



# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DEPARTAMENTO DE FITOTECNIA  
INSTITUTO DE HORTICULTURA  
POSGRADO EN HORTICULTURA

EXTRACCIÓN NUTRIMENTAL DE JITOMATE (*Solanum lycopersicum* L.) EN DIFERENTES MEZCLAS DE SUSTRATOS

TESIS  
COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS  
EN HORTICULTURA

PRESENTA:  
JUAN MANUEL VARGAS CANALES

DIRECTORA:  
DRA. ANA MARÍA CASTILLO GONZÁLEZ

Chapingo, México, Mayo de 2012



DIRECCION GENERAL ACADEMICA  
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES  
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES



**EXTRACCIÓN NUTRIMENTAL DE  
JITOMATE (*Solanum lycopersicum* L.) EN DIFERENTES MEZCLAS  
DE SUSTRATOS**

Tesis realizada por **Juan Manuel Vargas Canales** bajo la dirección del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA**

**Director:**



Dra. Ana María Castillo González

**Asesor:**



Dr. Joel Pineda Pineda

**Asesor:**



Dr. Edilberto Avitia García

**Asesor:**



Dr. José Armando Ramírez Arias

Chapingo, México, Mayo de 2012

## ÍNDICE

ÍNDICE DE CUADROS .....	1
ÍNDICE DE FIGURAS .....	2
RESUMEN .....	4
SUMMARY .....	5
I. INTRODUCCIÓN .....	6
II. OBJETIVOS .....	7
2. 1. Objetivo general .....	7
2. 2. Objetivos particulares .....	7
III. REVISIÓN DE LITERATURA.....	8
3. 1. Análisis de crecimiento .....	8
3. 1. 1. Índice de área foliar (IAF) .....	8
3. 1. 2. Tasa absoluta de crecimiento (TAC) .....	9
3. 1. 3. Tasa relativa de crecimiento (TRC) .....	9
3. 1. 4. Tasa de asimilación neta (TAN).....	9
3. 1. 5. Tasa de crecimiento de cultivo (TCC).....	10
3. 2. Nutrición vegetal .....	10
3. 3. Requerimientos nutrimentales de los cultivos .....	12
3. 4. Contenido de agua y nutrimentos en el tejido vegetal.....	12
3. 5. Composición elemental de los diferentes órganos de la planta .....	13
3. 6. Balance de nutrimentos .....	14
3. 7. Niveles de suministro .....	14
3. 8. Elementos minerales esenciales .....	15
3. 8. 1. Carbono, hidrógeno y oxígeno.....	16
3. 8. 2. Nitrógeno .....	17
3. 8. 3. Fósforo .....	18
3. 8. 4. Potasio .....	20
3. 8. 5. Calcio .....	21
3. 8. 6. Magnesio .....	22
3. 9. Análisis de tejido.....	23
3. 10. Curvas de absorción o extracción de nutrimentos .....	23
3. 11. Características físicas y químicas de los sustratos .....	26
IV. MATERIALES Y MÉTODOS.....	28

4. 1. Localización .....	28
4. 2. Sistema de producción .....	28
4. 3. Características de las mezclas de sustratos utilizados y tratamientos.....	28
4. 4. Solución nutritiva .....	29
4. 5. Unidad y diseño experimental .....	31
4. 6. Frecuencia de muestreo y tamaño de muestra .....	31
4. 7. Variables de eficiencia fisiológica .....	31
4. 7. 1. Índice de área foliar (IAF) .....	31
4. 7. 2. Tasa absoluta de crecimiento (TAC) .....	32
4. 7. 3. Tasa relativa de crecimiento (TRC) .....	32
4. 7. 4. Tasa de asimilación neta (TAN).....	32
4. 7. 5. Tasa de crecimiento del cultivo (TCC).....	33
4. 8. Determinación de nutrimentos.....	33
4. 9. Análisis de datos .....	33
V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	34
5. 1. Acumulación de materia seca .....	34
5. 2. Tasas de crecimiento del cultivo .....	35
5. 2. 1. Índice de área foliar (IAF) .....	35
5. 2. 2. Tasa absoluta de crecimiento (TAC) .....	37
5. 2. 3. Tasa relativa de crecimiento (TRC) .....	38
5. 2. 4. Tasa de asimilación neta (TAN).....	40
5. 2. 5. Tasa de crecimiento de cultivo (TCC).....	41
5. 3. Dinámica de extracción de los nutrimentos .....	42
5. 3. 1. Nitrógeno .....	44
5. 3. 2. Fósforo .....	44
5. 3. 3. Potasio .....	45
5. 3. 4. Calcio .....	46
5. 3. 5. Magnesio .....	47
5. 4. Análisis de rendimiento .....	47
5. 5. Sustratos .....	54
VI. CONCLUSIONES .....	57
VII. LITERATURA CONSULTADA .....	58

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Características físicas de las mezclas utilizadas en la producción de jitomate.....	29
Cuadro 2. Solución nutritiva de macronutrientes utilizada durante los primeros 60 días en el ciclo de cultivo de jitomate desarrollado en mezclas de tezontle con aserrín nuevo y reciclado. ....	30
Cuadro 3. Rangos normales de concentración de macronutrientes en materia seca de jitomate.....	43
Cuadro 4. Comparación de medias del contenido de macronutrientes en jitomate desarrollado en mezclas de tezontle con aserrín nuevo y reciclado.....	43
Cuadro 5. Comparación de medias de biomasa total y rendimiento de frutos. ....	53

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Acumulación de materia seca en jitomate desarrollado en mezclas de tezontle con aserrín nuevo y reciclado. T1: tezontle, T2: tezontle y aserrín reciclado (20:80, v/v), T3: tezontle y aserrín reciclado (30:70, v/v), T4: tezontle y aserrín nuevo (20:80, v/v) y T5: tezontle y aserrín nuevo (30:70, v/v).....	34
<b>Figura 2.</b> Distribución relativa de la materia seca total por órgano en jitomate desarrollado en mezclas de tezontle con aserrín nuevo y reciclado. T1: tezontle, T2: tezontle y aserrín reciclado (20:80, v/v), T3: tezontle y aserrín reciclado (30:70, v/v), T4: tezontle y aserrín nuevo (20:80, v/v) y T5: tezontle y aserrín nuevo (30:70, v/v). .....	35
<b>Figura 3.</b> Índice de área foliar (IAF) en jitomate desarrollado en mezclas de tezontle con aserrín nuevo y reciclado. T1: tezontle, T2: tezontle y aserrín reciclado (20:80, v/v), T3: tezontle y aserrín reciclado (30:70, v/v), T4: tezontle y aserrín nuevo (20:80, v/v) y T5: tezontle y aserrín nuevo (30:70, v/v).....	36
<b>Figura 4.</b> Tasa absoluta de crecimiento (TAC) en jitomate desarrollado en mezclas de tezontle con aserrín nuevo y reciclado. T1: tezontle, T2: tezontle y aserrín reciclado (20:80, v/v), T3: tezontle y aserrín reciclado (30:70, v/v), T4: tezontle y aserrín nuevo (20:80, v/v) y T5: tezontle y aserrín nuevo (30:70, v/v).....	38
<b>Figura 5.</b> Tasa relativa de crecimiento (TRC) en jitomate desarrollado en mezclas de tezontle con aserrín nuevo y reciclado. T1: tezontle, T2: tezontle y aserrín reciclado (20:80, v/v), T3: tezontle y aserrín reciclado (30:70, v/v), T4: tezontle y aserrín nuevo (20:80, v/v) y T5: tezontle y aserrín nuevo (30:70, v/v).....	39
<b>Figura 6.</b> Tasa de asimilación neta (TAN) en jitomate desarrollado en mezclas de tezontle con aserrín nuevo y reciclado. T1: tezontle, T2: tezontle y aserrín reciclado (20:80, v/v), T3: tezontle y aserrín reciclado (30:70, v/v), T4: tezontle y aserrín nuevo (20:80, v/v) y T5: tezontle y aserrín nuevo (30:70, v/v).....	40
<b>Figura 7.</b> Tasa de crecimiento de cultivo (TCC) en jitomate desarrollado en mezclas de tezontle con aserrín nuevo y reciclado. T1: tezontle, T2: tezontle y aserrín reciclado (20:80, v/v), T3: tezontle y aserrín reciclado (30:70, v/v), T4: tezontle y aserrín nuevo (20:80, v/v) y T5: tezontle y aserrín nuevo (30:70, v/v).....	42
<b>Figura 8.</b> Extracción total y porcentajes de incremento de N en jitomate desarrollado en mezclas de tezontle con aserrín nuevo y reciclado. T1: tezontle, T2: tezontle y	

aserrín reciclado (20:80, v/v), T3: tezontle y aserrín reciclado (30:70, v/v), T4: tezontle y aserrín nuevo (20:80, v/v) y T5: tezontle y aserrín nuevo (30:70, v/v). ....48

**Figura 9.** Extracción total y porcentajes de incremento de P en jitomate desarrollado en mezclas de tezontle con aserrín nuevo y reciclado. T1: tezontle, T2: tezontle y aserrín reciclado (20:80, v/v), T3: tezontle y aserrín reciclado (30:70, v/v), T4: tezontle y aserrín nuevo (20:80, v/v) y T5: tezontle y aserrín nuevo (30:70, v/v). ....49

**Figura 10.** Extracción total y porcentajes de incremento de K en jitomate desarrollado en mezclas de tezontle con aserrín nuevo y reciclado. T1: tezontle, T2: tezontle y aserrín reciclado (20:80, v/v), T3: tezontle y aserrín reciclado (30:70, v/v), T4: tezontle y aserrín nuevo (20:80, v/v) y T5: tezontle y aserrín nuevo (30:70, v/v). .....50

**Figura 11.** Extracción total y porcentajes de incremento de Ca en jitomate desarrollado en mezclas de tezontle con aserrín nuevo y reciclado. T1: tezontle, T2: tezontle y aserrín reciclado (20:80, v/v), T3: tezontle y aserrín reciclado (30:70, v/v), T4: tezontle y aserrín nuevo (20:80, v/v) y T5: tezontle y aserrín nuevo (30:70, v/v). .....51

**Figura 12.** Extracción total y porcentajes de incremento de Mg en jitomate desarrollado en mezclas de tezontle con aserrín nuevo y reciclado. T1: tezontle, T2: tezontle y aserrín reciclado (20:80, v/v), T3: tezontle y aserrín reciclado (30:70, v/v), T4: tezontle y aserrín nuevo (20:80, v/v) y T5: tezontle y aserrín nuevo (30:70, v/v). .....52

## RESUMEN

Los sistemas de producción en condiciones de invernadero e hidroponía permiten realizar una fertilización diaria, en función del ciclo del cultivo, del sustrato y del agua de riego. Actualmente se está utilizando el aserrín de pino como sustrato de forma exitosa en la producción de cultivos en estas condiciones, esta fue la razón por la cual se evaluó el efecto de mezclas de tezontle con aserrín nuevo y reciclado en la producción y extracción nutrimental de jitomate. Se utilizó un diseño experimental completamente al azar en donde se establecieron cinco tratamientos, T1: tezontle, T2: tezontle y aserrín reciclado (20:80, v/v), T3: tezontle y aserrín reciclado (30:70, v/v), T4: tezontle y aserrín nuevo (20:80, v/v) y T5: tezontle y aserrín nuevo (30:70, v/v). Las tasas máximas de extracción de nutrimentos se dieron entre los 60 y los 136 DDT, la dinámica de las curvas de extracción nutrimental presentó una tendencia similar en todos los tratamientos y la extracción en orden decreciente fue:  $K > N > Ca > P > Mg$ . Los resultados indican que la mejor mezcla de sustrato en relación al rendimiento del cultivo, índices de eficiencia fisiológica y eficiencias en la absorción de nutrimentos fue el tratamiento formado por la mezcla de tezontle y aserrín reciclado (30:70, v/v). Esto demuestra que el reciclaje del sustrato es una alternativa viable y con el manejo adecuado se pueden obtener mejores rendimientos.

**PALABRAS CALAVE ADICIONALES:** índices de eficiencia fisiológica, aserrín, tezontle, nutrición.

## SUMMARY

A greenhouse production system with hydroponics allows a daily fertilization of vegetable crops, depending on its life cycle, substrate and available water. The current use of pine sawdust as a substrate in crop production in these types of conditions is the trend and this was the reason to evaluate the effect of mixtures of volcanic rock with recycled and new sawdust into the production and nutrient extraction from tomato. A completely randomized design was used with five different treatments, T1: Red Gravel Stone, T2: Volcanic Rock and Recycled Sawdust (20:80, v / v), T3: Volcanic Rock and Recycled Sawdust (30:70, v / v), T4: New Volcanic Rock and Sawdust (20:80, v / v) and T5: Red Gravel Stone and Sawdust again (30:70, v / v). The maximum rates of nutrient uptake occurred from 60 to 136 days after transplanting, the dynamics of nutrient extraction curves showed a similar trend in all treatments and extraction in a decreasing order: K> N> Ca> P> Mg . The results indicate that the best substrate mixture in relation to the crop yield rates in absorption and physiological efficiency of nutrients was formed by treating the mixture of Volcanic Rock and recycled sawdust (30:70, v / v). This indicates that recycling of the substrate is a viable and appropriate management may provide higher yields.

**Additional Key Words:** Physiological efficiency index, Saw dust, Volcanic rock, Nutrition

## I. INTRODUCCIÓN

Actualmente en México se están extendiendo rápidamente los sistemas de producción de hortalizas en condiciones de invernadero e hidroponía, estos sistemas de producción nos permiten realizar una fertilización diaria, en función del ciclo del cultivo, del sustrato y del agua de riego. Este sistema permite el reciclaje de la solución nutritiva, ajustar la composición nutrimental, conductividad eléctrica y pH; en algunos casos también permite la incorporación de sustancias para evitar enfermedades radiculares. El suministro inadecuado de nutrientes a través de la solución nutritiva, puede dar lugar a un desbalance nutrimental en el ambiente de la raíz con efectos perjudiciales sobre la producción y la calidad debido a la deficiencia de minerales, toxicidad o salinidad.

La aplicación de nutrientes en la agricultura ha contribuido a un enorme incremento de la producción de alimentos; sin embargo, en ciertas zonas de los países desarrollados el uso excesivo de fertilizantes ha generado graves problemas de contaminación. Por ello es una prioridad mantener el equilibrio entre los nutrientes aportados al suelo o sustrato y las extracciones de los mismos por el cultivo, de forma que se minimicen las pérdidas al ambiente, ya sea disminuyendo la fertilización y/o utilizando cultivares más eficientes.

El aserrín es un subproducto de la industria aserradora y se ha utilizado como sustrato de cultivo durante los últimos 25 años, esto debido a que con un buen manejo puede competir con otros sustratos que además han limitado su disponibilidad. Sin embargo, los subproductos de la madera requieren de un proceso de compostaje o de maduración (envejecimiento) previamente a su uso como sustrato hortícola. Este proceso tiene como objetivo eliminar los posibles compuestos fitotóxicos y reducir el consumo de nitrógeno durante el cultivo o bien se puede mezclar con otros materiales y ser utilizados frescos en mezclas.

El objetivo actual de alcanzar y mantener una agricultura sustentable se basa especialmente en un conocimiento más amplio de estos sistemas; de ahí la importancia del uso de diagnósticos de nutrición, curvas de absorción, programas de nutrición que permitan el reciclaje de la solución nutritiva y la utilización de sustratos con características similares a los subproductos de la madera en los cultivos hidropónicos, que permitan reducir el uso de agroquímicos y optimizar el uso de nutrientes y agua.

## **II. OBJETIVOS**

### **2. 1. Objetivo general**

Describir la dinámica de absorción de nutrimentos en jitomate cultivado en hidroponía con diferentes mezclas de sustratos.

### **2. 2. Objetivos particulares**

- Conocer la distribución de biomasa y nutrimentos en la planta.
- Estimar los diferentes índices de eficiencia de la planta.
- Elaborar las curvas de extracción de macronutrimentos (N, P, K, Ca y Mg).
- Identificar la mejor mezcla de sustratos en relación al rendimiento del cultivo.

### III. REVISIÓN DE LITERATURA

#### **3. 1. Análisis de crecimiento**

Los eventos que ocurren desde el inicio hasta el final del proceso de crecimiento pueden tener marcada influencia sobre el rendimiento en materia seca. Una aproximación del análisis de los factores que influyen en el rendimiento y desarrollo vegetal es la acumulación de fotoasimilados a través del tiempo, lo que se denomina análisis de crecimiento (Gardner *et al.*, 1990).

El análisis de crecimiento evalúa cuantitativamente el crecimiento de las plantas e involucra técnicas de comparación que permiten estudiar los patrones de crecimiento vegetal (Hunt, 1978), puede efectuarse mediante dos métodos: a) método clásico, el cual evalúa el crecimiento con base en datos que provienen de muestras con un alto número de repeticiones, pero a intervalos prolongados; en este método no se realiza el ajuste de datos mediante modelos matemáticos, aunque pueden analizarse estadísticamente, b) método funcional, donde el crecimiento es evaluado con base en datos con pocas repeticiones pero a intervalos cortos, sobre todo cuando existe mucha variación en la información; los cuales pueden ser utilizados para ajuste de modelos (Hunt, 1982). El análisis de crecimiento con el enfoque funcional, utiliza datos a partir de muestras colectadas periódicamente y se ha utilizado con éxito en plantas anuales, bianuales y perennes (Brand y Weetman, 1987).

Para el análisis cuantitativo de factores que condicionan la producción se utilizan los índices fotosintéticos, para los cuales se requiere mediciones básicas de peso seco total de la planta, peso seco de los diferentes órganos de importancia económica y área foliar de la planta (Gardner *et al.*, 1990).

##### **3. 1. 1. Índice de área foliar (IAF)**

El área foliar por planta es una medida inapropiada del follaje de todo un cultivo, ya que no toma en cuenta el espaciamiento entre plantas, por lo cual se introdujo el concepto de índice de área foliar (IAF), definido como el área foliar por unidad de área de suelo ( $m^2 \cdot m^{-2}$ ) (Hunt, 1978).

La composición del dosel, en términos del número, tamaño y edad de las hojas individuales, posiblemente afecta la relación que existe entre el IAF y la radiación total interceptada y, consecuentemente, la producción y productividad de las especies cultivadas (Mora, 1998).

### **3. 1. 2. Tasa absoluta de crecimiento (TAC)**

La tasa absoluta de crecimiento está en función de la cantidad de material en crecimiento presente y de la tasa de crecimiento *per se*, motivo por el cual, en el principio del desarrollo existe un periodo en el que esta función del crecimiento es cada vez mayor, posteriormente se mantiene casi constante y luego comienza a disminuir; de tal forma que al final se vuelve negativa porque la muerte de las hojas es superior al crecimiento nuevo (Milthorpe y Mooeby, 1982; citados por Mora, 1998).

### **3. 1. 3. Tasa relativa de crecimiento (TRC)**

El crecimiento ya efectuado contribuye al nuevo, por lo que el índice apropiado a utilizar es la tasa relativa de crecimiento, que representa el incremento en peso seco por unidad de peso seco presente por unidad de tiempo  $g \cdot g^{-1} \cdot d^{-1}$  (Hunt, 1978).

### **3. 1. 4. Tasa de asimilación neta (TAN)**

La tasa de asimilación neta se refiere al aumento en peso seco por unidad de área foliar por unidad de tiempo, expresada en  $g \cdot m^{-2} \cdot día^{-1}$  (Hunt, 1982) y es una medida indirecta de la fotosíntesis.

El incremento de la biomasa en cualquier intervalo de tiempo es la integral del producto de la asimilación neta y el área foliar, por lo que tal incremento puede ser completamente descrito en función de los cambios de esos dos atributos; la TAN, que mide la intensidad de la asimilación de carbono, y el área foliar que es una medida del tamaño del sistema de asimilación (Mora, 1998).

### **3. 1. 5. Tasa de crecimiento de cultivo (TCC)**

La tasa de crecimiento del cultivo es simple, pero importante índice de productividad en agricultura, que significa la tasa de producción de biomasa por unidad área de suelo en un periodo determinado y se expresa en  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$ ; este parámetro se origina del producto de la eficiencia de las hojas (TAN) por el índice de área foliar del cultivo (IAF) y los valores que alcanza dependen de la magnitud relativa de sus componentes (Hunt, 1978).

### **3. 2. Nutrición vegetal**

La planta requiere de varios factores para su crecimiento como luz,  $\text{CO}_2$ , agua y minerales. Aumentando la concentración de cualquiera de estos factores del rango de deficiencia, se dan aumentos en la tasa de crecimiento y rendimiento; aunque la respuesta disminuye a través del aumento.

Esta relación fue formulada matemáticamente para elementos minerales por Mitscherlich como la *ley de disminución del incremento en rendimiento* (citado por Marschner, 2003). De acuerdo con esta formulación, las curvas de respuesta al incremento en rendimiento por un elemento mineral en particular son asintóticas; esto es, cuando el suministro de un nutrimento aumenta (o factor de crecimiento), otro nutrimento mineral (o factor de crecimiento) o el potencial genético de la planta se vuelve un factor limitante; esto puede ser causado por numerosos factores como, toxicidades de algún nutrimento mineral o inducir deficiencia de otro nutrimento mineral (antagonismo) (Marschner, 2003).

Se entiende por nutrición vegetal al proceso mediante el cual la planta absorbe del medio que le rodea las sustancias que le son necesarias para llevar a cabo su metabolismo y en consecuencia, crecer y desarrollarse. Las plantas tienen una capacidad limitada para absorber únicamente el nivel de elementos minerales para su crecimiento; por lo tanto, se puede llegar hasta la toxicidad. Los elementos nutritivos pueden clasificarse atendiendo a diferentes criterios; el más frecuente es aquel que responde a la cantidad utilizada por la planta y la frecuencia con que es necesaria su aportación al cultivo (Domínguez, 1989; Marschner, 2003).

El suministro y absorción de compuestos químicos necesarios para el crecimiento y metabolismo es definido como nutrición y los compuestos químicos requeridos por un organismo se denominan nutrimentos. Los mecanismos por los cuales los nutrimentos son convertidos a material celular o utilizados para propósitos energéticos, son los procesos metabólicos. El término metabolismo involucra diversas reacciones presentes en la célula. Por lo tanto, la nutrición y el metabolismo están estrechamente interrelacionados (Mengel y Kirkby, 2001).

Algunos nutrimentos pueden tener más de un papel específico en el crecimiento de la planta. Por ejemplo muchos iones diferentes al K, son importantes para mantener los potenciales osmóticos dentro de las plantas y para el mantenimiento de la electroneutralidad.

Un nutrimento puede tener varias funciones en la planta. Los síntomas característicos de deficiencias de un nutrimento en particular son aquellos en los que una función tiene un mayor requerimiento del nutrimento que otras funciones. Por ejemplo, la deficiencia de Zn altera el metabolismo de las auxinas, lo que ocasiona el acortamiento de entrenudos del tallo y hojas pequeñas (Salazar, 2002).

La fertilización de las diferentes especies de plantas cultivadas presentan diversos problemas, ya que las necesidades nutrimentales varían de acuerdo al estado fisiológico, la etapa fenológica, la variedad, época y forma de proporcionar los diferentes nutrimentos requeridos, aun tratándose de la misma especie (Tirado, 1977).

En general se absorben cantidades relativamente elevadas de un nutrimento, durante las primeras etapas de desarrollo vegetativo. Durante el desarrollo de los órganos de reserva (semilla, raíz y tubérculo) sus exigencias nutritivas son satisfechas; en parte, por la continua absorción de nutrimentos, y en parte, por la translocación desde los tallos y hojas (Wild y Jones, 1992).

### **3. 3. Requerimientos nutrimentales de los cultivos**

La demanda de un nutrimento por un cultivo está determinada por la producción de biomasa y la concentración de este en la planta, a la cual se le llama requerimiento interno (Greenwood, 1983).

El requerimiento interno es independiente del rendimiento potencial que se alcanza en distintas condiciones de suelo y clima, siempre que no existan limitaciones de manejo. La producción de biomasa se puede estimar en la práctica, a partir de la producción de la porción de interés económico (grano, biomasa aérea, fruto, aceite esencial) y del índice de cosecha, dado por la relación entre el producto de interés y la biomasa producida; de esta manera la extracción del nutrimento por el cultivo estará determinada fundamentalmente por la producción de biomasa (Etchevers *et al.*, 1991; Rodríguez, 1989).

El crecimiento y desarrollo de los cultivos generan una demanda de nutrimentos necesaria para satisfacer los requerimientos de sus procesos metabólicos. Es evidente que una mayor producción aumenta la demanda de los cultivos (Rodríguez *et al.*, 2001).

### **3. 4. Contenido de agua y nutrimentos en el tejido vegetal**

En las plantas superiores la mayor parte del material vegetal está constituido por agua, la cual alcanza valores entre 80 y 95 %. El agua se encuentra contenida en diferentes proporciones dentro de la planta, dependiendo de la actividad metabólica de cada una de sus partes. Cuando el tejido vegetal fresco es secado a 70 °C por 48 h, la materia seca obtenida representa alrededor de 10 a 20 % del peso fresco inicial. La materia seca de los cultivos agrícolas está compuesta principalmente por carbono, oxígeno e hidrógeno, elementos organogénicos, los cuales constituyen alrededor de 90 a 98 % del total y se encuentran combinados principalmente en los carbohidratos, lípidos y proteínas. La composición mineral representa entre 2 y 10 % (Alcántar y Trejo, 2007).

### **3. 5. Composición elemental de los diferentes órganos de la planta**

El contenido de diferentes elementos está influenciado por el tipo de planta, edad, época, fertilización, suelo en el que se establece, sitios donde se adapta, entre otros; por lo que el contenido de nutrimentos en la planta está relacionado con varios factores. A pesar de esto, es posible establecer al menos grandes intervalos de concentración en los que los elementos se presentan en los vegetales (Beauchamp, 1981).

La composición química típica de la materia seca de una hoja puede ser: 60 % carbohidratos, 25 % proteínas, 5 % lípidos y 10 % minerales. Del total de N de la hoja de una planta C<sub>3</sub>, solo el 23 % está asociado a los cloroplastos, 19 % es invertido en la captura de luz, 26 % en fijación de CO<sub>2</sub>, 23 % en procesos biosintéticos y energéticos y sólo 7 % es nitrógeno estructural (Gutiérrez, 1996).

Los nutrimentos transportados por la corriente de transpiración se acumulan en sitios específicos dentro de las hojas (no en los estomas) y son probablemente reciclados en el floema. El xilema se convierte en un sistema osmótico (Gutiérrez, 1996).

Las hojas representan el consumidor mayor de los nutrimentos extraídos por los cultivos y el reciclaje de estos minerales durante la reproducción es muy reducido en algunos casos. Una proporción importante de los minerales permanece en los tejidos vegetativos y deben ser incorporados al suelo (Gutiérrez, 1996).

El tallo constituye un importante órgano de reserva (particularmente en especies perennes) de agua, minerales y compuestos orgánicos; movilizables durante periodos de estrés (déficit hídrico, defoliación, podas) (Gutiérrez, 1996).

Al igual que el tallo, las raíces constituyen un importante órgano para el almacenamiento de agua, minerales y carbohidratos (Gutiérrez, 1996).

### **3. 6. Balance de nutrimentos**

El balance de los nutrimentos es importante en la nutrición de las plantas (Anónimo, 1995). Concentraciones elevadas de un nutrimento en la solución puede, también, deprimir la absorción de otros; es decir, se da un antagonismo iónico (Wild y Jones, 1992).

El objetivo de los programas de fertilización es complementar la capacidad de los suelos para suministrar los nutrimentos, que de otro modo existirían en cantidades deficientes para permitir el crecimiento sano y normal de las plantas (Anónimo, 1995).

No es fácil reconocer el balance nutrimental dentro de la planta para una mejor producción, excepto cuando el contenido de un mineral esencial es tan bajo que limita el crecimiento. Cuando el nitrógeno es deficiente, no hay sustituto para este elemento, como se puede observar en las plantas que crecen en hidroponía, las que eligen absorber el nitrógeno cuando otros elementos están disponibles en cantidades suficientes. Por esto, la relación de nutrimentos varía extensamente sin afectar el rendimiento (Bennet, 1994).

Navarro y Navarro (2000) mencionan que los nutrimentos en forma iónica pueden ejercer unos sobre otros, acciones que conducen a reducir o aumentar su absorción por la planta, mediante mecanismos no totalmente establecidos, de naturaleza físico-química, química o biológica. Estas interacciones se conocen respectivamente como antagonismos y sinergismos.

### **3. 7. Niveles de suministro**

El nivel de suministro óptimo se encuentra entre la deficiencia y el exceso (Finck, 1988). Aunque esto puede resultar bastante obvio, tanto la carencia como la abundancia de uno o más elementos, puede causar problemas en el metabolismo. Con frecuencia es posible observar una serie de síntomas cuando ocurre uno u otro problema; sin embargo, existen niveles en los cuales la deficiencia y el exceso no son tan evidentes, pero sí tienen un marcado efecto sobre el rendimiento; para el

caso de las deficiencias estos niveles se conocen como “hambre oculta” (Anónimo, 1992) y para el caso de los excesos “consumo de lujo”.

Para la determinación de las deficiencias y en ocasiones de los excesos, se puede recurrir a varios métodos, entre los que se encuentran: el análisis de suelo, el análisis de tejidos vegetales y el diagnóstico visual (Rodríguez, 1989; Finck, 1988).

Cuando se realizan análisis de tejidos vegetales, se deben de tener en cuenta que los distintos órganos presentan en forma diferencial la concentración de los minerales esenciales. El uso de los análisis de tejido en relación con el estado nutricional, se basa en que las plantas sanas y vigorosas y los contenidos de los nutrimentos en diversos tejidos suelen ser constantes (Franco, 1995).

Los estudios de extracción de nutrimentos que se efectúan en un cultivo, no constituyen una herramienta de diagnóstico como lo es el análisis foliar; sino más bien, constituyen una forma cuantitativa para dar solidez a los programas de fertilización recomendados, pues constantemente permiten conocer la cantidad de un nutrimento que es absorbida por un cultivo para producir un rendimiento dado en un tiempo definido (Bertsch, 2009).

### **3. 8. Elementos minerales esenciales**

De los 90 elementos naturales que se conocen, solamente 60 de ellos han sido encontrados en diversas plantas; no obstante, muchos de ellos no se consideran esenciales para su crecimiento, y su existencia probablemente se debe a que las raíces de las plantas absorben en su entorno algunos elementos que existen en forma soluble. Las plantas tienen la habilidad de poder seleccionar la cantidad de diversos iones que absorben, no siendo normalmente esta absorción directamente proporcional a la cantidad de nutrimentos que existen en el suelo; es más, según las especies, puede variar esta habilidad de seleccionar cada uno de los iones en particular (Resh, 1992).

Los nutrimentos esenciales requeridos por las plantas superiores son exclusivamente de naturaleza inorgánica. En 1939 Arnon y Stout establecieron los tres criterios de esencialidad (Beauchamp, 1981):

1. La falta del elemento en cuestión da como resultado un crecimiento anormal, interrupción por completo del ciclo de vida, o muerte prematura de la planta.
2. El elemento debe de ser específico y no puede ser remplazado por ningún otro.
3. El elemento debe de ejercer un efecto directo en el crecimiento o metabolismo y su efecto no debe ser indirecto como por algún antagonismo o por la presencia de otros elementos en un nivel tóxico.

Sólo 17 elementos están considerados como esenciales para el crecimiento de la mayoría de las plantas, que generalmente son absorbidos del ambiente, suelo o del medio nutritivo por las raíces. A pesar de que estos elementos solo se encuentran en concentraciones de 20 a 10 % del peso de las plantas, no dejan por ello de ejercer una influencia vital sobre el crecimiento (Alcántar y Trejo, 2007).

Los elementos esenciales para la mayoría de las plantas superiores son: el carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O), nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), azufre (S), cloro (Cl), hierro (Fe), cloro (Cl), manganeso (Mn), boro (B), molibdeno (Mn), cobre (Cu) y níquel (Ni) (Salisbury y Ross, 1994).

### **3. 8. 1. Carbono, hidrógeno y oxígeno**

Carbono, hidrógeno y oxígeno, son los elementos que se encuentran en todos los compuestos orgánicos de la planta. Los carbohidratos ( $\text{CH}_2\text{O}$ ) constituyen la estructura básica o esqueleto de las plantas y son la fuente de energía metabólica, dentro de ellos se incluyen numerosos ácidos orgánicos (precursores de aminoácidos), azúcares simples y complejos, polímeros de azúcares, como almidón, celulosa y hemicelulosa. En peso aproximadamente el 45, 43 y 6 % de una planta está compuesta de C, O y H, respectivamente. Por ello, más de 90 % del peso seco o rendimiento del cultivo se deriva del aire y del agua (Alcántar y Trejo, 2007).

Estos tres elementos mayores se combinan en las plantas verdes en el proceso llamado fotosíntesis, la conversión de energía lumínica a la energía química. Para que la fotosíntesis se lleve a cabo (Benton, 1998):

- La planta debe estar totalmente turgente (no debe haber estrés hídrico).
- Los estomas deben estar abiertos, para el intercambio gaseoso, para que el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) pueda entrar en las hojas de la planta rápidamente.
- La superficie de la hoja debe exponerse para absorber la luz del sol.
- La planta debe estar bien nutrida.

### 3. 8. 2. Nitrógeno

Después del agua, el nitrógeno es el nutrimento mas importante para el desarrollo de la planta, dada su abundancia en las principales biomoléculas de la materia viva (Azcón y Talón, 2008); es el nutrimento económicamente mas importante, por la frecuencia con que se encuentra como limitante en los cultivos en México (Alcántar y Trejo, 2007).

El nitrógeno es de extraordinaria importancia en las plantas, ya que es constituyente de proteínas, ácidos nucleicos, aminoácidos, enzimas, coenzimas, amidas, fosfolípidos, bases púricas, algunas vitaminas y la clorofila, principalmente; aunque también es constituyente de una multitud de compuestos llamados alcaloides, que no son metabolitos esenciales y se cree que sirven como compuestos que almacenan nitrógeno (N). El N es un elemento mineral primario, absorbido por las plantas en forma de iones nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) o amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) y es el nutrimento más limitante en la producción de la mayoría de los cultivos. Es esencial en la división y expansión celular; por lo tanto, en el crecimiento (Anónimo, 1995; Jones *et al.*, 1991; Miller, 1981).

Las concentraciones más altas de N se encuentran en las hojas más jóvenes. En general, el N-total de la planta normalmente disminuye con la edad de esta; aunque el N inorgánico puede acumularse en las plantas, principalmente en tallos y tejidos conductores, en forma de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>; el N orgánico predomina como proteína de alto peso molecular en las plantas y aproximadamente 75 % se encuentra en los cloroplastos

de las células foliares (Jones *et al.*, 1991; Jones, 2003; Marschner, 2003; Mengel y Kirkby, 2001).

El nitrógeno orgánico generalmente constituye de 1.5 a 5 % de la materia seca de los vegetales, con valores de suficiencia de 2.5 a 3.5 en tejidos de hoja (Mengel y Kirkby, 2001). A su vez, Thompson (1982) explica que la cantidad de nitrógeno absorbido por día es máximo cuando las plantas son jóvenes y declinan gradualmente con la edad.

La forma en que se transloca el nitrógeno absorbido por las raíces, depende de la fuente nitrogenada y del metabolismo radical. El  $\text{N-NO}_3^-$  y los aminoácidos son las principales formas en las que se transloca el N en el sistema vascular de las plantas. Cuando el suministro de N en el medio radical es inadecuado, el nitrógeno de las hojas más viejas se moviliza hacia los órganos más jóvenes de la planta; por lo que los síntomas de deficiencias primero se manifiestan en las hojas inferiores, en las cuales las proteínas se hidrolizan (proteólisis) y los aminoácidos resultantes se redistribuyen en las hojas jóvenes y ápices. La proteólisis colapsa a los cloroplastos, con lo cual disminuye el contenido de clorofila que conduce al amarillamiento de las hojas viejas (Mengel y Kirkby, 2001).

### **3. 8. 3. Fósforo**

El fósforo es parte de un gran número de sustancias orgánicas (nucleoproteínas, fosfoproteínas, fosfolípidos) y participa en diversas reacciones químicas (Miller, 1981). El fósforo existe en todas las células vivas. La planta lo utiliza para sintetizar ácidos nucleicos (ADN y ARN). Se utiliza también para almacenar y transferir energía a través de enlaces ricos en energía (ATP y ADP). El fósforo estimula el crecimiento temprano y la formación de raíz, acelera la maduración y promueve la producción de semillas (Anónimo, 1995).

El fósforo es absorbido por las plantas en forma de  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{HPO}_4^{=}$  o  $\text{PO}_4^{=}$ , dependiendo del pH del suelo. Los trabajos realizados por varios investigadores han demostrado que las plantas absorben una mayor cantidad de fósforo cuando se añade nitrógeno a los fertilizantes fosfatados. Un mayor crecimiento de raíz,

cambios fisiológicos que hacen que las células de la raíz sean más receptivas al fósforo, una mayor transferencia del fósforo de la raíz hacia el xilema y una disminución de pH del suelo debido al nitrógeno amoniacal, se ha sugerido como explicación de la mayor eficiencia de absorción de fósforo en presencia del nitrógeno (Anónimo, 1995).

La mayoría de los fosfatos presentes en las raíces, tallos y hojas están en forma inorgánica, siendo más alta la proporción de fósforo inorgánico respecto al total en hojas viejas; mientras que en hojas jóvenes hay mayor concentración de fósforo orgánico, en forma de ácidos nucleicos y fosfolípidos. Dicho nutriente interviene como factor de calidad de los frutos, ya que favorecen a todos los procesos relacionados con la fecundación, fructificación y maduración. Las hojas jóvenes son suministradas no solo por el fosfato tomado por las raíces, sino también del fosfato que se encuentra en las hojas viejas (Mengel y Kirkby, 2001).

El fósforo se acumula principalmente en los tejidos activos (síntesis, respiración), los meristemas (puntos de división celular), semillas y frutos (Miller, 1981). La concentración más alta de P se encuentra en las hojas nuevas y en los pecíolos (Jones, 2003).

La planta requiere de un mayor suministro de fósforo bajo las siguientes circunstancias: 1) crecimiento de las plantas en climas fríos, 2) crecimiento limitado de la raíz y 3) rápido crecimiento de la parte aérea (Anónimo, 1995).

Las plantas que sufren deficiencia de fósforo presentan retraso en el crecimiento, y la proporción de la materia seca de la parte aérea en relación a la raíz es baja, los síntomas de deficiencia se presentan en las hojas más viejas, en donde prevalece un color verde oscuro; también se pueden presentar una coloración púrpura rojiza en las hojas y tallos, producido por los pigmentos llamados antocianinas (Mengel y Kirkby, 2001).

### 3. 8. 4. Potasio

Las plantas contienen potasio en forma de sales inorgánicas. Por consiguiente, este elemento no forma parte de la estructura de ningún compuesto orgánico de la planta; además, interviene en la absorción de otros nutrimentos y el transporte de los mismos dentro de la planta. Es absorbido por las plantas en forma de iones de potasio ( $K^+$ ). No se sintetiza en compuestos, como ocurre con el nitrógeno y el fósforo; sino que tiende a permanecer en forma iónica en las células y tejidos. Es esencial en la translocación de los azúcares y la formación del almidón (Anónimo, 1995; Thompson, 1982).

Cuando el potasio entra en el sistema metabólico de las células, forma sales con los ácidos orgánicos del interior de las mismas, que sirven para regular el potencial osmótico celular, equilibrando así el contenido de agua interno; tiene función en la apertura y cierre de estomas; en los tejidos jóvenes el K es indispensable para obtener turgencia celular óptima, que se requiere para la expansión celular; está presente en forma soluble en las vacuolas de las células y en todos los tejidos, donde son más activas las divisiones celulares; participa en la fotosíntesis por aumentar directamente el crecimiento y el índice de área foliar; interviene además, fisiológicamente en los siguientes procesos: síntesis de azúcares y almidón, transporte de azúcares, síntesis de proteínas e interviene en la activación enzimática (Jones *et al.*, 1991; Mengel y Kirkby, 1982; Rodríguez, 1996).

La absorción de potasio presenta variaciones, tanto en el periodo de crecimiento, como durante el día. La máxima absorción de K se presenta durante la etapa de fructificación; mientras que la variación diurna presenta la máxima tasa de absorción de K, cuando se presenta la mitad del fotoperíodo (Le-Bot y Kirkby, 1992).

El potasio estimula el crecimiento de la raíz y mejora la resistencia de las plantas a las enfermedades. Se ha encontrado que el potasio es requerido con más frecuencia por los árboles frutales, como los ciruelos y hortalizas, cuya producción de carbohidratos es muy alta (Anónimo, 1995).

El  $K^+$  es muy móvil en la planta, principalmente en dirección de los tejidos meristemáticos a partir de los órganos viejos (Mengel y Kirkby, 2001). El potasio constituye de 1.0 a 5.0 % del peso seco de las hojas, donde las concentraciones más altas se encuentran en las hojas jóvenes, pecíolos y tallos de la planta (Jones, 2003).

### **3. 8. 5. Calcio**

El calcio es absorbido por las plantas en forma de ión calcio ( $Ca^{2+}$ ); dado que es un nutrimento estructural, forma parte esencial de todas las paredes y membranas y debe estar presente para la formación de nuevas células. Una vez que se deposita en los tejidos de las plantas, el calcio no es removido. En consecuencia, los tejidos jóvenes son los primeros en ser afectados cuando existen deficiencias de este nutrimento. La translocación dentro de la planta es por la savia del xilema (hacia arriba) con la corriente de la transpiración, que va a las hojas; participa en el almacenamiento de azúcares y mejora la firmeza de los frutos; en las hojas el flujo de Ca, disminuye después de la madurez de la hoja, aun cuando se mantenga una transpiración constante (Anónimo, 1995; Mengel y Kirkby, 2001).

La principal función del calcio es mantener la integridad celular y permeabilidad de membranas; pero también participa en la germinación del polen y el crecimiento del tubo polínico, en la síntesis de proteínas, movimiento de los carbohidratos y puede disminuir la presencia de elementos pesados en las plantas. Es importante en frutos y órganos de almacenamiento que acumulan grandes cantidades de azúcares del floema (Jones *et al.*, 1991; Jones 2003).

Está involucrado en el metabolismo o formación del núcleo y favorece la formación y el incremento de la proteína contenida en las mitocondrias. Es cofactor de muchas enzimas en la hidrólisis de ATP y fosfolípidos. Reduce y neutraliza el efecto de otras sales y contribuye a la neutralización de los ácidos orgánicos en los tejidos vegetales (Bidwell, 1990).

En el interior de la planta el Ca es un elemento poco móvil, actuando en la formación de pectatos de calcio de la laminilla media de las células. Igualmente,

actúa en la división mitótica de las células, en el crecimiento de los meristemos y en la absorción de nitratos. En la regulación de la absorción activa de los elementos y en la permeabilidad de las paredes celulares (Rodríguez, 1996).

En las plantas está presente en 0.2 a 5.9 % del peso seco en tejidos vegetales, pero las concentraciones más altas se encuentran en las hojas más viejas (Jones, 2003).

### **3. 8. 6. Magnesio**

Las plantas absorben el magnesio en forma de ión magnesio ( $Mg^{2+}$ ). La función más conocida del  $Mg^{2+}$ , es el papel que desempeña en la molécula de clorofila, que representa de 15 a 20 % del Mg total contenido en la planta. Por tanto, es esencial para el proceso de fotosíntesis.

El transporte de  $Mg^{2+}$  es principalmente en la corriente de transpiración; es muy móvil en el floema y puede translocarse de los tejidos viejos a los jóvenes o al ápice; en consecuencia, la sintomatología de deficiencia aparece a menudo en primer lugar en las hojas más bajas. Como los frutos y tejidos de almacenamiento son dependientes del floema para su suministro mineral, estos son más altos en K y Mg que en Ca (Anónimo, 1995; Bidwell, 1990; Mengel y Kirkby, 2001).

El magnesio funciona como activador (catalizador) de muchas enzimas, que se requieren para los procesos de crecimiento de las plantas (Mengel y Kirkby, 2001), por ejemplo participa en la activación de la ribulosa bifosfato carboxilasa que favorece la asimilación de  $CO_2$  y producción de azúcares y almidón; también tiene relación con la síntesis de proteínas (Mengel y Kirkby, 2001).

El Mg forma parte constituyente de los pectatos de magnesio en las semillas, tejidos meristematicos y frutos; también interviene en la síntesis de aceites vegetales (Rodríguez, 1996). El magnesio constituye 0.5 % del peso seco en el tejido vegetal y se puede encontrar formando de 0.15 a 1 % del peso seco del tejido en la hoja, el cual se puede incrementar con la edad (Gómez *et al.*, 2002; Navarro y Navarro, 2000; Jones, 2003; Rodríguez *et al.*, 2001).

### **3. 9. Análisis de tejido**

Utilizando los análisis de tejido y los de la solución nutritiva se puede comparar y relacionar la absorción de la planta, para de esta forma poder efectuar un balance de los diversos elementos minerales en la solución nutritiva de aporte. Es posible de esta forma controlar los cambios en las soluciones nutritivas, una vez que se conozca la relación exacta entre las fluctuaciones que pueden producirse en los elementos minerales a través del tiempo.

Una ventaja del análisis de tejido sobre el análisis del suelo es que el primero indica lo que ha sido o está siendo absorbido por la planta, mientras que el segundo muestra solamente la disponibilidad de elementos para la planta (Resh, 1992).

### **3. 10. Curvas de absorción o extracción de nutrimentos**

La demanda de nutrimentos por un cultivo está dada por su producción de biomasa y la concentración del nutrimento en la planta, la concentración mínima de un nutrimento en la planta, para alcanzar el rendimiento máximo posible en una condición dada (aunque varía entre las distintas partes de ella) es relativamente constante a la madurez fisiológica si se considera la biomasa aérea en su conjunto (Greenwood, 1983).

Se conocen numerosos experimentos de fertilización, en los que el rendimiento de los cultivos es muy dependiente del suministro de elementos minerales. La relación entre el rendimiento y el abastecimiento nutrimental puede ser descrito por una curva óptima, la cual depende del genotipo, abastecimiento mineral y de la disponibilidad de otros factores del crecimiento como el agua (Rengel, 1999).

La extracción nutrimental es la base para determinar la dosis del fertilizante y aumentar la eficiencia en el uso de nutrimentos. La eficiencia en el uso de nutrimentos se define como la proporción de todos los aportes de nutrimentos que se extraen en la cosecha (Cassman *et al.*, 2002). Si la cantidad de nutrimentos es alta, solo hay que fertilizar al nivel de las extracciones (tomando en cuenta las pérdidas y el grado de aprovechamiento). El grado de aprovechamiento de una

aportación de nutrimentos indica la fracción de fertilizantes absorbida (expresada en porcentaje de la cantidad de nutrimentos aportada) (Anónimo, 1999).

La curva de absorción de nutrimentos determina las cantidades extraídas por una planta, a través de su ciclo de vida. Con esta información es posible conocer las épocas de mayor absorción de cada nutrimento y definir un programa de fertilización adecuado para cada cultivo, en el que se considera la cantidad y tipo de fertilizante, como la época idónea para hacer las aplicaciones (Molina *et al.*, 1993).

Los programas de fertilización se basan en la demanda nutrimental de los cultivos de acuerdo con sus etapas fenológicas. Estas variables se determinan mediante muestras de biomasa total secuencial; es decir, se toman muestras de cultivo en una superficie determinada, que puede ser de un número definido de metros cuadrados. Estos muestreos se realizan teniendo especial precaución de que sean representativos de la etapa de desarrollo del cultivo. Las muestras se secan, se pesan y se muelen para su análisis en laboratorio. Mediante el conocimiento de la materia seca total y el análisis químico de muestras se obtienen las curvas de acumulación de nutrimentos (Anguiano y Lascares, 1998; Castellanos, 1998).

La absorción para cada uno de los nutrimentos en las plantas es diferente y esta no transcurre paralela a la curva de formación de material vegetal, puesto que los distintos nutrimentos son requeridos de acuerdo con sus funciones fisiológicas en forma integral, pero también diferencial en los diferentes estadios del crecimiento. Como regla general, se observa que la cantidad de nutrimentos en la planta aumenta continuamente con el transcurso del tiempo, a excepción de pequeñas pérdidas que pueden presentarse al final del periodo de crecimiento. Así mismo, la concentración nutrimental en los diferentes órganos es diferencial, dependiendo de la actividad metabólica. Los datos de extracción son la cantidad de elementos que se extraen del suelo o que se acumulan en las plantas, esta cantidad se da por ciclo o por año (Anguiano y Lascares, 1998).

Los estudios de absorción contabilizan de una forma u otra el consumo de nutrimentos de un cultivo para completar su ciclo de producción (Bertsch, 2009).

Una curva de absorción es la representación gráfica de la extracción de un nutrimento y representa las cantidades de este elemento extraídas por la planta durante su ciclo de vida (Bertsch, 2009).

Estas curvas permiten conocer la dinámica de absorción de los diferentes nutrimentos durante el ciclo de cultivo y su relación con el crecimiento. Con estas gráficas es fácil comparar las distintas tendencias de absorción total y la absorción de nutrimentos en cada órgano, esta información es valiosa para diseñar estrategias de manejo de nutrición del cultivo y dentro de estas encontramos las siguientes (Bertsch, 2009):

1. Curvas de crecimiento. Para poder realizar las curvas de absorción es necesario generar las curvas de crecimiento del cultivo, en términos de peso seco. Esta información permite establecer las principales etapas fenológicas, la participación de cada órgano en ellas y la relación con la dinámica de absorción.
2. Curvas de absorción para determinar épocas de máxima absorción. Cuando se expresa en términos porcentuales la cantidad de nutrimentos absorbida por las plantas durante el ciclo de cultivo (utilizando el consumo máximo como 100 %) se puede observar claramente cuando ocurren los momentos máximos de absorción. Con esta información se puede determinar la época oportuna de entrega de nutrimento durante el ciclo de cultivo.
3. Curvas de absorción para evaluar el reciclaje de nutrimentos. Con las curvas de absorción de nutrimentos es posible detectar en cual tejido se acumula preferentemente un nutrimento y con esta información se puede determinar si este nutrimento saldrá del sistema con el producto cosechado o se perderá.
4. Curvas de absorción para evaluar la translocación de nutrimentos. Es posible identificar la conducta de translocación de un nutrimento cuando la curva de

acumulación de esta decrece en algún tejido se puede observar que continúa ascendiendo en otro.

5. Curvas de absorción para incrementar la eficiencia de fertilización con el tiempo. En cultivos de ciclo corto de fertilización intensiva, las curvas de absorción permiten hacer un ajuste muy preciso entre la aplicación y el consumo de nutrimentos.

### **3. 11. Características físicas y químicas de los sustratos**

Densidad aparente. Corresponde al peso seco del sustrato por unidad de volumen, incluyendo todos los espacios ocupados por aire y materiales orgánicos (Abad, 1993). Esta característica se utiliza para estimar la capacidad total de almacenaje del sustrato y su grado de compactación. Es conveniente un sustrato con baja densidad aparente, debido a que se maximiza el uso del medio de cultivo, minimizando los costos de transporte y manipulación de materiales (Ansorena, 1994; Calderón, 2005).

Porosidad. La porosidad de un sustrato consiste en el volumen total que no está siendo ocupado por partículas sólidas, minerales u orgánicas (Burés, 1997). La cantidad de agua y aire dentro de un sustrato dependen del espacio poroso del medio; sin embargo, no es suficiente que el sustrato posea una elevada porosidad total, sino que ésta se encuentre compartida entre macroporos, que se hallan ocupados por aire y microporos que alojan agua en su interior (Ansorena, 1994).

Aireación. El tipo de material utilizado como sustrato, el tamaño y continuidad de sus poros, la temperatura, profundidad, humedad y actividad microbiológica, son aspectos que deben ser considerados para comprender la dinámica de los gases dentro de un medio de cultivo, donde idealmente el intercambio gaseoso debe ser rápido. Además la utilización de contenedores de volumen reducido, produce cambios en la aireación y retención de agua, afectando el desarrollo de las plantas (Calderón, 2005).

Retención de agua. La cantidad total de agua retenida por un sustrato en un contenedor depende de la proporción de microporos y del volumen del contenedor, sin embargo, aunque la retención de agua sea elevada, puede ser adsorbida por las partículas del sustrato, por lo que no se encontrará disponible, esto dependerá del tamaño de los poros más pequeños y de la concentración de sales en la solución acuosa. Un sustrato adecuado corresponde a aquel que tiene 20 ó 30 % de agua fácilmente disponible (Ansorena, 1994).

Una baja retención de agua en un sustrato puede producirse por una baja porosidad total, alta proporción de macroporos o microporos, elevada concentración de sales en solución acuosa o una combinación de las situaciones anteriores (Abad, 1993; Ansorena, 1994).

Granulometría. La granulometría del sustrato debe ser mediana a gruesa, con tamaños de 0.25 a 2.6 mm, que produzcan poros de 30 a 300  $\mu\text{m}$ , permitiendo una buena aireación y retención de agua. También es importante que el tamaño de las partículas sea estable en el tiempo (Aguilar, 2002).

Estabilidad de la materia orgánica. La descomposición de la materia orgánica en el sustrato debe ser mínima, ya que puede producir una textura más fina y una baja aireación. Dentro del contenedor, el volumen del sustrato es pequeño para el crecimiento de las raíces y cualquier reducción significativa es perjudicial para el desarrollo normal de las plantas (Pastor, 2000).

pH. Corresponde a la medida de concentración de la acidez en la solución del sustrato y tiene la capacidad de controlar la disponibilidad de todos los nutrientes (Pastor, 2000).

El pH del sustrato depende de la especie que se esté cultivando, la mayoría de las especies crecen bien en pH ligeramente ácido entre 6.2 y 6.8. Con valores inferiores a 5 pueden aparecer deficiencias de N, K, Ca, Mg y B; con valores superiores a 6 se producen problemas en la disponibilidad de Fe, P, Zn, Mn y Cu (Abad, 1993).

Según Lara (2000) el pH óptimo para el desarrollo de la planta se encuentra entre 5.5 y 6.0.

## **IV. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **4. 1. Localización**

La investigación se realizó en un invernadero con cubierta de polietileno con una transmitancia de radiación solar de 90 %, con un diseño tipo sierra ubicado en el Campo Agrícola Experimental “San Ignacio” de la Universidad Autónoma Chapingo, geográficamente ubicado entre los 19° 20´ latitud norte y 98° 53´ longitud oeste, a 2240 msnm.

### **4. 2. Sistema de producción**

Se utilizó el híbrido de jitomate Rafaello de tipo saladette, la siembra se llevó a cabo el día 13 de abril de 2010, en charolas de poliestireno de 200 cavidades, que fueron desinfectadas con hipoclorito de sodio a 5 %, como sustrato se utilizó la marca comercial Kekkila previamente humedecido, se colocó una semilla por cavidad y se dio un riego de saturación, posteriormente se estibarón las charolas y se envolvieron en polietileno. La emergencia se obtuvo a los ocho días después de la siembra.

El trasplante se realizó 32 días después de la siembra, en bolsas con 15 L de la mezcla de sustrato correspondiente a cada tratamiento, se trasplantaron dos plantas en cada bolsa, con una densidad de 5 plantas·m<sup>-2</sup>.

Para la realización del experimento se estableció el cultivo en sistema hidropónico abierto, se acondicionaron dos camas de siembra arregladas en dos hileras. Se utilizó un sistema de riego localizado con dos goteros por bolsa, constituido por una línea central que se hizo pasar entre las hileras de bolsas y de cada emisor salían cuatro goteros con un gasto de cada gotero de un litro por hora.

### **4. 3. Características de las mezclas de sustratos utilizados y tratamientos**

Los tratamientos que se establecieron consistieron en diferentes mezclas y proporciones estableciéndose los siguientes: T1: tezontle, T2: tezontle y aserrín reciclado (20:80, v/v), T3: tezontle y aserrín reciclado (30:70, v/v), T4: tezontle y aserrín nuevo (20:80, v/v) y T5: tezontle y aserrín nuevo (30:70, v/v). Para todas las mezclas el tezontle utilizado fue nuevo con un tamaño de partícula <6 mm.

En el Cuadro 1 se presentan las características obtenidas en laboratorio de las mezclas de aserrín nuevo y reciclado de dos ciclo de cultivo de producción de jitomate, características de mayor importancia a considerar para la selección de un sustrato.

**Cuadro 1.** Características físicas de las mezclas utilizadas en la producción de jitomate.

<b>Relación T A</b>	<b>CA (%)</b>	<b>CRH (%)</b>	<b>EPT (%)</b>	<b>DA (g cm<sup>-3</sup>)</b>
Tezontle	5.8	37.8	46.6	1.2
30 70 R	5.1	68.4	73.5	0.5
20 80 R	7.7	70.7	78.3	0.3
30 70 N	12.0	59.9	47.9	0.2
20 80 N	10.8	60.5	49.7	0.1
Sustrato ideal <sup>z</sup>	10-12	55-70	70-85	1.0-1.5
Sustrato ideal <sup>y</sup>	20-30	20-30	> 85	0.5
Sustrato ideal <sup>x</sup>	10-20	16-55	50-95	0.09-1.5

<sup>z</sup> Cabrera, 1999; <sup>y</sup> Abad *et al.*, 2006; <sup>x</sup> Bunt, 1988.

A: aserrín, T: tezontle, R: reciclado, N: nuevo, CA: Capacidad de aireación, CRH: Capacidad de retención de humedad, EPT: Espacio poroso total, DA: Densidad aparente.

#### 4. 4. Solución nutritiva

El diseño de las soluciones nutritivas se realizó de acuerdo con los requerimientos medios del cultivo reportados por Urrestarazu (2006) y Nuez (1995), la primera (Cuadros 2) se aplicó durante los primeros 60 DDT y la segunda (Cuadros 3) hasta finalizar el experimento (136 DDT).

La solución nutritiva de micronutrientes utilizada durante todo el ciclo de cultivo fue la siguiente: Fe 3 mg·L<sup>-1</sup>, Mn 0.5 mg·L<sup>-1</sup>, Cu 0.1 mg·L<sup>-1</sup>, Zn 0.1 mg·L<sup>-1</sup> y B 0.1 mg·L<sup>-1</sup>

**Cuadro 2.** Solución nutritiva de macronutrientes utilizada durante los primeros 60 días en el ciclo de cultivo de jitomate desarrollado en mezclas de tezontle con aserrín nuevo y reciclado.

Fertilizante	Cationes (meq L <sup>-1</sup> )					Aniones (meq L <sup>-1</sup> )		
	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	H <sup>+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>
Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> 4H <sub>2</sub> O		6				6		
NH <sub>4</sub> H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>				0.5			0.5	
KNO <sub>3</sub>	4					4		
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1							1
Mg SO <sub>4</sub> 7H <sub>2</sub> O			3					3
H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>					0.5		0.5	
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>					1			1
∑ parcial cat-ani	5	6	3	0.5	1.5	10	1	5
∑ cat-ani	16					16		

meq: Miliequivalentes

**Cuadro 3.** Solución nutritiva de macronutrientes utilizada después de los 60 DDT en el ciclo de cultivo de jitomate desarrollado en mezclas de tezontle con aserrín nuevo y reciclado.

Fertilizante	Cationes (meq L <sup>-1</sup> )					Aniones (meq L <sup>-1</sup> )		
	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	H <sup>+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>
Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> 4H <sub>2</sub> O		8				8		
NH <sub>4</sub> H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>				1			1	
KNO <sub>3</sub>	4					4		
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2							2
Mg SO <sub>4</sub> 7H <sub>2</sub> O			4					4
H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>					0.5		0.5	
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>					1			1
∑ parcial cat-ani	6	8	4	1	1.5	12	1.5	7
∑ cat-ani	20.5					20.5		

meq: Miliequivalentes

#### **4. 5. Unidad y diseño experimental**

Se usó un diseño experimental completamente al azar con tres repeticiones, donde la unidad experimental y de muestreo fue una planta por maceta.

#### **4. 6. Frecuencia de muestreo y tamaño de muestra**

Se realizaron cinco muestreos destructivos con intervalos de 25 a 30 días. En cada muestreo se extrajeron tres plantas por tratamiento, tratando en cada uno de causar el menor daño. Después de extraerlas se colocaron en una bolsa de papel e inmediatamente se llevaron al Laboratorio de Nutrición Vegetal del Departamento de Suelos, en el cual se lavaron, se separaron en tallo, hojas y flores y frutos para determinar peso fresco (g); se colocaron en bolsas identificadas y se colocaron en la estufa de secado con aire circulante forzado a una temperatura promedio de 70 °C durante 72 horas o hasta obtener peso seco constante (g), se molieron por separado en un molino de acero inoxidable tipo Willey con malla de 1 mm, colocando la muestra en sobres etiquetados y sellados y posteriormente se determinó la concentración de nutrientes (N, P, K, Ca y Mg).

#### **4. 7. Variables de eficiencia fisiológica**

Con los datos promedio estimados para cada muestreo, mediante el análisis de crecimiento funcional (Mora *et al.*, 2005), la cantidad de biomasa y la magnitud del área foliar se calcularon los índices de eficiencia.

##### **4. 7. 1. Índice de área foliar (IAF)**

Este índice se calcula con la fórmula propuesta por Watson (1947, citado por Mora, 1998):

$$IAF = \frac{\textit{área foliar por planta}}{\textit{área de terreno ocupado por la planta}}$$

#### 4. 7. 2. Tasa absoluta de crecimiento (TAC)

Se calculó en  $\text{g} \cdot \text{día}^{-1}$  (Hunt, 1982)

$$TAC = \frac{W_2 - W_1}{t_2 - t_1}$$

Donde  $W_2$  y  $W_1$  representa el peso seco final e inicial en un intervalo de tiempo, y  $t_2$  y  $t_1$  son el tiempo final e inicial del mismo periodo.

#### 4. 7. 3. Tasa relativa de crecimiento (TRC)

Es un índice de crecimiento de la planta; una tasa de cambio en tamaño, es un incremento en biomasa por unidad de tiempo. Más comúnmente aplicado al peso total de materia seca o área total de área foliar por planta. Se calcula en  $\text{g} \cdot \text{día}^{-1}$  (Hunt, 1982).

Se calcula con la fórmula:

$$TRC = \frac{\text{Loge}W_2 - \text{Loge}W_1}{t_2 - t_1}$$

Donde  $\text{Loge} W_2$  y  $\text{Loge} W_1$  son el logaritmo natural del peso seco final e inicial, respectivamente, en un intervalo de tiempo, y  $t_2$  y  $t_1$  son tiempo final e inicial del mismo periodo.

#### 4. 7. 4. Tasa de asimilación neta (TAN)

Se calculo en  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{día}^{-2}$ , de acuerdo con la formula empleada por Williams (1946, Citado por Mora, 1998):

$$TAN = \left( \frac{W_2 - W_1}{L_2 - L_1} \right) \times \left( \frac{\text{Loge}W_2 - \text{Loge}W_1}{t_2 - t_1} \right)$$

Donde  $W_2$  y  $W_1$  es el peso seco de la planta entera al final y al inicio de un periodo determinado;  $L_1$  y  $L_2$  es el área foliar total al final y al inicio de los mismos periodos,  $\text{Loge}$  es el logaritmo natural, y  $t_2$  y  $t_1$  es el tiempo final e inicial del periodo dado.

#### **5. 7. 5. Tasa de crecimiento del cultivo (TCC)**

Se calcula, en  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-2}$  (Hunt, 1982).

$$TCC = \frac{W_2 - W_1}{t_2 - t_1} / S$$

Donde  $W_2$  y  $W_1$  representa el peso seco final e inicial en un intervalo de tiempo, y  $t_2$  y  $t_1$  son el tiempo final e inicial del mismo periodo, y  $S$  es el área de terreno ocupado por la planta.

#### **4. 8. Determinación de nutrimentos**

La determinación de nutrimentos se realizó en tallo, hojas, flores y frutos. Se usaron 0.5 g de materia seca, que se sometieron a una digestión húmeda con una mezcla de solución diácida (ácido sulfúrico y ácido perclórico en relación 4:1) y 2 ml de peróxido de hidrógeno a 30 %. Después de la digestión se aforó a 50 ml con agua desionizada. La determinación de la concentración de nitrógeno se hizo por el método de microkjeldahl (Chapman y Pratt, 1973). La concentración de P se determinó por el método de molibdovanadato amarillo (Chapman y Pratt, 1973) leyendo la absorbancia a 470 nm en un espectrofotómetro Thermo Spectronic modelo Genesys 10 UV. Las concentraciones de K, Ca y Mg se determinaron por espectrofotometría de absorción atómica, en un espectrofotómetro modelo SpectrAA 220 de Varian (Australia).

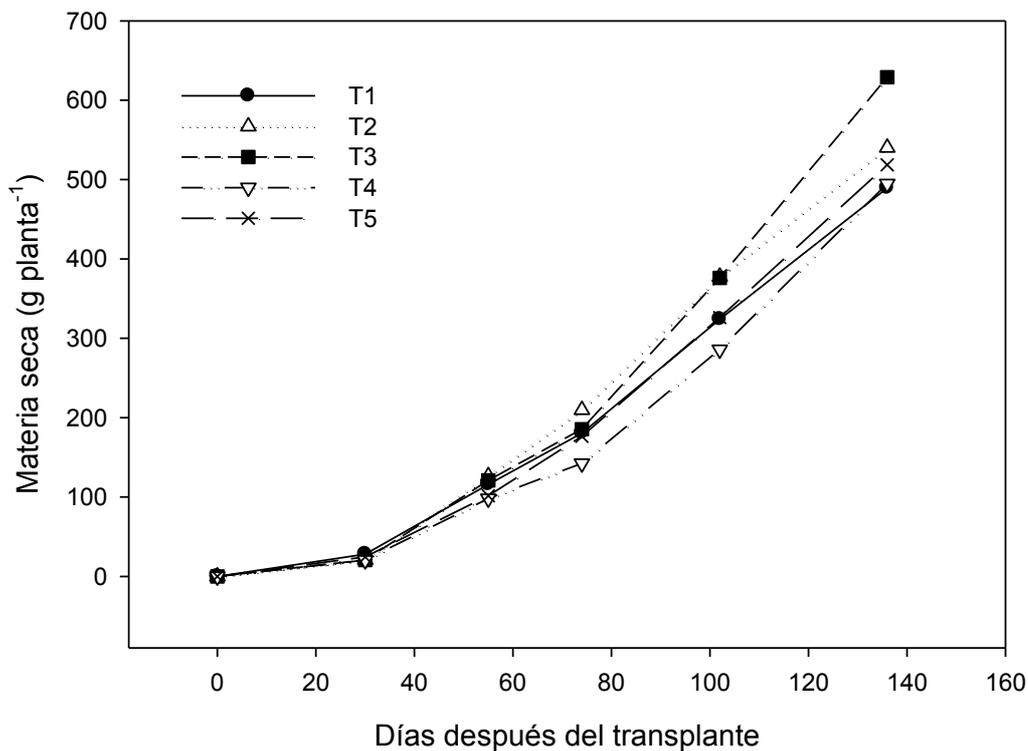
#### **4. 9. Análisis de datos**

Los gráficos se realizaron con el paquete computacional Microsoft Office Excel 2010 y SigmaPlot versión 10.0 y los análisis de comparación de medias de Tukey ( $P \leq 0.05$ ) con el paquete estadísticos SAS versión 9.1.3 (SAS Institute Inc. 2006).

## V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

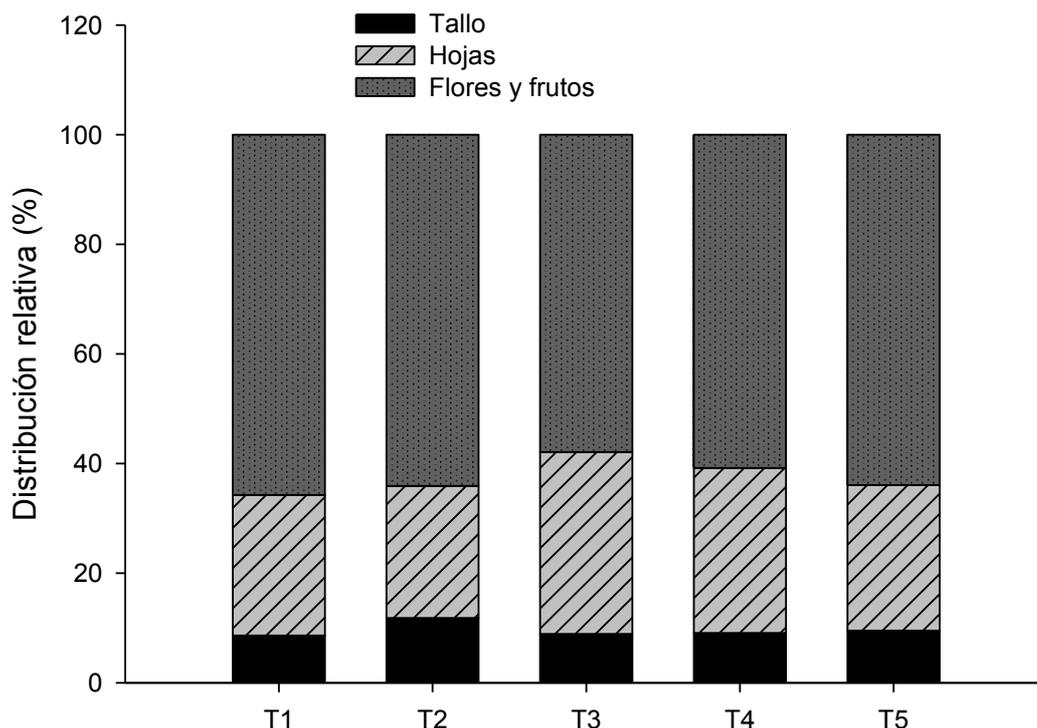
### 5. 1. Acumulación de materia seca

De acuerdo con la fenología del cultivo la acumulación y distribución de materia seca por órgano en los cinco tratamientos evaluados, presentaron una tendencia similar a lo largo del ciclo del cultivo (Figura 1), mostrando una mayor acumulación a partir de los 55 DDT coincidiendo con el desarrollo de los frutos. En términos generales la acumulación de materia seca describe el comportamiento típico de cualquier organismo u órgano y no hubo diferencia significativa entre tratamientos, lo que indica que el estado nutricional, las condiciones ambientales y el manejo fueron similares. En este caso no se presenta un comportamiento sigmoideal por tratarse de una variedad de crecimiento indeterminado.



**Figura 1.** Acumulación de materia seca en jitomate desarrollado en mezclas de tezontle con aserrín nuevo y reciclado. T1: tezontle, T2: tezontle y aserrín reciclado (20:80, v/v), T3: tezontle y aserrín reciclado (30:70, v/v), T4: tezontle y aserrín nuevo (20:80, v/v) y T5: tezontle y aserrín nuevo (30:70, v/v).

En la distribución de la materia seca por órgano a lo largo del ciclo de cultivo presenta hasta los 55 DDT mayor acumulación de materia seca el tallo y las hojas; posteriormente inicia una acumulación dominante en flores y frutos, que representa en todos los tratamientos mas de 60 %, 30 % para el caso de hoja y menos de 10 % para tallo (Figura 2).



**Figura 2.** Distribución relativa de la materia seca total por órgano en jitomate desarrollado en mezclas de tezontle con aserrín nuevo y reciclado. T1: tezontle, T2: tezontle y aserrín reciclado (20:80, v/v), T3: tezontle y aserrín reciclado (30:70, v/v), T4: tezontle y aserrín nuevo (20:80, v/v) y T5: tezontle y aserrín nuevo (30:70, v/v).

## 5. 2. Tasas de crecimiento del cultivo

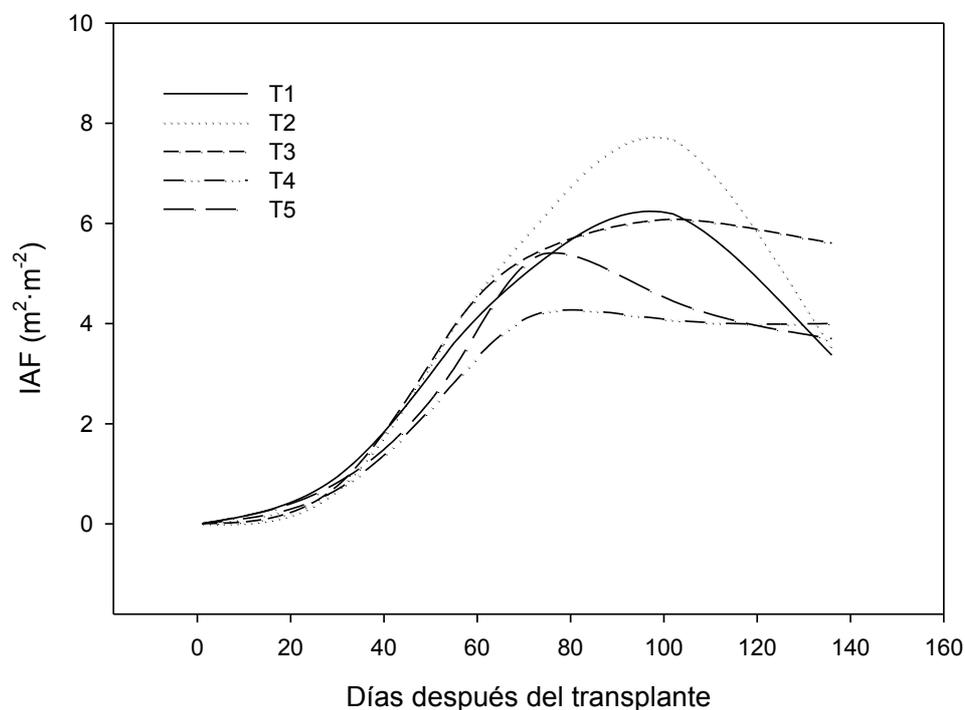
### 5. 2. 1. Índice de área foliar (IAF)

Durante el desarrollo de las plantas el comportamiento del índice de área foliar (IAF) fue similar en los cinco tratamientos (Figura 3). El IAF desde el transplante hasta los 40 DDT fue bajo, pero después aumento rápidamente hasta alcanzar los valores máximos a los 105 DDT e inicia una disminución gradualmente cuya velocidad dependió del tratamiento, que coincide con el inicio de la cosecha. Estos resultados

coinciden con los encontrados por Barraza *et al.* (2004) en jitomate, en donde el mayor valor de área foliar se presentó a los 105 DDT.

Este índice presentó un comportamiento sigmoideal. En otros trabajos que se han realizado con variedades de jitomate con crecimiento indeterminado se encontró que el IAF presentó un decremento temporal debido a podas que se realizaron en la parte inferior de la planta.

Los valores más altos de IAF se obtuvieron con el T2 (mezcla de tezontle y aserrín reciclado, 20:80, v/v), lo cual sugiere una mayor actividad fotosintética, lo que según Jarra *et al.* (1999), las plantas con mayor área foliar y ambiente favorable, son capaces de utilizar mejor la energía solar con una fotosíntesis más eficiente; situación que es favorable para un mayor rendimiento, manifestándose en una mayor tasa de traslocación de fotoasimilados hacia los puntos de demanda que son principalmente los frutos.



**Figura 3.** Índice de área foliar (IAF) en jitomate desarrollado en mezclas de tezontle con aserrín nuevo y reciclado. T1: tezontle, T2: tezontle y aserrín reciclado (20:80, v/v), T3: tezontle y aserrín reciclado (30:70, v/v), T4: tezontle y aserrín nuevo (20:80, v/v) y T5: tezontle y aserrín nuevo (30:70, v/v).

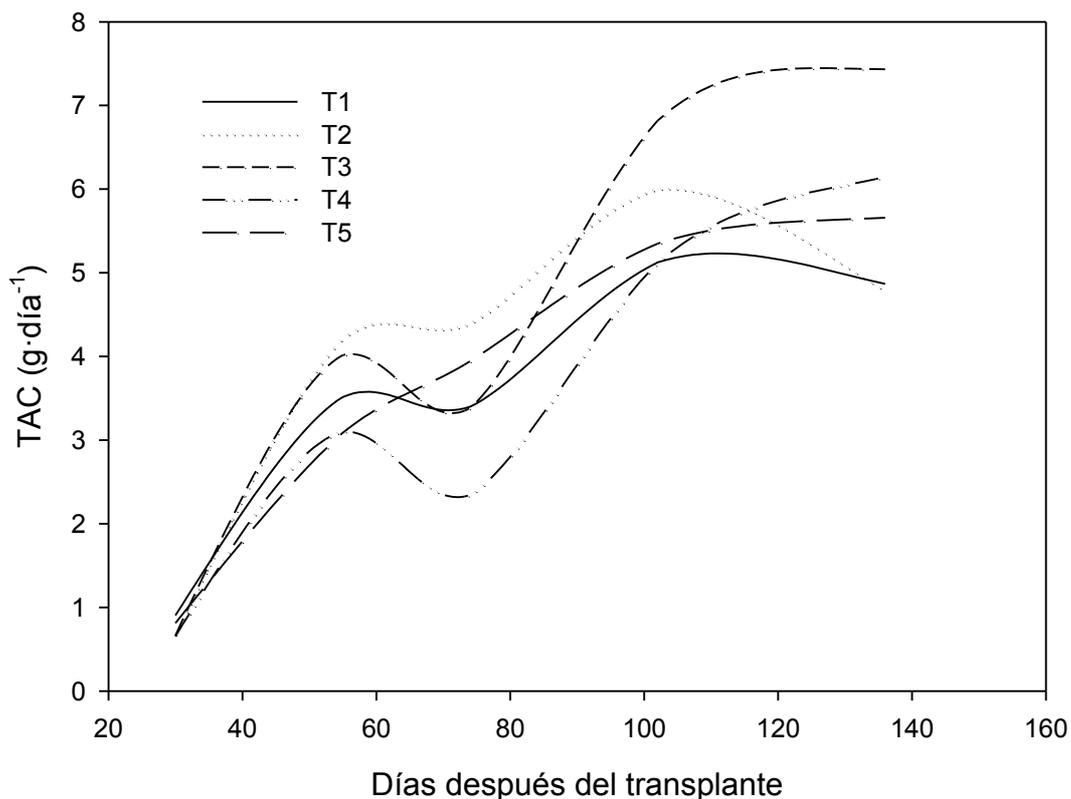
### **5. 2. 2. Tasa absoluta de crecimiento (TAC)**

La tasa absoluta de crecimiento (TAC) fue similar en los cinco tratamientos (Figura 4), presentando un desarrollo similar hasta los 60 DDT, debido a que en este periodo la planta se encuentra en establecimiento, ampliando su sistema radical (Jarma *et al.*, 2006).

A partir de los 60 DDT se observa un comportamiento diferencial de los tratamientos (Figura 4), obteniendo los valores más altos los tratamientos T2 (mezcla de tezontle y aserrín reciclado, 20:80, v/v) y T3 (mezcla de tezontle y aserrín reciclado, 30:70, v/v), sugiriendo un uso más eficiente de la radiación e incremento en la actividad metabólica, lo cual se tradujo en mayor producción de biomasa (Jarma, 2006); pero a los 60 DDT a los 80 DDT se presentó una disminución en su desarrollo. Y a partir de los 80 DDT y hasta los 105 DDT su tendencia fue aumentando debido al constante crecimiento que presentaron las plantas un hábito indeterminado, teniendo su máxima TAC.

A los 105 DDT comenzó a disminuir, cuya velocidad varió de acuerdo con cada tratamiento, de tal forma que al final se volvió negativo porque la muerte de las hojas es superior al crecimiento nuevo (Milthorpe y Mooeby, 1982; citados por Mora, 1998).

Trabajos realizados en pepino indican que en estados juveniles se invierte una gran cantidad de asimilados en las hojas para poder realizar y mantener una alta tasa de fotosíntesis, ya que en la época reproductiva la alta demanda de los frutos reduce el crecimiento de la parte vegetativa (Canizares *et al.*, 2004); sin embargo, la eficiencia en la acumulación de fotoasimilados en estados de crecimiento vegetativo es una condición particular de la especie y del ambiente donde se desarrollan.



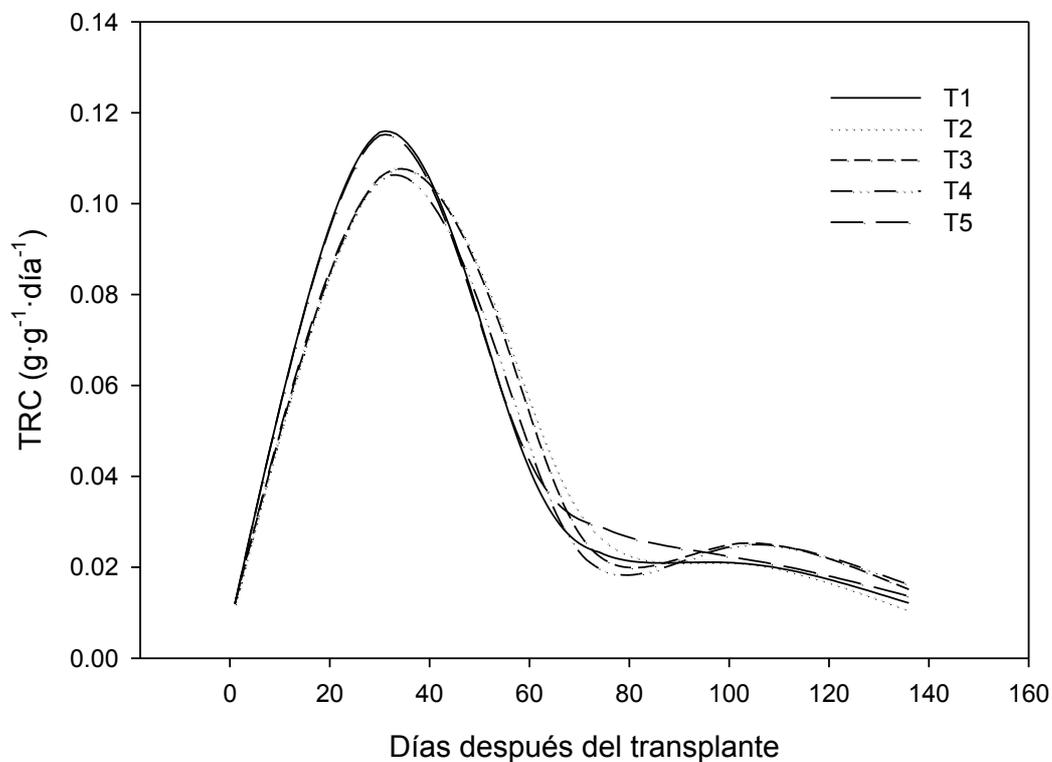
**Figura 4.** Tasa absoluta de crecimiento (TAC) en jitomate desarrollado en mezclas de tezontle con aserrín nuevo y reciclado. T1: tezontle, T2: tezontle y aserrín reciclado (20:80, v/v), T3: tezontle y aserrín reciclado (30:70, v/v), T4: tezontle y aserrín nuevo (20:80, v/v) y T5: tezontle y aserrín nuevo (30:70, v/v).

### 5. 2. 3. Tasa relativa de crecimiento (TRC)

La tasa relativa de crecimiento (TRC) presentó una tendencia similar en todos los tratamientos (Figura 5), iniciando con niveles muy bajos debido al estrés provocado por el trasplante. Los tratamientos presentaron la mayor TRC a los 30 DDT, periodo en donde se presenta una constante de desarrollo y después inicia un descenso. El comportamiento de la TRC durante el ciclo biológico de las plantas se debe principalmente a la diferente proporción de órganos en activo crecimiento que posee la planta durante su desarrollo; por lo que este índice representa la proporción de meristemos activos; es decir, los sitios en donde se lleva a cabo la división y expansión celular durante la etapa vegetativa, pero conforme avanza el desarrollo de la planta tiende a disminuir, de tal modo que en la madurez fisiológica la actividad meristemática es mínima. A los 30 DDT inicia un constante descenso,

presentando una ligera fluctuación a los 100 DDT, hasta presentar el mínimo a los 136 DDT. Este comportamiento es típico y se presenta de manera general en los diferentes tratamientos; observando valores altos al principio del ciclo de cultivo debido al crecimiento acelerado y a la gran división celular que se presenta en esta etapa, y a medida que pasa el tiempo decrece ésta hasta llegar a cero al final del cultivo.

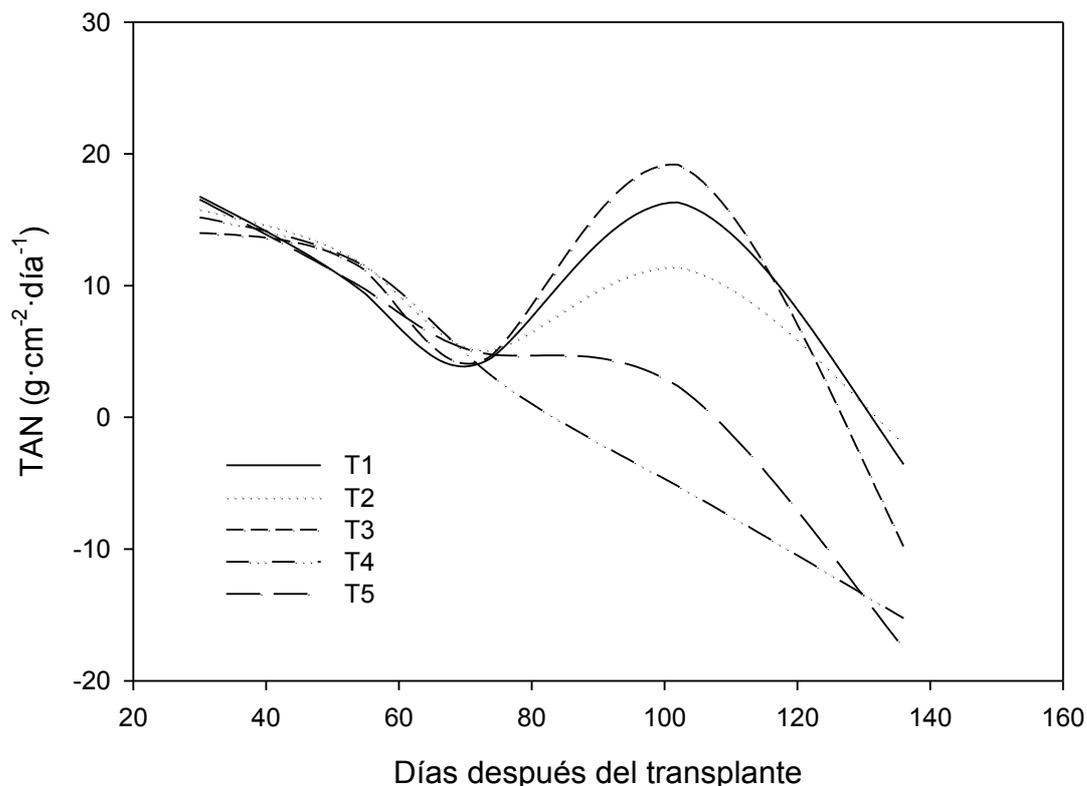
De acuerdo con lo anterior en la Figura 5 se observa una disminución a partir de los 30 DDT; esta situación es posible que se deba a que las hojas inferiores dejaron de ganar peso y se convirtieron en fuentes que atendían la demanda de fotoasimilados que requerían las flores para su amarre y posterior llenado de frutos.



**Figura 5.** Tasa relativa de crecimiento (TRC) en jitomate desarrollado en mezclas de tezontle con aserrín nuevo y reciclado. T1: tezontle, T2: tezontle y aserrín reciclado (20:80, v/v), T3: tezontle y aserrín reciclado (30:70, v/v), T4: tezontle y aserrín nuevo (20:80, v/v) y T5: tezontle y aserrín nuevo (30:70, v/v).

#### 5. 2. 4. Tasa de asimilación neta (TAN)

La tasa de asimilación neta (TAN) presentó en los tratamientos 1 (tezontle) y 3 (mezcla de tezontle y aserrín reciclado, 30:70, v/v) el punto máximo a los 100 DDT y en los tratamientos 2 (mezcla de tezontle y aserrín reciclado, 20:80, v/v), 4 (mezcla de tezontle y aserrín nuevo, 20:80, v/v) y 5 (mezcla de tezontle y aserrín nuevo, 30:70, v/v) presentan sus valores máximos al inicio, los cuales son normales. Se presentan valores máximos en las primeras etapas de desarrollo y posteriormente el valor decrece aunque aparezcan hojas nuevas las fotosintéticamente activas son sombreadas, lo que impide su funcionamiento total; del mismo modo las hojas interiores del dosel no reciben suficiente radiación, lo que provoca que no fotosintetizen eficientemente (Figura 6). Lo anterior concuerda con lo encontrado por Gardner *et al.* (1990), quienes mencionan que la ganancia de materia seca por unidad de área foliar decrece en la medida que salen nuevas hojas, debido al sombreadamiento recíproco.



**Figura 6.** Tasa de asimilación neta (TAN) en jitomate desarrollado en mezclas de tezontle con aserrín nuevo y reciclado. T1: tezontle, T2: tezontle y aserrín reciclado (20:80, v/v), T3: tezontle y aserrín reciclado (30:70, v/v), T4: tezontle y aserrín nuevo (20:80, v/v) y T5: tezontle y aserrín nuevo (30:70, v/v).

De acuerdo con lo anterior, se puede decir que los tratamientos T2 (mezcla de tezontle y aserrín reciclado, 20:80, v/v), T4 (mezcla de tezontle y aserrín nuevo, 20:80, v/v) y T5 (mezcla de tezontle y aserrín nuevo, 30:70, v/v) tuvieron una mayor ganancia de materia seca por unidad de tejido asimilatorio y por unidad de tiempo, lo cual de acuerdo con Gómez *et al.* (1999), en investigación realizada en papa, indica una mayor eficiencia fotosintética promedio.

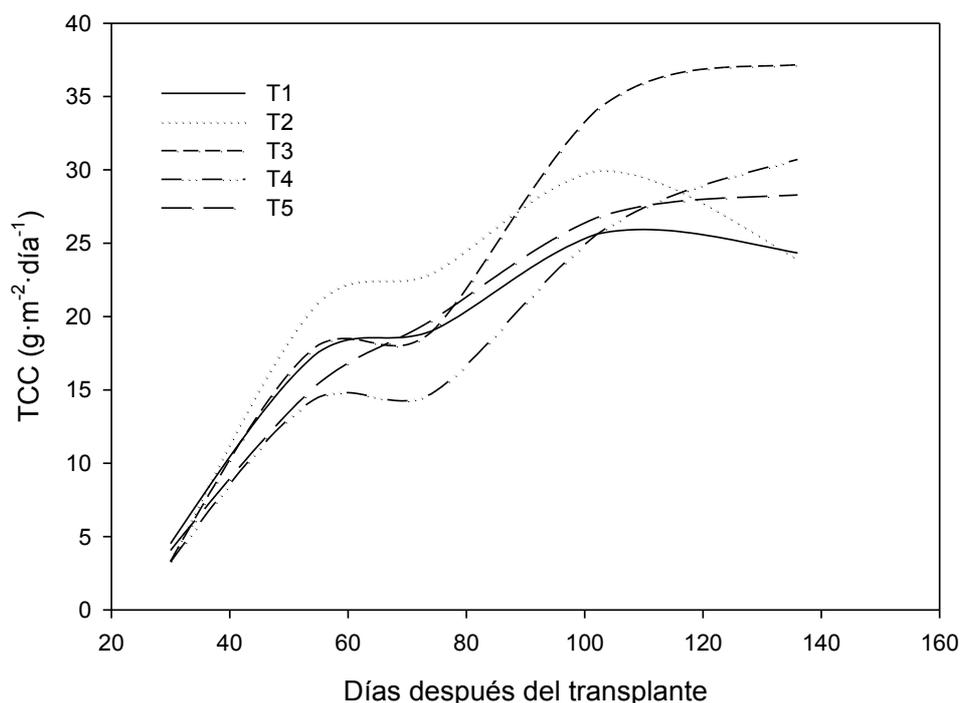
### **5. 2. 5. Tasa de crecimiento de cultivo (TCC)**

La tasa de crecimiento del cultivo (TCC) es un índice de productividad de biomasa por unidad de área del suelo en un periodo determinado (Hunt, 1978). La tasa absoluta de crecimiento (TAC) también mide una tasa de incremento de biomasa y tiene una tendencia similar a la TCC (Mora, 1998).

La diferencia entre estos índices radica en que la TAC se calcula por planta ( $\text{g pta}^{-1} \text{ día}^{-1}$ ); mientras que la TCC mide los incrementos absolutos por superficie sembrada ( $\text{g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ), de manera que la TAC puede variar considerablemente de una planta a otra.

La TCC (Figura 7) fue aumentando constantemente hasta los 120 DDT en todos los tratamientos y posteriormente presentó una ligera disminución. Presentando una baja TCC los primeros días debido al estrés que sufrió la planta causado por el transplante, pero fue aumentando hasta los 120 DDT hasta el final del ciclo.

La mayor TCC la presentaron los tratamientos T2 (mezcla de tezontle y aserrín reciclado, 20:80, v/v) y T3 (mezcla de tezontle y aserrín reciclado, 30:70, v/v), esto indica mayor eficiencia productiva de biomasa por unidad de superficie de suelo y concuerda con lo reportado por Hunt (1990) en el sentido de que la TCC es un índice de productividad agrícola, cuyos valores más altos se reflejan en mayor producción de los órganos de interés para la cosecha, contribuyendo a un mayor rendimiento.



**Figura 7.** Tasa de crecimiento de cultivo (TCC) en jitomate desarrollado en mezclas de tezontle con aserrín nuevo y reciclado. T1: tezontle, T2: tezontle y aserrín reciclado (20:80, v/v), T3: tezontle y aserrín reciclado (30:70, v/v), T4: tezontle y aserrín nuevo (20:80, v/v) y T5: tezontle y aserrín nuevo (30:70, v/v).

### 5. 3. Dinámica de extracción de los nutrimentos

La demanda nutrimental de cada cultivo para expresar el rendimiento máximo potencial esta determinada por la capacidad para absorber los nutrimentos requeridos, lo cual se mide con la acumulación de los mismos en la materia seca de los diferentes órganos (tallo, frutos, follaje y raíces). Las solanáceas absorben grandes cantidades de nutrimentos, los cuales dependen de la cantidad de frutos y materia seca que produzcan, influenciadas por variables genéticas y ambientales (Grageda, 1999; Hedge, 1997).

En esta investigación, las plantas no presentaron síntomas visibles de deficiencia nutrimental y los valores de concentración coinciden con los valores óptimos de concentración nutrimental reportados por Jones (1999) (Cuadro 4), por lo tanto se considera que las concentraciones obtenidas de cada elemento en la biomasa total

se encuentran en los intervalos suficientes, indicando un buen abastecimiento nutrimental.

**Cuadro 4.** Rangos normales de concentración de macronutrientos en materia seca de jitomate.

Elemento	Intervalo normal (%)	Valores encontrados (%)
Nitrógeno (N)	2.8 – 6.0	3.3 <sup>z</sup>
Fósforo (P)	0.3 – 0.9	0.7
Potasio (K)	2.5 – 6.0	3.5
Magnesio (Mg)	0.4 – 1.3	0.8
Calcio (Ca)	0.9 – 7.2	3.6

(Jones, 1999). <sup>z</sup> Promedio general de concentración de nutrientes en hojas de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.).

La extracción de macronutrientos en orden decreciente fue: K > N > Ca > P > Mg (Cuadro 5). Estadísticamente las comparaciones de medias del contenido de N, P, K y Mg no presentan diferencias significativas; en el caso de Ca sí existieron diferencias significativas. El tratamiento que fue más eficiente en la absorción fue el T3 (mezcla de tezontle y aserrín reciclado, 30:70, v/v).

**Cuadro 5.** Comparación de medias del contenido de macronutrientos en jitomate desarrollado en mezclas de tezontle con aserrín nuevo y reciclado.

Tratamiento	Nitrógeno	Fósforo	Potasio	Calcio	Magnesio
	g·planta <sup>-1</sup>				
T1	7.4 a	2.6 a	15.4 a	6.3 b	1.4 a <sup>z</sup>
T2	9.1 a	3.6 a	19.2 a	6.9 ab	1.4 a
T3	10.0 a	4.2 a	22.5 a	9.5 a	1.3 a
T4	10.3 a	3.2 a	17.6 a	8.0 ab	1.1 a
T5	8.5 a	2.8 a	15.2 a	6.3 b	1.1 a

“Z” medias con las mismas letras no difieren de acuerdo con la prueba de Tukey con una  $P \leq 0.05$ . T1: tezontle, T2: tezontle y aserrín reciclado (20:80, v/v), T3: tezontle y aserrín reciclado (30:70, v/v), T4: tezontle y aserrín nuevo (20:80, v/v) y T5: tezontle y aserrín nuevo (30:70, v/v).

### **5. 3. 1. Nitrógeno**

En la Figura 8 se presenta la dinámica de extracción de N en los distintos tratamientos. Se observa que la curva de extracción de este nutrimento tuvo una tendencia similar en todos los tratamientos hasta los 60 DDT, manteniéndose un incremento constante. En el periodo comprendido entre los 60 y los 136 DDT se presentó un comportamiento diferencial indicando que los tratamientos con mayor eficiencia en la recuperación de N fueron el T2 (mezcla de tezontle y aserrín reciclado, 20:80, v/v), T3 (mezcla de tezontle y aserrín reciclado, 30:70, v/v) y T4 (mezcla de tezontle y aserrín nuevo, 20:80, v/v).

La Figura 8 muestra la absorción total de N y el incremento que se dio a través del tiempo en los cinco tratamientos, se observa que en el periodo comprendido entre los 60 a 136 DDT la extracción fue mayor a 70 % del N total demandado por la planta. Además se muestran (Figura 8) los momentos de mayor y menor absorción, lo que ayudará a ajustar el programa de fertilización de N para proporcionarlo en el momento oportuno, ya que es un elemento muy dinámico (Bertsch, 2009); y se obtuvo una baja eficiencia de recuperación de N principalmente en la etapa vegetativa. Esto coincide con Pineda *et al.* (2011) quienes indican que la concentración de la solución nutritiva utilizada en la fase vegetativa debe ser ajustada debido a que durante los primeros 40 DDT se pierde una gran cantidad de nutrimentos por lixiviación.

En general la concentración de N en todos los tratamientos fue similar; sin embargo, durante los primeros 100 DDT el T2 (mezcla de tezontle y aserrín reciclado, 20:80, v/v) presentó mayores concentraciones, aunque a los 136 DDT en el T3 (mezcla de tezontle y aserrín reciclado, 30:70, v/v) y T4 (mezcla de tezontle y aserrín nuevo, 20:80, v/v) se encontraron valores más altos.

### **5. 3. 2. Fósforo**

En la Figura 9 se muestra la dinámica de acumulación de P en los diferentes tratamientos. En general la dinámica de absorción fue similar; sin embargo, se observa que la demanda nutrimental fue mayor a partir de los 60 DDT, lo que coincide con el desarrollo de flores y frutos. Al respecto Giaconi y Escaff (1993)

afirman que la presencia del P es indispensable para la buena fecundación de las flores.

Como lo muestra la Figura 9, los tratamientos que tuvieron mayor demanda fueron el T3 (mezcla de tezontle y aserrín reciclado, 30:70, v/v), T4 (mezcla de tezontle y aserrín nuevo, 20:80, v/v) y T2 (mezcla de tezontle y aserrín reciclado, 20:80, v/v) presentando mayores variaciones y a partir de los 100 DDT aumentaron la demanda rápidamente, en contraste con T1 (tezontle) y T5 (mezcla de tezontle y aserrín nuevo, 30:70, v/v) que fueron más constantes en su demanda. Estas variaciones con una tendencia diferencial entre tratamientos indican que los tratamientos con mayor eficiencia en recuperación de P son el T2 (mezcla de tezontle y aserrín reciclado, 20:80, v/v), T3 (mezcla de tezontle y aserrín reciclado, 30:70, v/v) y T4 (mezcla de tezontle y aserrín nuevo, 20:80, v/v).

Se observa que la absorción total de P y el incremento que se dio a través del tiempo en los cinco tratamientos, en el periodo comprendido entre los 80 a 140 DDT la extracción fue mayor a 90 % del P total demandado por la planta.

### **5. 3. 3. Potasio**

La **Figura 10** presenta la dinámica de extracción de K, la cual fue similar en todos los tratamientos, con algunas variaciones; sin embargo, como en el caso de N, P, Ca y Mg se elevó la cantidad de absorción a partir de los 100 DDT. Durante esta etapa que coincide con el desarrollo de flores y frutos, se extrajo alrededor de 30 % del K total hasta llegar a 40 % a los 136 DDT (Figura 10).

Al igual que para el caso de N y P a partir de los 60 DDT se observa una tendencia diferencial entre tratamientos, indicando que los tratamientos con mayor eficiencia en la recuperación de K son el T2 (mezcla de tezontle y aserrín reciclado, 20:80, v/v), T3 (mezcla de tezontle y aserrín reciclado, 30:70, v/v) y T4 (mezcla de tezontle y aserrín nuevo, 20:80, v/v), lo cual sugiere una mayor disponibilidad de nutrimentos.

Sancho (1999) indica que en sandía (*Citrullus lanatus* L.) cv. Crimson Jewel, los valores máximos de absorción de nutrimentos coincidieron con la emisión de guías e

inicio de la floración (33-44 DDS) y después del pico de la floración e inicio de llenado de frutos, donde fue absorbido 35% del K total a los 40 DDS.

#### **5. 3. 4. Calcio**

En la Figura 11 se presenta la dinámica de extracción de Ca en los diferentes tratamientos que en general fue similar en todos los tratamientos hasta los 60 DDT y en el periodo comprendido entre los 60 y 136 DDT se observó una tendencia diferencial, indicando que los tratamientos con mayor eficiencia en recuperación de Ca fueron el T2 (mezcla de tezontle y aserrín reciclado, 20:80, v/v), T3 (mezcla de tezontle y aserrín reciclado, 30:70, v/v) y T4 (mezcla de tezontle y aserrín nuevo, 20:80, v/v), situación similar a N, P y K sugiriendo una mayor disponibilidad de nutrimentos.

En la absorción total de Ca y el incremento que se dió a través del tiempo, se observa que en el periodo comprendido de los 100 a los 136 DDT el incremento fue de alrededor de 60 % del Ca total demandado por la planta, lo cual coincide con la época de floración e inicio del periodo de cosecha, indicando los momentos de mayor absorción, lo que ayuda a ajustar el programa de fertilización del Ca para proporcionarlo en el momento oportuno (Bertsch, 2009).

Esto podría explicarse por lo que menciona Mengel y Kirkby (2001), que la translocación del Ca dentro de la planta es por la savia del xilema, con la corriente de transpiración que va a las hojas, donde se almacena y después se trasloca a flores y frutos; Jones (2003) menciona que la principal función del Ca es mantener la integridad celular y la permeabilidad de membranas, pero también participa en la germinación del polen y el crecimiento del tubo polínico.

De acuerdo al análisis estadístico los tratamientos que presentan mayor eficiencia en la extracción son el 3 (mezcla de tezontle y aserrín reciclado, 30:70, v/v), 4 (mezcla de tezontle y aserrín nuevo, 20:80, v/v) y 2 (mezcla de tezontle y aserrín reciclado, 20:80, v/v) presentando diferencias significativas con los tratamientos 5 (mezcla de tezontle y aserrín nuevo, 30:70, v/v) y 1 (tezontle).

### **5. 3. 5. Magnesio**

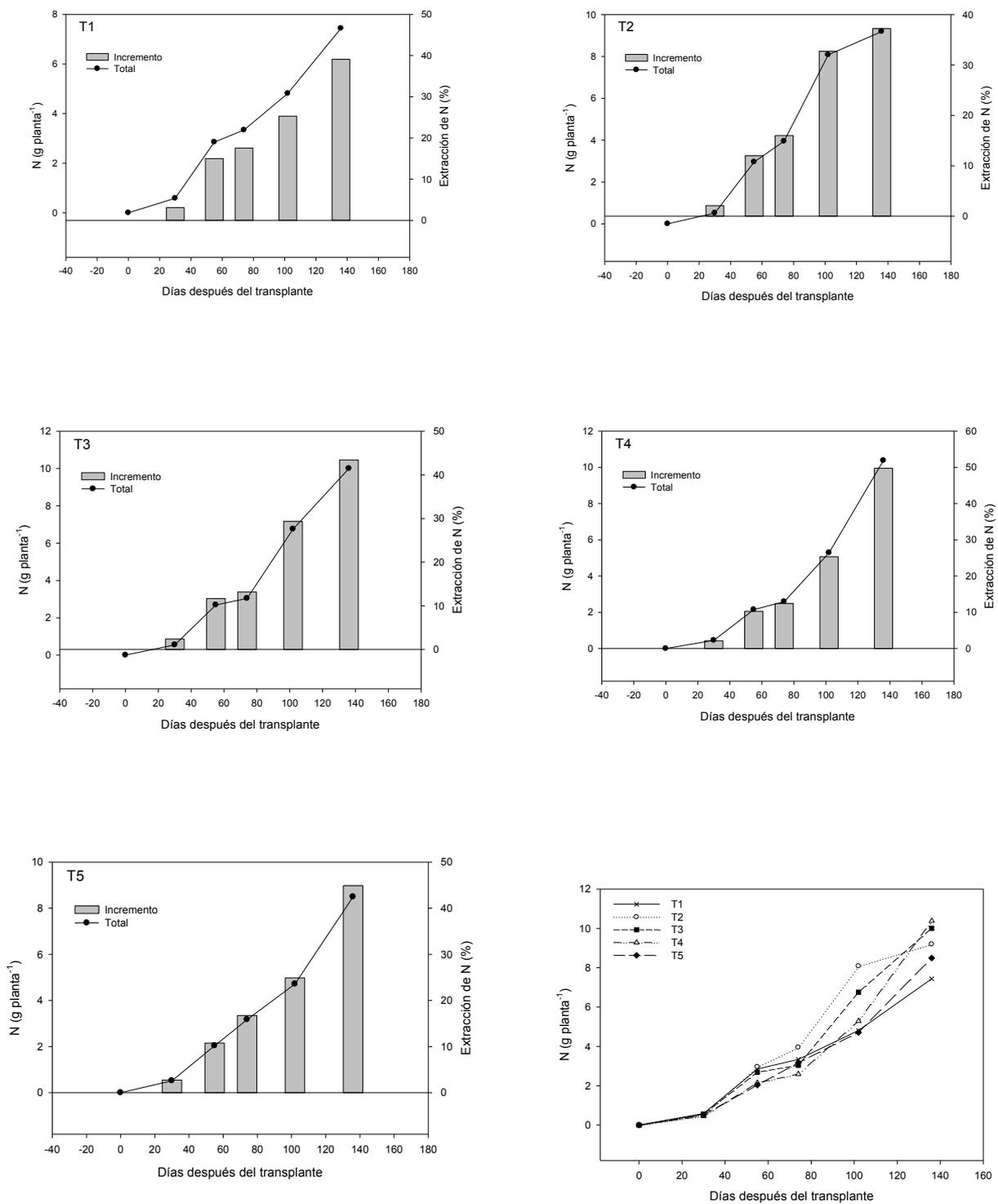
En la Figura 12 se observa la dinámica de extracción de Mg, obteniéndose una tendencia similar en todos los tratamientos hasta los 60 DDT. En el periodo comprendido entre los 60 DDT y los 136 DDT se presentó un comportamiento diferencial en el que se observa que los tratamientos con mayor eficiencia en la recuperación de Mg fueron el T3 (mezcla de tezontle y aserrín reciclado, 30:70, v/v), T2 (mezcla de tezontle y aserrín reciclado, 20:80, v/v) y T1 (tezontle) y durante esta etapa se dio un aumento en la absorción de 80 % del Mg total, coincidiendo con el inicio del desarrollo de flores y frutos. Aunque a los 74 DDT todos los tratamientos presentan una ligera disminución, para volver a aumentar a los 102 DDT y mantener una constante de incremento.

En la absorción total de Mg y el incremento que se dio a través del tiempo, se observa que en comparación con el N, P, K y Ca indica que es un elemento que no cambia mucho en cuanto al incremento, su demanda fue más constante y coincidió con la época de inicio de la floración.

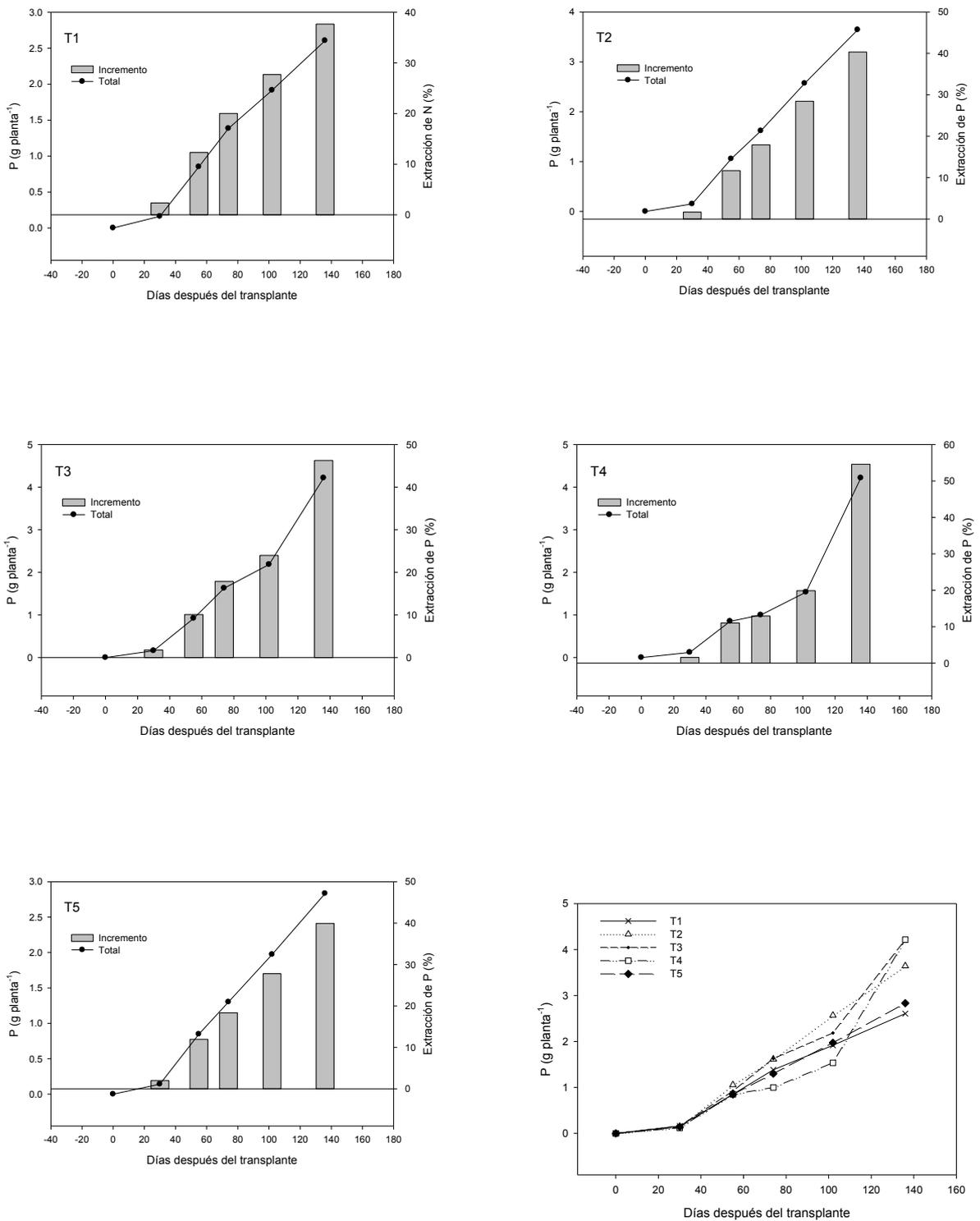
De acuerdo al análisis estadístico no se presentaron diferencias estadísticas entre tratamientos.

### **5. 4. Análisis de rendimiento**

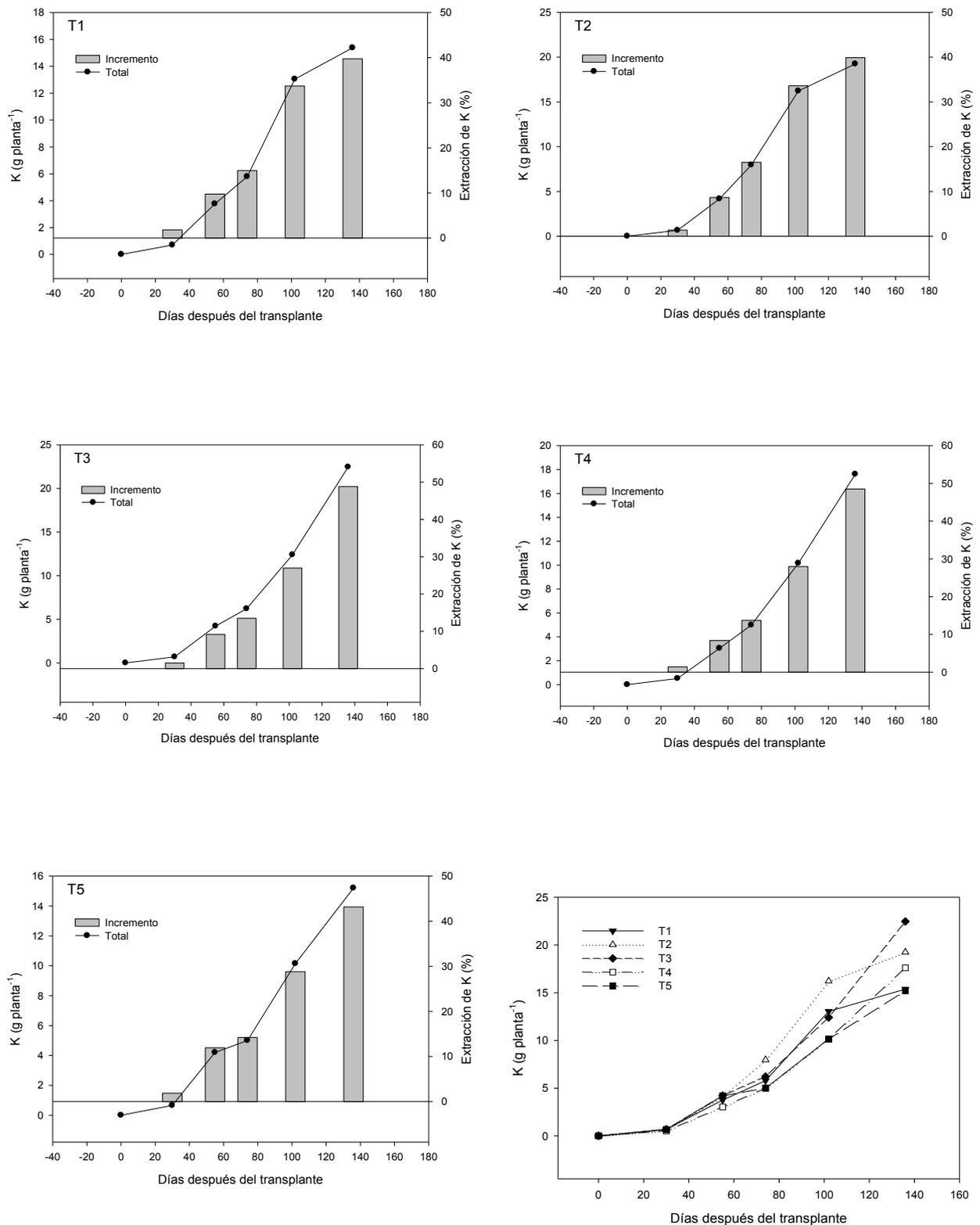
En peso de frutos por planta no existió variación entre los tratamientos estudiados, se tuvo el mismo comportamiento en el rendimiento total y aunque estadísticamente no se presentan diferencias significativas, se observan valores las diferentes en rendimiento (Cuadro 6), destacando el tratamiento 3 (mezcla de tezontle y aserrín reciclado, 70:30, v/v) y 2 (mezcla de tezontle y aserrín reciclado, 20:80, v/v) con mayor rendimiento lo que pudo deberse a una mejor absorción de nutrimentos de la solución nutritiva dadas las características de la mezcla (Cuadro 1), al comportamiento de su índice de área foliar que fue mayor y la cantidad de estructuras fotosintéticas, permitiendo sintetizar más carbohidratos que fueron translocados al fruto.



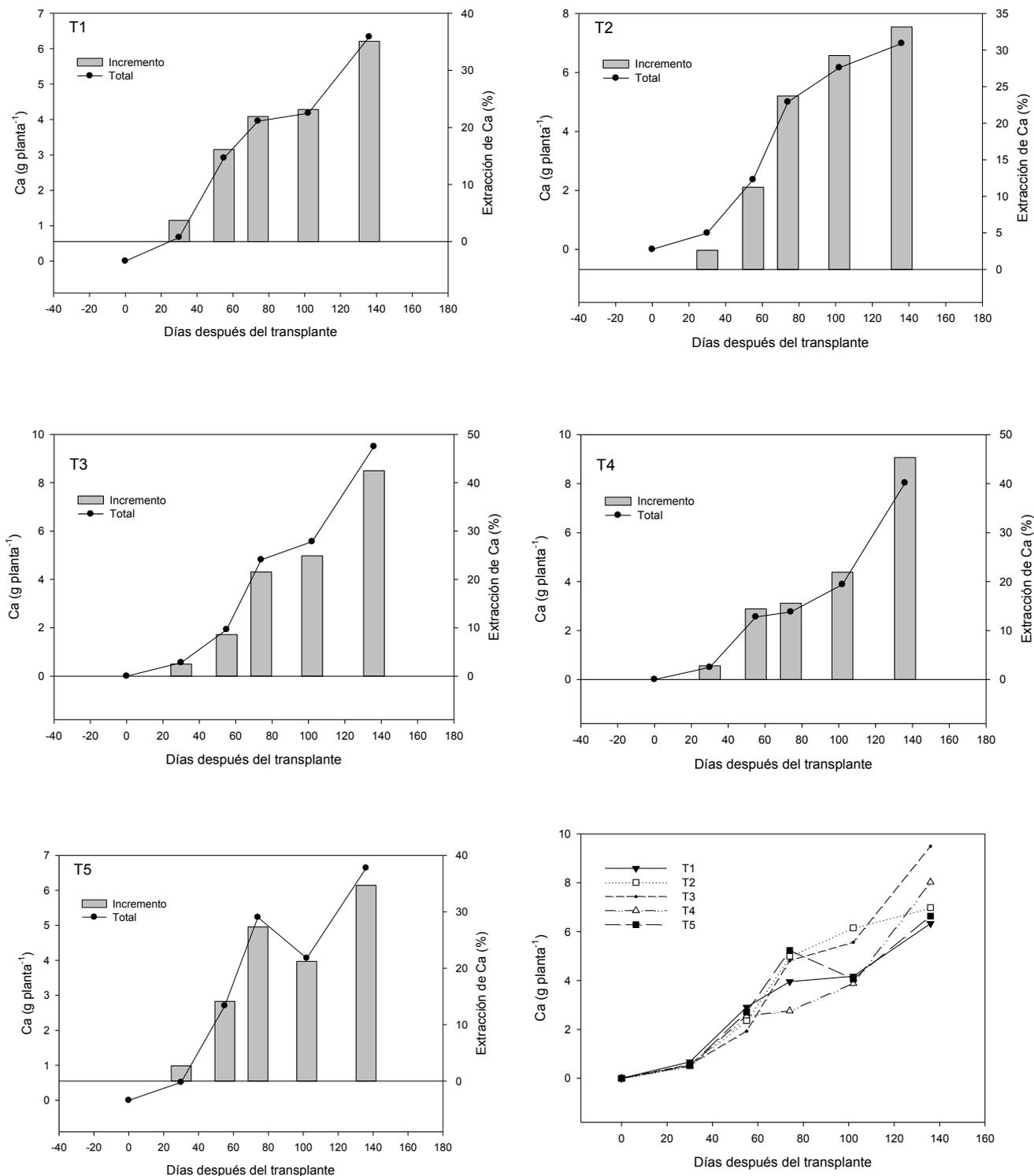
**Figura 8.** Extracción total y porcentajes de incremento de N en jitomate desarrollado en mezclas de tezontle con aserrín nuevo y reciclado. T1: tezontle, T2: tezontle y aserrín reciclado (20:80, v/v), T3: tezontle y aserrín reciclado (30:70, v/v), T4: tezontle y aserrín nuevo (20:80, v/v) y T5: tezontle y aserrín nuevo (30:70, v/v).



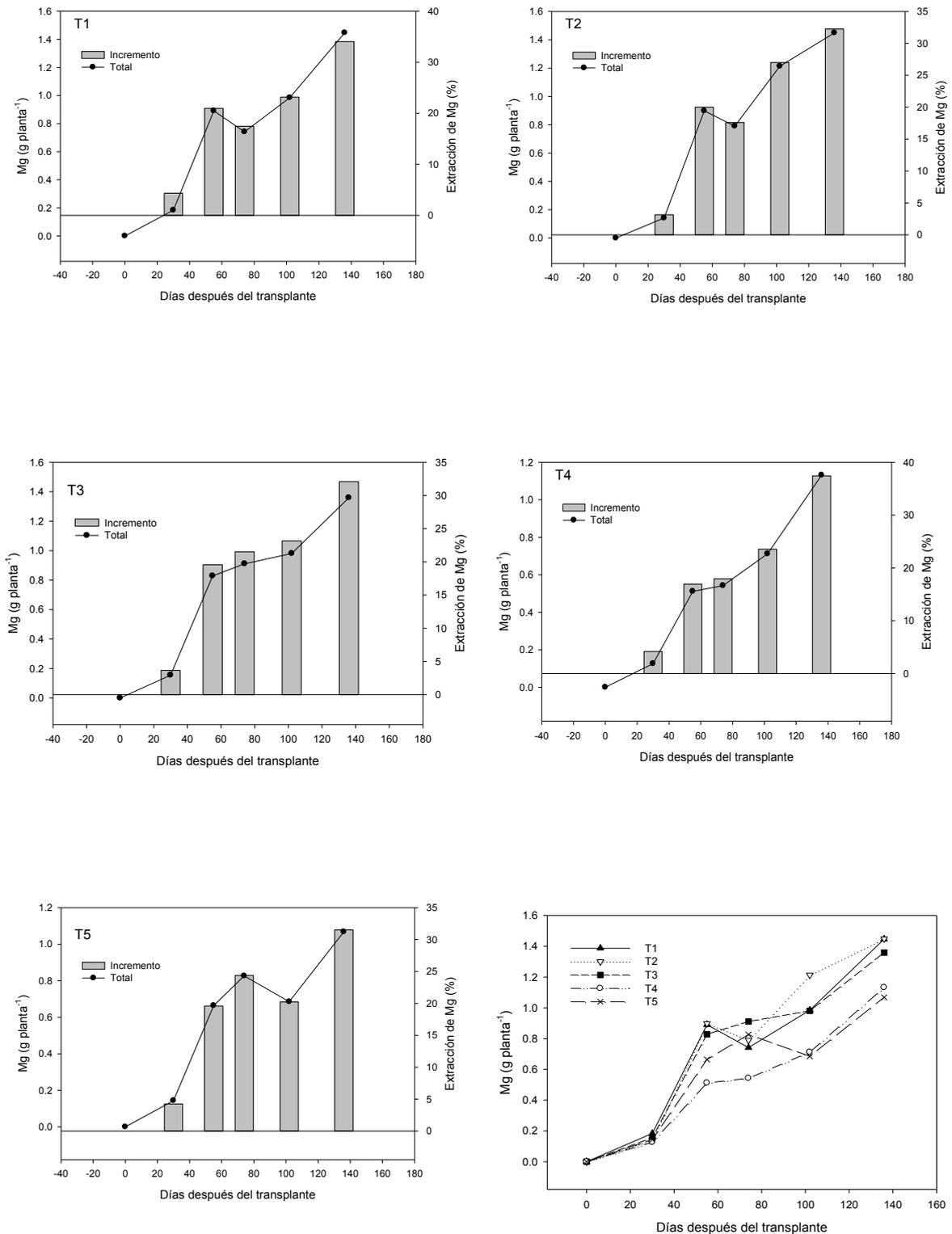
**Figura 9.** Extracción total y porcentajes de incremento de P en jitomate desarrollado en mezclas de tezontle con aserrín nuevo y reciclado. T1: tezontle, T2: tezontle y aserrín reciclado (20:80, v/v), T3: tezontle y aserrín reciclado (30:70, v/v), T4: tezontle y aserrín nuevo (20:80, v/v) y T5: tezontle y aserrín nuevo (30:70, v/v).



**Figura 10.** Extracción total y porcentajes de incremento de K en jitomate desarrollado en mezclas de tezontle con aserrín nuevo y reciclado. T1: tezontle, T2: tezontle y aserrín reciclado (20:80, v/v), T3: tezontle y aserrín reciclado (30:70, v/v), T4: tezontle y aserrín nuevo (20:80, v/v) y T5: tezontle y aserrín nuevo (30:70, v/v).



**Figura 11.** Extracción total y porcentajes de incremento de Ca en jitomate desarrollado en mezclas de tezontle con aserrín nuevo y reciclado. T1: tezontle, T2: tezontle y aserrín reciclado (20:80, v/v), T3: tezontle y aserrín reciclado (30:70, v/v), T4: tezontle y aserrín nuevo (20:80, v/v) y T5: tezontle y aserrín nuevo (30:70, v/v).



**Figura 12.** Extracción total y porcentajes de incremento de Mg en jitomate desarrollado en mezclas de tezontle con aserrín nuevo y reciclado. T1: tezontle, T2: tezontle y aserrín reciclado (20:80, v/v), T3: tezontle y aserrín reciclado (30:70, v/v), T4: tezontle y aserrín nuevo (20:80, v/v) y T5: tezontle y aserrín nuevo (30:70, v/v).

Adams *et al.* (1973) indican que las deficiencias minerales, particularmente en nitrógeno, fósforo y potasio, retrasan el desarrollo de las flores pudiendo provocar incluso el aborto de las mismas, este efecto puede ser especialmente importante.

**Cuadro 6.** Comparación de medias de biomasa total y rendimiento de frutos.

Tratamientos	Biomasa Total	Rendimiento (Frutos)
		g·planta <sup>-1</sup>
T3	9413 a	7406 a <sup>z</sup>
T2	8901 a	6951 a
T5	7218 a	5848 a
T4	6632 a	5361 a
T1	6433 a	5218 a

“Z” medias con las mismas letras no difieren de acuerdo con la prueba de *Tukey* con una  $P \leq 0.05$ . T1: tezontle, T2: tezontle y aserrín reciclado (20:80, v/v), T3: tezontle y aserrín reciclado (30:70, v/v), T4: tezontle y aserrín nuevo (20:80, v/v) y T5: tezontle y aserrín nuevo (30:70, v/v).

Estos resultados son superiores a los obtenidos por Ortega *et al.* (2010) de 4 kg·planta<sup>-1</sup> en tratamientos con mezclas de aserrín y composta. Es importante destacar que los datos con los que se compara el rendimiento de este experimento se dieron en condiciones ambientales distintas.

En este sentido es importante destacar la importancia sobre el cálculo de los balances de nutrientes y sus ciclos ya que son una herramienta poderosa para mejorar el conocimiento sobre el flujo y comportamiento de los nutrientes en los sistemas agrícolas. Spiess (2011) menciona que para mantener una agricultura sostenible es necesario buscar un equilibrio sin excedentes, como algo inevitable.

Es necesario tomar en cuenta que un medio de cultivo puede dar resultados distintos según el tipo, forma y tamaño del contenedor, especie vegetal, manejo o condiciones climáticas (Burés, 1997), en este caso la única diferencia en manejo que se tuvo fue la mezcla de sustrato, lo que destaca la importancia que tiene un sustrato para garantizar el éxito de un cultivo.

## 5. 5. Sustratos

De acuerdo a los análisis estadísticos los tratamientos evaluados no presentan diferencias significativa; sin embargo, se puede apreciar que los mejores resultados para el crecimiento, desarrollo y rendimiento de la planta, fueron obtenidos con el T3 (mezcla de tezontle y aserrín reciclado, 30:70, v/v). La explicación está en las propiedades físicas de cada sustrato, ya que en este tratamiento se tuvieron características más favorables para el desarrollo del cultivo como son la capacidad de aireación y retención de humedad (Cuadro 1).

En investigaciones realizadas por Reyes *et al.* (2005) en *Pinus pseudostrobus* var. *apulcensis* en sustratos base de aserrín, los resultados en cuanto a la proporción de las mezclas de aserrín crudo de pino, mezclado a 80 % con otros materiales indican que se puede utilizar satisfactoriamente como medio de crecimiento para producir especies forestales utilizando el sistema de producción tradicional y se descartan efectos por toxicidad producidas por el aserrín crudo.

Estos trabajos coinciden con lo encontrado por Mateo (2011) con sustratos a base de aserrín para producir de *Cedrela odorata* L., en donde las mezclas con mas altas proporciones de aserrín (70 y 80 %) dieron los mejores resultados.

Con relación a la capacidad de aireación de los sustratos en evaluación, los resultados indican que las mezclas presentan una diferencia mínima en cuanto a capacidad de aireación presentando valores que variaron de 5.1 a 7.7 % un poco menor al recomendado por Cabrera (1999), Abad *et al.*, (2006) y Bunt (1988); para el caso de la densidad aparente, la variación fue de 0.5 a 0.3 kg litro<sup>-1</sup> coincidiendo solo con los valores recomendados por Bunt (1988).

Considerando que la retención de humedad se refiere al volumen total del sustrato ocupado por agua después de ser saturado y dejado drenar libremente, esta retención está en función de la cantidad de poros capilares que contenga el sustrato (De Boodt *et al.*, 1974), y de acuerdo a los valores indicados para el sustrato ideal (55 al 70 %) (Cabrera, 1999), las mezclas están en este rango, oscilando entre el 68.4 y 70.7 %, con excepción del tratamiento T1 (tezontle) que presento valores mas bajos.

En cuanto a espacio poroso total de acuerdo con Cabrera (1999) y Bunt (1988) los tratamientos tuvieron los niveles adecuados (73.5 a 78.3 %) con excepción del T1 (tezontle) que presentó valores más bajos. Sin embargo, estos factores no afectaron negativamente el óptimo desarrollo de la planta, lo que indica que el jitomate puede desarrollarse sin problemas con variaciones importantes en las propiedades físicas en relación con el sustrato ideal.

Estos resultados coinciden con los encontrados por Pire y Pereira (2003), en fibra de coco, aserrín de coco, cáscara de arroz y bagazo de caña, presentando altos valores de porosidad total y bajos de densidad aparente y de partícula.

En general sustratos que difieren significativamente en tamaños de partícula presentan mayor densidad aparente, como lo son las mezclas (Pokorny *et al.* 1986) y del mismo modo tienen mayor espacio poroso total, mayor retención de humedad y mayor capacidad de aireación que los sustratos con partículas de tamaños similares (Raviv y Heinrich, 2008); características con las cuales cuentan las mezclas de sustratos utilizadas en el presente experimento y las diferencias encontradas en cuanto a absorción nutricional sugieren que hay diferencias significativas en la disponibilidad de agua y nutrientes.

Un medio de cultivo o sustrato debe de diseñarse para aumentar al máximo su contenido de agua y aire, utilizando como referencia los valores del sustrato ideal, ya que en general las características físicas de un sustrato no pueden predecirse en forma sencilla o a partir de sus componentes; sería conveniente analizar sus características físicas y las mezclas que se pueden realizar. La mezcla de dos o más componentes por lo general produce interacciones que hacen que las propiedades físicas de las mezclas finales sean la media óptima de las propiedades de los componentes (Bowman y Paul, 1983 citado por Cabrera, 1995).

De acuerdo a estos datos se puede especular que cualquier sustrato que se pueda mezclar y caracterizar entre estos niveles puede ser el ideal para la producción en hidroponía.

Es importante destacar que la actividad tan intensa de la agricultura protegida esta generando problemas serios de contaminación ambiental, tales como: desechos vegetales, plásticos de invernadero, envases de agroquímicos, fertilizantes, alambres, sustratos, etc., que han perdido su valor comercial en las condiciones de tiempo y lugar en que se han obtenido (Urrestarazu *et al.*, 2005). El volumen medio de residuos que genera un invernadero con sistemas de producción de hidroponía en relación a sustratos varia de 6 – 10 t ha<sup>-1</sup> (Cara y Ribera, 1998).

Para el caso de los sustratos existen numerosas investigaciones para disminuir el impacto ambiental donde el reciclaje es una alternativa viable, como lo es la presente investigación que indica que con el adecuado manejo se pueden obtener incluso mejores rendimientos.

## VI. CONCLUSIONES

1. La dinámica de acumulación de biomasa de manera general presentó una tendencia similar en todos los tratamientos, y en función de rendimientos de manera decreciente fue de la siguiente forma: T3 (mezcla de tezontle y aserrín reciclado, 30:70, v/v) > T2 (mezcla de tezontle y aserrín reciclado, 20:80, v/v) > T5 (mezcla de tezontle y aserrín nuevo, 30:70, v/v) > T4 (mezcla de tezontle y aserrín nuevo, 20:80, v/v) > T1 (tezontle).
2. Las tasas máximas de acumulación de materia seca y de extracción de nutrimentos (N, P, K, Ca y Mg) se dieron entre los 60 y los 136 DDT periodo en el que se presentó la floración y la fructificación.
3. La dinámica de las curvas de extracción nutrimental de macronutrimentos presentó de manera general una tendencia similar en todos los tratamientos y en orden decreciente fue: K > N > Ca > P > Mg.
4. Las plantas que tuvieron una mejor disponibilidad de nutrientes presentaron mayores rendimientos.
5. La mejor mezcla de sustrato en relación al rendimiento del cultivo y eficiencia en la absorción de nutrimentos fue el tratamiento T3 (mezcla de tezontle y aserrín reciclado, 30:70, v/v).
6. El comportamiento de acumulación de materia seca y de extracción de nutrimentos indican que el jitomate requiere de un ajuste en el programa de fertilización principalmente en los primeros 60 DDT.
7. El uso del aserrín reciclado en mezclas con tezontle permite un adecuado desarrollo para las plantas y representa una alternativa viable por su bajo costo.

## VII. LITERATURA CONSULTADA

- ABAD, B. M.; NOGUERA, M. P. 2006. Los sustratos en los cultivos sin suelo, pp. 137-183. *In: Manual de Cultivo sin Suelo*. URRESTARAZU, G. M. (Ed.). Mundi-Prensa. Madrid, España.
- ABAD, B. M. 1993. Sustratos. Características y propiedades. pp 47 – 62. *In: Cultivo Sin Suelo*. CANOVAS, F.; DIAZ, J. R. (ed.). Instituto de Estudios Almerienses. FIAPA. Almeria, España.
- ADAMS, P. WINSOR, W.; DONALD, J. 1973. The effects of nitrogen, potassium and subirrigation on the yield, quality and composition of single-truss tomatoes. *J. Hort. Sci.* 48: 123-133.
- AGUILAR, R. 2002. Producción de Sustratos para Viveros. Proyecto Regional de Fortalecimiento de la Vigilancia Fitosanitaria en Cultivos de Exportación no Tradicional. Costa Rica. 46 p.
- ALCÁNTAR, G. G.; TREJO. T. L. 2007. Nutrición de Cultivos. Colegio de posgraduados Mundi-prensa, México, 437 p.
- ANSORENA, J. 1994. Propiedades físicas de los sustratos. *Chile Agrícola*, 20(208): 217-218.
- ANGUIANO, S. L. E.; LASCARES, Y. O. 1998. Elaboración de programas de fertilización en maíz, jitomate, naranja y crisantemo. Tesis Profesional. Departamento de Fitotecnia. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 124 p.
- ANÓNIMO, 1992. Manual de Fertilizantes. Décima impresión. National Plant Food Institute. Ed. Limusa. México, D. F. 292 p.
- ANÓNIMO, 1995. Manual de Fertilizantes para Horticultura. Ed. Limusa. México, D. F. 297 p.
- ANÓNIMO, 1999. Fertirrigación de Cultivos y Frutales. Soquimich Comercial S. A., Santiago, Chile. 224 p.
- AZCON, B. J.; TALON, M. 2008. Fundamentos de Fisiología. Segunda edición. México, D. F.
- BARRAZA, F. V.; FISCHER, G.; CARDONA, C. E. 2004. Estudio del proceso de crecimiento del cultivo del tomate (*Solanum lycopersicum L.*) en el Valle del Sinu medio, Colombia. *Agronomía Colombiana* 22(1): 81-90.

- BEAUCHAMP, D. 1981. Nutrición Vegetal. Ed. Tonsa-San Sebastián. México, D. F. 311 p.
- BENNETT, W. F. 1994. Nutrient Deficiencias and Toxicities in Crop Plants. Ed. APS PRESS. Minnesota. U.S.A. 202 p.
- BENTON, J. J. 1998. Plant Nutrition, Manual. CRC Press. Boca Raton Boston London New York Washington.
- BERTSCH, F. 2009. Absorción de Nutrientes por los Cultivos. Ed. San José, Costa Rica, Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. 308 p.
- BIDWELL, R. G. S. 1990. Fisiología Vegetal. Trad. del inglés por: G. G. Cano y M. Rojas. AGT editor. México, D. F. 784 p.
- BRAND G. D.; WEETMAN, F.G. 1987. Growth Analysis of Perennial Plants: The Relative Production Rate and its Yield Components. *Annals of Botany* 59: 45-53.
- BUNT, A. C. 1988. Media and Mixes for Container-Grown Plants: a Manual on the Preparation and Use of Growing Media for Pot Plants. 2nd ed. Unwin Hyman Ltd., London, UK. 309 p.
- BURES, S. 1997. Sustratos. Ediciones Agrotécnicas S.L. Madrid, España. 220 p.
- CABRERA, R. I. 1995. Fundamentals of container media management, Part. 1. Physical properties. Rutgers Cooperative Extension Factsheet No. 950. 4 p.
- CABRERA, R. I. 1999. Propiedades, uso y manejo de sustratos de cultivo para la producción de plantas en maceta. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 5(1): 5-11.
- CALDERÓN, A. 2005. Sustratos Agrícolas. Proyecto Fondef. Universidad de Chile, Fac. Cs. Agronómicas. 4 p.
- CANIZARES, K.; RODRIGUEZ, J.; GOTO, R. 2004. Crescimento e índices de troca gasosa em plantas de pepino irrigadas com água enriquecida com CO<sub>2</sub>. *Horticultura Brasileira*, Brasília, 22(4), 706-711.
- CARA, G.; RIBERA, J. 1998. Residuos en la agricultura intensiva. El caso de Almería. Encuentro ambiental almeriense: en busca de soluciones. Almería, España. 128-132.
- CASSMAN, K. G.; DOBERMANN, A.; WALTERS, D. T. 2002. Agroecosystems, nitrogen use efficiency, and nitrogen management. *Ambio* 31:132-140.
- CASTELLANOS, 1998. El seguimiento de la nutrición del cultivo en los sistemas de fertirrigación. *Plantaciones modernas*. 3(1): 5-8.

- CHAPMAN, H. D.; P. E. PRATT. 1973. Método de Análisis de Suelos, Plantas y Agua. Trad. del inglés por: A. Contin. Ed. Trillas. México, D. F. 195 p.
- DE BOODT, M.; VERDONCK, O.; CAPPAERT, I. 1974. Method for measuring the waterrelease curve of organic substrates. Acta Horticulturae 37: 2054-2062.
- DOMÍNGUEZ, V. A. 1989. Tratado de Fertilización. 3ª Edición. Ed. Mundi-Prensa. México, D. F. 374 p.
- ETCHEVERS, B.; RODRÍGUEZ, S. J.; GALVIS S. A. 1991. Generación de recomendaciones de fertilización mediante un enfoque sistémico racional. Terra 9: 3-10.
- FINCK, A. 1988. Fertilizantes y Fertilización. Ed. REVERTÉ S. A. Barcelona, España. 439 p.
- FRANCO, Z. J. 1995. Determinación de la respuesta espectral del cultivo de jitomate (*Solanum lycopersicum L.*) bajo diferentes condiciones nutrimentales. Tesis profesional. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 77 p.
- GARDNER F., P.; BRENT P., R.; MITCHELL R., L. 1990. Physiology of Crop Plants. Second Edition. Iowa state University. AMES. USA. 208 p.
- GIACONI, V.; ESCAFF, M. 1993. Cultivo de Hortalizas. Universitaria. Santiago, Chile. 332 p.
- GOMEZ, C.; BUITRAGO, M. C.; HUERTAS, B. 1999. Ecofisiología de papa (*Solanum tuberosum*) utilizada para consumo en fresco y para la industria. Revista COMALFI 26(1-3), 42-55.
- GÓMEZ, T. L.; GÓMEZ, C. M. A.; RINDERMANN, R. 2002. Desafíos de la Agricultura Orgánica. Segunda reimpresión. Universidad Autónoma Chapingo-Centro de Investigaciones Económicas y Sociales y Tecnológicas de la Agroindustria y la Agricultura Mundial. Ediciones Mundi-Prensa. México, D. F. 224 p.
- GRAGEDA, G. J. 1999. La fertilización en hortalizas. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Centro de Investigación Regional del Noreste. Folleto Técnico No. 19. Sonora, México. 62 p.
- GREENWOOD, D. J. 1983. Quantitative theory and the control of soil fertility. New Phytol. 94: 1-18.

- GUTIÉRREZ, M. V. 1996. Nutrición mineral de las plantas: fisiología y aplicaciones. *In*: pp. 115-117. X Congreso Nacional Agronómico / II Congreso de Suelos. Universidad de Costa Rica.
- HEDGE, D. M. 1997. Nutrient requirements of solanaceous vegetables crops. Extension bulletin ASPAC, Food and Fertilizer Technology Center for the Asian and Pacific Region. Taipei, Taiwan. No. 441, 9.9 p.
- HUNT, R. 1978. Plant Growth Analysis. Edward Arnold. London 67 p.
- HUNT, R. 1982. Plant Growth Curves. Edward Arnold. London 247 p.
- HUNT, R. 1990. Basic Growth Analysis: Plant Growth Analysis for Beginners. Unwin Hyman Ltd., Londres. 112 p.
- JARMA, A.; BUITRAGO, C.; GUTIERREZ, S. 1999. Respuesta del crecimiento de la habichuela (*Phaseolus vulgaris* L. var. Blue Lake) a tres niveles de radiación incidente. Revista COMALFI 26(1-3), 62-73.
- JARMA, A.; RENGIFO, T.; ARAMENDIZ, T. H. 2006. Fisiología de stevia (*Stevia rebaudiana*) en función de la radiación en el Caribe colombiano. II. Análisis de crecimiento. Agronomía Colombiana 24(1): 38-47.
- JONES, B. JR. 2003. Plant Nutrition Manual. CRC Press LLC. Florida, U.S.A. 149 p.
- JONES, JR.; WOLF, B. J.; MILLS, A. H. 1991. Plant Analysis Handbook. Micro-Macro Publishing, Inc. Athens, Georgia, U.S.A. 213 p.
- JONES, J. B. 1999. Tomato Plant Culture. CRC Press LLC. Florida U.S.A. 199 p.
- LARA, H. A. 2000. Manejo de la solución nutritiva en la producción de tomate en hidroponía. Terra, 17 (3).
- LE-BOT, J.; KIRKBY, A. E. 1992. Diurnal uptake of nitrate and potassium during the vegetative growth of tomato plants. J. Plant Nutr. 15 (2):247-254.
- MATEO, S. J. J.; BONIFACIO, B. R.; PEREZ, R. S. R.; MOHEDANO, C. L.; CAPULIN, G. J. 2011. Producción de (*Cedrela odorata* L.), en sustrato a base de aserrín crudo en sistema tecnificado en tecpan de galeana, guerrero, México. Ra Ximhai, 7(1) 123 – 132.
- MARSCHNER, H. 2003. Mineral Nutrition of Higher Plant. Academic Press. San Diego, California, U.S.A. 674 p.
- MENGEL, K.; KIRKBY E. 2001. Principles of Plant Nutrition. Third edition. International Potash Institute. Worblaufen-Bern, Switzerland. 655 p.

- MILLER, E. V. 1981. Fisiología Vegetal. Trad. del inglés por: F. Latorre. Ed. UTEHA. México, D. F. 334 p.
- MOLINA, E.; SALAS, R.; CASTRO, A. 1993. Curvas de crecimiento y absorción de nutrimentos en fresa (*Fragaria x ananassa* Duch. cv. Chandler) en Alajuela. Agronomía Costarricense 17 (1): 67-73.
- MORA, A. R.; ORTIZ, C. J.; MENDOZA, C. M. C.; RIVERA, P. A.; LOZOYA, S. H.; COLINAS, L. M. T. 2005. Cinética de la acumulación y distribución de biomasa en genotipos de papa establecidos en condiciones de secano. Rev. Chapingo Serie Horticultura 11(1): 135-142.
- MORA, A. R. 1998. Dinámica del crecimiento y producción de *Solanum tuberosum* L. en crecimiento de temporal. Tesis Doctoral. IREGEP. Colegio de Posgraduados. Texcoco, México. 165 p.
- NAVARRO, G. S.; NAVARRO, G. G. 2000. Química agrícola. El suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal. Ed. Mundi-Prensa. 488 p.
- NUEZ, F. 1995. El Cultivo del Tomate. Ed. Mundi-Prensa. Madrid, España. 767 p.
- ORTEGA, M. L. D.; SANCHEZ, O. J.; OCAMPO, M. J.; SANDOVAL, C. E.; SALCIDO, R. B. A.; MANZO, R. F. 2010. Efecto de diferentes sustratos en crecimiento y rendimiento de tomate (*Lycopersicum esculentum* Mill.) bajo condiciones de invernadero. Ra Ximhai, 6 (3): 339-346.
- PASTOR, J. 2000. Utilización de sustratos en vivero. Universidad de Lleida, Dpto. de Hortofruticultura, Botánica y Jardinería. Madrid, España. pp. 231-235.
- PINEDA, P. J.; RAMIREZ, A. A.; SANCHEZ, D. F.; CASTILLO, G. A. M.; VALDEZ, A. L. A.; VARGAS, C. J. M. 2011. Extraction and nutrient efficiency during the vegetative growth of tomato under hydroponics conditions. Acta hort. (ISHS) 893:997-1005.
- PIRE, R.; PEREIRA, A. 2003. Propiedades físicas de componentes de sustratos de uso común en la horticultura del estado Lara, Venezuela. Propuesta metodológica. Bioagro 15 (1).
- POKORNY, F. A.; GIBSON, P. G.; DUNAVENT, M. G. 1986. Prediction of bulk density of pine bark and/or sand potting media from laboratory analyses of individual components. J. Amer. Soc. Hort. Science, 111, 8-11.
- RAVIV, M.; HEINRICH, L. J. 2008. Soilless Culture: Theory and Practice. United States of America. 625 p.

- RENGEL, Z. 1999. Mineral Nutrition of Crops. Fundamental Mechanisms and Applications. Ed. Food Products Press. New Cork. U.S.A. 399 p.
- RESH, H. 1992. Cultivos Hidropónicos, Nuevas Técnicas de Producción. 3ª Edición. Mundi-Prensa. Madrid, España. 366 p.
- REYES, R. J.; ALDRETE, A.; CETINA, A. V. V.; LOPEZ, U. J. 2005. Producción de plántulas de *Pinus pseudostrobus* var. *apulcensis* en sustratos a base de aserrín. Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente, 10 (002): 105-110.
- RODRÍGUEZ, S. F. 1989. Fertilizantes. Nutrición Vegetal. AGT Editor S. A. 1ª reimpresión. México, D.F. 157 p.
- RODRÍGUEZ, S. F. 1996. Fertilizantes-Nutrición Vegetal. AGT editor. S. A. México, D. F. 157 p.
- RODRÍGUEZ, S. J.; PINOCHETT, F. D.; MATEUS, B. 2001. Fertilización de los Cultivos. LOM ediciones. Chile 117 p.
- SALAZAR, G. S. 2002. Nutrición del Aguacate, Principios y Aplicaciones. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias – Instituto de la Potasa y el Fósforo. 165 p.
- SALISBURY, F. B.; ROSS, C. W. 1994. Fisiología Vegetal. Grupo Editorial Iberoamericano S. A. de C. V. México.
- SANCHO V. H. 1999. Curvas de absorción de nutrientes: importancia y uso en los programas de fertilización. Informaciones agronómicas. Instituto de la potasa y el fósforo. Publicación numero 36.
- SAS Institute Inc. 2006. Base SAS 9.1.3 Procedures Guide, Second Edition, Volumes 1, 2, 3, and 4. Cary, NC: SAS Institute Inc.
- SPIESS, E. 2011. Nitrogen, phosphorus and potassium balances and cycles of Swiss agricultura from 1975 to 2008. Nutr Cycl Agroecosyst (2011) 91:351-365.
- THOMPSON, L. M. 1982. Los Suelos y Su Fertilidad. Trad. del inglés por: J. Puigdefabregas. Ed. REVERTE. Barcelona, España. 639 p.
- TIRADO, T. J. L. 1977. Variaciones en la concentración de N, P, K en las hojas de aguacate var. Fuerte por efecto de fertilizantes y estados fenológicos. Tesis profesional. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 63 p.
- URRESTARAZU, G. M. 2006. Manual de Cultivo sin Suelo. (Ed.). Mundi-Prensa. Madrid, España.

- URRESTARAZU, G. M; SUAREZ, E. F.; MAZUELA, P. 2005. Reutilización de residuos de la industria hortícola. Revista Vida Rural, 26-29.
- WILD, A.; JONES L. H. P. 1992. Nutrición Mineral de las Plantas Cultivadas pp. 73-119. *In*. Condiciones del Suelo y Desarrollo de las Plantas según Russell. Wild, A. (ed). Ed. Mundi-Prensa. Madrid, España.