CO₂ (A_{CO2}, μmol m⁻² s⁻¹), conductancia estomática (g_s, mmol m⁻² s⁻¹), concentración de CO₂ subestomático (C_i, ppm), uso eficaz del agua (UEA = A_{CO2}/T_{hoja}, μmol mmol⁻¹), transpiración foliar (T_{hoja}, mmol m⁻²-s⁻¹), y relación A/g_s (μmol mol⁻¹) en plantas de tomate cultivadas con tres frecuencias de riego (FR1, alta; FR2, mediana; FR3, baja). Los datos corresponden al muestreo del 15 de Agosto. La barra de error indica el error estándar de la media. Valores con diferentes letras presentan diferencias significativas al 95% según el test de Rango múltiple de Duncan. Letras minúsculas comparan los tratamientos de frecuencia de riego para cada temperatura. Letras mayúsculas comparan las temperaturas para cada frecuencia de riego.

Tabla 4.18. Efectos de la temperatura y la frecuencia de riego en los parámetros de fluorescencia de clorofilas máxima eficiencia cuántica de los centros de reacción del PSII (Fv/Fm), Fo (fluorescencia mínima de hojas adaptadas a la oscuridad), y valor máximo de fluorescencia en hojas adaptadas a la oscuridad (Fm), eficiencia fotoquímica del PSII (Φ PSII), eficiencia de las antenas en los centros de reacción del PSII (Fv'/Fm') y quenching fotoquímico (qP) en plantas de tomate.

	Fv/Fm	Fo	Fm	Φ PSII	Fv'/Fm'	qP
Factor principal: T^a						
25 °C	0,84±0,01	135,9±12,6	863,9±64,8	0,42±0,021	0,64±0,011	0,64±0,02
35 °C	0,76±0,01	181,9±15,4	817,7±67,9	0,43±0,02	0,56±0,02	0,76±0,02
Factor principal: Riego						
FR1	0,83±0,01a	157,3±22,0	905,3±89	0,47±0,01a	0,63±0,01a	0,74±0,02
FR2	0,80±0,01ab	140,6±5,20	784,2±27	0,44±0,01a	0,62±0,01a	0,70±0,02
FR3	0,77±0,02b	175,4±21,6	830,1±102	0,35±0,03b	0,54±0,03b	0,65±0,04
ANOVA						
T ^a	***	*	ns	ns	***	**
Riego	*	ns	ns	**	**	ns
T ^a x Riego	ns	ns	ns	ns	ns	ns

*, **, *** y “ns” indican diferencias significativas a $p < 0,05$, $p < 0,01$, $p < 0,001$ y no significativas, respectivamente, para cada nutriente. Los valores de cada uno de los parámetros son valores medios \pm error estándar.

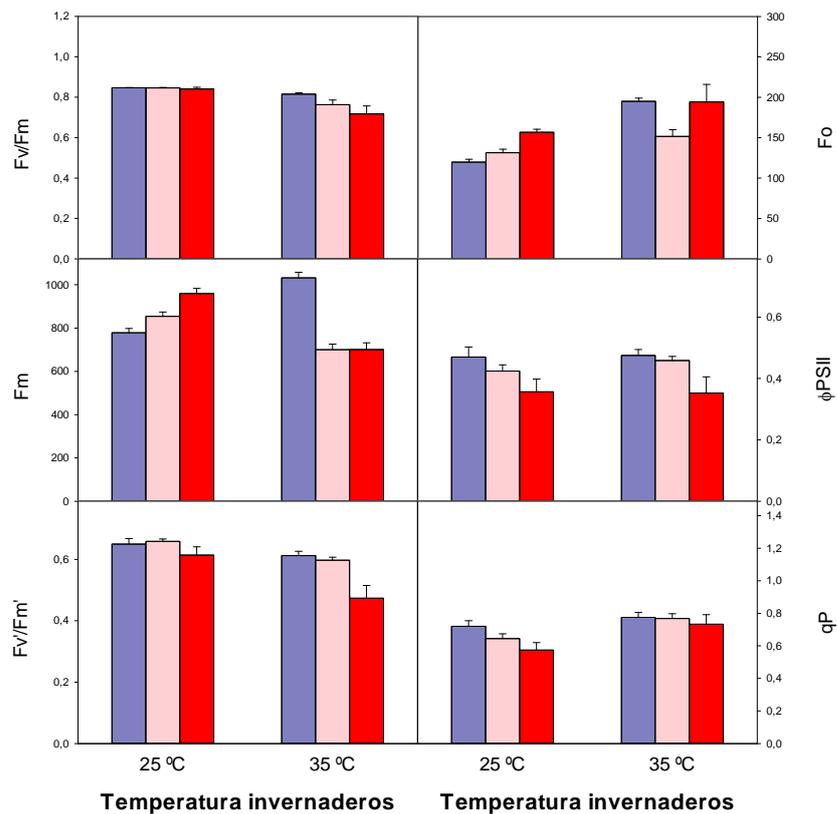


Figura 4.23. Efecto de la temperatura de los invernaderos (25 °C y 35 °C) sobre los parámetros de fluorescencia de clorofilas máxima eficiencia cuántica de los centros de reacción del PSII (Fv/Fm), fluorescencia mínima de hojas adaptadas a la oscuridad (Fo), valor máximo de fluorescencia en hojas adaptadas a la oscuridad (Fm), eficiencia fotoquímica del PSII (Φ PSII), eficiencia de las antenas en los centros de reacción del PSII (Fv'/Fm') y quenching fotoquímico (qP) en plantas de tomate cultivadas con tres frecuencias de riego (FR1, alta; FR2, mediana; FR3 baja). Los datos corresponden al muestreo del 15 de Agosto. La barra de error indica el error estándar de la media.

4.4. Discusión

En este experimento se ensayaron plantas de tomate en dos temperaturas diferentes y cultivadas con tres frecuencias de riego FR1 (alta frecuencia), FR2 (moderada frecuencia) y FR3 (baja frecuencia). Los datos del análisis de la varianza muestran que solamente en cinco variables medidas hubo una interacción significativa entre la temperatura y la frecuencia de riego. Por lo tanto, para simplificar la discusión se van a discutir por separado los efectos de la temperatura y la frecuencia de riego.

Efectos de la alta temperatura sobre las respuestas agronómicas y fisiológicas de plantas de tomate

En nuestras condiciones de cultivo hemos visto que una temperatura de 35 °C se puede considerar muy perjudicial para la variedad de tomate ‘Anairis’ ya que se produjo una reducción de la producción del 55 % (3 kg por planta) con respecto a la temperatura de 25 °C. Esta reducción se debió a la disminución del número de frutos comerciales (como consecuencia del aumento del número de frutos con peso menor de 70 g y los frutos dañados por el rajado) y a la disminución del peso medio de los frutos comerciales, pero no al número de frutos totales obtenidos por planta. Estos datos sugieren que en esta variedad la alta temperatura no influyó sobre la floración o el cuajado de los frutos como si se ha observado en otras variedades de tomate (Garg and Cheema y *col.*, 2011), sino que el efecto perjudicial de la alta temperatura se dio directamente sobre los frutos provocando alteraciones morfológicas o reduciendo la tasa de crecimiento. La tasa de crecimiento de los frutos está relacionada principalmente con la capacidad fotosintética (Newton y *col.*, 1999) y/o la distribución de fotoasimilados entre los diferentes tejidos de la planta (Ho, 1996). En nuestro experimento se observó que la biomasa de la parte aérea fue mayor en plantas cultivadas a 35 °C que aquellas a 25 °C, mientras que la asimilación neta de CO₂ (A_{CO_2}) fue mayor a 25 °C. Lo que indicaría que en las plantas a 35 °C los fotoasimilados van destinados principalmente a incrementar el área foliar de la planta y así compensar la baja A_{CO_2} , a expensas de limitar el suministro de carbohidratos a los frutos, disminuyendo por tanto su tamaño. Los efectos de la temperatura sobre la biomasa foliar de las plantas parece ser que depende de la especie, así un incremento de temperatura de 31 °C a 38 °C disminuyó la parte aérea de plantas de maíz pero no de mijo (Ashraf and Hafeez, 2004). Incluso Muldoon y *col.* (1984) en un cultivar de maíz observó que al incrementar la temperatura de 25 °C a 31 °C incrementó la altura de las plantas, la biomasa seca foliar, el área foliar

y el número de hojas.

La temperatura también puede afectar a la calidad de los frutos ya que influye directamente sobre el metabolismo afectando las estructuras celulares y otros componentes que determinan la calidad de los frutos de tomate como color, textura, tamaño y propiedades organolépticas (Dorais y *col.*, 2001). En nuestro experimento, se observaron algunas diferencias en las características físico-químicas de los frutos cultivados a 25 °C y a 35 °C. En general se observa una disminución del índice de color en las características físicas, un ligero descenso del pH y CE, y un aumento de los sólidos solubles totales. La mayoría de los experimentos que estudian cómo afecta el estrés térmico a la producción y calidad de los frutos utilizan mallas de sombreo para poder establecer rangos de temperatura diferentes (López-Marin y *col.*, 2013). Sin embargo, al utilizar las mallas de sombreo la reducción de la temperatura va acompañada de una reducción de la radiación solar incidente, por lo que se plantea la duda de si es el exceso de temperatura, de radiación o ambos a la vez el factor causante de las alteraciones de los frutos. En nuestro experimento, como la luz incidente (PAR) fue la misma para los dos invernaderos, y el periodo desde la antesis a la cosecha del fruto fue prácticamente el mismo para las dos temperaturas, podemos afirmar que la diferencia observada en estos parámetros podría estar correlacionada con la mayor temperatura acumulada (temperatura acumulada = $\sum_{i=1}^{i=45} T_i$; T es la temperatura media diaria cada día entre la antesis y la cosecha del fruto) en el invernadero de 35 °C. Riga y *col.*, (2008) realizó un experimento con plantas de tomate independizando la temperatura y la radiación solar incidente y observó que la temperatura acumulada fue significativamente relacionada con la firmeza, conductividad eléctrica, sólidos solubles totales, y los compuestos fenólicos; mientras que el pH, peso seco, acidez valorable y contenido de vitamina C no dependió de los °C acumulados en el proceso de maduración del fruto.

La concentración de glucosa y fructosa incrementó también con la alta temperatura, donde los valores más altos de concentración para estos monosacáridos se obtuvieron en plantas cultivadas a 35 °C. El aumento de estos carbohidratos influenciados por el aumento de la temperatura indicaría que los frutos también sufrieron estrés que podría estar relacionado con la poca disponibilidad de agua en el fruto, ya que la alta temperatura podría haber reducido el suministro de agua al fruto a expensas de aumentar la transpiración foliar como un mecanismo para evitar altas temperaturas en las hojas. También ha sido demostrado que el aumento de la

temperatura (35 °C) favorece que los carbohidratos de reservas en los frutos, ya sea en forma de sacarosa y/o almidón, se degraden y aumente el contenido de azúcares libres como la glucosa y fructosa (Rosales, M. A.; Rubio-Wilhelmi, María M.; Castellano, R. y *col.*, 2007) y a su vez se favorece un debilitamiento de las paredes celulares de las células del fruto, lo cual implica la degradación de componentes derivados de fenoles como la lignina y por ello aumentan estos fenoles libres. (Sánchez-Rodríguez E. y *col.*, 2012). El aumento de la temperatura, al provocar el aumento de los azúcares libres, acelera procesos como la glicolisis, ciclo de Krebs y de la cadena transportadora de electrones en las mitocondrias (respiración), y por ello es de esperar que moléculas carbonadas intermediarias del ciclo de krebss como el malato y el ácido cítrico aumenten. Para el caso del ácido ascórbico, como un antioxidante por excelencia, es de esperar que aumente pues está relacionado con un mecanismo de defensa de la planta ante el estrés causado por las temperaturas altas, lo cual puede causar estrés oxidativo en las células y una de las forma de contrarrestarlo es el aumento de sustancias defensivas como el ácido ascórbico y los carotenos como compuestos antioxidantes.

El estrés térmico también puede afectar la concentración de nutrientes en la planta, ya que la alta temperatura afecta a los procesos fisiológicos involucrados en su absorción (Tollenaar, 1989). En un estudio en maíz Bravo y Uribe (1981) indicaron que la absorción de K y P incrementan significativamente con el incremento de la temperatura observándose la máxima absorción a 32 °C para el K y a 38 °C para el P. Sin embargo, Muldoon y *col.*, (1984) observó que al incrementar la temperatura se produjo en plantas de maíz una disminución del N y S donde el Na apenas se vió afectado. Ashraf and Hafeez (2004) indicaron que los efectos de la temperatura sobre la concentración de nutrientes varía según la termotolerancia del cultivo. En especies termotolerantes como el mijo se produce un incremento de la absorción de N mientras que en maíz (especie termosensible) se produce una disminución de la absorción. En el experimento de Ashraf y Hafeez en el 2004, también se observa que la absorción de K y P incrementó con la temperatura pero mucho más en la especie termotolerante. En nuestro experimento, también observamos alteraciones en la nutrición mineral en hojas, tallo y raíces. Aunque, las alteraciones en las hojas dependieron de la fecha de muestreo, en general podemos decir que la concentración de Ca, K, S, P, Fe y Zn disminuyó, y la concentración de Na y B incrementó con la alta temperatura. Sin embargo, estas alteraciones no provocaron ninguna deficiencia o toxicidad ya que todos los nutrientes se mantuvieron en un rango de normalidad para plantas de tomate. En

plantas la concentración mineral en sus diferentes tejidos depende de una gran variedad de factores como la absorción de nutrientes por las raíces, los procesos de transporte desde la raíz a la parte aérea, el peso de la raíz, la relación en peso entre la parte aérea y la raíz, etc. En nuestro experimento, la disminución de los nutrientes Ca, K, S, P, Fe y Zn a 35 °C podrían ser debido a un efecto de dilución ya que las plantas cultivadas a esta temperatura tuvieron una mayor biomasa en la parte aérea que las plantas cultivadas a 25 °C. En el caso del B y Na, sin embargo, se observó un incremento de la concentración a pesar del efecto de dilución de la biomasa, lo que sugiere que para estos nutrientes las temperaturas altas podrían haber incrementado la absorción de estos nutrientes por las raíces.

La fotosíntesis es uno de los procesos fisiológicos más sensibles al estrés por calor, y puede ser inhibida por las altas temperaturas antes que se produzcan otros efectos (Berry y Bjorkman, 1980). En nuestro ensayo la asimilación neta de CO₂ (A_{CO_2}) disminuyó con la alta temperatura y esta disminución fue acompañada por una disminución de la conductancia estomática (g_s). Ahora bien, en los parámetros de C_i , UEA y A/g_s sí que se encontraron una interacción significativa entre la temperatura y la frecuencia de riego. Esto indica que las causas por las que se produjo el descenso de la A_{CO_2} con la temperatura fue diferente según la frecuencia de riego. Con una alta frecuencia de riego C_i disminuyó con la temperatura pasando de 310 a 250 ppm CO₂ lo que sugiere que el cierre estomático limitó la entrada de CO₂ a las células del mesófilo (Von Caemmerer y Farquar, 1981). Pero además, como la temperatura afectó a los parámetros de fluorescencia de clorofilas F_v/F_m y F_o indicaría que los procesos de captación de la luz también podrían estar dañados (centros de reacción del (fotosistema II)). Estos daños son asociados con modificaciones estructurales del PSII, especialmente con la proteína D1, que en condiciones de estrés por calor es fosforilada y degradada (Asada y *col.*, 1998). El cierre estomático observado en estas plantas podría ser debido a una pérdida de turgor celular como muestran los datos de relaciones hídricas. El hecho de que la pérdida de turgor celular no fuera acompañado con una disminución del contenido relativo de agua (CRA) sugiere que las hojas de tomate expuestas a altas temperaturas sufren un proceso de ajuste elástico. Los procesos de ajuste elástico evitan la deshidratación de las hojas modificando las propiedades de las paredes celulares de tal manera que al hacerse más rígidas implican que pequeños cambios en el CRA permite una rápido descenso del turgor celular y como consecuencia de esto del potencial hídrico, lo que evita la pérdida de agua (Verslues y *col.*, 2006). En el caso de

la disminución de la A_{CO_2} con la temperatura en las otras dos frecuencias de riego, FR2 y FR3, parece ser que los factores no estomáticos son los principales responsables y no el cierre estomático como demuestra que C_i no fue afectado por la temperatura con la frecuencia de riego FR2, e incluso aumentó con la frecuencia de riego FR3, además de que en este tratamiento se produjo una disminución de F_v/F_m y Φ_{PSII} . Por otro lado, el comportamiento de los parámetros de intercambio gaseosos que hemos observado en este experimento es diferente a otros experimentos realizados en plantas de tomate donde el estrés térmico se realiza mediante un golpe de temperatura. Camejo y col., (2005) observó que plantas de tomate sometidas a 45 °C durante 2 horas disminuyen la A_{CO_2} debido a alteraciones tanto en el ciclo de Calvin como a daños en el PSII, sin embargo la g_s y la transpiración aumento con la temperatura. Morales y col., (2003) observó que en plantas de tomate a 40 °C durante 4 días se produce la deshidratación de las hojas debido a la disminución de la conductividad hidráulica de las raíces.

Efectos de la frecuencia de riego sobre las respuestas agronómicas y fisiológicas de plantas de tomate

El tratamiento de la baja frecuencia de riego (FR3), que consistió en regar las plantas cuando consumían 1,2 litros de agua, fue el más perjudicial comparado con los tratamientos FR2 y FR1. Este tratamiento, como veremos más adelante en los datos de relaciones hídricas, causó un déficit hídrico que determinó durante todo el experimento las respuestas agronómicas y fisiológicas de las plantas. Este déficit hídrico estuvo causado tanto por la alta acumulación de sales como por el agotamiento del agua disponible para la planta en el sustrato. Al regar cuando las plantas consumían 1,2 litros de agua hacia que se agotará prácticamente toda el agua disponible en el sustrato (0-50cb). Además, aunque el porcentaje de lavado para cada frecuencia de riego se aplicó según la conductividad eléctrica del drenaje, en este tratamiento el porcentaje aplicado no fue suficiente para evitar la acumulación de sales como vemos en la CE de la solución de drenaje. Por estas razones en el tratamiento FR3 a las plantas les costaba mucho más extraer el agua que las plantas de los tratamientos FR1 y FR2, y por lo tanto el agua consumida fue mucho menor para las plantas en el tratamiento FR3.

En cuanto a las respuestas agronómicas observamos que la frecuencia de riego FR3 redujo la producción comercial en 1,9 kg por planta. Las plantas de tomate se consideran como un cultivo poco tolerante al déficit hídrico donde la pérdida de la cosecha se produce por problemas en la floración más que en la formación del fruto

(Foolad, 2003). En nuestro ensayo, sin embargo, la baja frecuencia de riego (FR3) afectó tanto a la floración y el cuajado de los frutos, como sugiere la disminución del número total de frutos, como a la tasa de crecimiento de los frutos ya que disminuyó el peso medio de los frutos. En este tratamiento, sin embargo, no se observó ningún aumento de frutos rajados o frutos con BER con respecto a FR1 y FR2. Matos Pires (2011) y Ismail y *col.* (2008) observaron en plantas de tomate cultivadas tanto en sustrato como en suelo que las altas frecuencias de riego incrementan la producción con respecto a las bajas frecuencias de riego, aunque incluso se apliquen a la planta la misma cantidad de agua por día. Estos autores llegan a la conclusión de que el contenido hídrico del suelo es el principal factor que determina el peso medio de los frutos, mientras que la temperatura del suelo afecta principalmente al número de frutos.

La calidad de los frutos de tomate también se vio afectada por la frecuencia de riego, destacando que los frutos procedentes del tratamiento de más baja frecuencia (FR3) tuvieron una mayor concentración de sólidos solubles totales (SST) que los frutos de la frecuencia FR2 y FR1. Esto podría ser debido a tres factores: i) cuando se mantiene una adecuada humedad del suelo, las raíces pueden absorber más agua incrementando el peso medio del fruto y diluyendo, por tanto los sólidos solubles totales (Ismail y *col.*, 2008); ii) la disminución en el número de frutos hace que haya más fotoasimilados para los frutos que se desarrollan en la planta, relación inversa entre la producción y calidad de frutos en tomate (Eshed y Zamir, 1994); y iii) en condiciones de déficit hídrico las plantas incrementan la síntesis de solutos orgánicos, como los azúcares, para ajustarse osmóticamente y evitar la deshidratación (Munns, 2002). Marouelli y *col.*, (2004) indicaron que para incrementar la calidad de los frutos de tomate se debería disminuir la cantidad de agua aplicada a las plantas al empezar el estado de maduración.

La concentración de glucosa y fructosa también incrementó con la baja frecuencia de riego (FR3). Al igual que en el caso de la temperatura, el aumento de estos carbohidratos por la baja frecuencia de riego, responde al mismo factor, es decir, que este tratamiento produce un estrés fisiológico en el fruto asociado entre otras cosas a la baja disponibilidad de agua. El aumento de la concentración de fenoles en este tratamiento corrobora los resultados obtenidos por Krauss y *col.*, (2007). Estos autores indicaron que cuando las plantas sufren déficit hídrico por algún tipo de estrés se produce un incremento de la concentración de fenoles. Además, la limitación de agua aumenta los carbohidratos libres, entonces otros compuestos carbonados relacionados

con la degradación de los mismos también aumentan y entre ellos pueden estar el ácido cítrico y phytico. En el caso de los ácidos oxálico, succínico, acético y fumárico, la poca variación que hubo entre ellos puede estar relacionada con que son intermediarios del ciclo de krebs y se interconvierten fácilmente en otros ácidos del ciclo como el málico y cítrico y por tanto las variaciones de ellos se pueden ver reflejadas en las variaciones de concentración encontradas en estos dos últimos (Rosales, Miguel A.; Cervilla, Luis M.; Sánchez-Rodríguez, E. y *col.*, 2011).

Las concentraciones de nutrientes en los diferentes tejidos de la planta también se vieron afectadas por la frecuencia de riego. En general se puede decir que la baja frecuencia de riego disminuyó la concentración de P, S, Cu, Mn y Zn, y aumentó la concentración de Na. Sin embargo, en ninguno de los casos se observó una deficiencia o toxicidad que pudiera provocar un efecto negativo directo sobre la producción o el crecimiento vegetativo. La concentración de nutrientes en los diferentes tejidos de las plantas depende de una gran cantidad de factores entre los que se incluyen la disponibilidad de los nutrientes en el suelo, la absorción de nutrientes por las raíces, el transporte de la raíz a la parte aérea, y la distribución de los nutrientes por todos los órganos de la planta. En condiciones medio ambientales adversas la importancia de cada uno de estos factores puede cambiar con respecto a condiciones medioambientales óptimas de tal manera que la combinación de todos ellos hace que la concentración de los nutrientes se incremente, disminuya o incluso se mantenga igual que la concentración de las plantas control. La disponibilidad de nutrientes en el suelo depende del transporte de los nutrientes de la solución del suelo a las raíces (a través del movimiento del agua, flujo másico, o a través del gradiente de concentración, difusión), precipitación de compuestos insolubles, reacciones de absorción electrostática, y actividades microbianas. En condiciones de cultivo sin suelo donde el sustrato está limitado en los sacos de cultivo, el movimiento de nutrientes por convección es mucho mayor que por difusión, entonces aquellos nutrientes que se mueven por difusión son los que presentan una menor movilidad. Silber y *col.*, (2003) observó en plantas de lechuga cultivadas en perlita que un manejo de riego de baja frecuencia disminuyó la absorción de N, P y micronutrientes, elementos poco móviles en el sustrato ya que se mueven por difusión. Además de las limitaciones en la disponibilidad de nutrientes en el suelo otros factores como la conductividad hidráulica de las raíces pueden afectar a la nutrición de las plantas. En condiciones de baja disponibilidad de agua, el flujo de agua en la planta no es de naturaleza hidrostática si no osmótica, lo cual hace que la

conductividad hidráulica de las raíces sea muy pequeña lo que también limitaría el transporte de nutrientes a la parte aérea de las plantas (Steudle y *col.*, 2000).

Los datos de relaciones hídricas muestran que las plantas del tratamiento FR3 sufrieron déficit hídrico ya que el potencial hídrico de las hojas pasó de -0,8 MPa para las plantas de los tratamientos FR1 y FR2 a -1,4 MPa para el tratamiento FR3, y esto estuvo acompañado de una disminución tanto del potencial de turgor (Ψ_p) como del contenido relativo de agua (CRA). En plantas sometidas a déficit hídrico el factor principal para que puedan seguir creciendo es mantener un buen estado hídrico con altos valores de Ψ_p (Arndt y *col.*, 2001). En plantas de tomate se ha observado que un Ψ_w del suelo menor a -1 MPa se puede considerar como un factor umbral a partir del cual empieza a disminuir el potencial hídrico y el turgor celular de las plantas, y por tanto a afectar a las características fotosintéticas de las hojas (Easlon y Richard, 2009). Aunque en nuestro ensayo nosotros no medimos el Ψ_w del suelo, podría ser muy probable que en el tratamiento FR3 se sobrepasara este valor ya que al regar con una frecuencia muy baja disminuye considerablemente el agua disponible para la planta y se acumulan las sales en el sustrato por lo que el Ψ_w del sustrato se hace más negativo tanto por el bajo contenido de agua como por la disminución del potencial osmótico. La disminución del potencial de turgor en las hojas podría haber producido el cierre estomático causando la disminución de la asimilación neta de CO_2 (A_{CO_2}). En plantas de tomate en general se ha observado una escasa capacidad para tolerar la sequía (Flower y Ludlow, 1986 ;Turner 1986). Aunque en algunas especies silvestres se ha observado un cierre estomático regulado por el ABA (ácido abscísico) sin pérdida de turgor celular para evitar la pérdida de agua, parece ser que estos mecanismos no son muy eficaces y las plantas terminan deshidratándose (Easlon y Richard, 2009). En nuestro experimento los datos de parámetros de intercambio gaseoso indican que la disminución de la A_{CO_2} podría ser debida a factores no estomáticos ya que la disminución de la conductancia estomática fue acompañada por un incremento en la concentración del CO_2 subestomático (C_i), como ya hemos comentado anteriormente. Games y *col.*, (2012) observaron que la difusión del CO_2 a través de los estomas y de las células del mesófilo, más que las limitaciones bioquímicas de la fotosíntesis, son los factores que más influyen en la disminución de la A_{CO_2} en plantas de tomate en condiciones de déficit hídrico. Sin embargo, en nuestro ensayo los datos de fluorescencia de clorofilas indican daños en la maquinaria fotosintética de las hojas al pasar F_v/F_m de 0.82 para los tratamientos FR1 y FR2 a 0.77 en el tratamiento FR3.

4.5. Conclusiones

Con los datos de este experimento se puede concluir que para nuestras condiciones de cultivo la temperatura de 35 °C resulta perjudicial para la producción comercial de las plantas de tomate de la variedad ‘Anairis’. Esto se debe a que en las plantas cultivadas con esta temperatura aumentaron el número de frutos no comerciales y disminuyó el peso medio de los frutos comerciales. Sin embargo, la alta temperatura mejoró la calidad química de los frutos al aumentar los sólidos solubles totales. Los aspectos negativos de la alta temperatura sobre los parámetros agronómicos podrían ser debidos a que la temperatura de 35 °C afectó negativamente a la asimilación neta de CO₂, aunque las causas por las que disminuyó este parámetros dependieron de la frecuencia de riego. Mientras que los factores no estomáticos jugaron un papel importante en todas las frecuencia ensayadas, en la frecuencia de riego FR1 fue importante también el cierre estomático. Los datos de relaciones hídricas sugieren que las plantas de tomate a 35 °C tuvieron algún tipo de ajuste elástico que les permitió mantener un buen estado hídrico de la planta. La nutrición mineral también se vio alterada con la temperatura más alta. En general podemos decir que la concentración de Ca, K, S, P, Fe y Zn disminuyó, y la concentración de Na y B incrementó con la alta temperatura. Sin embargo, no se produjeron problemas de deficiencia o toxicidad que pudieran alterar el desarrollo de las plantas.

En cuanto al riego, una frecuencia de riego alta o moderada (FR1 y FR2) son más adecuadas con respecto a un manejo de baja frecuencia (FR3). Este tratamiento produjo un déficit hídrico en las plantas que afectó negativamente tanto a las respuestas agronómicas como fisiológicas. Esto se debió a que con una frecuencia baja de riego se acumulan una mayor concentración de sales en el sustrato y además se llega a agotar el agua disponible para la planta superando por tanto los umbrales de potencial hídrico adecuados para un buen desarrollo del cultivo. La pérdida de producción comercial con el tratamiento FR3 fue debido a la disminución tanto del número total de frutos, como a su tasa de crecimiento. La calidad sí que fue mejorada por la baja frecuencia de riego ya que los frutos del tratamiento FR3 tuvieron la mayor concentración de sólidos solubles totales (SST). Los datos de relaciones hídricas sugieren que los aspectos negativos observados en la producción comercial con la frecuencia de riego FR3 fueron debidos a que estas plantas sufrieron déficit hídrico ya que tanto el potencial hídrico, el potencial de turgor y el contenido relativo de agua disminuyeron en este tratamiento. La concentración de nutrientes en los diferentes tejidos de la planta también se vieron

afectadas por la frecuencia de riego. En general se puede decir que la baja frecuencia de riego disminuyó la concentración de P, S, Cu, Mn y Zn, y aumentó la concentración de Na. Sin embargo, en ninguno de los casos se observó una deficiencia o toxicidad que pudiera provocar un efecto negativo directo sobre la producción o el crecimiento vegetativo.

En general se puede concluir sobre el efecto combinado de la temperatura y la frecuencia de riego que los efectos fueron aditivos no observándose apenas interacciones significativas temperatura x frecuencia de riego. Por lo tanto, aquellas plantas cultivadas a 35 °C y con la baja frecuencia de riego tuvieron la producción comercial más pequeña al disminuir tanto en número de frutos comerciales como el peso medio de los frutos. Sin embargo, la concentración de sólidos solubles totales fue más alta en relación a frutos procedentes de los otros tratamientos. En los parámetros de intercambio gaseoso A_{CO_2} y g_s también observamos los valores más bajos porque además del efecto perjudicial de la alta temperatura en la fotosíntesis, las plantas también sufrieron déficit hídrico produciéndose la deshidratación de las hojas. Entonces de todo lo dicho anteriormente, para obtener una buena producción comercial de plantas de tomate de la variedad “Anairis” se requiere mantener la temperatura del invernadero por debajo de 35 °C y manejar el cultivo con altas frecuencias de riego.

4.6. Bibliografía

- Arndt, S.K.; Clifford, S.C.; Wanek, W.; Jones, H.G. ;Popp, M. (2001). Physiological and morphological adaptation of the fruit tree *Ziziphus rotundifolia* in response to progressive drought stress. *Tree Physioogyl* 21, 705-715.
- Asada, K.; Endo, T.; Mano, J.; Miyake, C. (1998). Molecular mechanism for relaxation of and protection from light stress. Stress responses of photosynthetic organisms. *Amsterdam: Elsevier* 37-52.
- Ashraf, M.; Hafeez M. (2004). Thermotolerance of pearl millet and maize at early growth stages: growth and nutrient relations. *Biologia Plantarum* 48, 81-86.
- Berry J.; Bjorkman O. (1980). Photosynthetic response and adaptation to temperature in higher plants. *Plant Physiology* 31, 491-543.
- Bravo, F.P.; Uribe, E.G. (1981). Temperature dependence of the concentration kinetics of absorption of phosphate and potassium in corn roots. *Plant Physiology*. 67, 815-819.
- Camejo, D.; Rodríguez P.; Morales M^a A.; Dell’Amico J. M.; Torrecillas A.; y Alarcón

- J. J.; (2005). High temperature effects on photosynthetic activity of two tomato cultivars with different heat susceptibility. *Journal of Plant Physiology* 162, 281-289.
- Carvajal, M.; Martínez-Giménez, M. R.; Alcaraz, C. F. (1997). Effect of ascorbic acid addition to peppers on paprika quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 75, 442-446.
- Dorais, M.; Papadopoulos, A.P.; Gosselin, A. (2001). Greenhouse tomato fruit quality. *Horticultural Reviews*, 26, 239-319.
- Easlon, H. M.; Richards J. H. (2009). Drought response in self-compatible species of tomato (Solanaceae). *American Journal of Botany* 96, 605-611.
- Eshed Y.; Zamir D. (1994). Introgressions from *Lycopersicon pennellii* can improve the soluble-solids yield of tomato hybrids. *Theoretical and Applied Genetic* 88:891-897.
- Flower, D. J.; Ludlow M. M. (1986). Contribution of osmotic adjustment to the dehydration tolerance of water-stressed pigeonpea (*cajanus-cajan* (L) millsp) leaves. *Plant Cell and Environment* 9, 33-40.
- Foolad, M.R.; L.P. Zhang; P. Subbiah, (2003). The Genetics of drought tolerance during seed germination in tomato: inheritance and QTL mapping. *Genome* 46, 536-545.
- Galmés Jeroni, Ochogavía Joan Manuel, Gago Jorge, Roldán Emilio José, Cifre Josep y Conesa Miquel Angel. (2012). Leaf responses to drought stress in mediterranean accessions of *Solanum lycopersicum*: anatomical adaptations in relation to gas exchange parameters. *Plant, Cell and Environment* 16, 12-22.
- Garg, N; Cheema D. S. (2011). Assessment of fruit quality attributes of tomato hybrids involving ripening mutants under high temperature conditions. *Scientia Horticulturae* 131, 29-38.
- Ho, L.C. (1996). The mechanism of assimilate partitioning and carbohydrate compartmentation in fruit in relation to the quality and yield of tomato. *Journal of Experimental Botany*, 47, 1239-1243.
- Ismail, S.M.; Ozawa, K.; Khondaker, N.A. (2008). Influence of single and multiple water application timings on yield and water use efficiency in tomato (variety First power). *Agricultural Water Management* 95, 116-122.
- López-Marína, J.; González, A.; Pérez-Alfocea, F.; Egea-Gilabert C.; Fernández Juan, A. (2013). Grafting is an efficient alternative to shading screens to alleviate thermal stress in greenhouse-grown sweet pepper. *Scientia Horticulturae* 149, 39-46.

- Marouelli, W.A.; Washington, L.C.S.; Moretti, C.L.; (2004). Production quality and water use efficiency of processing tomato as affected by the final irrigation timing. *Horticultura Brasileira* 22, 226-231.
- Matos Pires, R. C.; Furlani, P. R.; Vasconcelos Ribeiro, R.; Bodine J. D.; Sakai, E.; Luiz Lourença, A.; Torre Neto, A. (2011). Irrigation frequency and substrate volume effects in the growth. *Embrapa Instrumentação Agropecuária C.P. 741 13560-970 – São Carlos, SP – Brasil*.
- Morales, D.; Rodríguez, P.; Dell'amico, J.; Nicolás, E.; Torrecillas, A.; Sánchez-Blanco. (2003). Hight-temperature preconditioning and thermal shock imposition affects water relations, gas exchange and root hydraulic conductivity in tomato imposition affects water relations, gas exchange and root hydraulic conductivity in tomato. *Journal of Plant Biology* 47, 203-208.
- Muldoon, D.K.; Wheeler, J.L.; Pearson, C.J. (1984). Growth, mineral composition and digestibility of maize, sorghum and barnyard millets at different temperatures. - *Australian Journal of Agricultural Resource* 35, 367-378.
- Muldoon, D.K.; Wheeler, J.L.; Pearson, C.J. (1984). Growth, mineral composition and digestibility of maize, sorghum and barnyard millets at different temperatures. - *Australian Journal of Agricultural Resource*. 35, 367-378.
- Munns, R. (2002). Comparative physiology of salt and water stress. *Plant, Cell & Environment* 25, 239-250.
- Newton, P.; Sahraoui, R.; Economakis, C. (1999). The influence of air temperature on truss weight of tomatoes. *Acta Horticulturae*, 507, 43-49.
- Riga, P. Anza, M.; Garbisu C. (2008). Tomato quality is more dependent on temperature than on photosynthetically active radiation *Journal of the Science of Food and Agriculture* 88, 158-166.
- Rosales, M. A.; Rubio-Wilhelmi, María M.; Castellano, R. (2007). Sucrolytic activities in cherry tomato fruits in relation to temperature and solar radiation. *Scientia Horticulturae* 113, 244-249.
- Rosales, Miguel A.; Cervilla, Luis M.; Sánchez-Rodríguez, E. (2011). The effect of environmental conditions on nutritional quality of cherry tomato fruits: evaluation of two experimental Mediterranean greenhouses. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 91, 152-162.
- Sánchez-Rodríguez, E.; Ruiz, J.M.; Ferreres, F.; Moreno, D.A. (2012). Phenolic profiles of cherry tomatoes as influenced by hydric stress and rootstock technique. *Food*

- and Chemistry* 134, 775-82.
- Silber, A.; Xu, G.; Levkovitch, I.; Soriano, S.; Bilu, A.; Wallach R. (2003). High fertigation frequency: the effects on uptake of nutrients, water and plant growth. *Plant and Soil* 253, 467-477.
- Steudle, E. (2000). Water uptake by roots: effects of water deficit. *Journal of Experiment Botany* 51, 1531-1542.
- Tollenaar, M. (1989). Response of dry matter accumulation in maize to temperature. I. Dry matter partitioning. *Crop Science*. 29, 1239-1246.
- Verslues, P. E.; Agarwal; M.; Katiyar-Agarwal, S.; Zhu, J. y Kang Z. J. (2006). Methods and concepts in quantifying resistance to drought, salt and freezing, abiotic stresses that affect plant water status. *Plant Journal* 45, 523.
- Von Caemmerer, S.; Farquhar, G.D. (1981). Some relationships between the biochemistry of photosynthesis and the gas exchange of leaves. *Planta* 153, 376-87.
- Waterman, P. G.; Mole, S. (1994). Analysis of phenolic plantmetabolites. *Blackwell Scientific Publication: Oxford* 83-91.

CAPITULO 5:

Conclusiones



Estudio del comportamiento de plantas de tomate (Solanum lycopersicum) bajo invernadero en diferentes sistemas de cultivo sin suelo en condiciones salinas

1. Según nuestras condiciones de cultivo, el sistema hidropónico es el más idóneo para cultivar plantas de tomate de la variedad “Optima” en condiciones de salinidad en el rango ensayado de 2-10 dSm⁻¹, seguido del sistema de sacos de perlita. El sistema de NGS fue el que menor producción comercial dio.
2. Los tratamientos salinos de 40 y 80 mM NaCl disminuyeron la producción comercial en un 35 y 58%, respectivamente, con respecto al tratamiento control, y esta disminución fue similar para los tres sistemas ensayados. Esta reducción se debió a una disminución del peso medio de los frutos en los tres sistemas, y además a un descenso en el número de frutos en plantas cultivadas en NGS.
3. Aunque la salinidad produce frutos de pequeño tamaño, la calidad química de los frutos, sólidos solubles totales (SST) y acidez valorable (TA) mejoró con la salinidad, pero en una mayor medida en los frutos del sistema de NGS.
4. La concentración de Cl y Na fue mayor para plantas en NGS seguido de hidroponía y perlita; y estos valores se correlacionaron con la reducción en el desarrollo vegetativo pero no con la producción.
5. En cuanto a la nutrición, la concentración de K, P y Mg fue también afectada por la salinidad disminuyendo de forma similar para los tres sistemas de cultivo. Aunque en ningún momento se llegaron a producir deficiencias o toxicidades nutricionales.
6. La asimilación neta de CO₂ (A_{CO2}) disminuye con la salinidad cuando la concentración de Cl en las hojas fue superior a 1,5 %, y esta reducción pudo ser debida principalmente a desajustes metabólicos de la fotosíntesis más que a factores estomáticos o procesos relacionados con la captación de la luz.
7. Según los datos de relaciones hídricas y los parámetros de intercambio gaseoso, el efecto negativo de la salinidad se debió principalmente a la toxicidad de Cl y/o Na. El efecto osmótico fue prácticamente insignificante ya que no se observó una pérdida de turgor celular o deshidratación de las hojas.

Estudio del comportamiento de plantas de tomate (Solanum lycopersicum) bajo invernadero a altas temperaturas medioambientales cultivadas con tres diferentes frecuencias de riego

1. Para nuestras condiciones de cultivo la temperatura de 25 °C es la más idónea para la producción comercial de plantas de tomate de la variedad 'Anairis', ya que a la temperatura de 35 °C disminuyó la producción comercial debido a un aumento del número de frutos no comerciales y a la disminución del peso medio de los frutos comerciales.
2. Aunque la temperatura de 35 °C disminuyó el peso medio de los frutos, la calidad química si mejoró al aumentar los sólidos solubles totales.
3. La nutrición mineral de las plantas también se vio alterada con la temperatura más alta. En general podemos decir que la concentración foliar de Ca, K, S, P, Fe y Zn disminuyó, y la concentración de Na y B incrementó con la alta temperatura. Sin embargo, no se produjeron problemas de deficiencia o toxicidad que pudieran alterar el desarrollo de las plantas.
4. Los datos de relaciones hídricas sugieren que las plantas de tomate a 35 °C tuvieron algún tipo de ajuste elástico que les permitió mantener un buen estado hídrico de la planta.
5. Las medidas de intercambio gaseosos indican que la temperatura afectó negativamente a la asimilación neta de CO₂ y a la conductancia estomática g_s. En el tratamiento de riego de alta frecuencia FR1, la reducción de la asimilación neta de CO₂ fue debido tanto al cierre estomático como a posibles alteraciones en los procesos metabólicos de la fotosíntesis, mientras que en los tratamientos de riego FR2 y FR3 destacaron los factores no estomáticos.
6. En cuanto al riego, una frecuencia de riego alta o moderada (FR1 y FR2) son más adecuadas con respecto a un manejo de baja frecuencia (FR3), ya que este tratamiento produjo un déficit hídrico en las plantas que afectó negativamente tanto a las respuestas agronómicas como fisiológicas.

7. La pérdida de producción comercial con el tratamiento FR3 fue debido a la disminución tanto del número total de frutos, como al peso medio de los frutos.
8. La calidad química de los frutos mejoró por la baja frecuencia de riego ya que los frutos del tratamiento FR3 tuvieron la mayor concentración de sólidos solubles totales (SST).
9. La baja frecuencia de riego disminuyó la concentración de P, S, Cu, Mn y Zn, y aumentó la concentración de Na. Sin embargo, en ninguno de los casos se observó una deficiencia o toxicidad que pudiera provocar un efecto negativo directo sobre la producción o el crecimiento vegetativo.
10. Los efectos negativos tanto de la alta temperatura como de la baja frecuencia de riego en general fueron aditivos no observándose apenas interacciones significativas temperatura x frecuencia de riego. Por lo tanto, aquellas plantas cultivadas a 35 °C y con la baja frecuencia de riego tuvieron la producción comercial más baja al disminuir tanto en número de frutos comerciales como el peso medio de los frutos. Sin embargo, la concentración de sólidos solubles totales fue más alta en relación a frutos procedentes de los otros tratamientos.
11. En los parámetros de intercambio gaseoso A_{CO_2} y g_s también observamos los valores más bajos en las plantas cultivadas a 35 °C y con la frecuencia de riego más baja, porque además del efecto perjudicial de la alta temperatura en la fotosíntesis, las plantas también sufrieron déficit hídrico produciéndose la deshidratación de las hojas.
12. Entonces de todo lo dicho anteriormente, para obtener una buena producción comercial de plantas de tomate de la variedad 'Anairis' se requiere mantener la temperatura del invernadero por debajo de 35 °C y manejar el cultivo con altas frecuencias de riego.

Anexos



Hojas

Anexo 1. Efecto de la salinidad (S0, control; S1, 40 mM NaCl; 80 mM NaCl) sobre la concentración foliar de Ca, K, P, S y Mg en plantas de tomate cultivadas en tres sistemas de cultivo sin suelo. Las muestras de hojas fueron cogidas el 07/06/2010.

		Ca (%)	K (%)	P (%)	S (%)	Mg (%)
07/06/2010						
Factor principal: Sistema						
	Hidropónico	3.50±0.12a	3.87±0.15	0.59±0.04b	0.97±0.070b	0.47±0.02b
	NGS	3.05±0.11b	3.97±0.19	0.59±0.03b	0.66±0.028c	0.29±0.01c
	Perlita	3.02±0.12b	4.05±0.16	0.97±0.08a	1.37±0.054a	0.63±0.04a
Factor principal: Salinidad						
	S0	3.16±0.13	4.16±0.19	0.97±0.08a	0.97±0.05a	0.52±0.05a
	S1	3.41±0.13	3.99±0.10	0.68±0.04b	1.10±0.09b	0.47±0.04a
	S2	3.00±0.10	3.74±0.19	0.50±0.02c	0.92±0.10ab	0.40±0.03
Interacción Sistema x Salinidad						
	S0	3.43±0.18	4.18±0.22 ^{ns} AB	0.78±0.043 ^a Y _a B	1.00±0.10 ^{ns} A	0.51±0.03
Hidropónico	S1	3.85±0.26	3.91±0.17A	0.54±0.021bB	1.14±0.07B	0.50±0.03
	S2	3.23±0.10	3.53±0.31B	0.44±0.050bB	0.77±0.14B	0.413±0.06
	S0	2.99±0.24	4.75±0.31 ^Y aA	0.71±0.067 ^Y aB	0.75±0.03 ^Y aB	0.29±0.01
NGS	S1	3.22±0.17	3.87±0.22bA	0.59±0.030abB	0.64±0.03abC	0.28±0.01
	S2	2.94±0.20	3.30±0.14bB	0.45±0.038bB	0.57±0.04bB	0.28±0.01
	S0	3.07±0.28	3.54±0.26 ^{ns} B	1.42±0.084 ^Y aA	1.16±0.05 ^Y bA	0.77±0.07
Perlita	S1	3.16±0.16	4.21±0.11A	0.91±0.053bA	1.51±0.08aA	0.62±0.04
	S2	2.83±0.22	4.40±0.31A	0.60±0.030cA	1.43±0.07aA	0.51±0.03
Sistema		*	ns	***	***	***
Salinidad		ns	ns	***	*	***
Sist x Sal		ns	*	***	**	ns

*, **, *** y "ns" indican diferencias significativas a $p < 0,05$, $p < 0,01$, $p < 0,001$ y no significativas, respectivamente. En los factores principales para cada columna, valores con diferentes letras presentan diferencias significativas al 95% según el test de Rango múltiple de Duncan. ^Y indica diferencias significativas a partir de $p < 0,05$ entre los tratamientos salinos dentro de un determinado sistema. En la interacción sistema x salinidad: letras minúsculas comparan los tratamientos salinos para cada sistema de cultivo, y letras mayúsculas comparan los sistemas de cultivo para cada tratamiento salino. Los valores de cada uno de los parámetros son valores medios ± error estándar.

Anexo 2. Efecto de la salinidad (S0, control; S1, 40 mM NaCl; 80 mM NaCl) sobre la concentración foliar de Ca, K, P, S y Mg en plantas de tomate cultivadas en tres sistemas de cultivo sin suelo. Las muestras de hojas fueron cogidas el 06/07/2010.

		Ca (%)	K (%)	P (%)	S (%)	Mg (%)
06/07/2010						
Factor principal: Sistema						
	Hidropónico	5.34±0.13a	2.61±0.22c	0.73±0.04b	1.59±0.06b	0.43±0.01b
	NGS	4.21±0.19b	2.97±0.33b	0.60±0.04c	0.86±0.06c	0.32±0.02c
	Perlita	5.04±0.09a	3.43±0.08a	0.98±0.05a	1.91±0.08a	0.66±0.03a
Factor principal: Salinidad						
	S0	4.97±0.15	3.91±0.15a	0.92±0.04a	1.51±0.08	0.51±0.05
	S1	4.79±0.26	2.86±0.12b	0.82±0.05a	1.48±0.14	0.44±0.04
	S2	4.82±0.10	2.24±0.23c	0.56±0.04b	1.37±0.15	0.47±0.03
Interacción Sistema x Salinidad						
Hidropónico	S0	5.40±0.21	3.66±0.10 ^V aB	0.97±0.006 ^V aA	1.73±0.09nsA	0.49±0.03
	S1	5.74±0.20	2.55±0.15bB	0.67±0.031bB	1.62±0.16A	0.41±0.03
	S2	4.871±0.16	1.61±0.07cA	0.56±0.016cAB	1.43±0.03B	0.39±0.06
NGS	S0	4.19±0.15	4.71±0.14 ^V aA	0.71±0.040 ^V aB	1.15±0.06 ^V aB	0.28±0.01
	S1	4.02±0.60	2.55±0.12bB	0.67±0.032aB	0.80±0.04bB	0.28±0.01
	S2	4.43±0.18	1.65±0.15cB	0.39±0.046bB	0.62±0.03bC	0.39±0.01
Perlita	S0	5.33±0.02	3.37±0.06 ^{ns} B	1.09±0.075 ^V aA	1.65±0.11 nsA	0.74±0.07
	S1	4.61±0.17	3.48±0.02A	1.10±0.046aA	2.00±0.16A	0.62±0.04
	S2	5.18±0.11	3.45±0.25B	0.74±0.050bA	2.08±0.07A	0.61±0.03
Sistema		*	ns	***	***	***
Salinidad		ns	ns	***	*	ns
Sist x Sal		ns	*	***	**	ns

*, **, *** y "ns" indican diferencias significativas a $p < 0,05$, $p < 0,01$, $p < 0,001$ y no significativas, respectivamente. En los factores principales para cada columna, valores con diferentes letras presentan diferencias significativas al 95% según el test de Rango múltiple de Duncan. ^V indica diferencias significativas a partir de $p < 0,05$ entre los tratamientos salinos dentro de un determinado sistema. En la interacción sistema x salinidad: letras minúsculas comparan los tratamientos salinos para cada sistema de cultivo, y letras mayúsculas comparan los sistemas de cultivo para cada tratamiento salino. Los valores de cada uno de los parámetros son valores medios \pm error estándar.

Anexo 3. Efecto de la salinidad (S0, control; S1, 40 mM NaCl; 80 mM NaCl) sobre la concentración foliar de Cu, Fe, Mn, y Zn en plantas de tomate cultivadas en tres sistemas de cultivo sin suelo. Las muestras de hojas fueron cogidas el 07/06/2010.

		Cu (mg kg ⁻¹)	Fe (mg kg ⁻¹)	Mn (mg kg ⁻¹)	Zn (mg kg ⁻¹)
07/06/2010					
Factor principal: Sistema					
	Hidropónico	12.68±0.81a	64.41±3.54b	22.45±3.22c	28.97±3.13a
	NGS	5.76±0.42b	70.74±2.12b	64.09±5.39a	16.77±1.07b
	Perlita	6.00±0.23b	113.8±3.62a	43.68±1.94b	15.37±0.79b
Factor principal: Salinidad					
	S0	8.98±0.89	82.84±5.78	51.50±7.71a	19.07±1.23b
	S1	7.85±1.04	83.74±5.92	40.75±4.58b	17.85±1.48b
	S2	7.61±0.87	82.39±6.82	37.98±2.77b	24.19±3.61a
Interacción Sistema x Salinidad					
Hidropónico	S0	13.37±1.06	61.70±4.63	19.10±3.80nsC	21.76±1.00 ^V bA
	S1	13.03±1.67	68.70±4.03	15.94±3.02B	25.24±2.11bA
	S2	11.65±1.59	62.83±9.18	32.31±7.22A	39.89±7.57aA
NGS	S0	7.85±0.66	76.77±3.27	92.81±3.86 ^V aA	20.36±2.23 ^V aA
	S1	4.70±0.24	67.36±4.52	55.54±3.54bA	14.13±1.01bB
	S2	4.72±0.26	68.09±1.99	43.94±2.89cA	15.82±1.23abB
Perlita	S0	5.73±0.59	110.0±7.99	42.60±3.28 ^V bB	15.10±2.13nsA
	S1	5.82±0.27	115.1±5.05	50.76±2.43aA	14.16±0.71B
	S2	6.44±0.26	116.2±6.32	37.69±2.05bA	16.86±0.75B
Sistema		***	***	***	***
Salinidad		ns	ns	***	*
Sistema x Salinidad		ns	ns	***	**

*, **, *** y "ns" indican diferencias significativas a $p < 0,05$, $p < 0,01$, $p < 0,001$ y no significativas, respectivamente. En los factores principales para cada columna, valores con diferentes letras presentan diferencias significativas al 95% según el test de Rango múltiple de Duncan. ^V indica diferencias significativas a partir de $p < 0,05$ entre los tratamientos salinos dentro de un determinado sistema. En la interacción sistema x salinidad: letras minúsculas comparan los tratamientos salinos para cada sistema de cultivo, y letras mayúsculas comparan los sistemas de cultivo para cada tratamiento salino. Los valores de cada uno de los parámetros son valores medios ± error estándar.

Anexo 4. Efecto de la salinidad (S0, control; S1, 40 mM NaCl; 80 mM NaCl) sobre la concentración foliar de Cu, Fe, Mn, y Zn en plantas de tomate cultivadas en tres sistemas de cultivo sin suelo. Las muestras de hojas fueron cogidas el 06/07/2010.

		Cu (mg kg ⁻¹)	Fe (mg kg ⁻¹)	Mn (mg kg ⁻¹)	Zn (mg kg ⁻¹)
06/07/2010					
Factor principal: Sistema					
	Hidropónico	10.99±0.41a	93.19±3.56b	42.01±3.07b	25.40±0.86
	NGS	4.457±0.28c	85.36±4.52b	82.24±4.34a	21.09±1.06
	Perlita	6.06±0.39b	154.6±4.15a	73.52±3.58a	21.46±1.54
Factor principal: Salinidad					
	S0	7.18±0.73	110.6±7.37	70.90±6.09	23.99±1.35
	S1	7.15±0.70	116.7±9.60	62.77±6.78	23.32±0.99
	S2	7.17±0.91	105.8±8.95	64.11±3.41	20.64±1.32
Interacción Sistema x Salinidad					
	S0	11.00±0.74ns	81.15±4.91nsB	45.22±1.18 ^V abB	23.60±0.79
Hidropónico	S1	10.69±0.76	94.56±5.50B	28.34±1.63bB	25.79±2.20
	S2	11.28±0.94	103.8±5.76B	52.47±5.70aA	26.80±1.48
	S0	5.69±0.27 ^V a	103.3±3.08 ^V aB	100.2±5.27nsA	24.53±1.34
NGS	S1	4.43±0.34ab	88.16±6.64aB	72.44±7.17A	21.59±2.06
	S2	3.25±0.23b	64.53±0.58C	74.01±4.97A	17.14±0.81
	S0	4.85±0.45 ns	147.3±7.12A	67.22±5.67nsB	23.84±4.43
Perlita	S1	6.32±0.32	167.4±7.97A	87.52±4.92A	22.57±0.59
	S2	6.99±0.96	149.2±5.61A	65.83±4.83A	17.98±1.96
	Sistema	***	***	***	ns
	Salinidad	ns	ns	ns	ns
	Sistema x Salinidad	ns	*	**	ns

*, **, *** y "ns" indican diferencias significativas a $p < 0,05$, $p < 0,01$, $p < 0,001$ y no significativas, respectivamente. En los factores principales para cada columna, valores con diferentes letras presentan diferencias significativas al 95% según el test de Rango múltiple de Duncan. ^V indica diferencias significativas a partir de $p < 0,05$ entre los tratamientos salinos dentro de un determinado sistema. En la interacción sistema x salinidad: letras minúsculas comparan los tratamientos salinos para cada sistema de cultivo, y letras mayúsculas comparan los sistemas de cultivo para cada tratamiento salino. Los valores de cada uno de los parámetros son valores medios ± error estándar.

Anexo 5. Efecto de la salinidad (S0, control; S1, 40 mM NaCl; 80 mM NaCl) sobre la concentración de Ca, K, P, S y Zn en el tallo de plantas de tomate cultivadas en tres sistemas de cultivo sin suelo. Las muestras de hojas fueron cogidas el 06/07/2010.

		Ca (%)	K (%)	P (%)	S (%)	Mg (%)	
06/07/2010							
Factor principal: Sistema							
	Hidropónico	2.12±0.04a	3.66±0.18a	0.81±0.03a	0.27±0.01a	0.30±0.01a	
	NGS	1.49±0.05b	2.60±0.25b	0.54±0.03b	0.16±0.01b	0.16±0.01b	
		1.40±0.03b	3.41±0.13a	0.78±0.01a	0.29±0.01a	0.31±0.01a	
Factor principal: Salinidad							
	S0	1.84±0.07a	4.06±0.13a	0.82±0.03a	0.27±0.02a	0.29±0.03a	
	S1	1.67±0.09b	3.25±0.12b	0.74±0.02b	0.25±0.01a	0.27±0.02a	
	S2	1.52±0.08b	2.43±0.17c	0.60±0.03c	0.21±0.01b	0.23±0.02b	
Interacción Sistema x Salinidad							
	Hidropónico	S0	2.22±0.15	4.58±0.25	0.98±0.02 ^V aA	0.32±0.01	0.32±0.01nsA
		S1	2.141±0.12	3.47±0.12	0.77±0.02bA	0.27±0.002	0.30±0.01A
		S2	2.005±0.09	2.92±0.06	0.69±0.01cA	0.23±0.004	0.29±0.03A
	NGS	S0	1.78±0.04	3.70±0.17	0.67±0.04 ^V aC	0.19±0.004	0.16±0.002nsB
		S1	1.31±0.01	2.64±0.08	0.57±0.03aB	0.17±0.003	0.17±0.002B
		S2	1.32±0.04	1.46±0.02	0.39±0.01bB	0.13±0.001	0.15±0.013C
	Perlita	S0	1.53±0.03	3.88±0.16	0.81±0.01 ^{ns} B	0.32±0.02	0.38±0.04 ^V aA
		S1	1.44±0.04	3.44±0.22	0.81±0.02A	0.29±0.01	0.30±0.03abA
		S2	1.23±0.01	2.90±0.07	0.73±0.04A	0.26±0.01	0.24±0.01bB
	Sistema	***	***	***	***	***	
	Salinidad	**	***	***	**	**	
	Sistema x Salinidad	ns	ns	*	ns	*	

*, **, *** y "ns" indican diferencias significativas a $p < 0,05$, $p < 0,01$, $p < 0,001$ y no significativas, respectivamente. En los factores principales para cada columna, valores con diferentes letras presentan diferencias significativas al 95% según el test de Rango múltiple de Duncan. ^V indica diferencias significativas a partir de $p < 0,05$ entre los tratamientos salinos dentro de un determinado sistema. En la interacción sistema x salinidad: letras minúsculas comparan los tratamientos salinos para cada sistema de cultivo, y letras mayúsculas comparan los sistemas de cultivo para cada tratamiento salino. Los valores de cada uno de los parámetros son valores medios \pm error estándar.

Anexo 6. Efecto de la salinidad (S0, control; S1, 40 mM NaCl; 80 mM NaCl) sobre la concentración de Cu, Fe, Mn y Zn en el tallo de plantas de tomate cultivadas en tres sistemas de cultivo sin suelo. Las muestras de hojas fueron cogidas el 06/07/2010.

		Cu (mg kg ⁻¹)	Fe (mg kg ⁻¹)	Mn (mg kg ⁻¹)	Zn (mg kg ⁻¹)
06/07/2010					
Factor principal: Sistema					
	Hidropónico	12.02±0.69a	51.96±3.86a	31.05±1.24	133.15±6.56a
	NGS	3.52±0.48c	35.08±1.32b	27.07±2.09	37.57±2.53b
	Perlita	7.47±0.45b	62.26±5.40a	29.19±1.86	31.40±2.16b
Factor principal: Salinidad					
	S0	8.55±1.48a	52.65±6.88	32.99±1.50a	74.86±19.6
	S1	8.13±1.21ab	53.56±4.31	28.88±1.57ab	66.52±15.6
	S2	6.84±1.27b	45.15±4.73	25.64±1.32b	64.00±16.4
Interacción Sistema x Salinidad					
	S0	14.23±0.19 ^V aA	45.19±4.66	33.21±2.48	152.6±7.10
Hidropónico	S1	11.69±0.27bA	62.58±0.59	31.06±2.56	119.2±6.39
	S2	10.14±1.16bA	48.11±8.39	28.88±0.97	127.6±11.0
	S0	4.79±0.69 ^V aB	36.99±0.71	32.67±3.82	40.05±4.18
NGS	S1	3.50±0.35abC	35.93±4.64	22.91±0.69	34.55±2.90
	S2	2.25±0.26bB	32.61±1.87	24.24±0.66	37.10±5.78
	S0	6.62±0.84 ^{ns} B	75.78±11.3	33.09±2.52	31.87±3.11
Perlita	S1	7.66±0.20B	56.29±4.31	30.68±0.55	35.13±4.15
	S2	8.14±1.08A	54.72±8.13	23.80±3.42	27.20±3.68
	Sistema	***	***	ns	***
	Salinidad	*	ns	***	ns
	Sistema x Salinidad	*	ns	ns	ns

*, **, *** y "ns" indican diferencias significativas a $p < 0,05$, $p < 0,01$, $p < 0,001$ y no significativas, respectivamente. En los factores principales para cada columna, valores con diferentes letras presentan diferencias significativas al 95% según el test de Rango múltiple de Duncan. ^V indica diferencias significativas a partir de $p < 0,05$ entre los tratamientos salinos dentro de un determinado sistema. En la interacción sistema x salinidad: letras minúsculas comparan los tratamientos salinos para cada sistema de cultivo, y letras mayúsculas comparan los sistemas de cultivo para cada tratamiento salino. Los valores de cada uno de los parámetros son valores medios ± error estándar.

Anexo 7. Efecto de la salinidad (S0, control; S1, 40 mM NaCl; 80 mM NaCl) sobre la concentración de Ca, K, P, S y Mg en la raíz de plantas de tomate cultivadas en tres sistemas de cultivo sin suelo. Las muestras de hojas fueron cogidas el 06/07/2010.

		Ca	K	P	S	Mg
		(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
06/07/2010						
Factor principal: Sistema						
	Hidropónico	0.86±0.04b	5.37±0.57a	1.23±0.08a	0.71±0.04a	0.34±0.02
	NGS	11.16±0.25a	3.44±0.59b	0.41±0.05b	0.26±0.02c	1.01±0.12
	Perlita	1.13±0.04b	2.20±0.23c	0.41±0.02b	0.36±0.02b	0.16±0.01
Factor principal: Salinidad						
	S0	4.07±1.52b	5.21±0.62a	0.72±0.17a	0.44±0.05	0.70±0.23
	S1	4.46±1.78ab	3.88±0.66b	0.76±0.16a	0.46±0.09	0.43±0.14
	S2	4.63±1.78a	1.92±0.38c	0.58±0.09b	0.44±0.08	0.48±0.15
Interacción Sistema x Salinidad						
		0.78±0.01 ^Y bB	6.95±0.21 ^Y aA	1.38±0.10 ^Y aA	0.62±0.01 ^{ns} A	0.39±0.01 ^Y aB
Hidropónico	S0	0.79±0.04bB	5.90±0.20aA	1.38±0.12aA	0.83±0.03A	0.36±0.02aAB
	S1	1.01±0.08aB	3.256±0.49bA	0.93±0.01bA	0.70±0.10A	0.27±0.03bB
	S2	10.14±0.36 ^{ns} A	5.26±1.14 ^Y aAB	0.40±0.09 ^{ns} B	0.31±0.06 ^{ns} B	1.50±0.06 ^Y aA
NGS	S0	11.59±0.53A	4.22±0.59aB	0.57±0.13B	0.29±0.05B	0.79±0.22bA
	S1	11.74±0.31A	0.84±0.04bB	0.27±0.06C	0.19±0.04C	1.01±0.10abA
	S2	1.27±0.12 ^{ns} A	3.43±0.29 ^Y aB	0.38±0.03 ^Y bB	0.39±0.02 ^Y aB	0.20±0.02 ^{ns} C
Perlita	S0	1.01±0.05A	1.51±0.01bC	0.33±0.04bB	0.26±0.01bB	0.15±0.01B
	S1	1.12±0.06B	1.67±0.12bB	0.53±0.03aB	0.44±0.01aB	0.15±0.03B
	S2		***	***	***	***
Salinidad		*	***	*	ns	**
Sist x Sal		*	*	**	**	**

*, **, *** y "ns" indican diferencias significativas a $p < 0,05$, $p < 0,01$, $p < 0,001$ y no significativas, respectivamente. En los factores principales para cada columna, valores con diferentes letras presentan diferencias significativas al 95% según el test de Rango múltiple de Duncan. ^Y indica diferencias significativas a partir de $p < 0,05$ entre los tratamientos salinos dentro de un determinado sistema. En la interacción sistema x salinidad: letras minúsculas comparan los tratamientos salinos para cada sistema de cultivo, y letras mayúsculas comparan los sistemas de cultivo para cada tratamiento salino. Los valores de cada uno de los parámetros son valores medios \pm error estándar.

Anexo 8. Efecto de la salinidad (S0, control; S1, 40 mM NaCl; 80 mM NaCl) sobre la concentración de Cu, Fe, Mn y Zn en la raíz de plantas de tomate cultivadas en tres sistemas de cultivo sin suelo. Las muestras de hojas fueron cogidas el 06/07/2010.

		Cu (mg kg ⁻¹)	Fe (g kg ⁻¹)	Mn (mg kg ⁻¹)	Zn (mg kg ⁻¹)
06/07/2010					
Factor principal: Sistema					
	Hidropónico	57.51±7.82a	1.85±0.25c	112.7±20.99a	310.50±17.82a
	NGS	15.91±0.89b	2.96±0.11a	137.8±12.13a	33.22±1.23b
	Perlita	12.24±0.48b	2.21±0.09b	72.53±4.953b	36.13±2.61b
Factor principal: Salinidad					
	S0	33.93±10.14a	2.51±0.13a	118.12±16.45	128.1±44.8ab
	S1	31.75±9.69b	2.45±0.17a	109.8±15.01	142.0±55.3a
	S2	19.97±2.99b	2.08±0.31b	95.13±18.82	109.6±39.2b
Interacción Sistema x Salinidad					
	S0	71.55±13.1 ^V aA	2.46±0.31 ^V aA	163.5±18.90 ^V aA	305.6±20.4 ^{ns} A
Hidropónico	S1	70.31±3.03aA	2.06±0.22aB	127.2±37.04abA	360.8±27.8A
	S2	30.66±3.39bA	1.03±0.21bC	47.54±6.36bC	265.1±17.9A
	S0	17.17±0.82 ^{ns} B	2.76±0.24 ^{ns} A	125.8±19.76 ^{ns} A	33.62±2.14 ^{ns} B
NGS	S1	13.28±1.52B	3.06±0.58A	119.0±25.44A	33.98±3.54B
	S2	17.27±1.21B	3.08±0.22A	168.6±2.16A	32.07±0.37B
	S0	13.08±0.36 ^{ns} B	2.32±0.11 ^{ns} A	65.00±5.29 ^{ns} B	45.17±3.73 ^V aB
Perlita	S1	11.66±0.77B	2.20±0.15B	83.39±11.86A	31.35±1.28bB
	S2	11.97±1.22B	2.12±0.21B	69.19±5.73B	31.88±2.21bB
	Sistema	***	***	**	***
	Salinidad	**	*	ns	*
	Sistema x Salinidad	***	**	**	*

*, **, *** y "ns" indican diferencias significativas a $p < 0,05$, $p < 0,01$, $p < 0,001$ y no significativas, respectivamente. En los factores principales para cada columna, valores con diferentes letras presentan diferencias significativas al 95% según el test de Rango múltiple de Duncan. ^V indica diferencias significativas a partir de $p < 0,05$ entre los tratamientos salinos dentro de un determinado sistema. En la interacción sistema x salinidad: letras minúsculas comparan los tratamientos salinos para cada sistema de cultivo, y letras mayúsculas comparan los sistemas de cultivo para cada tratamiento salino. Los valores de cada uno de los parámetros son valores medios ± error estándar.

Anexo 9. Cromatograma de una muestra representativa de tomate variedad “Anairis”. Donde: 1, Ácido Phytico; 2, Ácido Oxálico; 3, Ácido Cítrico; 4, Ácido Málico; 5, Ácido Ascórbico; 6, Ácido Succínico; 7, Ácido Acético; 8, Ácido Fumárico; D, Desconocido.

