

ZAMORANO
CARRERA DE CIENCIA Y PRODUCCIÓN AGROPECUARIA

**Evaluación agroeconómica de cuatro programas
de fertilización y dos sustratos en tomate
(*Lycopersicon esculentum*) bajo
macrotúnel en Zamorano**

Trabajo de graduación presentado como requisito parcial
para optar al título de Ingeniero Agrónomo en
el Grado Académico de Licenciatura.

Presentado por:

Tomás Néstor Hasing Rodríguez

Honduras
Diciembre, 2002

El autor concede a Zamorano permiso
para reproducir y distribuir copias de este
trabajo para fines educativos. Para otras personas
físicas o jurídicas se reservan los derechos de autor.

Tomás Néstor Hasing Rodríguez.

Honduras
Diciembre, 2002

**Evaluación agroeconómica de cuatro programas
de fertilización y dos sustratos en tomate
(*Lycopersicon esculentum*) bajo
macrotúnel en Zamorano**

Presentado por:

Tomás Néstor Hasing Rodríguez

Aprobada:

José María Miselem L., M.Sc.
Asesor Principal

Jorge Ivan Restrepo, M.B.A.
Coordinador de la Carrera de
Ciencia y Producción
Agropecuaria

Mario Bustamante, M.Sc.
Asesor

Antonio Flores, Ph.D.
Decano Académico

Alfredo Rueda, Ph.D.
Coordinador Área Temática
Fitotecnia

Mario Contreras, Ph.D.
Director General

DEDICATORIA

A mis padres, con mucho cariño.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres y hermanos, por su apoyo y ejemplo de trabajo constante.

A Diana, por su cariño y ayuda incondicional.

Al Ing. José María Miselem, por sus consejos y ejemplo de arduo trabajo.

Al Ing. Mario Bustamante, por su gran ayuda.

Al personal de la Zamoempresa de Cultivos Intensivos, por su apoyo en el trabajo de campo.

Al personal del Laboratorio de Suelos, por su colaboración en todo momento.

A todas las personas que forman parte de COAGRISAN y COPAISAN, especialmente a Juan Felix, Carmen Delia, Oscar, Roberto, Marcelo, Pepe Juan, Antonio y Juan Carlos por sus enseñanzas, tiempo y paciencia que tuvieron conmigo.

A la familia Flores Fukuda, por su cariño y las atenciones que me brindaron.

A D. Berrezueta, C. Zurita, J. Venegas, E. El Malouf, V. Flores, L. Muñoz y J. Ulloa, por su sincera amistad.

A Zamorano, por las experiencias que viví.

AGRADECIMIENTOS A PATROCINADORES

A Zamorano, por el financiamiento parcial de mis estudios.

A la Fundación Caja Rural de Canarias, por su apoyo financiero en la realización de mi pasantía en Gran Canaria, España.

RESUMEN

Hasing, Tomás. 2002. Evaluación agroeconómica de cuatro programas de fertilización y dos sustratos en tomate (*Lycopersicon esculentum*) bajo macrotúnel en Zamorano, Honduras. Proyecto Especial del Programa de Ingeniería en Ciencia y Producción Agropecuaria, Zamorano, Honduras.

El experimento se desarrolló en el macrotúnel C de la Zamoempresa de Cultivos Intensivos (ZECI) en Zamorano, Honduras. El objetivo principal del ensayo fue determinar el desempeño agroeconómico del tomate en respuesta a cuatro programas de fertilización y dos sustratos. Los programas fueron: solución nutritiva usada en hidroponía, método de extracciones ajustado a la curva de absorción del cultivo, plan de fertilización utilizado en COAGRISAN (Cooperativa Agrícola de San Nicolás de Tolentino en Islas Canarias, España) y la fertilización testigo de la ZECI. Los sustratos variaron en su composición: sustrato testigo (50% casulla + 40 % compost + 10% arena) y sustrato semi-hidropónico (50% casulla + 25% compost + 25% arena). Los ocho tratamientos conformaron un arreglo en parcelas divididas con bloques completos en franjas. Las variables agronómicas evaluadas fueron rendimiento (total, comercial y no comercial), número de frutos (total, comercial y no comercial), peso del fruto (total, comercial y no comercial), tamaño del fruto (clasificado en cinco categorías), días a floración, diámetro del tallo y altura de la planta. Las variables económicas fueron costo, ingreso, utilidad bruta y relación beneficio/costo. Para el análisis estadístico se realizó Análisis de Varianza (ANDEVA) y separación de medias por el método Student-Newman-Keuls (SNK). Para el análisis económico se realizaron presupuestos parciales, análisis de dominancia y se calculó la tasa de retorno marginal para los tratamientos dominantes de acuerdo a tres posibles escenarios en los que se varió el precio de campo y el rendimiento (esperado, optimista y pesimista). Los tres programas de fertilización obtuvieron mayores rendimientos y frutos de mejor calidad (tamaño y peso) que el testigo. La solución nutritiva obtuvo el rendimiento más alto (99.8 t/ha), la menor cantidad de frutos pequeños y plantas con mayor vigor (expresado en altura y diámetro); sin embargo, el testigo absoluto (fertilización de la ZECI con el sustrato testigo) y el tratamiento que contempló el plan de Canarias con el sustrato testigo presentaron las utilidades más altas (106,311 y 133,422 Lps/ha, respectivamente). El cambio de una tecnología a otra representa una tasa de retorno marginal de 128 %.

Palabras clave: Fertilizantes, fertirrigación, hidroponía, nutrición vegetal.

NOTA DE PRENSA

CONTENIDO

Portadilla.....	i
Autoría.....	ii
Página de firmas	iii
Dedicatoria	iv
Agradecimientos.....	v
Agradecimientos a patrocinadores	vi
Resumen	vii
Nota de prensa	viii
Contenido	ix
Índice de cuadros.....	xii
Índice de figuras	xv
Índice de anexos	xvi
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	2
2.1 Fertirrigación	2
2.1.1 Agua de riego	3
2.1.2 Sustrato	4
2.1.3 Planta	4
2.2 Concepciones en fertirrigación.....	5
2.2.1 Extracciones	5
2.2.2 Solución nutritiva	6
2.2.2.1 Ajuste del pH y de las necesidades de fósforo	8
2.2.2.2 Ajuste de las necesidades de potasio	8
2.2.2.3 Ajuste de las necesidades nitrogenadas.....	8
2.2.2.4 Ajuste de otras necesidades	8
2.2.2.5 Cálculo de la CE estimada.....	9
2.3 Fertilizantes usados en fertirrigación.....	9
2.3.1 Nitrato de amonio (33.5% N).....	11
2.3.2 Urea (46% N).....	11
2.3.3 Nitrato de potasio (13% N, 46% K).....	11
2.3.4 Nitrato de calcio (15.5% N, 27% CaO).....	11
2.3.5 Nitrato de magnesio (11% N, 15.7% MgO).....	11
2.3.6 Sulfato de amonio (21% N, 58% SO ₃).....	12
2.3.7 Sulfato de potasio (50-52% K ₂ O, 46.5-47.5% SO ₃).....	12
2.3.8 Sulfato de magnesio (16% MgO, 31.7% SO ₃).....	12
2.3.9 Fosfato monoamónico (12% N, 60%P ₂ O ₅).....	12
2.3.10 Fosfato monopotásico (51% P ₂ O ₅ , 34% K ₂ O).....	12
2.3.11 Ácido fosfórico.....	12
2.3.12 Ácido nítrico.....	13

2.3.13	Ácido sulfúrico.....	13
2.4	Funciones de los elementos nutritivos en tomate.....	13
2.4.1	Nitrógeno.....	14
2.4.2	Fósforo.....	15
2.4.3	Potasio.....	16
2.4.4	Magnesio.....	16
2.4.5	Calcio.....	17
2.4.6	Azufre.....	18
2.4.7	Microelementos.....	18
2.4.7.1	Hierro.....	18
2.4.7.2	Manganeso.....	19
2.4.7.3	Zinc.....	19
2.4.7.4	Cobre.....	19
2.4.7.5	Boro.....	19
2.5	Sustratos.....	20
2.5.1	Propiedades físicas.....	20
2.5.1.1	Espacio poroso total.....	20
2.5.1.2	Capacidad de aireación.....	20
2.5.1.3	Granulometría.....	21
2.5.1.4	Densidad aparente.....	21
2.5.2	Propiedades químicas.....	21
2.5.2.1	Capacidad de intercambio catiónico (CIC).....	22
2.5.2.2	Disponibilidad de los nutrientes.....	22
2.5.2.3	Salinidad.....	22
2.5.2.4	pH.....	23
2.5.2.5	Relación Carbono / Nitrógeno (C/N).....	23
2.5.3	Propiedades biológicas.....	23
2.5.4	Otras propiedades.....	23
3.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	24
3.1	Establecimiento del ensayo.....	24
3.2	Tratamientos.....	24
3.3	Fertilizaciones.....	25
3.3.1	Solución nutritiva.....	25
3.3.2	Extracciones del cultivo.....	27
3.3.3	Plan de fertilización.....	28
3.3.4	Fertilización ZECI.....	28
3.4	Sustratos.....	28
3.5	Manejo agronómico.....	29
3.6	Recolección de datos.....	29
3.7	Análisis estadístico.....	31
3.8	Análisis económico.....	31
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	32
4.1	Análisis estadístico.....	32
4.1.1	Variables agronómicas.....	32

4.1.1.1	Rendimiento	32
4.1.1.2	Número de frutos	35
4.1.1.3	Tamaño del fruto	36
4.1.1.4	Peso promedio de fruto.....	37
4.1.1.5	Comportamiento de la planta.....	40
4.1.2	Variables económicas	41
4.2	Análisis económico.....	45
5.	CONCLUSIONES	50
6.	RECOMENDACIONES.....	51
7.	BILBIOGRAFÍA	52
8.	ANEXOS	54

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro

1	Clasificación del agua por su Conductividad Eléctrica (mS/cm)	3
2	Parámetros comparativos en el análisis foliar del tomate.....	5
3	Ritmo de absorción de elementos a lo largo del ciclo del cultivo de tomate....	6
4	Extracciones periódicas de N, P, K del cultivo de tomate.....	6
5	Soluciones recomendadas para cultivo hidropónico de tomate.....	7
6	Composición del agua de riego, disolución ideal y aportes previstos para preparar una disolución nutritiva	8
7	Tabla de doble entrada para escoger los fertilizantes a utilizar en el diseño de la disolución nutritiva	9
8	Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25°C) generada por disolución en agua destilada de los principales fertilizantes empleados en fertirrigación a diferentes dosis de empleo.....	10
9	Orientaciones sobre la compatibilidad de mezclas de los principales fertilizantes para fertirrigación	10
10	Tratamientos del ensayo	25
11	Ajuste de la solución nutritiva al agua de riego (transplante a cuaje de frutos).....	25
12	Cálculo de la cantidad de fertilizante en meq/l (transplante – cuaje de frutos).....	26
13	Cálculo de la cantidad de fertilizante en mg/l (transplante – cuaje de frutos).....	26
14	Ajuste de la solución nutritiva al agua de riego (cuaje de frutos – fin de cultivo).....	26
15	Cálculo de la cantidad de fertilizante en meq/l (cuaje de frutos – fin de cultivo).....	26
16	Cálculo de la cantidad de fertilizante en mg/l (cuaje de frutos – fin de cultivo).....	27

17	Cálculo de extracciones de macroelementos por etapa fenológica del cultivo de tomate.....	27
18	Cálculo de cantidad de fertilizantes con base en las extracciones del cultivo de tomate.....	27
19	Plan de fertilización de Canarias por días de la semana.....	28
20	Fertilización de la ZECI por días de la semana.....	28
21	Proporciones de los materiales usados en la elaboración de los sustratos....	29
22	VARIABLES agronómicas medidas en el ensayo y sus abreviaturas.....	30
23	Clasificación de tamaño de fruto.....	30
24	VARIABLES económicas medidas en el ensayo y sus abreviaturas.....	31
25	Efecto de cuatro fertilizaciones y dos sustratos en el peso total (PTOT) de tomate bajo macrotúnel en Zamorano.....	33
26	Efecto de cuatro fertilizaciones y dos sustratos en el peso comercial (PCOM) de tomate bajo macrotúnel en Zamorano.....	34
27	Valores obtenidos y recomendados para relaciones de nutrientes (calculadas a partir de la cantidad de miliequivalentes) en el cultivo de tomate.....	35
28	Caracterización física de los sustratos antes y después del ciclo de cultivo.....	35
29	Efecto de cuatro fertilizaciones y dos sustratos en el número de frutos totales (NTOT) de tomate bajo macrotúnel en Zamorano.....	36
30	Efecto de cuatro fertilizaciones y dos sustratos en el número de frutos comerciales (NUCOM) de tomate bajo macrotúnel en Zamorano.....	36
31	Efecto de cuatro fertilizaciones y dos sustratos en el peso promedio de frutos totales (PPRTO) de tomate bajo macrotúnel en Zamorano.....	38
32	Efecto de cuatro fertilizaciones y dos sustratos en el peso promedio de frutos comerciales (PPRCO) de tomate bajo macrotúnel en Zamorano.....	39
33	Efecto de cuatro fertilizaciones y dos sustratos en la altura de planta (ALTPLA) de tomate bajo macrotúnel en Zamorano.....	40
34	Efecto de cuatro fertilizaciones y dos sustratos en el diámetro de tallo (DIAPLA) de tomate bajo macrotúnel en Zamorano.....	41
35	Efecto de cuatro fertilizaciones y dos sustratos en el costo de producción (COST) de tomate bajo macrotúnel en Zamorano.....	42

36	Efecto de cuatro fertilizaciones y dos sustratos en los ingresos (INGR) de tomate bajo macrotúnel en Zamorano	43
37	Efecto de cuatro fertilizaciones y dos sustratos en la utilidad bruta (UTIL) de tomate bajo macrotúnel en Zamorano	44
38	Efecto de cuatro fertilizaciones y dos sustratos en la relación beneficio/costo (BECO) de tomate bajo macrotúnel en Zamorano	45
39	Supuestos tomados en consideración para el análisis de sensibilidad	45
40	Resultados económicos para el escenario esperado.....	47
41	Análisis de retorno marginal para el escenario esperado.....	47
42	Resultados económicos para el escenario pesimista.....	48
43	Análisis de retorno marginal para el escenario pesimista.....	48
44	Resultados económicos para el escenario optimista	49
45	Análisis de retorno marginal para el escenario optimista	49

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura

1	Evolución de la absorción de N, P, K en el ciclo de cultivo de tomate (Marhueda, 2000).....	14
2	Distribución de la producción por tamaño del fruto producto del efecto de cuatro fertilizaciones y dos sustratos	37
3	Comportamiento del peso promedio de frutos por fertilización	39
4	Comportamiento del peso promedio de frutos por sustrato	40
5	Análisis de dominancia para el escenario esperado	47
6	Análisis de dominancia para el escenario pesimista	48
7	Análisis de dominancia para el escenario optimista	49

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo

1	Resultados del análisis de agua utilizada en el riego.....	54
2	Resultados del análisis de extracto saturado de los sustratos evaluados	55
3	Control fitosanitario realizado en el ciclo de cultivo	56
4	Presupuesto de costos de producción (Comunes y diferenciales por tratamiento).....	57
5	Distribución de los tratamientos en el macrotúnel	59
6	Programa SAS	60
7	Resultado del análisis de varianza para las variables agroeconómicas	62
8	Análisis foliar del cultivo por tratamiento.....	64
9	Resultado del análisis de varianza para las variables económicas	65
10	Presupuestos parciales por tratamiento.....	66

1. INTRODUCCIÓN

Las técnicas del cultivo del tomate han experimentado cambios rápidos y notables durante las última décadas ya que la agricultura intensiva se inclina hacia condiciones de cultivo cada vez más controladas con el fin de aumentar los rendimientos. Se utilizan nuevos sustratos con propiedades óptimas y nuevas tecnologías para la aplicación de fertilizantes que permiten sincronizar las exportaciones diarias del cultivo con los aportes de nutrientes.

En esta situación, el sistema denominado fertirrigación ha experimentado un desarrollo paralelo a los sistemas de riego localizado permitiendo aplicar simultáneamente los fertilizantes y el agua de riego. Sin embargo, existen varias concepciones en la forma de calcular la cantidad y distribución de los nutrientes a lo largo del ciclo de producción, cada una adaptada a condiciones específicas de tecnología, manejo, sustrato y cultivo.

Por otra parte frente a los cultivos hortícolas tradicionales, instalados sobre un suelo normal, realizados frecuentemente al amparo de un sistema de protección (túneles o invernaderos), los cultivos en sustrato aparecen como una alternativa para optimizar los beneficios que normalmente se consiguen con el empleo de estructuras que mejoran las condiciones medioambientales

La presente investigación pretende comparar programas de fertilización (bajo diferentes concepciones) y sustratos en tomate bajo condiciones de cultivo en macrotúnel en Zamorano y definir la mejor combinación evaluando su desempeño agroeconómico.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 FERTIRRIGACIÓN

Alarcón (2000), define como fertirrigación a la aplicación simultánea de agua de riego y fertilizantes, generalmente con elevada frecuencia y de manera localizada; es decir, aplicando el riego en zonas concretas en torno a las plantas humedeciendo solamente una parte del volumen del sustrato (bulbo húmedo) donde se ve fomentado el desarrollo radicular.

Según Cadahía (2000), en los últimos años se ha demostrado que el mayor beneficio del riego localizado se centra en su utilización como vehículo de una dosificación racional de fertilizantes, es decir que ofrece la posibilidad de realizar una fertilización día a día en función del proceso fotosintético y exactamente a la medida del cultivo, sustrato y agua de riego determinada y para unas condiciones ambientales definidas. Además de ésta, se pueden mencionar otras ventajas:

- Ahorro considerable de agua y utilización de aguas de riego de baja calidad
- Nutrición optimizada del cultivo
- Control de la contaminación
- Mayor eficacia y rentabilidad de los fertilizantes
- Alternativas en la utilización de diversos tipos de fertilizantes: simples y complejos cristalinos y disoluciones concentradas.
- Fabricación “a la carta” de fertilizantes concentrados adaptados a un cultivo, sustrato, agua de riego y condiciones climáticas durante todos los días del ciclo del cultivo.
- Automatización de la fertilización

Entre las desventajas que presenta este sistema están:

- Costo inicial de infraestructura
- Obstrucción de goteros
- Manejo por personal especializado

Como se ha mencionado, en fertirrigación, se limitan las pérdidas de agua por evaporación superflua e innecesaria y, al ser menor el volumen mojado, se reduce la capacidad de almacenamiento, por lo que se precisan aplicaciones frecuentes a dosis reducidas. De ahí la importancia de un efectivo plan de fertilización.

Al desarrollar un programa de fertirrigación para un cultivo determinado, se debe considerar el análisis del sustrato, agua de riego y planta para unas condiciones climáticas y sistema de riego definido (Nuez, 1995).

2.1.1 Agua de riego

El agua es alimento y soporte para la aplicación del resto de elementos esenciales, por lo que el primer paso es evaluar la calidad del agua (riesgos de salinización, sodificación y toxicidad) y conocer su composición para ajustar la solución nutritiva óptima (Marhuenda, 2000).

Cada planta tiene un límite de tolerancia a la salinidad, por encima de los cuales, la presión osmótica generada en el entorno radical impide la normal absorción de agua del cultivo, necesitando el vegetal un aporte energético suplementario para su nutrición hídrica, lo que repercute marcadamente en el rendimiento del cultivo. Cuanto mayor sea la presión osmótica o la conductividad eléctrica (CE) del extracto saturado, más lenta será la absorción de agua.

Por lo anterior, el principal parámetro a la hora de evaluar la calidad del agua de riego es su contenido salino, determinado indirectamente por medio de la CE. Según las normas americanas de Riverside las aguas se clasifican por su CE a 25°C (cuadro 1).

La mayor parte de aguas empleadas en agricultura se sitúan en la clasificación C3. Existen algunos cultivos de tomate en España que tradicionalmente han sido regados con agua del grupo C4, incluso C5, consiguiendo un nivel de calidad muy elevado (Marhuenda, 2000).

Cuadro 1. Clasificación del agua por su Conductividad Eléctrica (mS/cm)

Clase	CE a 25°C	Salinidad	Comentarios
C1	< 0.25	Baja	Puede emplearse para riego sin peligro de salinización
C2	0.25 – 0.75	Media	Puede cultivarse plantas tolerantes a esta concentración
C3	0.75 – 2.25	Fuerte	No apta para riego en suelo con drenaje defectuoso
C4	2.25 – 5.00	Muy alta	Agua no recomendable para riego, salvo suelos permeables
C5	5 – 20	Excesiva	Sólo emplear en suelos totalmente arenosos
C6	> 20	---	Agua salobre

Fuente: Marhuenda. 2000.

Al contenido salino del agua de riego hay que añadirle el aporte de los distintos fertilizantes, todos (excepto la urea) son sales que se disocian en sus iones correspondientes en el agua aumentando la CE de la misma. En general, para tomate, el valor umbral de CE en el agua de riego (junto con los fertilizantes aportados) es de

2.5 mS/cm en hidroponía (Alarcón, 2000) y de 1.7 mS/cm para cultivos en suelo o sustratos orgánicos¹.

Los cationes como el Ca^{+2} , Mg^{+2} y Na^{+} , y los aniones como el Cl^{-} y SO_4^{-} , pueden encontrarse en cantidades excesivas respecto a las necesidades de las plantas, por lo que conviene tenerlo en cuenta a la hora de escoger los fertilizantes y las cantidades relativas a aplicar. El nivel de iones CO_3^{-} y HCO_3^{-} , indicarán la necesidad de aplicar ácido para ajustar el pH de la solución al valor óptimo (Alarcón, 2000).

2.1.2 Sustrato

En los cultivos intensivos con riego localizado por goteo o similar, el nivel de fertilidad del sustrato aunque importante queda en un segundo plano, ya que ante las elevadas exigencias de nutrición a cubrir en un corto período de tiempo, se opta por atender mediante la fertirrigación, prácticamente el cien por cien de las necesidades del cultivo, manteniendo una solución de suelo con un contenido satisfactorio para el cultivo de modo permanente en el bulbo húmedo, por lo que las reservas del suelo sólo juegan un papel secundario. En estos casos el diagnóstico de la nutrición de la planta mediante análisis foliar suele ser más eficaz (Gros; Domínguez, 1992).

En sistemas de producción con sustrato, debe tenerse en cuenta las exigencias de la planta y del productor. Para la planta es importante que el medio responda a algunas exigencias: debe proporcionar un buen soporte, las raíces deben obtener oxígeno, y el medio debe estar capacitado para proveerla de agua y nutrientes; además deben tenerse en cuenta las características químicas. Para un productor, es importante que el medio sea duradero, económico y que su manejo no cause problemas (Kipp; Wever, 2000).

2.1.3 Planta

Según Soler y Arroyo (1998), el cultivo dictará la técnica de riego más adecuada, las características de la instalación y la programación del riego. Se debe tener en cuenta el estado fenológico al formular la fertirrigación en cuanto a equilibrio fertilizante y cantidad de elementos a aportar. El diagnóstico de la nutrición vegetal mediante análisis foliares e inspecciones visuales informarán sobre el estado nutricional del cultivo y posibles carencias o toxicidades.

El análisis foliar se basa en el hecho de que la hoja es el órgano metabólicamente más activo en la planta, por lo que las alteraciones nutricionales afectan en mayor medida a la hoja que a otros órganos. Sin embargo la complejidad del análisis foliar radica en la interpretación de los valores obtenidos ya que la composición óptima varía durante el desarrollo del cultivo, de modo que niveles que en un momento dado son adecuados se convierten en limitantes en otros períodos. En el cuadro 2 se presentan los valores para diagnóstico foliar del tomate.

¹ CABRERA, J. 2002. Nutrición en cultivos en suelo. Gran Canaria. España (entrevista).

Cuadro 2. Parámetros comparativos en el análisis foliar del tomate.

Diagnóstico	%					ppm			
	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Bajo	<4.0	<0.3	<2.9	<1.0	<0.4	<40	<40	<5	<20
Suficiente	4.0-6.0	0.3-0.8	2.9-5.0	1.0-3.0	0.4-0.6	40-200	40-250	5-20	20-50
Alto	>6.0	>0.8	>5.0	>3.0	>0.6	>200	>250	>20	>50

Fuente: Cadahía. 2000.

El diagnóstico visual presenta a su vez diversas limitaciones, la más inmediata es que normalmente cuando aparecen los síntomas ya es tarde para corregir los daños causados por la(s) carencia(s) en el cultivo. Además de la complejidad que en sí misma presenta la identificación de los síntomas, cabe añadir que distintas carencias pueden dar síntomas similares y que pueden presentarse carencias múltiples causando solapamiento de los síntomas (Soler; Arroyo, 1998).

2.2 CONCEPCIONES EN FERTIRRIGACIÓN

En la actualidad básicamente se emplean dos métodos para establecer las necesidades de fertilización: uno en función de las extracciones del cultivo y otro basado en una solución nutritiva ideal a la que se ajustan los aportes previo análisis de agua.

2.2.1 Extracciones

Tradicionalmente, un programa de fertilización se realiza sobre la aplicación de una cantidad de fertilizante por unidad de superficie, por unidad de cultivo o por unidad de producto cosechado. El criterio general para determinar esta cantidad de fertilizantes a aplicar se obtiene a partir de las extracciones específicas para cada cultivo y calculadas a partir del nivel de producción esperado.

Las extracciones representan la cantidad de nutrientes que tendrían que aplicarse a la planta, en caso de que ésta se encontrara en un medio inerte, carente de sustancias nutritivas y en un sistema cerrado donde los nutrientes fueran aprovechados al cien por cien y no se perdieran o quedaran inmovilizados. Sin embargo, los sustratos interfieren en la nutrición tanto negativamente (inmovilizaciones, escasa capacidad de retención, bloqueo por otros elementos) como positivamente, aportando una cierta cantidad de nutrientes.

Por esto es importante conocer el nivel de absorción de nutrientes en las diferentes etapas fenológicas del cultivo (cuadro 3).

Cuadro 3. Ritmo de absorción de elementos a lo largo del ciclo del cultivo de tomate.

Fases	% -----		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Transplante – inicio de floración	10	5	5
Hasta fructificación	15	15	10
Hasta inicio de maduración	30	25	20
Maduración	45	55	65

Fuente: Soler y Arroyo. 1998.

Según Domínguez (1989), las necesidades de nutrientes del cultivo de tomate, en manejo intensivo durante un ciclo de cuatro meses, oscilan alrededor de 400 Kg/ha de N, 200 kg/ha de P₂O₅, 600 kg/ha de K₂O, 190 kg/ha de CaO y 100 kg/ha de MgO.

Considerando las extracciones totales y el ritmo de absorción (cuadro 3), es posible optimizar la fertirrigación aportando los nutrientes requeridos por el cultivo según su demanda periódica (cuadro 4).

Cuadro 4. Extracciones periódicas de N, P, K del cultivo de tomate

Fases	kg/ha -----		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Transplante – inicio de floración	40	10	30
Hasta fructificación	60	30	60
Hasta inicio de maduración	120	50	120
Maduración	180	110	390
TOTAL	400	200	600

2.2.2 Solución nutritiva

Según Alarcón (2000), las técnicas más avanzadas de fertirrigación se basan en la aplicación de soluciones nutritivas, es decir, volúmenes de disoluciones acuosas con una composición determinada.

Para conseguir que la planta tome los nutrientes de forma óptima es necesario que éstos se encuentren en concentraciones y relaciones adecuadas en la disolución fertilizante, de esta forma se evitan fenómenos negativos como efectos osmóticos y antagónicos que perturban la absorción de nutrientes por la planta (Cadahía, 2000).

Para expresar la composición de una disolución se utiliza el concepto de concentración, que se define como la cantidad de soluto (sustancia definida) en una determinada cantidad de disolvente o disolución. Cuando se habla de una cantidad de nutrientes en solución, los datos son referidos a concentraciones molares (mmol/l) o equivalentes (meq/l), por ser el término de expresión más adecuado cuando se maneja disoluciones acuosas en

las que los diferentes nutrientes se encuentran fundamentalmente en forma iónica (Alarcón, 2000).

Los factores a considerar para determinar una solución nutritiva son: cultivo/variedad, estado fenológico, período/estación, sistema de fertirrigación, característica del sustrato. Sin embargo, se puede observar la similitud de los resultados obtenidos por distintos investigadores para el cultivo de tomate (cuadro 5).

Cuadro 5. Soluciones recomendadas para cultivo hidropónico de tomate

Fuente	----- meq/l -----						
	NO ₃	H ₂ PO ₄	SO ₄	K	Ca	Mg	NH ₄
Grower Digest	15.36	1.29	---	7.69	7.50	2.92	---
Cooper	14.29	1.94	---	7.70	12.5	4.17	---
M. Edward Muckle	13.70	1.48	---	7.00	7.20	2.67	---
Steiner	12.00	2.00	3.00	5.50	7.00	3.00	0.50
Sonneveld	10.50	1.50	5.00	7.00	7.50	2.00	0.50
Cadahía	7.50	2.00	7.00	7.00	9.00	3.00	---

Fuente: Marhuenda. 2000.

Después de elegir la solución nutritiva a utilizar, es necesario analizar el agua de riego, ya que los aniones y los cationes pueden encontrarse en cantidades excesivas respecto a las necesidades de la planta. Además, el poder tampón del agua de riego ante la adición de compuesto ácido, depende casi exclusivamente de la presencia de ion bicarbonato (HCO₃⁻). Al adicionar un ácido (cualquier sustancia capaz de aportar iones hidrógeno), se eliminan iones bicarbonato para obtener agua y dióxido de carbono. Esta es la principal reacción que va a gobernar el pH de una solución nutritiva, y esto explica el escaso incremento de conductividad eléctrica encontrado al ajustar el pH de la solución nutriente con ácidos. Se aporta una especie iónica, pero desaparece una cantidad equivalente de ion bicarbonato. Si se efectúa una neutralización total de los bicarbonatos presentes desaparece el poder amortiguador, baja el pH y se eleva bruscamente la conductividad eléctrica de la disolución.

Para elaborar una solución nutritiva, generalmente se parte de soluciones madres de fertilizantes que se diluyen para obtener la solución nutriente final que se aporta a la planta.

A continuación se establecen los pasos a seguir para el cálculo, preparación y programación de una solución nutritiva.

2.2.2.1 Ajuste del pH y de las necesidades de fósforo. El pH óptimo de una solución nutritiva se sitúa en torno a 5.5. Con este valor, tras los posteriores equilibrios que suceden en el seno de la solución, alcanza un nivel de pH cercano a 6 en el punto de descarga, es decir, el valor mayor de disponibilidad para la mayor parte de los elementos esenciales. Este valor de pH (5.5), se consigue neutralizando bicarbonatos en el agua de riego hasta dejar 0.5 mmoles/l para evitar que cualquier pequeño error en la dosis de ácido pudiera situar el valor del pH de la solución nutritiva en valores de extrema acidez.

Para lograr esta neutralización de bicarbonatos, en primer lugar se cubren las necesidades del fósforo (añadiendo ácido fosfórico). Si estas necesidades exceden de la cantidad de bicarbonatos a neutralizar, hay que recurrir a otra fuente de fósforo. Si no se ha ajustado el pH al añadir el ácido fosfórico se completa el valor deseado con la adición de ácido nítrico, sulfúrico o incluso otros ácidos como clorhídrico.

2.2.2.2 Ajuste de las necesidades de potasio. Una vez ajustado el pH y las necesidades del fósforo, se atiende la demanda de potasio. En la mayor parte de los casos esto se completa mediante la adición de nitrato de potasio, salvo que interese la adición de sulfato de potasio u otra forma de fertilizante potásico como cloruro de potasio.

2.2.2.3 Ajuste de las necesidades nitrogenadas. Al llegar a este punto posiblemente ya se ha aportado parte de estas necesidades en forma de ácido nítrico o nitrato de potasio.

Si se opta por la adición de una parte considerable en forma amoniacal, en primer lugar se completa ésta mediante el aporte de nitrato de amonio o aportar parte del nitrógeno en forma ureica.

El resto de iones nitrato, hasta completar los estimados, se aportan como nitrato de calcio o nitrato de magnesio.

2.2.2.4 Ajuste de otras necesidades. Cuando se necesita subir la cantidad de magnesio o azufre es factible la adición de sulfato de magnesio. Igualmente pueden completarse los aportes de calcio con sulfato de calcio, etc.

En los cuadros 6 y 7 se muestran tablas prácticas para realizar el cálculo de la solución nutritiva.

Cuadro 6. Composición del agua de riego, disolución ideal y aportes previstos para preparar una disolución nutritiva

	Aniones (meq/l)				Cationes (meq/l)				pH	CE
	NO ₃ ⁻	H ₂ PO ₄	SO ₄ ⁼	HCO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺		
Agua de riego										
Solución ideal										
Aportes										

Fuente: Cadahía. 2000.

Cuadro 7. Tabla de doble entrada para escoger los fertilizantes a utilizar en el diseño de la disolución nutritiva

meq/lt	NH ₄ ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	H ⁺	Total
NO ₃ ⁻						
H ₂ PO ₄ ⁻						
SO ₄ ⁼						
Total						

Fuente: Cadahía. 2000.

2.2.2.5 Cálculo de la CE estimada. Una vez conocidas las cantidades a aportar de cada uno de los fertilizantes escogidos, resulta necesario el conocimiento de la CE generada por esa mezcla de fertilizantes y agua de riego.

Para esto se puede utilizar factores, que de forma aproximada, dan un valor estimado de la CE. El método más extendido, es el cálculo de la CE mediante el cociente de la suma de cationes (o de aniones) en la solución nutritiva final en meq/l y un factor variable entre 10 y 12. Se utilizará el factor 10 con CE baja y predominio de sales tipo cloruro y se empleará el factor 12 para CE elevada y con predominio de sales tipo sulfato.

Un segundo método establece el cálculo de la CE mediante la suma de la CE del agua de riego y la generada por las diferentes cantidades de fertilizante a aportar (cuadro 8), si bien es cierto estos valores están estimados en agua destilada y sin ninguna otra sustancia presente, por lo que la CE obtenida será siempre algo superior a la real.

2.3 FERTILIZANTES USADOS EN FERTIRRIGACIÓN

Se denomina fertilizante a todo producto natural o sintético, orgánico o inorgánico que se añade al suelo o a las plantas para poner a disposición de éstas, nutrientes necesarios para su desarrollo (Alarcón, 2000). La característica lógica y esencial de los fertilizantes usados en fertirrigación es que sean solubles en agua con el fin de obtener en disolución los elementos contenidos por los mismos, además se debe tener en cuenta la compatibilidad con otros fertilizantes (cuadro 9) y con el agua de riego.

Los fertilizantes al mezclarse con el agua de riego modifican el pH de la disolución resultante, con las consecuencias que ello representa. Así, si el fertilizante aumenta el pH habrá riesgos de precipitaciones de calcio pues en este caso el catión tiene menor solubilidad. Si el fertilizante disuelto baja el pH se evitarán obstrucciones en los goteros y servirá para limpiar la instalación.

Cuadro 8. Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25°C) generada por disolución en agua destilada de los principales fertilizantes empleados en fertirrigación a diferentes dosis de empleo

FERTILIZANTES LÍQUIDOS	0.1 ml/l	0.5 ml/l	1.0 ml/l
Acido nítrico 56%	477	2290	4571
Acido fosfórico 55%	273	1080	1851
Acido fosfórico 75%	405	1538	2523
Acido sulfúrico 98%	1370	5552	10091
FERTILIZANTES SÓLIDOS	0.1 g/l	0.5 g/l	1.0 g/l
Urea	0.3	1.1	2.0
Nitrato de amonio	179	850	1614
Sulfato de amonio	221	1033	1887
Nitrato de calcio	130	605	1177
Nitrato de magnesio	96	448	875
Fosfato monoamónico	96	455	889
Nitrato de potasio	144	693	1364
Fosfato monopotásico	79	375	746
Sulfato de potasio	188	880	1694
Cloruro de potasio	194	948	1880
Sulfato de magnesio	99	410	753

Fuente: Alarcón. 2000.

Cuadro 9. Orientaciones sobre la compatibilidad de mezclas de los principales fertilizantes para fertirrigación

Fert.	S.A.	U.	N.C.	N.P.	N.A.	M.A.P.	F.M.P.	S.P.	S.M.
S.A.	---	X	O	+	+	X	X	+	+
U.	X	---	X	X	O	X	X	+	X
N.C.	O	X	---	+	O	O	O	O	O
N.P.	+	X	+	---	+	+	+	+	+
N.A.	+	O	O	+	---	X	X	+	+
M.A.P.	X	X	O	+	X	---	+	+	+
F.M.P.	X	X	O	+	X	+	---	+	+
S.P.	+	+	O	+	+	+	+	---	+
S.M.	+	X	O	+	+	+	+	+	---

S.A.	Sulfato de amonio	O	Mezcla prohibida
U.	Urea	X	Mezcla posible en el momento de su aplicación
N.C.	Nitrato de calcio		
N.P.	Nitrato de potasio	+	Mezcla sin limitaciones
N.A.	Nitrato de amonio		
M.A.P.	Fosfato monoamónico		
F.M.P.	Fosfato monopotásico		
S.P.	Sulfato de potasio		
S.M.	Sulfato de magnesio		

Fuente: Alarcón. 2000.

A continuación se presenta una breve descripción de algunos de los fertilizantes citados por Alarcón (2000) y que son frecuentemente utilizados en fertirrigación:

2.3.1 Nitrato de amonio (33.5% N).

Es el abono sólido más empleado en fertirrigación, con la mitad de su nitrógeno en forma nítrica y la otra mitad en forma amoniacal. Es un fertilizante que ofrece muchas ventajas, es acidificante, de gran riqueza, y la forma amónica es retenida por los coloides del suelo (minimizando las pérdidas por lavado del perfil) y es absorbida por la planta a medida que se transforma en ion nitrato mediante el proceso de nitrificación realizado por bacterias nitrificantes. Provoca aumentos de CE elevados.

2.3.2 Urea (46% N).

Es el fertilizante nitrogenado de mayor riqueza, con un 46% de nitrógeno en forma amídica, que debe pasar a ion nitrato para ser absorbido por el cultivo. Desde el punto de vista de la conductividad eléctrica corresponde una muy ventajosa excepción, al ser una forma orgánica no disociada en disolución, no provoca aumento alguno al adicionarla al agua de riego, lo cual no quiere decir que, posteriormente, cuando se transforma en las formas nitrogenadas amónica o nítrica, no experimente la disolución del suelo el aumento correspondiente de CE.

2.3.3 Nitrato de potasio (13% N, 46% K).

Constituye la fuente potásica más utilizada en fertirrigación, frecuentemente se cubren las necesidades de potasio con el uso exclusivo de este fertilizante. Muestra incrementos de CE relativamente elevados.

2.3.4 Nitrato de calcio (15.5% N, 27% CaO).

Es un fertilizante muy empleado en fertirrigación. Una pequeña parte de su nitrógeno (alrededor del 1%) está en forma amoniacal, y puede ser suficiente para cubrir las exigencias de esta forma nitrogenada en situaciones de gran demanda. El mayor inconveniente de este fertilizante es su precio. Muestra niveles medios de incremento de CE.

2.3.5 Nitrato de magnesio (11% N, 15.7% MgO).

Fertilizante empleado sólo ante situaciones de potencial carencia de magnesio, su empleo no está muy difundido. Muestra incrementos de CE bajos.

2.3.6 Sulfato de amonio (21% N, 58% SO₃).

Empleado en situaciones de potencial carencia de azufre, es acidificante y provoca aumentos de CE extremadamente altos (además de mostrar una riqueza nitrogenada no muy elevada), por lo que su empleo con aguas de riego salinas es poco aconsejable, sobre todo si son ricas en sulfato.

2.3.7 Sulfato de potasio (50-52% K₂O, 46.5-47.5% SO₃).

Es el segundo fertilizante potásico más ampliamente utilizado. Su empleo viene motivado principalmente por situaciones de carencia potencial de azufre o por necesidades de fertilización potásica sin incrementos en el aporte de nitrógeno. Provoca aumentos de CE altos, limitando su empleo en aguas de alta salinidad, sobre todo si en ellos predomina el ion sulfato.

2.3.8 Sulfato de magnesio (16% MgO, 31.7% SO₃).

Es generalmente la fuente de magnesio empleada en fertirrigación ante situaciones potenciales de carencia de magnesio, ya que se aporta el magnesio adicional necesario sin modificar el equilibrio N,P,K. Es un fertilizante que provoca incrementos de CE bajos.

2.3.9 Fosfato monoamónico (12% N, 60%P₂O₅).

Es el fertilizante fosfatado sólido más empleado en fertirrigación. Provoca incrementos bajos de CE.

2.3.10 Fosfato monopotásico (51% P₂O₅, 34% K₂O).

Se trata de un fertilizante de excelente cualidades físico-químicas y nutricionales, pero con un precio muy elevado. Provoca aumentos de CE muy bajos.

Otros fertilizantes líquidos de uso muy común en fertirrigación son los ácidos empleados en la acidificación de soluciones nutritivas, a la vez que aportan parte de la nutrición del cultivo:

2.3.11 Ácido fosfórico.

Se utiliza al 55-75% de riqueza, lo que equivale a 40-54% como P₂O₅ y una densidad de 1.38-1.58 g/cm³. Generalmente se emplea el de mayor graduación con una riqueza de P₂O₅ variable entre 52-54%, dependiendo de la marca. Es el fertilizante fosfatado más utilizado en fertirrigación, y frecuentemente se cubren con él la totalidad de las necesidades de fósforo del cultivo.

2.3.12 Ácido nítrico.

Se emplea al 56-59% de riqueza, lo que equivale a 12.4-13.1% como nitrógeno nítrico y una densidad en torno a 1.35 g/cm³. Dado su carácter corrosivo y oxidante se usa para la limpieza de redes de riego. Generalmente es utilizado en sistemas de fertirrigación para completar el ajuste del pH, una vez cubiertas las necesidades de fósforo con la adición de ácido fosfórico. Además aporta una cantidad de nitrato que puede ser muy considerable de cara a cubrir las necesidades nitrogenadas del cultivo.

2.3.13 Ácido sulfúrico.

Se emplea a una riqueza del 98%, su densidad es aproximadamente 1.84 g/cm³. El ajuste del pH de la solución nutriente aporta una considerable cantidad de azufre.

2.4 FUNCIONES DE LOS ELEMENTOS NUTRITIVOS EN TOMATE

Se entiende por nutrición vegetal el proceso mediante el cual la planta absorbe del medio que le rodea las sustancias que le son necesarias para llevar a cabo su metabolismo, desarrollarse y crecer (Domínguez, 1989).

Según Gil (1995), más importante que el nivel global de fertilización es el suministro de una proporción adecuada entre los distintos elementos esenciales. Para establecer las fórmulas adecuadas de fertilización de una determinada especie se pueden hacer experiencias de campo o de laboratorio mediante diferentes tipos de análisis.

En el caso del tomate, se ha comprobado que el ritmo de absorción de los elementos nutritivos es el reflejado en la figura 1.

Como se observa, la absorción es muy escasa durante los primeros meses, incrementándose notablemente a partir de la fructificación (cuajado de los primeros frutos). A partir del inicio de maduración se absorbe entre el 45 - 55% de los elementos nutritivos.

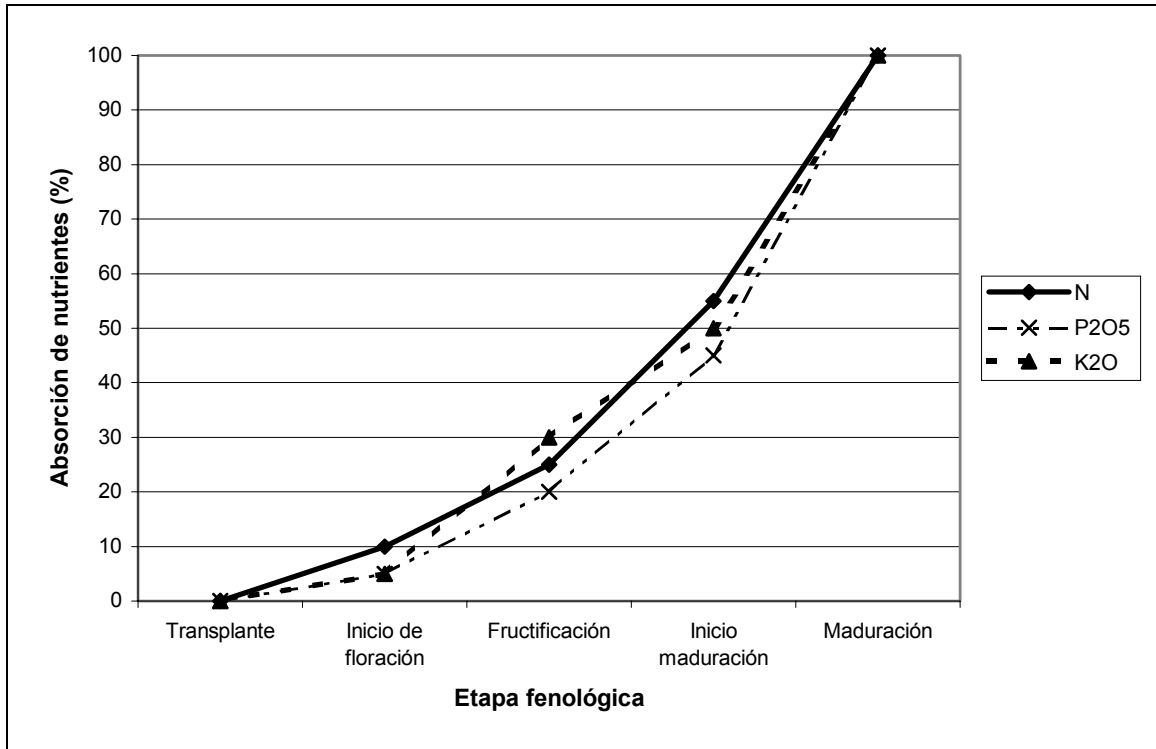


Figura 1. Evolución de la absorción de N, P, K en el ciclo de cultivo de tomate (Marhueda, 2000)

Los efectos más importantes de los principales elementos sobre el desarrollo del tomate son los siguientes:

2.4.1 Nitrógeno

El contenido de la planta en nitrógeno varía entre 2 y 4% de la materia seca. De éste un 80 a 85% corresponde a las proteínas y un 10% a los ácidos nucleicos. El nitrógeno es absorbido tanto en forma nítrica (NO_3^-) como en forma amoniacal (NH_4^+), siendo ambos metabolizados por la planta. Sin embargo es la forma nítrica la que es absorbida preferentemente. Aunque la forma ureica es transformada en amoniacal rápidamente en el suelo, también puede ser absorbida directamente por las plantas aunque muy lentamente en relación con la forma nítrica.

Cuando NH_4^+ es la mayor fuente de nitrógeno puede ocurrir toxicidad resultando en una reducción significativa en la producción (Benton, 1999). La forma NH_4^+ es más fácilmente utilizada por la planta de tomate en sus etapas iniciales de desarrollo, lo que beneficia un crecimiento temprano.

Cuando la planta de tomate entra a su etapa reproductiva, NH_4^+ puede afectar el crecimiento de la planta y la producción, incrementando la incidencia de pudrición apical

del fruto (PAF), un fenómeno que ha sido observado y reportado frecuentemente. En un proyecto de producción de tomate bajo invernadero Benton (1999), menciona que un cambio de fertilizantes que contienen NH_4^+ a formulaciones exclusivas con NO_3^- , casi eliminó la ocurrencia de PAF en frutos y la muerte de plantas por podredumbre vascular.

Benton (1999) comenta sobre la influencia de varias relaciones de $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$ en el crecimiento de la planta de tomate, producción e incidencia de PAF utilizando técnicas de crecimiento hidropónico. En varios ensayos, se verificó que cuando en la solución nutritiva el NH_4^+ era mayor de 25% del nitrógeno total había una disminución en el número de frutos y en el peso del fruto fresco. Además el número de frutos con PAF era el doble cuando NH_4^+ estaba presente en la solución nutritiva, independientemente de su relación con NO_3^- , sugiriendo que cualquier presencia de NH_4^+ puede incrementar significativamente la incidencia de PAF. En adición a los cambios en la producción, también observó cambios en la composición elemental en la planta. Con un incremento en el contenido de NH_4^+ en la solución nutritiva, había un correspondiente incremento del contenido de P en la planta; y disminuciones significativas de los contenidos de K, Ca y Mg. En el fruto el contenido de P aumentó y el contenido de K disminuyó, mientras que los contenidos de Ca y Mg no fueron afectados.

La carencia en tomate se manifiesta por una reducción del crecimiento, dando lugar a plantas poco vigorosas con hojas de color verde pálido y frutos de pequeño tamaño que maduran prematuramente. Los síntomas comienzan por un amarillamiento de las hojas basales que posteriormente se generaliza a toda la planta cuando la deficiencia se intensifica. En las hojas se produce una coloración púrpura en las nervaciones del envés y foliolo del haz, que en ocasiones se extiende en toda la planta (Jordá et al. 1998).

2.4.2 Fósforo

Las formas absorbidas de fósforo son los iones fosfato mono (H_2PO_4^-) y bi básico (HPO_4^{2-}). El fósforo una vez absorbido, es muy móvil en la planta y se incorpora rápidamente al metabolismo. Entre los compuestos más frecuentes y significativos cabe destacar adenosín di y tri fosfato (ADP y ATP), fosfolípidos, ácidos nucleicos (ADN y ARN) y dinucleótido adenina nicotinamida (NADPH) (Domínguez, 1989).

En hojas de tomate, Adams (1986) indica que niveles de P por encima de 1% son tóxicas. La incidencia de altos niveles de P en la planta, observados en análisis de plantas por Benton (1999), sugiere que excesos de P pueden ser un factor importante que afecta el crecimiento de la planta y la producción en muchos cultivos ya que un número significativo de muestras de hoja de tomate han sido encontradas con niveles de P por encima de de 1%. Las interacciones que ocurren entre P y los micronutrientes Fe, Mn y Zn han sido estudiados, demostrando que el incremento de P puede interferir con la absorción y función de estos elementos en plantas. Por esto, un alto nivel de P en la planta puede ser observado como una deficiencia de estos elementos.

La deficiencia de fósforo en tomate está bien definida, manifestándose inicialmente por una coloración verde oscura, con tintes púrpuras que comienzan en el borde del foliolo en

el haz y más intenso en las nervaciones del envés. Cuando la deficiencia es acusada la hoja toma coloración púrpura comenzando a necrosarse. En casos severos, la planta presenta un desarrollo raquítico con escasa vegetación, tallos finos y hojas pequeñas (Jordá et al. 1998).

2.4.3 Potasio

El potasio permanece en estado iónico en la planta equilibrando aniones y es muy móvil dentro de la planta. Una vez absorbido los iones de potasio pasan a través de las células corticales hacia el xilema, siendo transportados principalmente hacia los tejidos jóvenes en crecimiento.

Un inadecuado suministro de K a la planta de tomate resultará en una maduración desigual de los frutos y reducirá su calidad. Debe mantenerse niveles altos de K, pero no por encima del nivel en que pueda interferir significativamente con la disponibilidad de Mg y Ca. La disponibilidad de K es afectada por la aireación del suelo y en suelos demasiado húmedos su absorción puede verse reducida. Cuando el contenido de K disponible a la planta aumenta, el porcentaje de maduración desigual del fruto se reduce. Por esto es común incrementar el contenido de K en la solución nutritiva cuando empieza la fructificación.

El potasio actúa como osmoregulador disuelto en el jugo celular, juega un papel importante en la economía del agua en la planta y en la turgencia de las células, además asegura contenidos normales de celulosa y lignina favoreciendo la rigidez y estructura de las plantas (Domínguez, 1989).

En tomate, los síntomas iniciales de deficiencia aparecen en las hojas más viejas, con una clorosis en la periferia de los folíolos que destaca grandemente sobre el resto, que se mantiene de un color verde intenso. Esta clorosis se extiende hacia el centro del folíolo, permaneciendo el nervio central y los principales de color verde. Las hojas se muestran rizadas y abollonadas. Cuando la deficiencia es más acusada aparecen puntos necróticos sobre las manchas cloróticas, que se van extendiendo a toda la superficie foliar. El aspecto general de la planta es alargado y con escasa vegetación (Jordá et al. 1998).

2.4.4 Magnesio

Es un constituyente de la clorofila, por lo que una parte apreciable del contenido total en la planta se halla en los cloroplastos de las células de las hojas. El contenido normal en la planta, expresado en materia seca, es de 0.5%.

Es absorbido como ion Mg^{+2} y en menores cantidades que el potasio o el calcio. Este elemento es muy susceptible a la competencia de otros cationes (NH_4^+ , Ca^{+2} , K^+) en su absorción, por lo que es frecuente que se produzcan deficiencias inducidas por esta causa. El Magnesio es muy móvil en el floema y puede ser transportado fácilmente de las partes

viejas a las jóvenes. La mayor parte, en la planta, se encuentra como ion libre asociado a aniones orgánicos e inorgánicos.

Como componente de la clorofila realiza un papel prioritario en la fotosíntesis. Sin embargo, una función importante de este elemento es la de actuar como complemento de todas las enzimas que activan el proceso de fosforilación (Domínguez, 1989).

Los primeros síntomas de carencia se hacen visibles en las hojas más viejas ya que es un elemento móvil. Al inicio aparece clorosis internerval que va desde el centro de las hojas hasta los bordes. En estado avanzado se produce un punteado necrótico no generalizado que se extiende formando manchas necróticas. En estados de carencia severa la mayoría de las hojas presentan coloración amarilla con el nervio central de color verde claro (Jordá et al. 1998).

2.4.5 Calcio

Este elemento se encuentra como ion libre (Ca^{+2}) o bien combinado con grupos de escasa movilidad en la planta (oxalatos, carbonatos, fosfatos, carboxilos, etc.).

La falta de Ca está íntimamente relacionada con la ocurrencia de PAF en frutos. Benton (1999) menciona que con niveles de Ca en el fruto de 0,12% (peso seco) no se presenta PAF, pero sí cuando el contenido es 0,08%. La ocurrencia de este desorden no es solamente un problema de deficiencia de Ca pero está relacionada a una combinación de factores que restringen el movimiento de Ca al fruto. El factor más común es stress de humedad (exceso o deficiencia de agua) ya que la transpiración se reduce en la planta. Tomando en cuenta que el Ca se mueve por medio del flujo de la transpiración, una reducción en el movimiento del agua en la planta reduce la cantidad del agua transportadora del Ca que alcanza el fruto en desarrollo.

Cualquier factor que pudiera restringir la absorción de Ca por las raíces (bajo pH del suelo y desbalance en la cantidad de los cationes K^+ , Mg^{+2} , NH_4^+) en el suelo o en la solución nutritiva, puede fomentar PAF. Tener una suficiente concentración de Ca en el suelo o en la solución nutritiva es importante, pero frecuentemente es el balance entre los cationes lo que interfiere con la absorción de Ca.

Los primeros síntomas de deficiencia se aprecian en tallos y hojas jóvenes. Las hojas jóvenes presentan clorosis del centro de los folíolos hacia los bordes, donde aparece una coloración morada mostrando algunas de ellas forma de gancho. En estados avanzados las hojas aparecen totalmente cloróticas y los órganos más próximos a las zonas meristemáticas se ven fuertemente afectados, cesando en crecimiento de los mismos y dando la impresión de que la planta ha sido cortada a esa altura. Las hojas y tallos de los ápices se necrosan y mueren. Las hojas basales muestran coloración y se encuentran enrolladas. Los frutos son escasos, pequeños y en todos ellos aparece podredumbre apical (Jordá et al. 1998).

2.4.6 Azufre

Además de la forma iónica $\text{SO}_4^{=}$ en que se absorbe el azufre existen numerosos compuestos inorgánicos de azufre a los que se integra en su forma reducida. Forma parte, entre otros compuestos, de los aminoácidos esenciales, cisteína y metionina, de la coenzima A y de las vitaminas biotina y tiamina, glicósidos, etc. (Domínguez, 1989).

Esta deficiencia tiene baja incidencia en cultivos comerciales de tomate. En caso de producirse, las hojas jóvenes desarrolladas presentan clorosis internerval y los ápices de las plantas permanecen verde claro. La necrosis aparece rápidamente en forma de moteado simétrico a ambos lados del nervio central en hojas inmediatamente anteriores a la copa, apreciándose un retraso del crecimiento y amarillamiento generalizado en la planta. Los frutos son pequeños y los sépalos están rígidos y necrosados en las puntas. En estado avanzado de la deficiencia las hojas viejas se necrosan totalmente (Jordá et al. 1998).

2.4.7 Microelementos

No es frecuente la determinación de estos elementos nutritivos más que en aquellos casos en los que se sospecha la existencia o posibilidad de deficiencias, bien por las características específicas del sustrato o por la sensibilidad concreta de un determinado cultivo (Gros & Domínguez, 1992).

De manera específica Jordá et al. (1998), describe la función y carencias de estos elementos:

2.4.7.1 Hierro. Es constituyente de numerosos compuestos esenciales en el metabolismo de las plantas. Interviene en todas aquellas interacciones en las que existan procesos de oxidación-reducción como son la respiración, fotosíntesis y reducción de los nitratos; también actúa en la formación de clorofila y en el metabolismo de las proteínas. Es un elemento que presenta una movilidad media en las plantas.

Es la deficiencia más característica y fácil de reconocer entre las ocasionadas por los microelementos. Inicialmente se presenta una coloración pálida en las hojas terminales, que progresa a clorosis internerval que se extiende desde la base de los folíolos, destacando claramente los nervios que permanecen verdes, incluso las nervaduras secundarias dan un aspecto de retícula verde sobre fondo amarillo. Posteriormente esta clorosis se extiende a todo el limbo de la hoja. Nunca aparece necrosis.

2.4.7.2 Manganeso. Interviene en procesos vitales de los vegetales como son la fotosíntesis, la respiración, reducción de nitratos a amonio y como activador de diversas enzimas. No obstante, los requerimientos de manganeso generalmente no son muy específicos ya que presenta propiedades parecidas al calcio, magnesio, hierro y cinc. Estos cationes pueden afectar a la absorción y al transporte del manganeso en la planta.

La sintomatología de la carencia se presenta en las hojas como una clorosis internerval definida en manchas redondas u ovaladas, que comienzan en los tejidos próximos a la nervadura central y que posteriormente se extiende a todo el foliolo, dando un aspecto amarillento a la planta; incluso el raquis de la hoja tiene coloración amarilla. En su envés se pueden observar manchas cloróticas. Debido a que es un elemento que no disfruta de gran movilidad en la planta son las hojas jóvenes las primeras en mostrar la sintomatología pero rápidamente se extiende a toda ella. En un estado más avanzado de la deficiencia las hojas se necrosan y retuercen.

2.4.7.3 Zinc. Incide directamente en el crecimiento vegetal, debido a la relación de este elemento con la síntesis y niveles de auxina. También actúa en el metabolismo vegetal como activador de varias enzimas, teniendo una movilidad media dentro de la planta.

La carencia inicia con un amarillamiento generalizado de las hojas viejas. En las hojas intermedias aparecen manchas de color verde más claro, no definidas en la forma; esta coloración más pálida se extiende por todo el foliolo desde el borde hacia el centro, contrastando con los tejidos próximos a las nervaduras que permanecen de color verde más intenso. Esta diferencia de coloración no es apreciable en el envés de la hoja, lo que se observa en él es una coloración púrpura en el borde de los foliolos.

2.4.7.4 Cobre. Juega un papel importante en numerosas reacciones fisiológicas: respiración y fotosíntesis, metabolismo de proteínas y carbohidratos, biosíntesis de clorofila y síntesis de lignina. Es un elemento con baja movilidad en la planta y requerido por los cultivos en cantidades muy pequeñas.

Debido a la poca movilidad de este elemento los síntomas de deficiencia se manifiestan primero en hojas jóvenes, donde se produce un enrollado de los foliolos dando un aspecto tubular. Aparecen manchas cloróticas internervales y necrosis en los bordes de las hojas. Los pecíolos se curvan hacia abajo y los tallos son finos y alargados.

2.4.7.5 Boro. No se conoce con exactitud el mecanismo de acción de este elemento, se sabe que influye en el crecimiento meristemático, regula la degradación de la glucosa, actúa en el transporte de azúcares, interviene en el metabolismo del ARN y en la síntesis del ácido giberélico.

La carencia es muy característica y muy fácil de definir. Al tratarse de un elemento poco móvil en la planta los primeros síntomas aparecen en las zonas terminales de las mismas; las hojas de los ápices son de color verde pálido y de tamaño pequeño. Las hojas jóvenes

desarrolladas son las que presentan los síntomas más característicos de la deficiencia: clorosis marginal de los folíolos que evoluciona a color púrpura y que se va extendiendo a toda la superficie de la hoja. Las hojas aparecen rizadas y sus tejidos brillantes y engrosados. Cuando la deficiencia es muy acusada puede evolucionar a necrosis afectando al conjunto de la planta.

2.5 SUSTRATOS

El término sustrato se aplica en horticultura a todo material sólido distinto del suelo *in situ*, natural, de síntesis o residual, mineral u orgánico, que, colocado en un contenedor, en forma pura o en mezcla, permite el anclaje del sistema radicular, desempeñando, por tanto, un papel de soporte para la planta. El sustrato puede intervenir (material químicamente activo) o no (material inerte) en el complejo proceso de la nutrición mineral de la planta (Abad, 1991).

La primera etapa de la aplicación de un sustrato es la caracterización del mismo, con objeto de conocer sus propiedades físicas, químicas y biológicas. Las propiedades de los materiales son factores dominantes que determinan el manejo posterior del sustrato (contenedor, riego y fertilización).

2.5.1 Propiedades físicas

Las propiedades físicas de los sustratos de cultivos son de primera importancia. Una vez que el sustrato esté en el contenedor, y la planta este creciendo en él, no es posible modificar las características físicas básicas de dicho sustrato.

2.5.1.1 Espacio poroso total. Es el volumen total del sustrato de cultivo no ocupado por partículas orgánicas ni minerales. El total de poros existentes en un sustrato se divide en: poros capilares, que retienen el agua y poros no capilares o macroporos, de mayor tamaño, que son los que se vacían después que el sustrato ha drenado, permitiendo así la aireación. En los materiales más gruesos, gracias a la mayor proporción de macroporos, la aportación de oxígeno no supone ningún problema. En partículas finas, el almacenamiento de agua es superior, aunque la aportación de oxígeno puede ser limitada (Kipp; Wever, 2000)

2.5.1.2 Capacidad de aireación. Cadahía (2000) la define como la proporción del volumen de sustrato de cultivo que contiene aire después de que dicho sustrato ha sido saturado con agua y dejado drenar. El nivel óptimo de la capacidad de aireación oscila entre el 20 y 30% en volumen.

Las raíces requieren oxígeno para mantener su actividad metabólica y su crecimiento. Un déficit temporal de oxígeno puede reducir el crecimiento de las raíces y de la parte aérea, pero condiciones de anaerobiosis mantenidas durante varios días pueden llegar a provocar

la muerte de la planta. El oxígeno es también requerido por los microorganismos y, por lo tanto, las plantas cultivadas en sustratos orgánicos con una elevada población microbiana, requieren el doble o más de oxígeno que las plantas cultivadas en suelos minerales, sin abundante materia orgánica.

La altura o profundidad del contenedor tiene un efecto marcado sobre el contenido en aire del sustrato. Cuanto más alto es el contenedor, mayor es el contenido en aire. Cuando se usan contenedores pequeños o poco profundos, son preferibles los sustratos de textura gruesa que mantienen una aireación adecuada.

2.5.1.3 Granulometría. Muchos sustratos están constituidos por una mezcla de partículas de tamaños diferentes. Las propiedades físicas de estos sustratos varían en función de la distribución del tamaño de sus partículas siendo por tanto de importancia fundamental la caracterización granulométrica de los materiales.

El tamaño de las partículas afecta el crecimiento de las plantas a través del tamaño de los poros ya que determina el balance entre el contenido de agua y aire del sustrato a cualquier nivel de humedad.

Los materiales de textura gruesa, con tamaño de partícula superior a 0.9 mm, con poros grandes, retienen cantidades reducidas de agua y están bien aireadas. Los materiales finos, con partículas inferiores a 0.20 mm, retienen grandes cantidades de agua difícilmente disponible y están mal aireados. El mejor sustrato se define como aquel material de textura media a gruesa, con una distribución del tamaño de las partículas entre 0.25 y 2.5 mm, que retiene suficiente agua fácilmente disponible y presenta, además, un adecuado contenido en aire.

2.5.1.4 Densidad aparente. Se define como la relación entre el peso seco del sustrato y el volumen que ocupa en condiciones de cultivo, es decir, incluyendo el espacio poroso entre las partículas.

La densidad aparente juega un papel importante ya que los sustratos y los contenedores se transportan durante su manejo y manipulación y, consecuentemente, su peso ha de ser tenido en cuenta. En adición, el anclaje de las plantas debería ser también considerado como un factor de importancia: cuanto más alta sea la planta, más fuerte deberá ser el sustrato. En los invernaderos, donde el viento no es un factor limitante, la densidad aparente del sustrato puede ser tan baja como 0.15 g/cm^3 .

2.5.2 Propiedades químicas

Las propiedades químicas caracterizan las transferencias de materia entre el sustrato y la solución del sustrato: reacciones de disolución e hidrólisis de los constituyentes minerales y reacciones de intercambio de iones.

2.5.2.1 Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC). Se define como la suma de los cationes que pueden ser adsorbidos por unidad de peso (o de volumen) del sustrato. Dichos cationes quedan así retenidos frente al efecto lixivante del agua y están disponibles para la planta.

El valor óptimo de la CIC de los sustratos depende estrechamente de la frecuencia de la fertirrigación. Si la fertirrigación se aplica permanentemente, la capacidad de adsorción de los cationes no constituye ninguna ventaja, siendo recomendable en este caso la utilización de materiales inertes con muy baja o nula capacidad de intercambio catiónico. Si, por el contrario, la fertirrigación se aplica de modo intermitente, será conveniente la utilización de sustratos con moderada a elevada capacidad de intercambio catiónico, en todo caso superior a 20 meq/100 g.

2.5.2.2 Disponibilidad de los nutrientes. Los sustratos orgánicos difieren marcadamente entre sí en el contenido de nutrientes asimilables. Así, algunos (turba rubia p.e.) poseen un nivel reducido de nutrientes asimilables mientras que otros (compost p.e.) presentan niveles elevados, dependiendo dicho nivel del origen del compost y del proceso de compostaje.

En cualquier caso, para un crecimiento óptimo de las plantas deberían añadirse siempre nutrientes adicionales como fertilizantes de base y/o como fertilizantes durante el ciclo de cultivo.

2.5.2.3 Salinidad. Se refiere a la concentración de sales solubles presentes en el sustrato. Las causas que originan un incremento en la salinidad del sustrato después de estar éste colocado en el contenedor, son:

- La presencia de fertilizantes insolubles, como los de liberación lenta, cuando se degradan para producir nitrato o bien, cuando liberan sales mediante difusión, en una cuantía superior a las cantidades absorbidas o lixiviadas.
- Cuando la cantidad de sales aportadas con el agua de riego o la solución fertilizante es superior a las cantidades absorbidas por la planta o las pérdidas por lixiviación.
- Cuando el sustrato presenta una elevada CIC y al mismo tiempo se descompone con el transcurso del cultivo, liberando nutrientes.

Un incremento en la salinidad puede ser prevenido o corregido mediante lixiviación controlada. Otras medidas para atenuar los efectos de salinidad son:

- Mantener el sustrato de cultivo permanentemente húmedo.
- No aplicar fertilizantes en polvo ni soluciones fertilizantes con elevada fuerza iónica cuando el sustrato esté seco.
- Reducir el estrés de las plantas mediante sombreado e incremento de la humedad relativa ambiental.

2.5.2.4 pH. El nivel óptimo en el cultivo de tomate en sustrato varía entre 5.5 - 6.8 (disolución del extracto saturado).

El pH ejerce sus efectos principales sobre la asimilabilidad de los nutrientes, la CIC y la actividad biológica. Bajo condiciones de cultivo intensivo, se recomienda mantener el pH del sustrato dentro de un intervalo reducido.

Con pH de 5.0 - 6.5, la mayoría de los nutrientes mantienen su máximo nivel de asimilabilidad. Por debajo de pH = 5.0 pueden presentarse deficiencias de N, K, Ca, Mg, B, etc., mientras que por encima de pH = 6.5 puede disminuir la asimilabilidad de P, Fe, Mn, B, Zn y Cu. Los óxidos metálicos (de Fe, Mn, Cu, Zn, etc.) se hacen más solubles al bajar el pH (por debajo de 5.0), pudiendo llegando a ser fitotóxicos.

2.5.2.5 Relación Carbono / Nitrógeno (C/N). La relación C/N se usa tradicionalmente como un índice del origen de la materia orgánica, de su madurez y de su estabilidad. Los daños que aparecen sobre las plantas cultivadas en materiales orgánicos inmaduros, son debidos tanto a una inmovilización del nitrógeno como a una baja disponibilidad del oxígeno en la rizósfera. Esta situación está provocada por la actividad de los microorganismos que descomponen los materiales orgánicos frescos y utilizan el nitrógeno para la síntesis de sus proteínas celulares. El oxígeno es también consumido por la población microbiana.

Una relación C/N entre 20 - 40 es considerada como óptima para el cultivo en sustrato y es un indicador de material maduro y estable.

2.5.3 Propiedades biológicas

Todos los sustratos orgánicos son susceptibles a degradación biológica, viéndose favorecida esta situación por las condiciones ambientales que prevalecen en los invernaderos. La población microbiana es la responsable de dicho proceso, pudiendo resultar en deficiencias de oxígeno y de nitrógeno, liberación de sustancias fitotóxicas y contracción del sustrato. Así pues, la descomposición de la materia orgánica en los medios de cultivo, es desfavorable desde el punto de vista hortícola debiendo tomar precauciones con objeto de minimizar sus efectos sobre las plantas.

2.5.4 Otras propiedades

Existen otros aspectos que condicionan la calidad de sustratos del cultivo como son: estar libres de semillas de malas hierbas, sustancias fitotóxicas, nemátodos y otros patógenos. El sustrato debe ser reproducible y se debe garantizar su disponibilidad. Además debe ser respetuoso con el medio ambiente, estar libre de elementos extraños y ser resistente a cambios físicos, químicos y ambientales (www.infoagro.com).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 ESTABLECIMIENTO DEL ENSAYO

El experimento se desarrolló en el macrotúnel C de la Zamoempresa de Cultivos Intensivos (ZECI), en Zamorano, Honduras; sobre los 14° de latitud norte y 87° de longitud oeste a 800 m.s.n.m.

En el macrotúnel de 900 m² (10 x 90 m) se ubicaron 1728 bolsas en cuatro camas de un metro de ancho. Las camas fueron recubiertas con plástico negro y sobre cada una de ellas se distribuyó una doble hilera con 0,7 m entre hileras sencillas y 0,4 m entre bolsas; el distanciamiento entre camas fue de 2,25 m para una densidad de 2,22 plantas/m². El volumen de cada bolsa fue de 19 lt, se llenaron 864 bolsas con el sustrato convencional de la Zamoempresa de Cultivos Intensivos (ZECI) y las 864 restantes con el sustrato que se evaluó.

En el transplante se utilizaron plántulas de tomate del cultivar Floradade (crecimiento determinado) de 21 días de edad, sembradas en bandejas de plástico de 200 celdas cada una. El medio de cultivo fue Sunshine Mix #3 (Sun Agro Horticulture Inc., Washington)

Se utilizó riego por goteo con microtubos de 60 cm de longitud y caudal de 2.5 lt/hr, (se usó agua potable).

3.2 TRATAMIENTOS

Se evaluaron cuatro fertilizaciones y dos sustratos, para un total de ocho tratamientos (cuadro 10).

Cuadro 10. Tratamientos del ensayo

TRAT	ABREV	FERTILIZACION	SUSTRATO
1	S-2	Solución nutritiva	Sustrato 2
2	S-S	Solución nutritiva	Sustrato SEMI
3	E-2	Método de extracciones	Sustrato 2
4	E-S	Método de extracciones	Sustrato SEMI
5	P-2	Plan de fertilización	Sustrato 2
6	P-S	Plan de fertilización	Sustrato SEMI
7	Z-2	Fertilización ZECI (testigo)	Sustrato 2
8	Z-S	Fertilización ZECI	Sustrato SEMI

SEMI: Sustrato semi-hidropónico

2: Sustrato de la ZECI

3.3 FERTILIZACIONES

Las fertilizaciones se realizaron por medio de fertirrigación. El volumen de agua aplicado fue de 1.5 lt/planta/día distribuidos en dos riegos (mañana y tarde). A continuación se presentan los detalles de cada programa de fertilización.

3.3.1 Solución nutritiva

Este programa de fertilización se realizó con base en la solución nutritiva usada en hidroponía descrita por Steiner (Marhuenda, 2000), y ajustada al agua de riego (anexo 1), utilizando un incremento en conductividad eléctrica de 1,0 mmho/cm por encima del agua de entrada. Se modificó la solución nutritiva para dos etapas del cultivo, la primera desde el transplante hasta el cuaje de frutos (cuadros 11, 12., 13) y la segunda desde el cuaje de frutos hasta fin de cultivo (cuadros 14, 15 y 16).

Cuadro 11. Ajuste de la solución nutritiva al agua de riego (transplante a cuaje de frutos)

	---- Aniones (meq/l) ----				-- Cationes (meq/l) --				CE
	NO ₃	H ₂ PO ₄	SO ₄	HCO ₃	NH ₄	K	Ca	Mg	
Solución ideal	11.0	2.0	3.0	0.1	2.5	5.5	5.5	3.0	1.5
Agua de riego	0.1	0.0	0.4	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1
Ap. Previs. hidr.	10.9	2.0	2.6	0.0	2.4	5.3	5.4	2.9	1.6
Ap. Previs. sust.	7.0	1.3	1.7	0.0	1.5	3.4	3.5	1.9	1.0

Ap. previs. hidr.: Aportes previstos en hidroponía

Ap. previs. sust.: Aportes previstos en sustrato orgánico

Cuadro 12. Cálculo de la cantidad de fertilizante en meq/l (transplante – cuaje de frutos)

	NH₄	K	Ca	Mg	H	T real	T opt.
NO₃	0.2	3.4	3.5			7.0	7.0
H₂PO₄	1.3					1.3	1.3
SO₄				1.9		1.9	1.7
T real	1.5	3.4	3.5	1.9	0.0		
T opt.	1.5	3.4	3.5	1.9	0		

Cuadro 13. Cálculo de la cantidad de fertilizante en mg/l (transplante – cuaje de frutos)

Fertilizantes	meq/l	Peso eq.	Pureza %	mg/l
NH₄NO₃	0.2	80.0	98.0	14.7
KNO₃	3.4	101.1	98.0	351.2
CaNO₃	3.5	118.0	98.0	416.9
NH₄H₂PO₄	1.3	115.0	98.0	151.3
MgSO₄	1.9	123.2	98.0	237.5

eq: equivalente

Cuadro 14. Ajuste de la solución nutritiva al agua de riego (cuaje de frutos – fin de cultivo)

	---- Aniones (meq/l) ----				-- Cationes (meq/l) --				CE
	NO₃	H₂PO₄	SO₄	HCO₃	NH₄	K	Ca	Mg	
Disolución ideal	10.5	2.0	3.0	0.1	2.0	7.0	5.5	3.0	1.0
Agua de riego	0.1	0.0	0.4	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1
Aportes previs. hidr.	10.4	2.0	2.6	0.0	1.9	6.8	5.4	2.9	1.5
Aportes previs. sust.	6.9	1.3	1.7	0.0	1.3	4.5	3.6	2.0	1.0

Ap. previs. hidr.: Aportes previstos en hidroponía

Ap. previs. sust.: Aportes previstos en sustrato orgánico

Cuadro 15. Cálculo de la cantidad de fertilizante en meq/l (cuaje de frutos – fin de cultivo)

	NH₄	K	Ca	Mg	H	T real	T opt.
NO₃	-1.2	4.5	3.6			8.1	6.9
H₂PO₄	1.3					1.3	1.3
SO₄				2.0		2.0	1.7
T real	1.3	4.5	3.6	2.0	0.0		
T opt.	1.3	4.5	3.6	2.0	0.0		

Cuadro 16. Cálculo de la cantidad de fertilizante en mg/l (cuaje de frutos – fin de cultivo)

Fertilizantes	meq/l	Peso eq.	Pureza %	mg/l
KNO₃	4.5	101.1	98.0	466.9
CaNO₃	3.6	118.0	98.0	431.6
NH₄H₂PO₄	1.3	115.0	98.0	156.7
MgSO₄	2.0	123.2	98.0	245.9

eq: equivalente

De lunes a sábado la fertirrigación se realizó por la mañana y por la tarde, los domingos no se fertirrigó.

3.3.2 Extracciones del cultivo

A partir de las extracciones de tomate presentadas por Domínguez (1989) y su ritmo de absorción (Soler; Arroyo, 1998), se determinaron las cantidades diarias de fertilizantes a aportar (cuadros 17 y 18).

Cuadro 17. Cálculo de extracciones de macroelementos por etapa fenológica del cultivo de tomate

Fases	----- Macroelementos (kg/ha) -----				
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO
Transplante - floración	40	10	30	39	21
Floración - fructificación	60	30	60	16	8
Fructificación - inicio cosecha	120	50	120	64	33
Cosecha	180	110	390	71	38
Total	400	200	600	190	100

Cuadro 18. Cálculo de cantidad de fertilizantes con base en las extracciones del cultivo de tomate

Fases	----- Fertilizantes (kg/ha) -----				
	KNO ₃	CaNO ₃	MgSO ₄	NH ₄ NO ₃	NH ₄ H ₂ PO ₄
Transplante - floración	65.2	144.4	131.3	21.3	16.7
Floración - fructificación	130.4	59.3	50.0	83.2	50.0
Fructificación - inicio cosecha	260.9	237.0	206.3	66.8	83.3
Cosecha	847.8	263.0	237.5	71.6	183.3
Total	1,304.3	703.7	625.0	242.9	333.3

De lunes a sábado la fertirrigación se realizó por la mañana, los domingos no se fertirrigó.

3.3.3 Plan de fertilización

Se elaboró un programa de fertilización (cuadro 19) con base en las observaciones realizadas en las fincas de COAGRISAN (Cooperativa Agrícola San Nicolás de Tolentino), cooperativa productora y exportadora de tomate en Gran Canaria, España.

Cuadro 19. Plan de fertilización de Canarias por días de la semana

Fase	Fertilizantes (g/planta/día)					
	KNO ₃		CaNO ₃	NH ₄ NO ₃	MgSO ₄	NH ₄ H ₂ PO ₄
	I	II	II	I	I	I
1	0.1	0.2	0.6	0.2	0.1	0.4
2	0.4	0.4	0.6	0.2	0.1	0.2

I: Lunes, miércoles, viernes
 II: Martes, jueves, sábado

Fase 1: Transplante a cuaje de frutos
 Fase 2: Cuaje de frutos a fin de cultivo

De lunes a sábado la fertirrigación se realizó por la mañana, los domingos no se fertirrigó.

3.3.4 Fertilización ZECI (testigo)

Para establecer un parámetro de comparación, se evaluó la fertilización que realiza la ZECI. Las cantidades de fertilizantes se resumen en el cuadro 20.

Cuadro 20. Fertilización de la ZECI por días de la semana

Fase de cultivo	Fertilizante (kg/ha/día)		
	Urea		Nitrato de calcio
	I	II	I
Transplante - floración	6.4	0.0	0.0
Floración - fin de cultivo	0.0	6.4	6.4

I: lunes, miércoles, viernes
 II: martes, jueves

3.4 SUSTRATOS

Los dos sustratos evaluados estuvieron compuestos de casulla de arroz quemada, compost y arena; diferenciándose entre sí por las proporciones de estos materiales (cuadro 21).

Ambos fueron elaborados en la ZECI, y pasteurizados en trocos de 5 m³ a una temperatura de 90°C por un período de 2 horas.

Se realizó una caracterización de los sustratos con el fin de establecer sus propiedades físicas (densidad aparente y real, porosidad, capacidad de retención de agua) y su influencia en los resultados del ensayo.

El análisis del extracto saturado de ambos sustratos se presenta en el anexo 2.

Cuadro 21. Proporciones de los materiales usados en la elaboración de los sustratos

Material	Sustrato 2	Sustrato SEMI
	----- % -----	-----
Casulla de arroz quemada	50	50
Compost	40	25
Arena	10	25

Sustrato 2: Testigo

Sustrato SEMI: Semi-hidropónico

3.5 MANEJO AGRONÓMICO

Las plántulas se transplantaron al macrotúnel el día 21 de junio de 2002. La fertilización inició a los 10 DDT de acuerdo con cada tratamiento y finalizó a los 105 DDT. Se realizó un tutorado horizontal (sin poda del cultivo) de cuatro niveles, el primero a los 19 DDT, el segundo a los 27 DDT, el tercero a los 39 DDT y el cuarto a los 56 DDT.

El volumen diario de agua aplicado fue de 1.5 l/planta fragmentado en dos riegos de 0.75 lts. cada uno (por la mañana y por la tarde).

La cosecha se realizó entre los 70 y 115 DDT, con frecuencias de 2 a 3 veces por semana dependiendo del ritmo de maduración de los frutos.

En el anexo 3 se presenta un resumen de los problemas fitosanitarios que se presentaron en el cultivo y las aplicaciones que se realizaron para su control.

3.6 RECOLECCIÓN DE DATOS

Las variables agronómicas medidas (cuadro 22) fueron: días a floración; diámetro de planta (31 DDT); altura de planta (39 DDT); número, peso y tamaño de frutos comerciales y no comerciales en cada cosecha (70, 72, 74, 77, 80, 82, 84, 87, 90, 94, 97, 101, 106, 111, 115 DDT). A partir de los 115 DDT se proyectaron los datos de peso, número, y tamaño contando el número de frutos (diámetro \geq 5 cm) en la planta y

multiplicándolo por el peso y tamaño promedio obtenidos en la última cosecha en cada unidad experimental.

Cuadro 22. Variables agronómicas medidas en el ensayo y sus abreviaturas

Variables evaluadas	Abreviatura
Peso total	PTOT
Peso comercial	PCOM
Peso no comercial	PNOC
Número de frutos totales	NTOT
Número de frutos comerciales	NUCOM
Número de frutos no comerciales	NUNOC
Número de frutos con pudrición apical	PAF
Número de frutos de tamaño MMM	MMM
Número de frutos de tamaño MM	MM
Número de frutos de tamaño M	M
Número de frutos de tamaño G	G
Número de frutos de tamaño GG	GG
Peso promedio de fruto total	PPRTO
Peso promedio de fruto comercial	PPRCO
Peso promedio de fruto no comercial	PPRNO
Diámetro de planta	DIAPLA
Altura de planta	ALTPLA
Días a floración	FLORA

Para medir el tamaño, se clasificaron los frutos en categorías diferenciadas por su diámetro en grupos de diez milímetros (cuadro 23).

Cuadro 23. Clasificación de tamaño de fruto

Categoría	Diámetro (mm)
P	< 40
MMM	[40 – 47[
MM	[47 – 57[
M	[57 – 67[
G	[67 – 82[
GG	≥ 82

Con el objetivo de medir el desempeño económico de los tratamientos, se calcularon los costos (comunes + diferenciales, anexo 4), ingreso, utilidad bruta y relación beneficio costo para cada uno de los tratamientos (cuadro 24).

Cuadro 24. Variables económicas medidas en el ensayo y sus abreviaturas

Variable	Abreviatura
Costo total	COST
Ingreso	INGR
Utilidad bruta	UTIL
Relación beneficio/costo	BECO

3.7 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Se utilizó un diseño de parcelas divididas con bloques completos en franjas donde las parcelas principales fueron los sustratos y las subparcelas los programas de fertilización. Se evaluaron ocho tratamientos con cuatro repeticiones para un total de 32 unidades experimentales (anexo 5).

Para las variables agronómicas y económicas se realizó un Análisis de Varianza (ANDEVA) y en la separación de medias se utilizó la prueba Student Newman Keuls (SNK). Los datos fueron analizados con el programa Statistical Analysis System (SAS[®]) versión 6.04 utilizando el procedimiento “General Lineal Models” (GLM) para el ANDEVA y el comando “Least Squares Means” (LSMEANS) para determinar el efecto de las interacciones en los tratamientos y su nivel de significancia (anexo 6).

El modelo lineal utilizado fue:

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \alpha_j + \beta_k + (\tau.\alpha)_{ij} + (\beta.\alpha)_{jk}$$

Donde:

μ = Media del experimento

τ_i = Efecto de la fertilización i

α_j = Efecto del sustrato j

β_k = Efecto del bloque k

$(\tau.\alpha)_{ij}$ = Efecto de la interacción de la fertilización i con el sustrato j

$(\beta.\alpha)_{jk}$ = Efecto de la interacción del sustrato j con el bloque k

3.8 ANÁLISIS ECONÓMICO

Se utilizó el sistema de Formulación de Recomendaciones a Partir de Datos Agronómicos del Programa de Economía del CIMMYT (1998). Se elaboraron presupuestos parciales con el fin de obtener los costos y los beneficios netos de los tratamientos evaluados y se calcularon las tasas de retorno marginal (en los tratamientos dominantes) para conocer como los beneficios netos de cada tratamiento aumentaron al incrementar la cantidad invertida.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

4.1.1 Variables agronómicas

Los resultados del análisis de varianza de las variables agronómicas se resumen en el anexo 7.

El modelo se ajustó ($R^2 \geq 0.5$) significativamente ($P \leq 0.05$) para las variables de calidad (tamaño y peso promedio de frutos totales y comerciales), rendimiento (peso y número de frutos comerciales) y comportamiento de la planta (altura, diámetro y días a floración), mientras que para las variables de número y peso no comercial, número de frutos con pudrición apical y peso promedio de frutos no comerciales el modelo no fue representativo ($R^2 \leq 0.5$) ni significativo ($P \geq 0.05$).

Con excepción de los días a floración y el tamaño de fruto MM, los bloques no tuvieron un efecto significativo sobre las variables agronómicas evaluadas.

Los sustratos marcaron diferencias significativas en el rendimiento, número y peso promedio de frutos comerciales y totales, en los tamaños más grandes de frutos (M, G y GG), en altura y diámetro de planta.

Los programas de fertilización presentaron diferencias significativas en el rendimiento (total y comercial) y número de frutos (total y comercial). El tamaño del fruto también fue afectado significativamente por la fertilización (excepto por el calibre GG en donde tuvieron mayor efecto los sustratos) al igual que el peso promedio de frutos (total y comercial), altura y diámetro de planta. La fertilización no afectó significativamente los días a floración.

En general la interacción de los sustratos con la fertilización afectó significativamente el rendimiento (total y comercial), peso promedio de fruto (total y comercial) y el tamaño de fruto (Exceptuando GG).

4.1.1.1 Rendimiento. Las variables de peso total y comercial se comportaron de forma similar (cuadro 25 y 26). Los tratamientos plan 2, solución hidropónica 2 y extracciones 2 presentaron los valores más altos y no se encontró diferencia significativa entre ellos. El tratamiento ZECI 2 (testigo) obtuvo rendimientos iguales a extracciones 2 y solución

hidropónica SEMI, manteniéndose por debajo de los tratamientos con los valores más altos. Por otra parte ZECI SEMI obtuvo estadísticamente el rendimiento más bajo.

La solución hidropónica y ZECI presentaron los mayores y menores rendimientos respectivamente, siendo ambas significativamente diferentes a extracciones y plan que tuvieron rendimientos medios sin mostrar diferencia significativa entre sí.

Cuadro 25. Efecto de cuatro fertilizaciones y dos sustratos en el peso total (PTOT) de tomate bajo macrotúnel en Zamorano

Fuente de variación	Peso total (t/ha)	Separación de medias
Fertilización		
SOLU	101.36	a
EXTR	91.50	a
PLAN	90.81	a
ZECI	72.86	b
Sustrato		
DOS	105.60	a
SEMI	72.67	b
Tratamiento		
P-2	111.57	a
S-2	109.57	a b
E-2	104.15	a b c
Z-2	97.10	b c
S-S	93.15	c
E-S	78.85	d
P-S	70.05	d
Z-S	48.65	e

$R^2 = 0.92$

$P < 0.01$

$CV = 9.56$

Media = 89.14 ± 8.52

Medias dentro de la misma fuente de variación con la misma letra son estadísticamente iguales según prueba SNK ($P \leq 0.05$)

Cuadro 26. Efecto de cuatro fertilizaciones y dos sustratos en el peso comercial (PCOM) de tomate bajo macrotúnel en Zamorano

Fuente de variación	Peso comercial (t/ha)	Separación de medias
Fertilización		
SOLU	99.77	a
EXTR	90.01	b
PLAN	88.73	b
ZECI	70.69	c
Sustrato		
DOS	103.53	a
SEMI	71.07	b
Tratamiento		
P-2	109.15	a
S-2	108.13	a
E-2	102.20	a b
Z-2	94.63	b
S-S	91.42	b
E-S	77.83	c
P-S	68.30	c
Z-S	46.75	d

$R^2 = 0.92$ $P < 0.01$ $CV = 9.68$ $Media = 87,30 \pm 8.45$
 Medias dentro de la misma fuente de variación con la misma letra son estadísticamente iguales según prueba SNK ($P \leq 0.05$)

El elevado rendimiento de la solución hidropónica en comparación con el plan y las extracciones es atribuible al aumento en el número de frutos, mientras que la marcada diferencia con ZECI se puede atribuir al diferencial en la cantidad y peso de los frutos.

Las relaciones entre elementos que presentó la solución hidropónica se encontraron muy cerca de los valores establecidos como óptimos para el cultivo del tomate (cuadro 27). En floración y cosecha el método de extracciones presentó cantidades elevadas de potasio en relación con calcio y magnesio limitando su capacidad de absorción como se puede observar en el análisis foliar (anexo 8). Por otra parte existió un desbalance en la relación calcio/magnesio en el plan de Canarias en todo el ciclo de cultivo que pudo ocasionar una disminución de la producción.

Cuadro 27. Valores obtenidos y recomendados para relaciones de nutrientes (calculadas a partir de la cantidad de miliequivalentes) en el cultivo de tomate

Relación	Ideal	-- SOLU --		----- EXTR -----				---- PLAN ----	
		1	2	1	2	3	4	1	2
N/K	1.2	2.4	2.0	4.0	3.3	2.7	1.7	5.6	2.5
Ca/Mg	1-2	1.8	1.8	1.6	1.2	1.2	1.2	6.3	6.3
K/Ca	0.5-1	0.7	0.8	0.3	1.4	0.7	2.1	0.5	1.3
K/(Ca+Mg)	1	1.0	1.3	0.5	2.6	1.3	3.8	0.6	1.6
EXTR 1: Transplante - floración					SOLU 1: Transplante - cuaje de frutos				
EXTR 2: Floración - fructificación					SOLU 2: Cuaje de frutos - fin de cultivo				
EXTR 3: Fructificación - inicio de cosecha					PLAN 1: Transplante - cuaje de frutos				
EXTR 4: Cosecha					PLAN 2: Cuaje de frutos - fin de cultivo				

Se evidenció un rendimiento significativamente superior del sustrato 2 sobre el sustrato SEMI. Tomando en cuenta el volumen de agua aplicado (1.5 l/planta/día fragmentado en dos riegos), el sustrato SEMI presentó un drenaje promedio mayor (41%) que el sustrato 2 (29%), esta diferencia se debió a la variación en la cantidad de compost que influyó en las propiedades físicas de ambos sustratos (cuadro 28). Como consecuencia, el sustrato con mayor cantidad de compost (2) retuvo mayor cantidad de agua disminuyendo el estrés hídrico en la planta.

Cuadro 28. Caracterización física de los sustratos antes y después del ciclo de cultivo

Sustrato	Densidad aparente (g/cm ³)	Densidad real (g/cm ³)	Porosidad (%)	Capacidad de retención de agua (%)
2 pre. cultivo	0.47	1.36	64.9	137.0
2 pos. cultivo	0.38	0.83	54.5	144.9
SEMI pre. cultivo	0.60	1.30	53.7	89.6
SEMI pos. cultivo	0.51	1.36	62.3	122.8

Pre. cultivo = previo al ciclo de cultivo

Pos. cultivo = posterior al ciclo de cultivo

4.1.1.2 Número de frutos. La solución hidropónica alcanzó la mayor cantidad de frutos (total y comercial), siendo significativamente diferente del resto de fertilizaciones (cuadro 29 y 30). ZECI obtuvo estadísticamente el número de frutos más bajo (casi 17% menos en relación con la media del ensayo) producto del aborto floral observado en el campo.

El sustrato 2 presentó la mayor cantidad de frutos diferenciándose significativamente del sustrato SEMI.

Cuadro 29. Efecto de cuatro fertilizaciones y dos sustratos en el número de frutos totales (NTOT) de tomate bajo macrotúnel en Zamorano

Fuente de variación	Frutos totales (Uni./ha)	Separación de medias
Fertilización		
SOLU	822,753	a
EXTR	741,142	b
PLAN	711,869	b
ZECI	605,343	c
Sustrato		
DOS	827,405	a
SEMI	613,148	b

$R^2 = 0.90$ $P < 0.01$ $CV = 8.79$ $Media = 720,277 \pm 63,313$
 Medias dentro de la misma fuente de variación con la misma letra son estadísticamente iguales según prueba SNK ($P \leq 0.05$)

Cuadro 30. Efecto de cuatro fertilizaciones y dos sustratos en el número de frutos comerciales (NUCOM) de tomate bajo macrotúnel en Zamorano

Fuente de variación	Frutos comerciales (Uni./ha)	Separación de medias
Fertilización		
SOLU	800,825	a
EXTR	721,867	b
PLAN	690,877	b
ZECI	583,091	c
Sustrato		
DOS	805,646	a
SEMI	592,685	b

$R^2 = 0.90$ $P < 0.01$ $CV = 9.02$ $Media = 699,165 \pm 63,087$
 Medias dentro de la misma fuente de variación con la misma letra son estadísticamente iguales según prueba SNK ($P \leq 0.05$)

4.1.1.3 Tamaño del fruto. Para el tamaño más grande (GG) no se encontró diferencia significativa entre fertilizaciones, mientras que para los tamaños G, M y MM solamente la ZECI obtuvo un valor significativamente más bajo comparado con las demás fertilizaciones (exceptuando el plan de Canarias donde se encontró que la cantidad de M fue igual a la de ZECI). La solución hidropónica presentó la cantidad más baja del tamaño más pequeño (MMM).

En los sustratos no se encontraron diferencias significativas para los tamaños pequeños (MMM y MM). Sin embargo, para los demás tamaños, el sustrato 2 obtuvo cantidades significativamente mayores que el sustrato SEMI (figura 2).

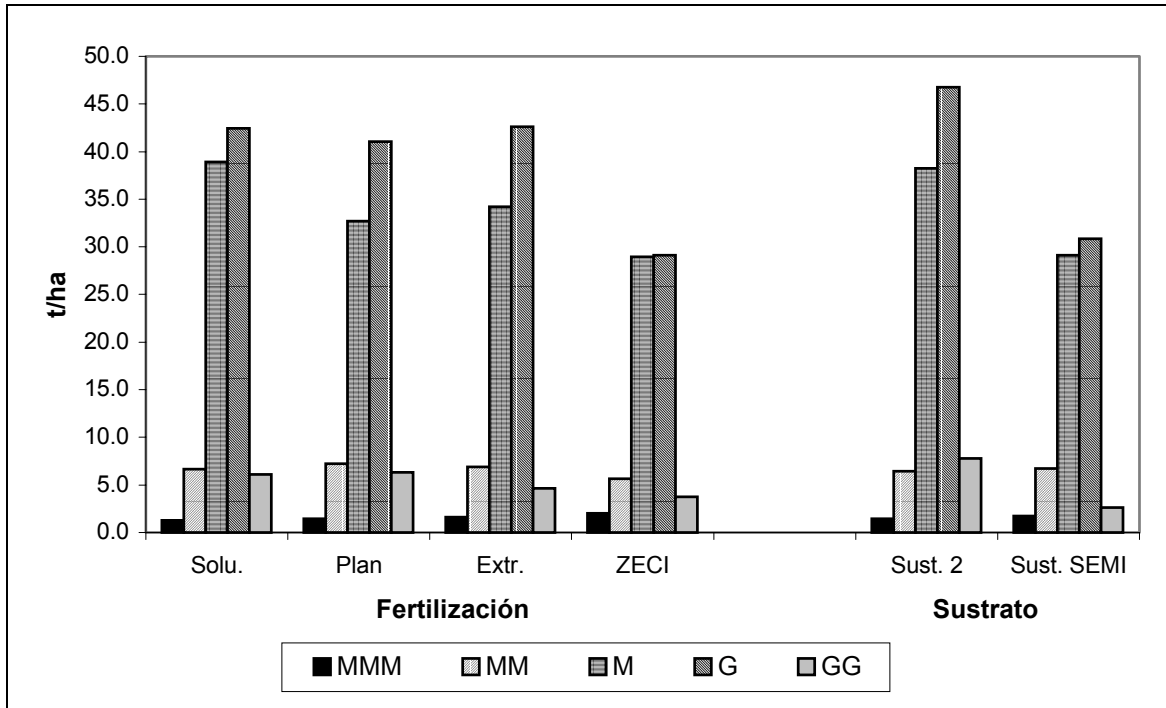


Figura 2. Distribución de la producción por tamaño del fruto producto del efecto de cuatro fertilizaciones y dos sustratos

4.1.1.4 Peso promedio de fruto. Las variables de peso promedio de fruto total y comercial se comportaron de igual manera (cuadros 31 y 32). En los tratamientos plan de Canarias 2, ZECI 2, extracciones 2 y solución hidropónica SEMI se encontraron los frutos de mayor peso sin diferencias significativas entre ellos. Por otro lado, ZECI SEMI fue el tratamiento que presentó frutos de menor peso diferenciándose significativamente de todos los demás tratamientos.

Sóamente el programa de fertilización ZECI presentó un valor estadísticamente menor al resto de fertilizaciones. El valor obtenido en el sustrato 2 fue significativamente más alto que el sustrato SEMI.

Cuadro 31. Efecto de cuatro fertilizaciones y dos sustratos en el peso promedio de frutos totales (PPRTO) de tomate bajo macrotúnel en Zamorano

Fuente de variación	Peso frutos totales (g/fruto)	Separación de medias
Fertilización		
PLAN	126.11	a
SOLU	123.52	a
EXTR	123.24	a
ZECI	117.25	b
Sustratos		
DOS	127.87	a
SEMI	117.18	b
Tratamientos		
P-2	131.46	a
Z-2	131.42	a
E-2	128.25	a
S-S	126.69	a b
P-S	120.74	b c
S-2	120.35	b c
E-S	118.23	c
Z-S	103.07	d

$R^2 = 0.88$ $P < 0.01$ $CV = 3.55$ $Media = 122.53 \pm 4.35$
 Medias dentro de la misma fuente de variación con la misma letra son estadísticamente iguales según prueba SNK ($P \leq 0.05$)

El plan de Canarias y la solución hidropónica mantuvieron el peso promedio del fruto por encima de los 150 g hasta la tercera semana de cosecha, a partir de este punto su peso comenzó a decrecer. Por otra parte, el peso promedio producto de las extracciones y ZECI comenzó a descender drásticamente desde la primera semana de cosecha (figura 3).

La superioridad del peso del fruto que presentó en un inicio el sustrato 2 se fue acortando con el tiempo, hasta que ambos sustratos casi igualaron el peso promedio de fruto en la sexta semana (figura 4).

Cuadro 32. Efecto de cuatro fertilizaciones y dos sustratos en el peso promedio de frutos comerciales (PPRCO) de tomate bajo macrotúnel en Zamorano

Fuente de variación	Peso frutos comerciales (g/fruto)	Separación de medias
Fertilización		
PLAN	126.94	a
SOLU	124.93	a
EXTR	124.45	a
ZECI	118.17	b
Sustratos		
DOS	128.73	a
SEMI	118.52	b
Tratamientos		
P-2	132.19	a
Z-2	131.39	a
E-2	129.44	a
S-S	127.98	a b
S-2	121.89	b c
P-S	121.69	b c
E-S	119.45	c
Z-S	104.95	d

$R^2 = 0.86$

$P < 0.01$

$CV = 3.70$

Media = 123.62 ± 4.57

Medias dentro de la misma fuente de variación con la misma letra son estadísticamente iguales según prueba SNK ($P \leq 0.05$)

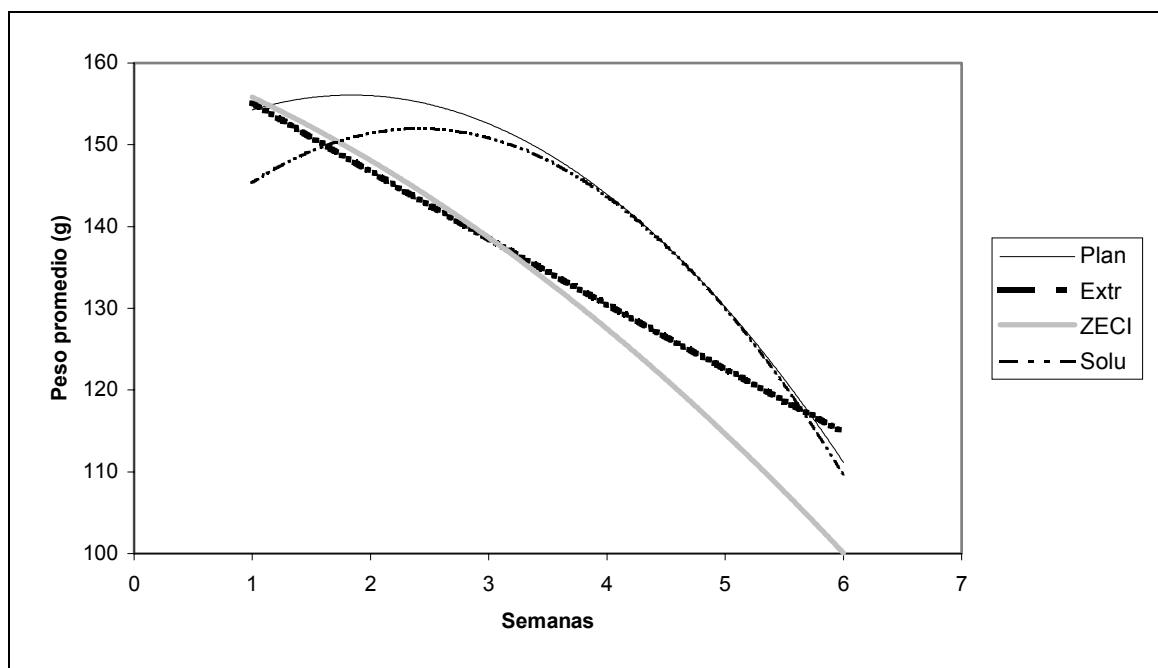


Figura 3. Comportamiento del peso promedio de frutos por fertilización

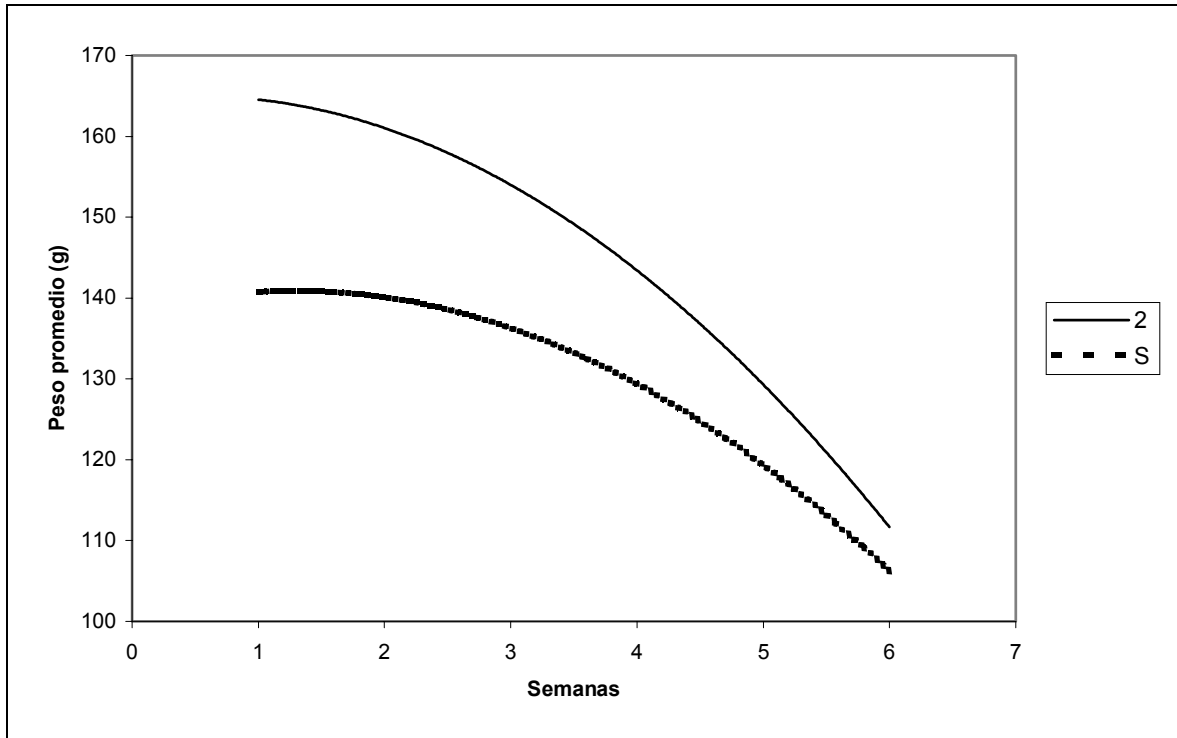


Figura 4. Comportamiento del peso promedio de frutos por sustrato

4.1.1.5 Comportamiento de la planta. La solución hidropónica obtuvo el mayor diámetro y altura de planta (cuadro 33 y 34), ambas variables fueron significativamente diferentes al resto de fertilizaciones que a la vez no presentaron diferencias entre sí. El sustrato 2 presentó plantas más vigorosas (altura y diámetro) que el sustrato SEMI.

Cuadro 33. Efecto de cuatro fertilizaciones y dos sustratos en la altura de planta (ALTPLA) de tomate bajo macrotúnel en Zamorano

Fuente de variación	Altura de planta (cm)	Separación de medias
Fertilización		
SOLU	80.00	a
EXTR	73.63	b
PLAN	73.38	b
ZECI	72.50	b
Sustrato		
DOS	80.50	a
SEMI	69.25	b

$R^2 = 0.90$ $P < 0.01$ $CV = 4.10$ $Media = 74.88 \pm 3.07$
 Medias dentro de la misma fuente de variación con la misma letra son estadísticamente iguales según prueba SNK ($P \leq 0.05$)

Cuadro 34. Efecto de cuatro fertilizaciones y dos sustratos en el diámetro de tallo (DIAPLA) de tomate bajo macrotúnel en Zamorano

Fuente de variación	Diámetro de planta (cm)	Separación de medias
Fertilización		
SOLU	13.38	a
PLAN	12.50	b
EXTR	12.38	b
ZECI	12.25	b
Sustratos		
DOS	13.56	a
SEMI	11.69	b

$R^2 = 0.83$ $P < 0.01$ $CV = 5.48$ Media = 12.63 ± 0.69
 Medias dentro de la misma fuente de variación con la misma letra son estadísticamente iguales según prueba SNK ($P \leq 0.05$)

4.1.2 Variables económicas

Los resultados del análisis de varianza de las variables económicas se resumen en el anexo 9.

El modelo fue representativo ($R \geq 0.5$) y significativo ($P \leq 0.05$) para las cuatro variables analizadas (COST, INGR, UTIL y BECO) que a la vez mostraron diferencias significativas para todas las fuentes de variación del modelo (bloques, sustratos, fertilizaciones, interacción bloque por sustrato y sustrato por fertilización).

Los tratamientos más costosos fueron Solución hidropónica 2 y Solución hidropónica SEMI mientras que ZECI SEMI y ZECI 2 resultaron ser los tratamientos de menor costo. El plan de Canarias, ZECI, extracciones y solución hidropónica en el sustrato 2 obtuvieron los ingresos y utilidades más altas (estadísticamente iguales, con excepción de ZECI 2 cuyo ingreso fue significativamente menor que los tratamientos mencionados) mientras que ZECI S presentó el ingreso y la utilidad más baja (cuadros 35-38).

En general, la solución hidropónica presentó el costo, ingreso, utilidad y relación beneficio/costo más alto (en algunas variables fue estadísticamente igual a otras fertilizaciones). ZECI mostró los valores significativamente más bajos en costo, ingreso y utilidad, sin embargo la relación beneficio costo fue estadísticamente igual en todos los programas de fertilización.

Los valores de todas las variables (COST, INGR, UTIL y BECO) fueron significativamente mayores para el sustrato 2.

Cuadro 35. Efecto de cuatro fertilizaciones y dos sustratos en el costo de producción (COST) de tomate bajo macrotúnel en Zamorano

Fuente de variación	Costo total (Lps/ha)	Separación de medias
Fertilización		
SOLU	215,523	a
EXTR	196,440	b
PLAN	183,664	c
ZECI	159,575	d
Sustratos		
DOS	194,684	a
SEMI	182,918	b
Tratamientos		
S-2	219,329	a
S-S	211,717	b
E-2	201,304	c
E-S	191,576	d
P-2	190,385	d
P-S	176,544	e
Z-2	167,316	f
Z-S	151,834	g
$R^2 = 0.99$	$P < 0.01$	$CV = 1.18$
Media = 188,800 ± 2,229		

Tasa de cambio actual: 16.7 Lps/US dólar

Medias dentro de la misma fuente de variación con la misma letra son estadísticamente iguales según prueba SNK ($P \leq 0.05$)

Cuadro 36. Efecto de cuatro fertilizaciones y dos sustratos en los ingresos (INGR) de tomate bajo macrotúnel en Zamorano

Fuente de variación	Ingreso (Lps/ha)	Separación de medias	
Fertilización			
SOLU	296,314	a	
EXTR	267,382	b	
PLAN	263,517	b	
ZECI	206,211	c	
Sustratos			
DOS	305,632	a	
SEMI	211,080	b	
Tratamientos			
P-2	324,207	a	
S-2	321,078	a	
E-2	303,617	a b	
Z-2	273,627	b	
S-S	271,550	b	
E-S	231,147	c	
P-S	202,826	c	
Z-S	138,796	d	
$R^2 = 0.92$	$P < 0.01$	$CV = 9.35$	Media = 258,356 ± 24,157

Tasa de cambio actual: 16.7 Lps/US dólar

Medias dentro de la misma fuente de variación con la misma letra son estadísticamente iguales según prueba SNK ($P \leq 0.05$)

Cuadro 37. Efecto de cuatro fertilizaciones y dos sustratos en la utilidad bruta (UTIL) de tomate bajo macrotúnel en Zamorano

Fuente de variación	Utilidad bruta (Lps/ha)	Separación de medias
Fertilización		
SOLU	80,791	a
PLAN	79,852	a
EXTR	70,942	a
ZECI	46,637	b
Sustratos		
DOS	110,949	a
SEMI	28,162	b
Tratamientos		
P-2	133,422	a
Z-2	106,311	a
E-2	102,313	a
S-2	101,749	a
S-S	59,832	b
E-S	39,570	b c
P-S	26,283	c
Z-S	-13,037	d

$R^2 = 0.90$ $P < 0.01$ $CV = 31.53$ $Media = 69,555 \pm 21,928$

Tasa de cambio actual: 16.7 Lps/US dólar

Medias dentro de la misma fuente de variación con la misma letra son estadísticamente iguales según prueba SNK ($P \leq 0.05$)

Cuadro 38. Efecto de cuatro fertilizaciones y dos sustratos en la relación beneficio/costo (BECO) de tomate bajo macrotúnel en Zamorano

Fuente de variación	Relación benef./costo (Lps/ha)	Separación de medias
Fertilización		
PLAN	0.421	a
SOLU	0.373	a
EXTR	0.355	a
ZECI	0.274	a
Sustratos		
DOS	0.575	a
SEMI	0.136	b
Tratamientos		
P-2	0.697	a
Z-2	0.633	a b
E-2	0.507	b c
S-2	0.464	c
S-S	0.282	d
E-S	0.204	d
P-S	0.144	d
Z-S	-0.086	e

$R^2 = 0.91$ $P < 0.01$ $CV = 31.83$ $Media = 0.356 \pm 0.113$
 Tasa de cambio actual: 16.7 Lps/US dólar
 Medias dentro de la misma fuente de variación con la misma letra son estadísticamente iguales según prueba SNK ($P \leq 0.05$)

4.2 ANALISIS ECONÓMICO

El cuadro 39 resume los precios y rendimientos tomados en consideración para cada escenario en el análisis de sensibilidad

Cuadro 39. Supuestos tomados en consideración para el análisis de sensibilidad

Supuestos	Esperado	Pesimista	Optimista
Coefficiente de ajuste de rendimiento	0.90	0.80	0.95
Precio de venta (Lps/Kg)	3.30	2.20	11.00
Costo cosecha (Lps/Kg)	0.02	0.02	0.02
Precio de campo (Lps/Kg)	3.28	2.18	10.98

Tasa de cambio actual: 16.7 Lps/US dólar

Los tratamientos dominantes en orden ascendente de costos de producción fueron ZECI SEMI, ZECI 2 y solución hidropónica 2 para los tres escenarios planteados (esperado, pesimista y optimista).

En el escenario esperado, el cambio de ZECI 2 a plan de Canarias 2 dio como resultado una tasa de retorno marginal de 127.8 %, es decir, cada unidad monetaria invertida en cambiar de un tratamiento a otro produjo un retorno de 1.27 unidades monetarias adicionales a la inversión.

Si bien la solución hidropónica obtuvo el mejor rendimiento, la mayor cantidad de frutos y en general los mejores valores para las variables de calidad, ninguno de los tratamientos con esta fertilización presentó el mejor desempeño económico. Al parecer, los sustratos tuvieron mayor efecto sobre estos índices, ya que todos los tratamientos que contemplaron el sustrato 2 se vieron favorecidos en el análisis estadístico (mayor utilidad y relación beneficio costo), dos de los cuales se catalogaron como dominantes y obtuvieron la mayor tasa de retorno marginal (ZECI 2 y Plan de Canarias 2).

A pesar de que ZECI 2 no presentó el mayor ingreso; su bajo costo y rendimiento aceptable (por debajo de plan de Canarias 2 y solución hidropónica 2, pero por encima de extracciones SEMI, plan de Canarias SEMI y ZECI SEMI) se tradujo en una elevada utilidad, alta relación beneficio costo y la mejor tasa de retorno marginal de los tratamientos evaluados.

El costo intermedio que presentó plan de Canarias 2 aunado a sus altos ingresos producto de su elevado rendimiento, resultó en una elevada utilidad, que si bien no fue significativamente diferente a los tratamientos con el sustrato 2, se respaldó al obtener los beneficios netos más altos.

El tratamiento extracciones 2 presentó una utilidad que estadísticamente estuvo dentro de los niveles más altos, sin embargo el tratamiento fue dominado por plan de Canarias 2 y ZECI 2 cuyos costos marginales fueron menores y sus beneficios netos mayores.

Para los tres escenarios, los presupuestos parciales se presentan en el anexo 10; los resultados económicos en los cuadros 40, 42 y 44; el análisis de dominancia en las figuras 5, 6 y 7 y el análisis de retorno marginal en los cuadros 41, 43 y 45.

Cuadro 40. Resultados económicos para el escenario esperado

Tratamiento		COST	INGR	UTIL	BECO	Dominancia
Fertilización	Sustrato	(Lps/ha)	(Lps/ha)	(Lps/ha)	(%)	
SOLU	2	219,328	321,078	101,749	0.46	Dominado
SOLU	SEMI	211,717	271,550	59,832	0.28	Dominado
EXTR	2	201,304	303,617	102,313	0.51	Dominado
EXTR	SEMI	191,576	231,147	39,571	0.21	Dominado
PLAN	2	190,785	324,207	133,422	0.70	Dominante
PLAN	SEMI	176,544	202,826	26,283	0.15	Dominado
ZECI	2	167,316	273,627	106,310	0.64	Dominante
ZECI	SEMI	151,833	138,796	-13,037	-0.09	Dominante

Tasa de cambio actual: 16.7 Lps/US dólar

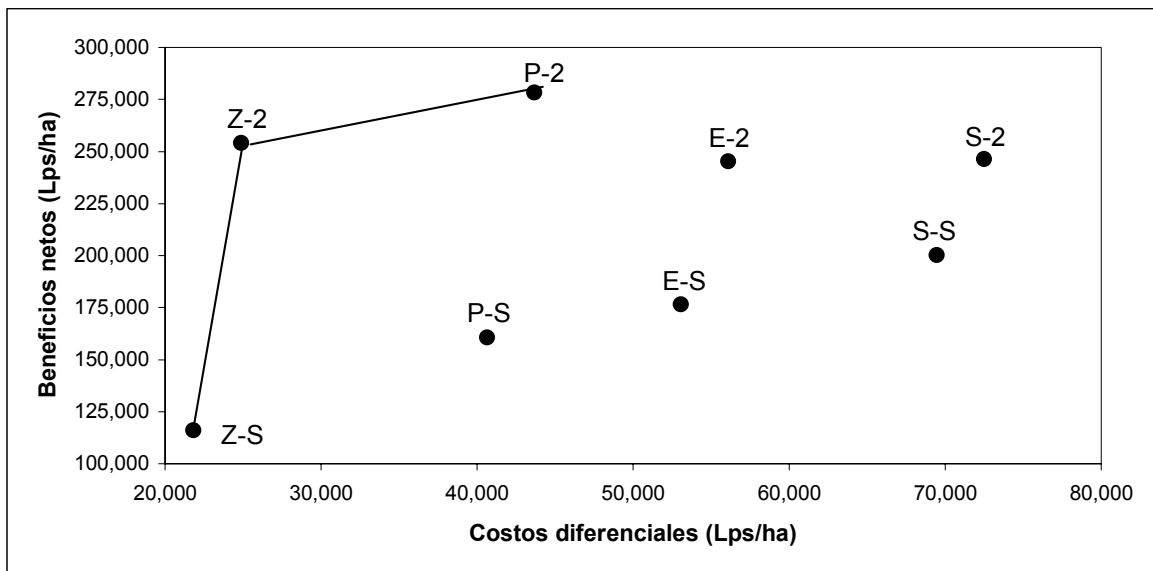


Figura 5. Análisis de dominancia para el escenario esperado

Cuadro 41. Análisis de retorno marginal para el escenario esperado

Tratamiento	Costos que varían	Costos marginales	Beneficios netos	Beneficios netos marginales	Tasa de retorno marginal
	Lps/ha				%
Z-S	21832		116038		
Z-2	24872	3041	254186	138147	4543.5
P-2	43674	18801	278220	24034	127.8

Tasa de cambio actual: 16.7 Lps/US dólar

Cuadro 42. Resultados económicos para el escenario pesimista

Tratamiento		COST	INGR	UTIL	BECO	Dominancia
Fertilización	Sustrato	(Lps/ha)	(Lps/ha)	(Lps/ha)	(%)	
SOLU	2	216,036	190,268	-25,768	-0.12	Dominado
SOLU	SEMI	208,933	160,918	-48,015	-0.23	Dominado
EXTR	2	198,191	179,921	-18,270	-0.09	Dominado
EXTR	SEMI	189,206	136,976	-52,230	-0.28	Dominado
PLAN	2	187,461	192,123	4,662	0.02	Dominante
PLAN	SEMI	174,464	120,193	-54,271	-0.31	Dominado
ZECI	2	164,511	162,149	-2,362	-0.01	Dominante
ZECI	SEMI	150,410	82,249	-68,161	-0.45	Dominante

Tasa de cambio actual: 16.7 Lps/US dólar

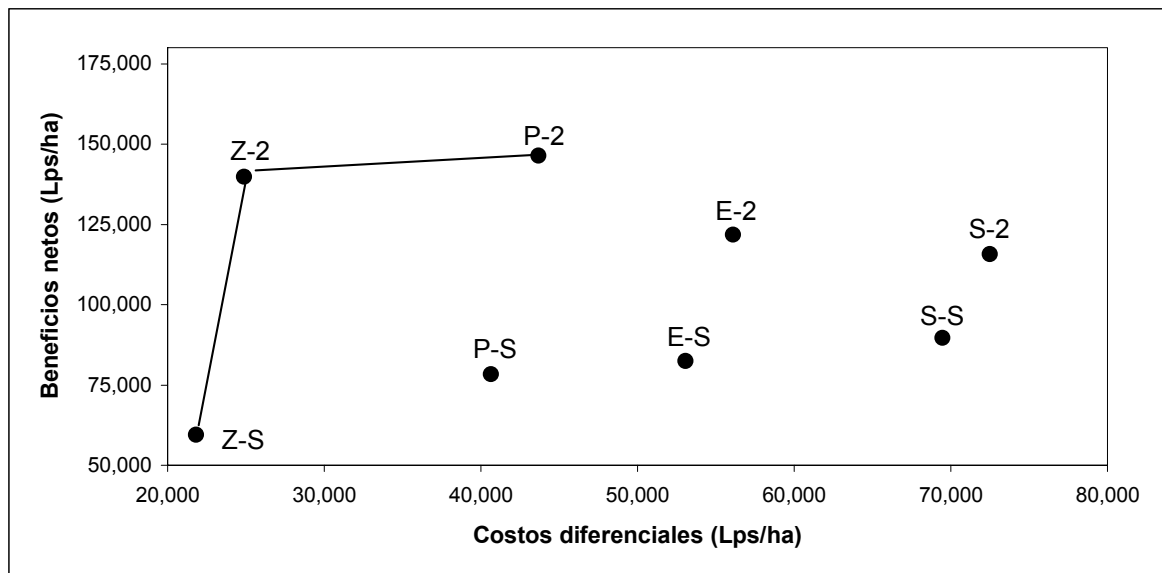


Figura 6. Análisis de dominancia para el escenario pesimista

Cuadro 43. Análisis de retorno marginal para el escenario pesimista

Tratamiento	Costos que varían	Costos marginales	Beneficios netos	Beneficios netos marginales	Tasa de retorno marginal
	----- Lps/ha -----			---- % ----	
Z-S	21832		59579		
		3041		80330	2642.0
Z-2	24872		139909		
		18801		6493	34.5
P-2	43674		146402		

Tasa de cambio actual: 16.7 Lps/US dólar

Cuadro 44. Resultados económicos para el escenario optimista

Tratamiento		COST	INGR	UTIL	BECO	Dominancia
Fertilización	Sustrato	(Lps/ha)	(Lps/ha)	(Lps/ha)	(%)	
SOLU	2	220,974	1,129,717	908,743	4.11	Dominado
SOLU	SEMI	213,109	955,453	742,343	3.48	Dominado
EXTR	2	202,861	1,068,283	865,422	4.27	Dominado
EXTR	SEMI	192,761	813,294	620,532	3.22	Dominado
PLAN	2	192,447	1,140,728	948,281	4.93	Dominante
PLAN	SEMI	177,583	713,648	536,064	3.02	Dominado
ZECI	2	168,719	962,761	794,041	4.71	Dominante
ZECI	SEMI	152,545	488,356	335,811	2.20	Dominante

Tasa de cambio actual: 16.7 Lps/US dólar

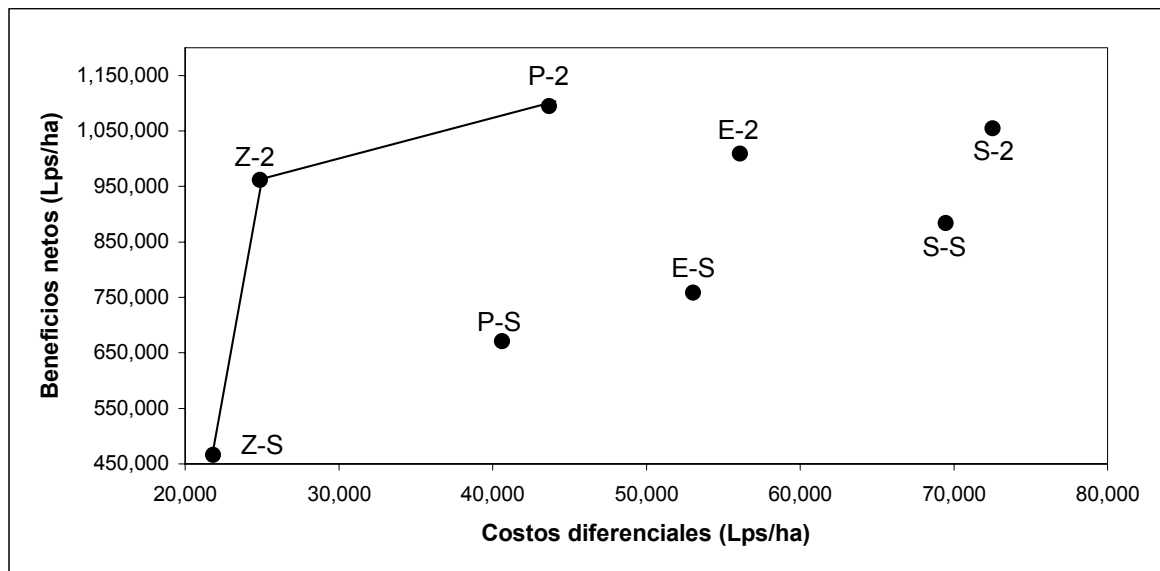


Figura 7. Análisis de dominancia para el escenario optimista

Cuadro 45. Análisis de retorno marginal para el escenario optimista

Tratamiento	Costos que varían	Costos marginales	Beneficios netos	Beneficios netos marginales	Tasa de retorno marginal
	-----	Lps/ha	-----	-----	---- % ----
Z-S	21832		465674		
Z-2	24872	3041	961871	496197	16319.5
P-2	43674	18801	1094535	132664	705.6

Tasa de cambio actual: 16.7 Lps/US dólar

5. CONCLUSIONES

En general, los tres programas de fertilización evaluados obtuvieron mayores rendimientos y frutos de mejor calidad (tamaño y peso) que el testigo. Agronómicamente la solución hidropónica se presentó como la mejor opción ya que obtuvo el rendimiento más alto, menor cantidad de frutos pequeños (MMM) y mayor vigorosidad en la planta expresada en altura y grosor del tallo a los 39 y 31 días después de transplante, respectivamente.

Para ninguna variable agronómica se evidenció diferencia significativa entre el programa basado en las extracciones del cultivo y el plan de fertilización usado en COAGRISAN (Islas Canarias).

El sustrato 2 (con mayor cantidad de compost) presentó un rendimiento más alto, frutos de mayor peso y plantas de mayor altura y diámetro. Si bien los sustratos no influenciaron en la cantidad de frutos de menor calibre (MMM y MM), se observó un aumento significativo en la cantidad de frutos de mayor tamaño (M, G y GG) en el sustrato 2.

Los tratamientos que combinaron el sustrato 2 con cualquier fertilización (exceptuando la fertilización testigo) obtuvieron los mayores rendimientos y fueron estadísticamente iguales.

La solución hidropónica fue el programa de fertilización con los costos más elevados, seguido por el programa con base en las extracciones del cultivo, el plan de fertilización y por último la fertilización testigo.

En términos de utilidad, el desempeño de las extracciones, el plan, y la solución nutritiva fue estadísticamente igual entre sí pero superior al testigo, que a pesar de su bajo costo, no presentó un rendimiento económico aceptable debido a su bajo ingreso.

El costo del sustrato 2 fue más elevado en comparación al sustrato SEMI, sin embargo su ingreso, utilidad y relación beneficio/costo señalan valores que compensan su inversión.

Los tratamientos (efecto de fertilización y sustrato) con menores costos fueron los que incluyeron a la fertilización testigo, seguido por los que incluyeron el plan, las extracciones y por último a la solución hidropónica.

Todos los tratamientos que incluyeron el sustrato 2 obtuvieron utilidades estadísticamente iguales, y dentro de éstos los que contemplaron el plan y la fertilización testigo presentaron la mejor relación beneficio/costo.

6. RECOMENDACIONES

Continuar utilizando el sustrato 2 con la fertilización ZECI (testigo) en el cultivo del tomate bajo las condiciones actuales de producción en macrotúneles de la Zamoempresa de Cultivos Intensivos en la Escuela Agrícola Panamericana.

Continuar la investigación de la solución hidropónica con sustratos inertes y con riegos más cortos, frecuentes y precisos. Para este efecto, la automatización del riego junto con un sistema autocompensado de riego por goteo son necesarios para mejorar el desempeño agroeconómico del cultivo del tomate.

7. BIBLIOGRAFÍA

ABAD, M. 1991. “Los Sustratos Hortícolas y las Técnicas de Cultivo sin Suelo”. En: La Horticultura Española en la C.E. Ediciones de Horticultura. S.L. Barcelona, España. 270 - 280 p.

ALARCÓN, A. 2000. Tecnología para Cultivos de Alto Rendimiento. Ediciones Novedades Agrícolas. Murcia, España. 460 p.

BENTON, J. 1999. Tomato plant culture: in the field, greenhouse, and home garden. CRC Press LLC. Florida, EEUU. 199 p.

CADAHIA, C. 2000. Fertirrigación. Cultivos Hortícolas y Ornamentales. 2da ed. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. 475 p.

CIMMYT. 1998. La formulación de recomendaciones a partir de datos agronómicos, un manual metodológico de evaluación económica. México D.F., México, CIMMYT. 79 p.

DOMÍNGUEZ, A. 1989. Tratado de Fertilización. 2da ed. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. 601 p.

GIL, F. 1995. Elementos de Fisiología Vegetal. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. 1147 p.

GROS, A.; DOMINCUEZ, A. 1992. Abonos. Guía Práctica de la Fertilización. 8va ed. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. 450 p.

JORDA, C. 1998. La Sanidad del Cultivo del Tomate. Editorial Phytoma. Valencia, España. 399 p.

KIPP, J.; WEVER G. 2000. “Sustratos y Turbas. Mezclas para Nutrir y Ayudar a Crecer a la Planta”. En: Revista de la Industria de Invernadero. Edición Especial Extra 2000. Ediciones de Horticultura S.L. Barcelona, España. 112-117 p.

MARHUENDA, A. 2000. “Fertirrigación en los Cultivos Protegidos”. En: Revista de la Industria de Invernadero. Edición Especial Extra 2000. Ediciones de Horticultura S.L. Barcelona, España. 86 - 104 p.

NUEZ, F. 1995. El Cultivo del Tomate. Ediciones Mundi-Prensa. Bilbao, España. 767 p.

SAS INSTITUTE Inc. 1996. User's guide version 6.12. SAS Institute Inc, Cary, NC, USA. 512 p.

SOLER J.; ARROYO, J. 1998. "Fertilización". En: Revista Vida Rural. Año V, número 71. Madrid, España. 29 – 48 p.

Anexo 3. Control fitosanitario realizado en el ciclo de cultivo

Fecha	Etapa fenológica	Problema	Producto	Dosis
22/06/02	Plántula	Mosca blanca	Confidor	0.5 g/l
22/06/02	Plántula	Cortador	Cebo Lannate	350 g/ha
28/06/02	Plántula	Mal del talluelo	Tricoderma	2.5 g/l
02/07/02	Crecimiento vegetativo	Mosca blanca	Vertimec	1 ml/l
08/07/02	Crecimiento vegetativo	Ácaros	Vertimec	1 ml/l
16/07/02	Crecimiento vegetativo	Spodoptera	Dipel	1.5 g/l
18/07/02	Crecimiento vegetativo	Fitoplasma	Terramicina	4 g/l
23/07/02	Floración	Mosca blanca	Confidor	1 g/l
23/07/02	Floración	Fitoplasma	Terramicina	2 g/l
29/07/02	Floración	Fitoplasma	Terramicina	2 g/l
02/08/02	Floración	Fitoplasma	Terramicina	4 g/l
06/08/02	Fructificación	Mildew polvoso	Azufre	8 g/l
07/08/02	Fructificación	Fitoplasma	Terramicina	4 g/l
08/08/02	Fructificación	Mosca blanca	Talstar	1 ml/l
10/08/02	Fructificación	Mosca blanca	Neem	5 ml/l
15/08/02	Fructificación	Mosca blanca	Vydate	4 ml/l
20/08/02	Fructificación	Mosca blanca	Verticillum	2.5 g/l
22/08/02	Fructificación	Mosca blanca	Neem	4 ml/l
27/08/02	Fructificación	Mosca blanca	Verticillum	2.5 g/l
07/09/02	Cosecha	Mosca blanca	Neem	4 ml/l
07/09/02	Cosecha	Mildew polvoso	Azufre	8 g/l
12/09/02	Cosecha	Mosca blanca	Vertimec	1 ml/l
18/09/02	Cosecha	Mosca blanca	Neem	4 ml/l
18/09/02	Cosecha	Spodoptera	Xentari	1.5 g/l
20/09/02	Cosecha	Mosca blanca	Neem	4 ml/l
20/09/02	Cosecha	Spodoptera	Xentari	1.5 g/l
25/09/02	Cosecha	Mosca blanca	Talstar	1 ml/l
27/09/02	Cosecha	Mosca blanca	Neem	4 ml/l
30/09/02	Cosecha	Mosca blanca	Talcord	2 ml/l
30/09/02	Cosecha	Mildew polvoso	Azufre	8 g/l

Anexo 6. Programa SAS

```

DATA NUTOMATE;
INPUT REP SUST$ FERT$ PCOM PNOC NUCOM NUNOC PAF MMM MM M G GG ALTPLA DIAPLA FLORA;
PTOT = PCOM + PNOC;
NTOT= NUCOM + NUNOC;
PPRCO=(PCOM*1000000)/NUCOM;
PPRNO=(PNOC*1000000)/NUNOC;
PPRTO=(PTOT*1000000)/NTOT;
DATALINES;
1 2 PLAN 108.0 3.2 820504 29529 0.49 1.4 6.4 34.9 51.6 13.8 74 12 31
1 2 EXTR 103.0 1.6 798411 20762 0.06 1.4 6.3 37.3 52.0 6.0 72 14 30
1 2 SOLU 102.8 1.7 841269 54116 0.00 2.8 8.3 34.6 34.6 11.8 80 14 32
1 2 ZECI 82.5 0.7 666636 9932 0.00 1.3 5.4 37.0 34.8 4.0 78 13 28
1 S PLAN 72.1 3.5 580458 41538 0.62 2.3 7.8 27.8 31.5 2.8 67 12 31
1 S EXTR 89.7 0.7 764326 6690 0.08 1.3 7.8 41.2 37.3 2.1 64 10 32
1 S SOLU 87.08 2.9 679911 37795 0.23 1.7 5.4 33.0 42.4 4.6 77 13 31
1 S ZECI 46.6 2.0 469810 16557 1.24 3.1 6.5 21.1 15.0 0.8 67 12 30
2 2 PLAN 94.5 3.5 721544 32728 1.11 1.6 7.3 34.6 42.7 8.4 72 13 29
2 2 EXTR 95.9 1.8 742513 12534 0.21 1.3 5.5 35.2 48.4 5.5 82 13 29
2 2 SOLU 108.4 2.3 909027 22491 0.00 1.4 8.0 45.1 45.1 5.8 85 14 28
2 2 ZECI 97.7 1.4 736543 10617 0.48 1.3 6.3 41.3 36.8 2.1 79 14 27
2 S PLAN 88.0 1.6 669978 16078 0.65 1.7 7.6 29.8 43.3 5.5 74 12 30
2 S EXTR 90.4 1.1 772451 34547 0.05 2.4 10.4 39.0 37.6 1.1 67 12 30
2 S SOLU 105.1 1.9 822247 15995 0.00 1.2 7.5 43.9 46.9 5.6 76 12 30
2 S ZECI 47.4 1.2 473974 19279 0.27 2.7 7.4 23.6 13.0 0.8 66 11 29
3 2 PLAN 108.0 1.0 807555 9304 0.00 0.8 5.7 38.3 54.9 8.2 84 14 29
3 2 EXTR 113.7 1.9 890055 16507 0.17 2.2 7.2 40.8 55.6 7.9 80 13 29
3 2 SOLU 113.5 1.1 936480 9593 0.00 1.3 8.2 46.3 46.3 5.3 84 14 29
3 2 ZECI 106.5 3.2 801124 26294 0.27 1.4 6.0 38.3 49.8 11.0 79 12 31
3 S PLAN 48.8 0.9 438170 7922 0.33 1.2 9.3 22.4 15.5 0.5 66 12 30
3 S EXTR 62.7 1.4 522033 13223 0.40 1.1 5.9 26.0 27.8 1.8 72 12 31
3 S SOLU 82.7 0.9 662431 8254 0.08 0.6 5.1 35.6 38.3 3.1 75 13 29
3 S ZECI 44.3 2.4 409720 43834 0.62 2.3 4.3 17.8 18.3 1.5 67 12 31
4 2 PLAN 126.1 2.0 952143 20683 0.00 1.3 6.8 44.9 62.7 10.3 84 14 29
4 2 EXTR 96.2 2.5 729578 39122 0.24 1.9 5.3 30.4 48.9 9.7 86 14 29
4 2 SOLU 107.8 0.7 862969 6814 0.00 0.8 5.5 39.9 39.9 6.3 88 15 29
4 2 ZECI 91.8 4.6 673978 27130 2.63 1.3 5.1 33.2 43.9 8.2 81 14 29
4 S PLAN 64.3 1.0 536667 10148 0.21 1.2 7.1 29.1 26.0 0.9 66 11 31
4 S EXTR 68.5 0.9 555571 10812 0.12 1.5 6.6 23.8 33.3 3.3 66 11 31
4 S SOLU 90.8 1.2 692267 20362 0.08 0.7 5.1 32.7 46.0 6.2 75 12 32
4 S ZECI 48.7 2.0 432943 24374 0.36 2.7 4.1 19.1 21.4 1.4 63 10 33
;
PROC GLM DATA= NUTOMATE;
CLASS REP SUST FERT;
MODEL PCOM PNOC NUCOM NUNOC PAF MMM MM M G GG ALTPLA DIAPLA FLORA PTOT NTOT PPRCO PPRNO
PPRTO= REP SUST FERT REP*SUST SUST*FERT/SS3;
RANDOM REP REP*SUST/TEST;
LSMEANS SUST*FERT/STDERR PDIF;
MEANS SUST/SNK ETYPE=3 E=REP*SUST;
MEANS FERT/SNK;
RUN;

```

```

DATA NUTOMATE;
INPUT REP SUST$ FERT$ COST INGR UTIL;
BECO = (UTIL/COST);
DATALINES;
1  D  SOLU  242959  305420  62461
2  D  SOLU  244477  321871  77394
3  D  SOLU  245871  336980  91108
4  D  SOLU  244308  320040  75731
1  S  SOLU  235601  258630  23029
2  S  SOLU  240544  312202  71658
3  S  SOLU  234404  245662  11258
4  S  SOLU  236623  269704  33082
1  D  EXTR  226594  305934  79341
2  D  EXTR  224657  284944  60287
3  D  EXTR  229529  337747  108217
4  D  EXTR  224740  285844  61104
1  S  EXTR  219905  266403  46498
2  S  EXTR  220104  268555  48452
3  S  EXTR  212499  186149  -26350
4  S  EXTR  214098  203479  -10619
1  D  PROG  215543  320766  105223
2  D  PROG  211841  280645  68804
3  D  PROG  215555  320897  105342
4  D  PROG  220504  374520  154016
1  S  PROG  202676  214283  11607
2  S  PROG  207010  261243  54233
3  S  PROG  196268  144838  -51429
4  S  PROG  200522  190941  -9582
1  D  ZECI  189746  244955  55209
2  D  ZECI  191188  260581  69393
3  D  ZECI  196335  316359  120024
4  D  ZECI  192298  272612  80314
1  S  ZECI  176873  138407  -38466
2  S  ZECI  177093  140793  -36300
3  S  ZECI  176232  131463  -44769
4  S  ZECI  177437  144520  -32917
;
PROC GLM DATA = NUTOMATE;
CLASS REP SUST FERT;
MODEL COST INGR UTIL BECO = REP SUST FERT REP*SUST SUST*FERT/SS3;
RANDOM REP REP*SUST/TEST;
LSMEANS SUST*FERT/STDERR PDIFF;
MEANS SUST/SNK ETYPE=3 E=REP*SUST;
MEANS FERT/SNK;
RUN;

```

Anexo 7. Resultado del análisis de varianza para las variables agroeconómicas

Fuente de variación	PCOM	PNOC	PTOT	NUCOM	NUNOC	NTOT	ALTPLA	DIAPLA	FLORA
Modelo	< 0.01*	0.71	< 0.01*	< 0.01*	0.99	< 0.01*	< 0.01*	< 0.01*	0.04*
Bloques	0.55	0.87	0.54	0.37	0.58	0.32	0.09	0.91	0.03*
Sustratos	< 0.01*	0.21	< 0.01*	< 0.01*	0.81	< 0.01*	< 0.01*	< 0.01*	< 0.01*
Fertilización	< 0.01*	0.45	< 0.01*	< 0.01*	0.98	< 0.01*	< 0.01*	0.02*	0.91
Bloques * sustrato	< 0.01*	0.44	< 0.01*	< 0.01*	0.90	< 0.01*	0.02*	0.03*	0.23
Sustrato * fertilización	< 0.01*	0.68	< 0.01*	0.10	0.80	0.13	0.37	0.73	0.71
R ²	0.92	0.35	0.92	0.90	0.18	0.90	0.90	0.83	0.64
CV (%)	9.68	56.23	9.56	9.02	70.26	8.79	4.10	5.48	3.57

* Significativo a $P \leq 0.05$

Resultado del análisis de varianza para las variables agronómicas.

Fuente de variación	MMM	MM	M	G	GG	PPRCO	PPRNO	PPRTO	PAF
Modelo	0.01*	0.01*	< 0.01*	< 0.01*	< 0.01*	< 0.01*	0.39	< 0.01*	0.45
Bloques	0.10	0.02*	0.20	0.78	0.55	0.22	0.54	0.14	0.86
Sustratos	0.13	0.43	< 0.01*	< 0.01*	< 0.01*	< 0.01*	0.13	< 0.01*	0.91
Fertilización	0.04*	0.03*	< 0.01*	< 0.01*	0.12	< 0.01*	0.73	< 0.01*	0.07
Bloques * sustrato	0.48	0.26	0.09	0.02*	0.25	0.83	0.15	0.64	0.28
Sustrato * fertilización	< 0.01*	0.01*	0.03*	< 0.01*	0.19	< 0.01*	0.43	< 0.01*	0.93
R ²	0.70	0.70	0.81	0.88	0.76	0.86	0.45	0.88	0.43
CV (%)	29.02	15.40	13.29	14.73	44.49	3.70	30.47	3.55	149.52

* Significativo a $P \leq 0.05$

Anexo 9. Resultado del análisis de varianza para las variables económicas

Fuente de variación	COST	INGR	UTIL	BECO
Modelo	< 0.01*	< 0.01*	< 0.01*	< 0.01*
Bloque	0.71	0.71	0.71	0.68
Sustrato	< 0.01*	< 0.01*	< 0.01*	< 0.01*
Fertilización	< 0.01*	< 0.01*	0.02*	0.04*
Repetición * sustrato	< 0.01*	< 0.01*	< 0.01*	< 0.01*
Sustrato * fertilización	< 0.01*	< 0.01*	< 0.01*	< 0.01*
R ²	0.99	0.92	0.90	0.91
CV (%)	1.04	9.35	49.29	51.6

* Significativo a $P \leq 0.05$

Anexo 10. Presupuestos parciales por tratamiento

	Tratamiento							
	S-2	S-S	E-2	E-S	P-2	P-S	Z-2	Z-S
Rendimiento medio (Kg/ha)	108,125	91,420	102,000	77,825	109,150	68,300	94,625	46,750
Rendimiento ajustado (Kg/ha)	97,313	82,278	91,800	70,043	98,235	61,470	85,163	42,075
Beneficios brutos campo (Lps/ha)	318,871	269,606	300,808	229,513	321,894	201,423	279,058	137,870
Costo fertilizante (Lps/ha)	49,748	49,748	33,336	33,336	20,917	20,917	2,115	2,115
Costo sustrato (Lps/ha)	22,757	19,717	22,757	19,717	22,757	19,717	22,757	19,717
Total costos que varían (Lps/ha)	72,506	69,465	56,093	53,052	43,674	40,633	24,872	21,832
Beneficios netos (Lps/ha)	246,365	200,141	244,715	176,461	278,220	160,790	254,186	116,038

Presupuestos parciales por tratamiento, escenario pesimista (metodología CIMMYT)

	Tratamiento							
	S-2	S-S	E-2	E-S	P-2	P-S	Z-2	Z-S
Rendimiento medio (Kg/ha)	108,125	91,420	102,000	77,825	109,150	68,300	94,625	46,750
Rendimiento ajustado (Kg/ha)	86,500	73,136	81,600	62,260	87,320	54,640	75,700	37,400
Beneficios brutos campo (Lps/ha)	188,291	159,200	177,625	135,526	190,076	118,939	164,782	81,411
Costo fertilizante (Lps/ha)	49,748	49,748	33,336	33,336	20,917	20,917	2,115	2,115
Costo sustrato (Lps/ha)	22,757	19,717	22,757	19,717	22,757	19,717	22,757	19,717
Total costos que varían (Lps/ha)	72,506	69,465	56,093	53,052	43,674	40,633	24,872	21,832
Beneficios netos (Lps/ha)	115,785	89,735	121,532	82,473	146,402	78,306	139,909	59,579

Presupuestos parciales por tratamiento, escenario pesimista (metodología CIMMYT)

	Tratamiento							
	S-2	S-S	E-2	E-S	P-2	P-S	Z-2	Z-S
Rendimiento medio (Kg/ha)	108,125	91,420	102,000	77,825	109,150	68,300	94,625	46,750
Rendimiento ajustado (Kg/ha)	102,719	86,849	96,900	73,934	103,693	64,885	89,894	44,413
Beneficio bruto campo (Lps/ha)	1,127,520	953,322	1,063,649	811,554	1,138,209	712,228	986,743	487,506
Costo fertilizante (Lps/ha)	49,748	49,748	33,336	33,336	20,917	20,917	2,115	2,115
Costo sustrato (Lps/ha)	22,757	19,717	22,757	19,717	22,757	19,717	22,757	19,717
Total costos que varían (Lps/ha)	72,506	69,465	56,093	53,052	43,674	40,633	24,872	21,832
Beneficios netos (Lps/ha)	1,055,015	883,857	1,007,556	758,502	1,094,535	671,595	961,871	465,674

