



# **COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

---

**INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACION EN CIENCIAS AGRÍCOLAS**

**CAMPUS MONTECILLO**

**POSTGRADO DE EDAFOLOGIA**

## **PRODUCCIÓN DE PLANTA FORESTAL CON SUSTRATO ALTERNATIVO Y FERTILIZANTES DE LIBERACIÓN CONTROLADA**

**ROLANDO ÁVILA AYALA**

**T E S I S**

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRO EN CIENCIAS**

**MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO**

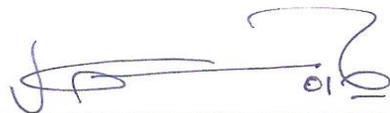
**2015**

La presente tesis titulada: "Producción de planta forestal con sustrato alternativo y fertilizantes de liberación controlada", realizada por el alumno: Rolando Ávila Ayala, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS  
EDAFOLOGÍA

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



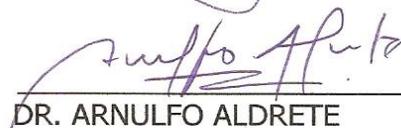
DR. VÍCTOR MANUEL ORDAZ CHAPARRO

ASESOR



DR. JORGE DIONISIO ETCHEVERS BARRA

ASESOR



DR. ARNULFO ALDRETE

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Junio de 2015

## AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico brindado en mis estudios de maestría; a la ex Línea Prioritaria de Investigación 1: Actividad 6, por brindar el apoyo necesario en la realización de este trabajo; y sobretodo, al INIFAP por brindarme la oportunidad para obtener el grado de maestría.

Al Dr. Ordaz, quien con paciencia e interés, condujo la presente investigación.

A los miembros de mi Consejo Particular, Dr. Etchevers y Dr. Aldrete, por su disponibilidad y valiosas aportaciones para la realización de esta tesis.

Al COLPOS, especialmente el posgrado en Edafología y su personal académico y administrativo, a quienes les debo su valiosa orientación.

A los laboratorios de Fertilidad a cargo de la M. C. Juliana Padilla y Física de Suelos, antes responsable el M. C. Francisco Landeros (†), así como el personal que amablemente me ayudó con su experiencia y amable disponibilidad.

Mi más sincero agradecimiento para todas aquellas personas que me brindaron su amistad y apoyo a lo largo de este proceso.

A mi esposa Gabriela e hijos, Juan y Francisco, que compartieron todo este proceso conmigo. A mis Padres, Abuelos y hermanos que tanto estimo.

## CONTENIDO

	Página
LISTA DE CUADROS.....	vi
LISTA DE FIGURAS.....	vii
RESUMEN.....	x
ABSTRACT.....	xi
CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
CAPÍTULO II REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
2.1 Descripción de cedro rojo ( <i>Cedrela odorata L.</i> ).....	4
2.2 Sustratos.....	4
2.3 Fertilizantes de liberación controlada (FLC).....	7
2.3.1 Osmocote.....	9
2.3.2 Multicote.....	9
2.3.3 Manejo de FLC en viveros forestales.....	10
CAPÍTULO III SUPERFICIES DE RESPUESTA PARA CARACTERÍSTICAS FÍSICAS EN LA ELABORACIÓN DE SUSTRATOS.....	12
3.1 RESUMEN.....	12
3.2 INTRODUCCIÓN.....	13
3.3 MATERIALES Y MÉTODOS.....	14
3.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	16
3.4.1 Espacio poroso total (EPT).....	17
3.4.2 Capacidad de aireación (CA).....	19

3.4.3 Agua fácilmente disponible (AFD).....	21
3.4.4 Agua difícilmente disponible (ADD).....	23
3.4.5 Agua de reserva (AR).....	25
3.5 CONCLUSIONES.....	27
CAPÍTULO IV EFICIENCIA DE FERTILIZANTES DE LIBERACIÓN CONTROLADA EN LA PRODUCCIÓN Y CALIDAD DE PLANTA EN VIVERO.....	28
4.1 RESUMEN.....	28
4.2 INTRODUCCIÓN.....	29
4.3 MATERIALES Y MÉTODOS.....	30
4.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	31
4.4.1 Variables morfológicas y distribución de biomasa.....	31
4.4.2 Atributos de calidad de la planta.....	35
4.5 CONCLUSIONES.....	38
CAPÍTULO V LITERATURA CITADA.....	39

## LISTA DE CUADROS

Cuadro	Descripción	Página
Cuadro 3.1.	Diseño de tratamientos de sustratos obtenidos de mezclas de materiales de acuerdo con la matriz “San Cristóbal”.....	15
Cuadro 3.2.	Propiedades físicas de los sustratos obtenidos de las mezclas de materiales optimizadas con la matriz “San Cristóbal”.....	17
Cuadro 4.1.	Significancia estadística ( $P \leq 0.05$ ) del efecto de fertilizante, tratamientos y dosis por fertilizante en el análisis de varianza en las plantas de <i>C. odorata</i> de 4 meses.....	33
Cuadro 4.2.	Significancia estadística ( $P \leq 0.05$ ) del efecto de fertilizante, tratamientos y dosis por fertilizante en el análisis de varianza de indicadores de calidad de planta de cedro rojo.....	37

## LISTA DE FIGURAS

Figura	Descripción	Página
Figura 3.1.	Efecto lineal negativo del tezontle y positivo del aserrín (A y B) y la interacción del tezontle con el compost (C) sobre el espacio poroso total del sustrato.....	18
Figura 3.2.	Superficie de respuesta para el espacio poroso total del sustrato con diferentes proporciones del tezontle, el aserrín y el compost.....	19
Figura 3.3.	Efecto lineal del tezontle y del aserrín (A y B), interacción del aserrín con el tezontle y con el compost (C y D) sobre la capacidad de aireación en el sustrato.....	20
Figura 3.4.	Efecto lineal del tezontle y el aserrín (A y B), interacciones del tezontle con el aserrín (C) y el tezontle con el compost (D) sobre el agua fácilmente disponible.....	22
Figura 3.5.	Efecto lineal de tezontle y de compost (A y B); de las interacciones del aserrín con el tezontle y con el compost (C y D) sobre el agua difícilmente disponible.....	24

Figura 3.6.	Efecto lineal del tezontle y el compost (A y B); interacciones del tezontle con el aserrín y el compost (C y D) sobre el agua de reserva en la mezcla.....	26
Figura 4.1.	Efecto de las dosis de fertilizante en el crecimiento promedio en altura y diámetro (A y B) de las plantas de <i>C. odorata</i> en vivero. Las medias con distinta letra son diferentes estadísticamente. La comparación fue entre los pares de dosis (Contrastes) y como tratamientos (Tukey $P \leq 0.05$ ).....	31
Figura 4.2.	Efecto de las dosis de fertilizantes en la distribución de la biomasa total, la aérea y la radical (A, B y C) de las plantas de <i>C. odorata</i> en vivero. Las medias con distinta letra son diferentes estadísticamente. La comparación fue entre los pares de dosis (Contrastes) y como tratamientos (Tukey $P \leq 0.05$ ).....	32
Figura 4.3.	Relación de nitrógeno y fósforo liberados in situ del Osmocote y el Multicote durante el ciclo de producción en vivero de <i>C. odorata</i> . Datos inéditos.....	34

Figura 4.4. Efecto de las dosis de Osmocote y Multicote en las variables de calidad Índice de esbeltez (A), relación peso seco aéreo y radical (B) e Índice de Dickson (C) de *C. odorata* en vivero. Las medias con distinta letra son diferentes estadísticamente. La comparación fue entre los pares de dosis (Contrastes) y como tratamientos (Tukey  $P \leq 0.05$ ).....

36

# PRODUCCIÓN DE PLANTA FORESTAL CON SUSTRATO ALTERNATIVO Y FERTILIZANTES DE LIBERACIÓN CONTROLADA

## RESUMEN

El acondicionamiento de sustratos con base en sus características físicas es factible. La nutrición de plantas en vivero con los fertilizantes de liberación controlada afecta el desarrollo y los índices de calidad de planta. El objetivo de este trabajo fue evaluar la respuesta de cedro rojo en un sustrato alternativo con fertilizantes de liberación controlada en condiciones de vivero. La selección del medio de cultivo se realizó mediante la optimización de mezclas de tezontle, aserrín y compost con base en la relación aire-agua. Los coeficientes de determinación obtenidos fueron: porosidad total (0.96), capacidad de aireación (0.59), agua fácilmente disponible (0.76), agua difícilmente disponible (0.83) y agua de reserva (0.49). Las plantas estuvieron por 4 meses en vivero y fueron fertilizadas con Osmocote® y Multicote®. Las variables analizadas en las plantas fueron: altura, diámetro de tallo, peso seco total, índice de Dickson, índice de esbeltez y la relación del peso seco aéreo y radical. Solo en la altura y el diámetro de planta se encontró efecto del fertilizante y la respuesta de ambas fue mayor con Osmocote Plus® que con Multicote®. Las plántulas mostraron mayor incremento en las variables de respuesta con las dosis intermedia y alta de ambos fertilizantes, no se encontró diferencia cuando fueron tratadas con la misma dosis de cada fertilizante. El diseño “San Cristóbal” redujo el tiempo de los ensayos para la optimización de mezclas. Es importante evaluar dosis inferiores y en contenedores más pequeños para lograr planta de menor tamaño y mayor calidad.

**Palabras clave:** dosis de fertilización, nutrición en vivero, cedro rojo.

# FOREST PRODUCTION PLANT WITH ALTERNATIVE SUBSTRATE AND CONTROLLED RELEASE FERTILIZERS

## ABSTRACT

The conditioning of substrates based on physical characteristics is achievable. The nutrition of plants in nursery with controlled fertilizer release affect development and plant quality indices. The aim of this study was to evaluate the response of red cedar in an alternative substrate with controlled fertilizer release under nursery conditions. The selection of the culture medium was performed by optimizing volcanic rock, sawdust and compost mixtures based on the air-water relationship. The coefficients of determination obtained were: total porosity (0.96), air capacity (0.59), easily available water (0.76), hardly water available (0.83) and water reserve (0.49). The plants were taken during four months in the nursery, and fertilized with Osmocote® y Multicote®. The variables analyzed in plants were: height, stem diameter, total dry weight, Dickson and slenderness index, and the ratio of foliage and root dry weight. Only in the height and diameter of plant fertilizer effect it was found and the response was greater with Osmocote® both with Multicote®. Seedlings showed greater increase in the response variables with intermediate and high levels of both fertilizers and no difference was found when treated with the same level of each fertilizer. The design "San Cristobal" reduced the time trials for the optimization of mixtures. It is important to evaluate lower dosages and smaller plant containers to achieve smaller size and higher quality plants.

**Keywords:** fertilization rates, nutrition nursery, red cedar.

## **CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN GENERAL**

Los viveros han recobrado un papel relevante como depositarios y proveedores de plantas (Benítez *et al.*, 2002). La plántula forestal requiere de un manejo adecuado en el vivero y en tal sentido, la selección del medio de cultivo y la fertilización juegan un papel importante para obtener planta de calidad. La decisión de emplear cualquier tipo de sustrato no debe recaer solamente en su valoración económica sin considerar sus propiedades físicas y químicas, ya que será el soporte físico de la planta en las primeras etapas del desarrollo fisiológico (Sánchez-Córdova *et al.*, 2008).

El empleo generalizado de sustratos artificiales pobres en contenido nutritivo, pero adecuados por sus características físico-químicas y estructurales, hace que el aporte del fertilizante sea la fuente fundamental de nutrimentos, lo cual permite controlar adecuadamente la disponibilidad de elementos minerales para la planta durante el cultivo.

De los materiales comúnmente usados para sustratos ha sido la turba de musgo (*Sphagnum sp.*) conocida como “peat moss”, sin embargo la producción de planta en países no productores de turba, junto con su dudosa disponibilidad futura, ha tenido como consecuencia la búsqueda de nuevos materiales que se pueden utilizar como sustratos de cultivo (Terés, 2000). Ante este panorama, se han utilizado otros materiales como sustrato, por ejemplo la perlita, la vermiculita, el tezontle, la piedra pómez, la corteza de pino y el aserrín, entre otros. El empleo de estos ha sido por separado o en mezclas.

La fertilización es de las más importantes prácticas culturales para obtener planta de calidad, especialmente en las plántulas producidas en contenedores, en la cual, el volumen limitado obstaculiza seriamente su desarrollo (Landis, 1989), asimismo, una buena o mala nutrición puede acelerar o retrasar el desarrollo de las plantas, tanto de su parte aérea como radical; puede alterar la composición nutritiva de los tejidos, con efectos sobre el nivel de reservas, la capacidad de arraigo, la resistencia al estrés hídrico o la resistencia al frío y a enfermedades (Landis, 1985; Malik and Timmer, 1998; Grossnikle, 2000). En definitiva, puede afectar a todos los atributos de calidad que tradicionalmente se consideran en la caracterización de la planta forestal, muchos de ellos decisivos en el éxito de las repoblaciones realizadas en condiciones estacionales rigurosas.

Los fertilizantes hidrosolubles son los de mayor uso en los viveros forestales, actividad que demanda personal capacitado y equipos de riego sofisticados para la fertirrigación. Durante la aplicación del fertilizante en las plantas se pierde hasta el 30% de los mismos por el agua que cae en los pasillos y periferia del área de producción (Landis y Dumroese, 2009). Los fertilizantes de liberación controlada (FLC) utilizados en algunos viveros han favorecido una buena calidad de planta, además de la reducción en el costo de inversión y la simplificación en las labores de fertilización en las plantas. De acuerdo con Hasse *et al.* (2007), el uso de los FLC para intensificar la producción de planta forestal en el vivero va en aumento.

En este contexto, se experimentó la producción de planta de cedro rojo (*Cedrela odorata* L.) en vivero con un sustrato optimizado (tezontle, aserrín y lombricompost), además del manejo nutricional con FLC (Osmocote Plus 4-5® y Multicote 4®). El objetivo general de este trabajo consistió en evaluar la respuesta de planta forestal en condiciones de vivero en un sustrato

alternativo con fertilizantes de liberación controlada. Para cumplir con este propósito se plantearon dos objetivos particulares: 1) identificar el efecto de mezclas de materiales sobre la fracción que proporciona agua y aire a la planta; y 2) seleccionar un sustrato alternativo y evaluar la eficiencia de fertilizantes de liberación controlada sobre el desarrollo y los atributos de la calidad de planta del cedro rojo (*Cedrela odorata* L.) en vivero. La hipótesis general fue que el tipo de fertilizante y las propiedades físicas del sustrato no afectan el desarrollo de la planta en vivero. Asimismo, las hipótesis particulares fueron 1) las propiedades físicas de al menos un sustrato son favorables para establecer planta forestal en vivero; y 2) existe diferencia en la respuesta morfológica y la calidad de planta del cedro rojo respecto a la cantidad y tipo de fertilizante.

La presente tesis se estructuró en capítulos, donde los resultados se muestran a partir del Capítulo III con la optimización de mezclas de materiales en las características de liberación de humedad a diferentes tensiones. Asimismo, la respuesta de las plantas en la fase de vivero con FLC se discute en el Capítulo IV.

## **CAPÍTULO II. REVISIÓN DE LITERATURA**

### **2.1 Descripción de cedro rojo (*Cedrela odorata* L.)**

El cedro rojo es una especie que crece en selvas altas y medianas perennifolias que se distribuyen en la vertiente del Golfo de México, desde el sur de Tamaulipas y sureste de San Luis Potosí hasta la Península de Yucatán. En la vertiente del Pacífico, este crece desde Sinaloa hasta Guerrero y desde la Depresión Central hasta la Costa de Chiapas. La especie alcanza su máximo tamaño e incrementos en áreas con precipitaciones que van de los 2 500 a 4 000 mm anuales (Pennington y Sarukhán, 1998). También se adapta en bosques húmedos deciduos donde la precipitación va de 1 200 a 1 800 mm, de 4 a 5 meses secos y en altitudes de 0 a 1 200 m; es una especie que exige suelos profundos con buen drenaje y aireación (Gordillo, 2000).

*C. odorata* es una especie que ha ganado suma importancia en la reforestación por su fácil propagación y rápido crecimiento (Alderete *et al.*, 2010). De acuerdo con la CONAFOR (2015), 177 216 ha de plantaciones forestales comerciales (PFC) fueron establecidas en el periodo 2000 – 2014, de las cuales el 20.51 % de esta área fue del cedro rojo. Asimismo, los estados con mayor superficie establecida fueron Veracruz, Campeche y Chiapas (58.25 % del área total).

### **2.2 Sustratos**

El término sustrato se aplica a todo material sólido distinto del suelo natural, de síntesis o residual, mineral u orgánico, que colocado en un contenedor, en forma pura o en mezcla, permita

el anclaje del sistema radicular, y puede intervenir (material químicamente activo) o no (material inerte) en el proceso de la nutrición mineral de la planta (Abad *et al.*, 2004).

En los últimos años se ha utilizado como sustrato principal en muchos viveros de México una mezcla de turba, perlita y vermiculita (60:30:10) en la producción de planta forestal en contenedor (Sánchez-Córdova *et al.*, 2008). El uso generalizado de la turba como sustrato, trae como consecuencia que los costos de producción se eleven considerablemente, debido a que el producto se importa de otros países.

Una alternativa viable consiste en el empleo de materiales locales de mayor accesibilidad y más económicos. Sin embargo, en ocasiones no reúnen por sí solos las características óptimas para la planta, por lo cual será necesario mezclar dos o más materiales. En la selección apropiada del medio de cultivo es importante considerar las propiedades físicas, ya que juegan un papel importante en el desarrollo fisiológico de la planta y una vez establecido el cultivo difícilmente pueden manipularse (Abad *et al.*, 2004; Blok *et al.*, 2008; Sánchez-Córdova *et al.*, 2008).

Obtener mezclas de sustratos no resulta sencillo y por lo general se obtienen por el método de “prueba y error” (acierto y error), es decir, se realizan mezclas de materiales conocidos y se seleccionan aquellas que presentan las mejores características de las plantas producidas (Burés, 1997; Zamora *et al.*, 2005). Con este enfoque se han realizado diversos estudios (Melgar y Pascual, 2010; Aklibasinda *et al.*, 2011; Gungor y Yildirim, 2013); y en otros se han propuesto metodologías estadísticas: en arreglos factoriales (González *et al.*, 2011; Cruz *et al.*, 2012), programación lineal (Zamora *et al.*, 2005; Vargas *et al.*, 2008; Cruz *et al.*, 2010), regresión no

lineal (Díaz y Requejo, 2012) y modelos logarítmicos (Terés *et al.*, 2007). Otras técnicas de optimización, como los métodos de superficie de respuesta (MSR), no se han reportado para evaluar sustratos.

La investigación en medios de cultivo para viveros forestales, se ha enfocado en materiales que se pueda tener acceso de manera local y así poder sustituir el uso de la turba como sustrato. El aserrín es un subproducto de la industria forestal que se ha utilizado como sustrato de cultivo durante los últimos 25 años, debido a que con un buen manejo puede competir con otros materiales usados como sustratos, que comparativamente tienen disponibilidad limitada (handreck y Black, 2005; Raviv y Lieth, 2008).

Reyes *et al.* (2005) evaluaron la producción de *Pinus pseudostrobus* var. *Apulcesis* con mezclas de aserrín al 80 % y el 20 % restante ya sea con tierra de monte, corteza de pino, vermiculita, turba o perlita. Encontraron que el desarrollo y calidad de las plantas se favoreció más con la mezcla del aserrín y la turba.

Sánchez-Córdova *et al.* (2008) en la combinación de aserrín y corteza (4:1 v/v) encontraron características físicas semejantes a la mezcla de turba, perlita y vermiculita (6:3:1 v/v) y puede utilizarse para la producción de plantas en contenedores.

Mateo *et al.* (2011) combinaron 70 % de aserrín con 30 % de la mezcla de turba, perlita y vermiculita (6:3:1 v/v) y determinaron que el crecimiento y desarrollo de plántula de cedro rojo se favoreció en la mezcla cuando hubo mayor cantidad de fertilizante aplicado.

Aklibasinda *et al.* (2011) en *Pinus sylvestris* evaluaron la respuesta morfológica y de distribución de biomasa en mezclas de piedra pómez, cascarilla de arroz y turba con diferentes proporciones. Encontraron mayor desarrollo en las combinaciones de turba con cascarilla respecto a las demás mezclas, asimismo, los mejores resultados se obtuvieron cuando en el sustrato estuvo presente la turba entre 80 y 90 %.

Romero *et al.* (2012) sustituyeron la turba con la cáscara de nuez en mezclas con perlita y vermiculita, y se compararon contra la mezcla testigo, que llevaba peat moss en su composición. La respuesta de las variables evaluadas fue semejante con o sin la sustitución de la turba por cáscara de nuez en proporción de 33 %.

Ordaz y Ávila (2013) en plántula de *C. odorata* evaluaron 11 sustratos con diferentes proporciones de tezontle, aserrín y composta que fueron optimizadas con el diseño “San Cristóbal”. La respuesta en la altura de planta se vio favorecida por altas proporciones del aserrín en la mezcla respecto a los otros materiales.

### **2.3 Fertilizantes de liberación controlada (FLC)**

La industria de los fertilizantes enfrenta un permanente cambio para mejorar la eficiencia de sus productos. Esto se realiza ya sea a través del mejoramiento de los fertilizantes ya en uso o por el desarrollo de nuevos tipos específicos de fuentes de nutrición (Trenkel *et al.*, 1988; Maene, 1995; Trenkel, 1997). Una vía posible para esta mejora es el uso de los llamados “abonos

inteligentes”, que liberan los nutrientes de acuerdo a los requerimientos de las plantas o hasta que las plantas lo requieran (Trenkel, 1997).

Shoji y Gandeza (1992) consideran que un fertilizante ideal debe tener por lo menos las tres características siguientes:

- a) Solo requiere una aplicación en toda la temporada de cultivo para suministrar la cantidad de nutrientes para el crecimiento óptimo de las plantas.
- b) Que tiene un alto porcentaje de recuperación del fertilizante con el fin de lograr un mayor retorno a la entrada de la producción.
- c) Con efectos perjudiciales mínimos al suelo, agua y atmósfera.

Los fertilizantes de liberación controlada (FLC) cumplen estos requisitos en una medida considerable para su uso potencial. Sin embargo, hay que tomar en cuenta que los errores en campo y manejo de los cultivos no pueden ser compensados por la usanza de este tipo especial de fertilización.

La finalidad de los FLC es la entrega de los nutrientes a una tasa que coincida con la demanda de la planta, sin embargo, el comportamiento de liberación es variable según el producto y depende de los niveles de humedad del suelo, la temperatura y/o la actividad microbiana (Rose *et al.*, 2004).

Los FLC recubiertos con polímeros son considerados los de mayor avance tecnológico debido a su alta eficiencia del aporte nutrimental y la duración del producto con respecto a los fertilizantes convencionales e hidrosolubles de rápida entrega (Fan *et al.*, 2004; Rose *et al.*, 2004; Landis y Dumroese, 2009), asimismo, minimizan las pérdidas por lixiviación y contaminación del suelo.

En la actualidad, los fabricantes de FLC comercializan presentaciones con diferentes contenidos nutrimentales y períodos de liberación, desde 3 meses hasta 2 años. Incluso fertilizantes específicos por tipos de cultivo como agrícolas, frutícolas, ornamentales y forestales. Para este último grupo es posible encontrar productos tales como Osmocote Plus® y Multicote®.

### **2.3.1 Osmocote**

Este producto es manufacturado por O. M. Scotts Company (anteriormente por Grace Sierra Horticultural Products Company) y ha sido utilizado por décadas en diversos sectores agropecuarios. La tecnología de cubierta de resina involucra un fertilizante central soluble, cubierto por un polímero termosensible de dicitlopentadieno de hidrocarbano (Goertz, 1993). En el mercado existe una serie de fertilizantes Osmocote® con gran variabilidad en la tasas de entrega.

### **2.3.2 Multicote**

Este producto es manufacturado por Haifa Chemicals Ltd. Israel y corresponde al grupo que son recubiertos con poliuretano, los gránulos de fertilizante se calientan en un recipiente giratorio y

se tratan con un ácido graso e hidróxido de metal. Está creado a partir de capas reactivas en las cuales los monómeros son polimerizados a medida que entran en contacto con el sustrato. La liberación del fertilizante ocurre por difusión osmótica y se encuentra controlada por el grosor de la capa que cubre el fertilizante. A este grupo de materiales se consideran menos reactivos a temperaturas extremas porque el poliuretano se mantiene rígido, intacto y no se expande (Goertz, 1993; Trenkel, 1997).

### **2.3.3 Manejo de FLC en viveros forestales**

Dentro de la investigación referente a la producción de plantas en vivero, en diferentes especies forestales se han obtenido logros relevantes con el uso de FLC.

En un experimento con plantas de *Pinus jeffreyi* a raíz desnuda se fertilizaron con Sierra® 16-6-10, High N® 24-4-7 y Osmocote ® 17-7-12, posteriormente se evaluaron en campo y se encontró que el Osmocote® favoreció el crecimiento de la planta, a diferencia de los otros dos materiales donde la respuesta fue mínima y además, con altas dosis de aplicación indujeron una elevada mortalidad (Walker, 1999).

Reddell *et al.* (1999) en *Gmelina arborea* y *Acacia mangium* desde condiciones de vivero y hasta la edad de 14 meses, evaluaron una mezcla de Nutricote® 16-4.4-8.3 con diferente tasa de liberación de nutrimentos (de 4 a 5 meses y de 6 a 9 meses). Al final del estudio, encontraron que las plantas con FLC superaban en 100 % en la altura y el volumen al testigo sin fertilizar.

Oliet *et al.* (2004) en un ensayo con plántula de *Pinus halepensis*, evaluaron la respuesta de esta especie con dos formulaciones de Osmocote® (9-13-18 y 17-10-10) con tres dosis (3, 5 y 7 g L<sup>-1</sup>). Los atributos morfológicos de las plantas mejoraron cuando se elevaron las dosis, independientemente de la formulación empleada.

Dumroese *et al.* (2005) evaluaron la respuesta de *Pinus palustris* a 44 mg N como fertilización base y a 66 mg N complementado con Polyon® 18-9-16. En las plantas que se adicionó el FLC tuvieron mayores incrementos respecto al testigo en las variables diámetro de tallo con 42 %, peso seco de la parte aérea con 87 % y de raíz 47 %.

En un estudio en vivero con las especies *Eucryphia cordifolia*, *Nothofagus dombeyi* y *Nothofagus nervosa*, Bustos *et al.* (2008) evaluaron diferentes dosis de Osmocote®. En *N. nervosa* la respuesta fue satisfactoria en el peso seco de tallo y hojas con la dosis de 5 kg m<sup>-3</sup>, sin embargo, *E. cordifolia* y *N. dombeyi* requirieron mayor aporte nutrimental, pues los mejores resultados fueron con la dosis alta (7 kg m<sup>-3</sup>).

## **CAPÍTULO III. SUPERFICIES DE RESPUESTA PARA CARACTERÍSTICAS FÍSICAS EN LA ELABORACIÓN DE SUSTRATOS**

### **3.1 RESUMEN**

Diversos materiales se utilizan como sustratos pero separados no reúnen todas las características óptimas para la planta; por esto se formulan mezclas en proporciones diferentes. El propósito de este estudio fue evaluar mezclas de materiales y su relación con las características físicas que integran la curva de liberación de agua. Se utilizó el diseño experimental “San Cristóbal”, el cual es una metodología de superficie de respuesta que modeló el comportamiento del tezontle, el aserrín y el compost en 11 mezclas a través de regresión multilínea. Los coeficientes de determinación de los modelos estadísticos para cada punto de la curva de liberación de agua fueron: espacio poroso total (0.96), capacidad de aireación (0.59), agua fácilmente disponible (0.76), agua difícilmente disponible (0.83) y agua de reserva (0.49). Los modelos manifestaron un comportamiento lineal e interacción para todos los componentes de la curva. Estos puntos se representaron en superficies de respuesta y se detectó que el tezontle afectó la capacidad de aireación y el agua de reserva; y el aserrín, el espacio poroso total, el agua fácilmente disponible y el agua de reserva; el compost se relacionó con el agua difícilmente disponible. El diseño “San Cristóbal” permitió identificar la influencia de los materiales en los componentes de la curva de liberación de agua y redujo el tiempo de los ensayos para la optimización de sustratos.

**Palabras clave:** relación agua-aire, medios de cultivo.

### 3.2 INTRODUCCIÓN

Existen materiales diversos, aptos para sustrato, aunque raramente reúnen por sí solos las características físicas adecuadas de relación agua-aire. En la mayoría de los casos será necesario mezclarlos con uno o más materiales, para ajustarlos a las condiciones apropiadas que las plantas requieren (Abad *et al.*, 2004; Cruz *et al.*, 2010). Generalmente, las proporciones para preparar las mezclas se establecen arbitrariamente y la mezcla mejor se selecciona en dependencia de la respuesta del cultivo (acierto y error); es decir, actualmente no se realiza una optimización previa de las mezclas (Zamora *et al.*, 2005). Con este enfoque se han realizado diversos estudios (Melgar y Pascual, 2010; Aklibasinda *et al.*, 2011; Gungor y Yildirim, 2013); y en otros se han propuesto metodologías estadísticas: en arreglos factoriales (González *et al.*, 2011; Cruz *et al.*, 2012), programación lineal (Zamora *et al.*, 2005; Vargas *et al.*, 2008; Cruz *et al.*, 2010), regresión no lineal (Díaz y Requejo, 2012) y modelos logarítmicos (Terés *et al.*, 2007). Otras técnicas de optimización, como los métodos de superficie de respuesta (MSR), no se han reportado para evaluar sustratos. Este procedimiento se ha aplicado con éxito en disciplinas diversas como la agricultura, las ciencias biológicas, la ingeniería química y el desarrollo de productos alimenticios, en las que se han modelado los efectos de los niveles de componentes y disminuir el número de ensayos que se llevan a cabo (Rossi, 2001; Briones y Martínez, 2002; Villar *et al.*, 2007). La superficie de respuesta permite que el investigador inspeccione, de manera visual, la respuesta para cierta zona de niveles de los factores de interés y evaluar la sensibilidad a los factores de tratamiento y la ecuación de respuesta estimada permitirá localizar un punto estacionario que quizá sea un máximo, un mínimo o una deflexión en la superficie (Kuehl, 2001). Existen varios MSR, entre ellos el compuesto central modificado por Rojas

(1962) (diseño “San Cristóbal”), que reduce el número de tratamientos del arreglo factorial con tres o más factores y, además, permite una representación multidimensional de las combinaciones de factores. Las características principales del diseño son: a) el número mínimo necesario para cumplir el objetivo del análisis de los efectos individuales de cada factor y sus interacciones (Kuehl, 2001), b) su poder mayor de precisión en los estimadores y c) facilidad de ajuste del polinomio cuadrático (Cochran y Cox, 1990). La presente investigación, tuvo como objetivo utilizar el diseño “San Cristóbal” para modelar el comportamiento de mezclas de tezontle, aserrín y compost sobre la porosidad total del sustrato obtenido y su relación con la fracción que proporciona agua y aire.

### **3.3 MATERIALES Y MÉTODOS**

Se utilizó tezontle, aserrín y compost como material en cuatro proporciones cada uno y se realizaron mezclas mediante la matriz de distribución de tratamientos “San Cristóbal” (Rojas, 1962; Martínez, 1988). Estos se caracterizaron a través de su análisis físico, que incluyó la determinación de espacio poroso total (EPT) y los componentes de la curva de liberación de agua como: capacidad de aireación (CA), agua fácilmente disponible (AFD), agua de reserva (AR) y agua difícilmente disponible (ADD). Se utilizó la metodología de análisis de sustratos propuesta por De Boodt *et al.* (1974) y Ansorena (1994).

Los factores representados en los ejes fueron: en el eje “x”, tezontle (T); en el eje “y”, aserrín (A); y en el eje “z”, compost (C). Cada punto correspondió a la conjunción de tres de los cuatro niveles de factores incluidos en el diseño (0, 1, 2 y 3). Las combinaciones elegidas entre todas las

posibles fueron: 1) un factorial completo del tipo  $2^p$ , donde se ubicaron los niveles 1 y 3 de cada factor (T, A y C); 2) el punto central (nivel 1 de los tres factores) y los  $p$  puntos axiales 3:1:1, 1:3:1 y, 1:1:3. Las combinaciones de materiales en cantidad se transformaron a proporción de volumen de cada material para el análisis estadístico (Cuadro 3.1).

Cuadro 3.1. Diseño de tratamientos de sustratos obtenidos de mezclas de materiales de acuerdo con la matriz “San Cristóbal”.

Tratamientos	Material (L)			Volumen (%)		
	T§	A	C	T	A	C
1	1	1	1	0.33	0.33	0.33
2	1	1	2	0.25	0.25	0.50
3	1	1	3	0.20	0.20	0.60
4	1	2	1	0.25	0.50	0.25
5	1	3	1	0.20	0.60	0.20
6	1	3	3	0.14	0.43	0.43
7	2	1	1	0.50	0.25	0.25
8	3	1	1	0.60	0.20	0.20
9	3	1	3	0.43	0.14	0.43
10	3	3	1	0.43	0.43	0.14
11	1	1	0	0.50	0.50	0.00

§T = tezontle; A = aserrín; C = compost.

El modelo matemático del diseño San Cristóbal es una función de regresión que obedece a un arreglo factorial fraccionado.

$$Y = b_0 + b_1T + b_2A + b_3C + b_4T^2 + b_5A^2 + b_6C^2 + b_7TA + b_8TC + b_9AC$$

donde:

$Y$  = característica que se desea estimar, en función de tezontle, aserrín y compost (T, A y C)

$b_0$  = intercepto al origen; la estimación de  $Y$  debida al nivel 0 de cada factor ( $T = A = C = 0$ )

$b_1, b_2, y b_3$ , estimadores de los efectos lineales de T, A y C, respectivamente

$b_4, b_5, y b_6$ , estimadores de los efectos cuadráticos respectivos

$b_7, b_8, y b_9$ , estimadores de las interacciones de primer orden entre los factores

En este modelo no existen interacciones de segundo orden.

Para el análisis estadístico, se utilizó el modelo general de regresión descrito arriba. Para crear distintas funciones de respuesta, se utilizó el procedimiento REG del paquete Statistical Analysis System SAS 9.0 (SAS Institute Inc., 2002). Una vez especificado el modelo inicial, se examinó si todos los términos o variables que formaban parte del mismo debían incluirse en la ecuación final de regresión y compararlos, en respuesta a funciones lineales, cuadráticas o interacción. Aunque existen diferentes métodos de selección de variables explicativas en el modelo, este se ajustó por el procedimiento BACKWARD en un nivel  $\alpha \leq 0.1$ . Asimismo, con los paquetes estadísticos Design-Expert 9 (Stat-Ease, 2013) y Sigma Plot 10.0 (Systat Software, 2006) se modeló la variación tridimensional de las propiedades físicas en superficies de respuesta, que permitieron visualizar con facilidad el comportamiento del tezontle, el aserrín y el compost.

### **3.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Los Tratamientos 3, 5 y 8 se ubican en los puntos axiales 1:1:3, 1:3:1, y 3:1:1, respectivamente; se observó que los valores de la Mezcla 5 sobresalieron en EPT, AFD y AR, excepto en la respuesta de CA y ADD (Cuadro 3.2). Con la metodología propuesta se redujeron las combinaciones de 64 a solo 11 (17 % de posibilidades). Este dato es superior al 7 % que se

obtiene a través de programación lineal (Zamora *et al.*, 2005), pero inferior a 31.2 % cuando se utiliza regresión no lineal, propuesto por Díaz y Requejo (2012).

Cuadro 3.2. Propiedades físicas de los sustratos obtenidos de las mezclas de materiales optimizadas con la matriz “San Cristóbal.”

Mezcla	Combinación	Volumen (%)				
		ζEPT	CA	AFD	ADD	AR
1	1:1:1	70.7	13.6	8.6	32.8	15.8
2	1:1:2	71.9	26.0	2.2	35.1	8.6
3	1:1:3	70.6	20.0	14.4	34.6	1.7
4	1:2:1	71.5	19.8	15.6	29.5	6.6
5	1:3:1	75.4	18.6	22.2	27.5	7.2
6	1:3:3	74.9	17.6	23.2	31.8	2.3
7	2:1:1	66.7	26.5	10.1	25.9	4.1
8	3:1:1	63.5	24.6	11.3	25.8	1.7
9	3:1:3	68.5	33.3	7.0	26.1	2.1
10	3:3:1	68.5	18.7	15.9	29.4	4.5
11	1:1:0	66.4	26.7	16.7	20.4	2.6

ζEPT = espacio poroso total; CA = capacidad de aireación; AFD = agua fácilmente disponible; ADD = agua difícilmente disponible; AR = agua de reserva.

### 3.4.1 Espacio poroso total (EPT)

El análisis de varianza para el EPT mostró significancia del modelo general ( $p\text{-value} < 0.001$ ). El coeficiente de determinación explicó 96.4 % ( $R^2 = 0.96$ ) del comportamiento del EPT, asimismo, el CME resultó bajo (0.67). El modelo de regresión fue el siguiente:

$$EPT (\%) = 68.09 - 19.25T + 15.48A + 33.79TC$$

En la ecuación anterior se detectó que el EPT se derivó del efecto lineal del tezontle (negativo) y del aserrín (positivo), además de la interacción del tezontle con el compost.

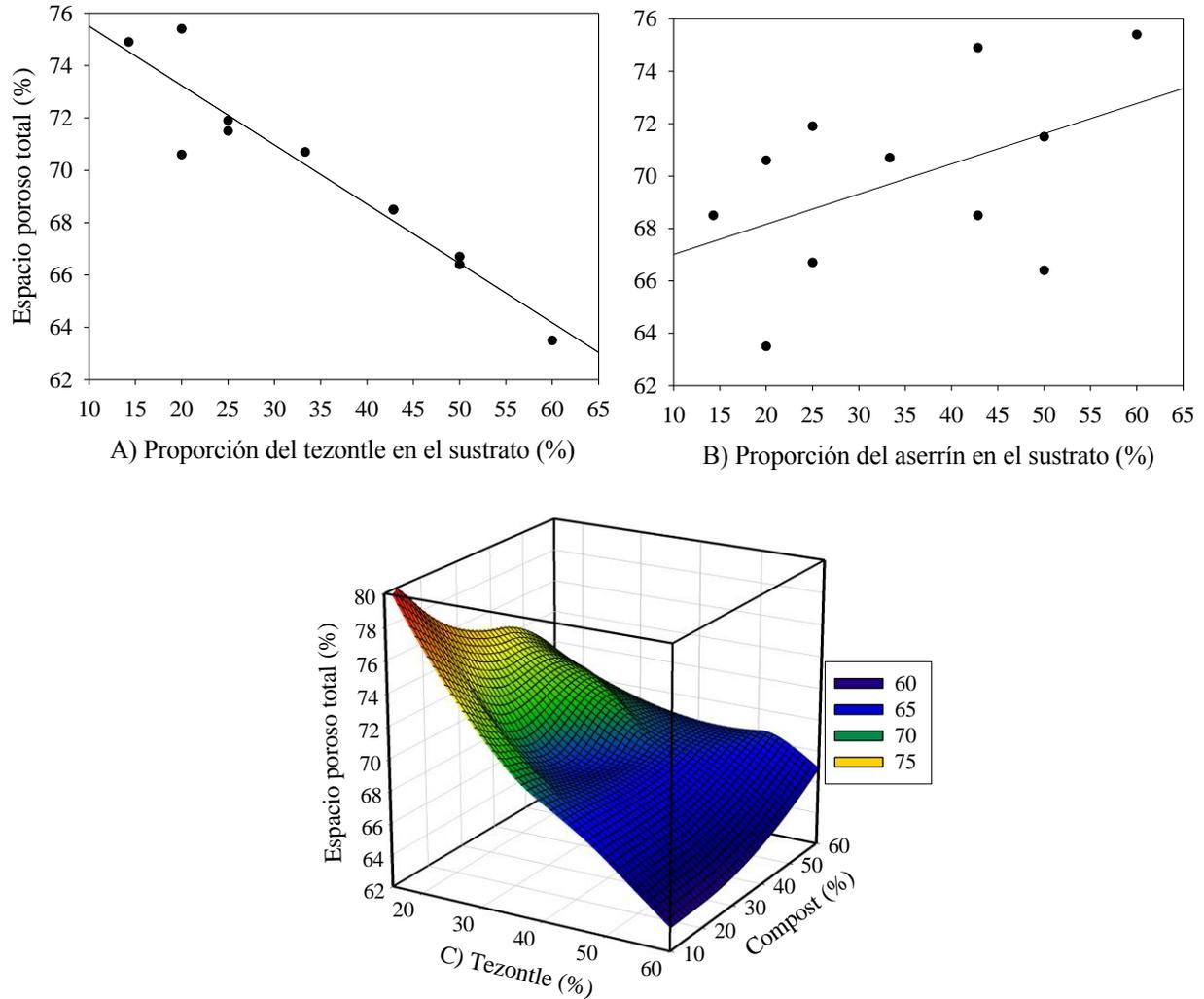


Figura 3 1. Efecto lineal negativo del tezontle y positivo del aserrín (A y B) y la interacción del tezontle con el compost (C) sobre el espacio poroso total del sustrato.

El EPT disminuyó cuando la proporción del tezontle aumentó de 14 a 60 % en el sustrato (Figura 3.1A) y en forma inversa si la proporción del aserrín se incrementó en la mezcla (Figura 3.1B). El EPT disminuyó cuando el tezontle predomina con respecto a otro material en la mezcla, por ejemplo con el aserrín (Pineda *et al.*, 2012), la perlita (Zamora *et al.*, 2005; Díaz y Requejo,

2012) y el compost (Cruz *et al.*, 2012). El EPT aumentó si tanto el tezontle como el compost en la mezcla son bajas y de similar cantidad (Figura 3.1C); el mayor EPT se obtuvo cuando estos dos materiales estuvieron en proporciones de 20 % cada uno en la mezcla.

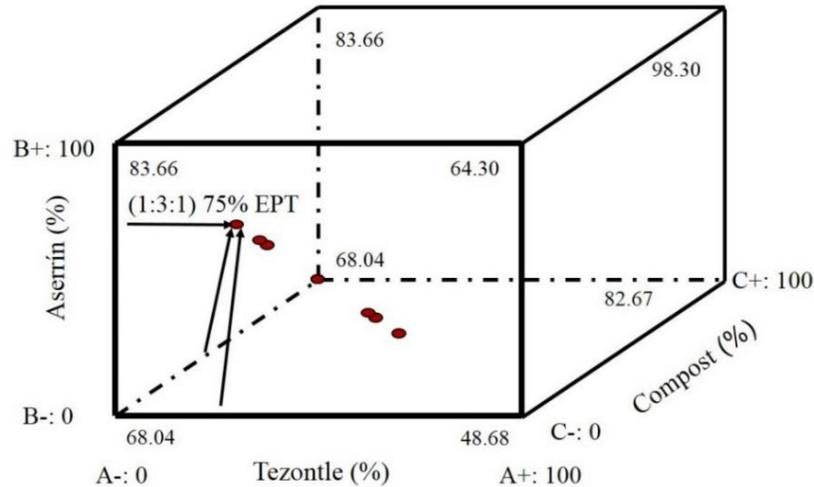


Figura 3.2. Superficie de respuesta para el espacio poroso total del sustrato con diferentes proporciones del tezontle, el aserrín y el compost.

El comportamiento del EPT detallado por la ecuación general en función del tezontle, el aserrín y el compost se representó en la superficie de respuesta tridimensional (Figura 3.2). Los vértices que correspondieron al 100 % de un material, indican el EPT de 48.68 % en el tezontle, 83.66 % en el aserrín y 68.04 % en el compost, valores similares reportaron Díaz y Requejo (2012); Pineda *et al.* (2012) y Zamora *et al.* (2005), respectivamente.

### 3.4.2 Capacidad de aireación (CA)

No se encontró diferencia estadística en el modelo ( $p\text{-value} = 0.187$ ). Sin embargo, la ecuación que mejor explicó la relación entre la CA y los componentes del sustrato obtuvo una  $R^2 = 0.59$  y  $CME = 21.23$ . Para esta variable, la ecuación de regresión fue la siguiente:

$$CA (\%) = 46.37 - 4.40T + 11.74A - 103.23TA - 162.04AC$$

Con base en la ecuación anterior, el comportamiento de la CA estuvo en función del efecto lineal del tezontle y el aserrín, además de las interacciones del aserrín con el tezontle y el compost.

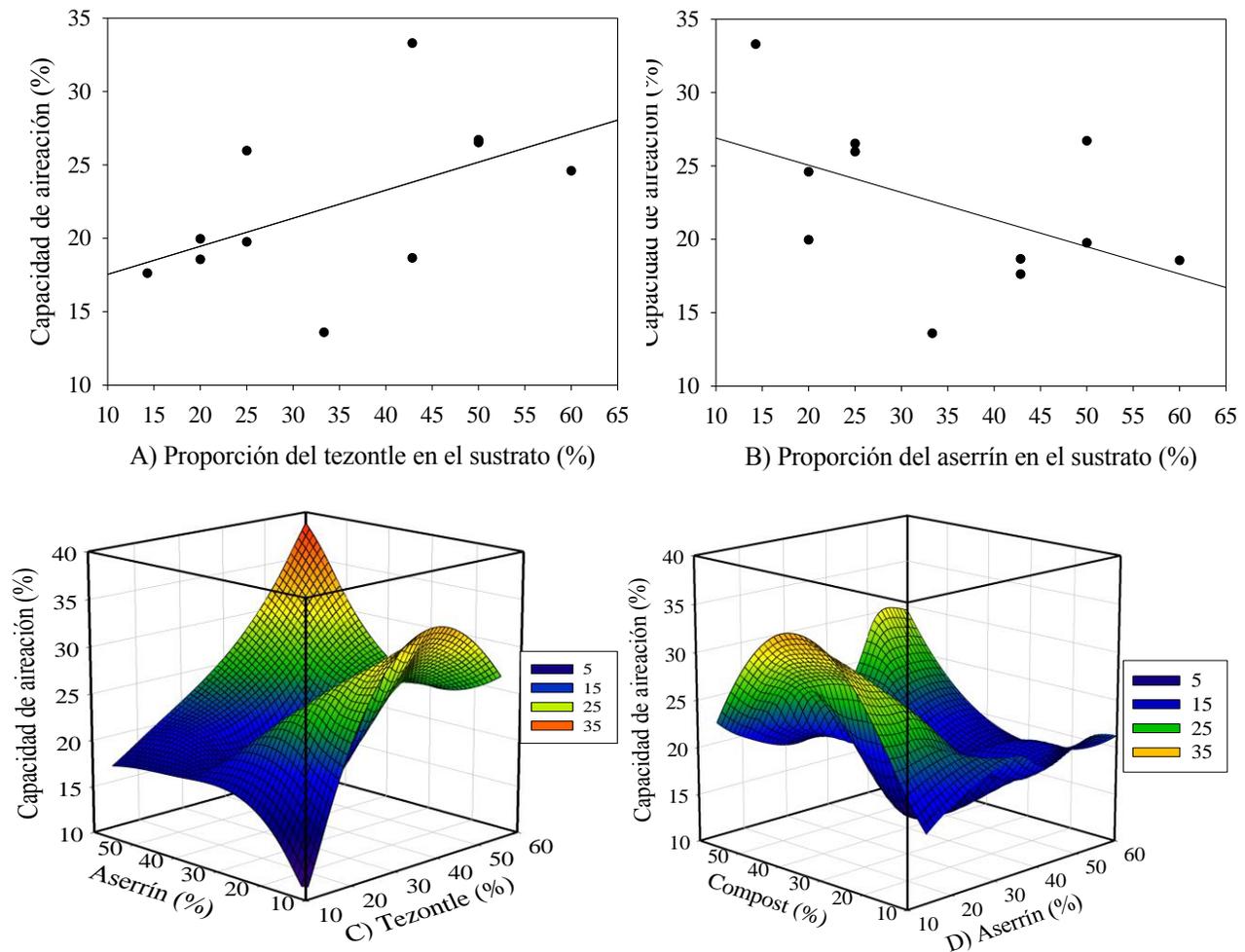


Figura 3.3. Efecto lineal del tezontle y del aserrín (A y B), interacción del aserrín con el tezontle y con el compost (C y D) sobre la capacidad de aireación en el sustrato.

La respuesta de la CA varió constantemente a diferentes niveles del tezontle en la mezcla. Cuando el tezontle aumentó entre 25 a 35 % la CA descendió hasta 10 % y remontó a 33 % cuando se agregó 45 % de este material (Figura 3.3A). El comportamiento de la CA en función del aserrín fue inverso respecto al tezontle; con cantidades de 15 % del aserrín el sustrato llegó a

33 % de la CA, pero cayó aproximadamente a 20 % cuando las proporciones oscilaron entre 40 a 60 % de este material (Figura 3.3B).

Las interacciones del aserrín con el tezontle y/o el compost presentaron un comportamiento afín. Si el aserrín contenido en el sustrato se mantiene entre 10 y 20 % y además las proporciones del tezontle del compost son elevadas, la CA aumentó exponencialmente hasta llegar a 30 % (Figura 3.3C y 3.3D). Se observó también que las proporciones altas y de igual magnitud de los tres materiales, promovieron el incremento del CA. La relación de 60 % del tezontle y/o el compost con 10 % del aserrín, resultó en la CA con alrededor de 30 %. Esta predisposición es similar a la reportada por Pineda *et al.* (2012) y Cruz *et al.* (2012), donde la CA de un sustrato de tezontle-aserrín o tezontle-compost aumentó cuando existe mayor cantidad del tezontle en la mezcla.

### **3.4.3 Agua fácilmente disponible (AFD)**

No se encontró diferencia estadística en el modelo de la AFD ( $p\text{-value} = 0.112$ ). Sin embargo, la ecuación de regresión explicó el 76.4 % de la variación del AFD y los componentes del sustrato ( $R^2 = 0.76$  y  $CME = 18.96$ ). El modelo propuesto fue el siguiente:

$$AFD (\%) = 33.31 + 32.36T + 30.85A - 188.25TA - 176.62TC - 46.58AC$$

La ecuación anterior muestra que el AFD estuvo en función del efecto lineal del tezontle y el aserrín, asimismo de las interacciones del tezontle con el aserrín y/o el compost y el compost con el aserrín

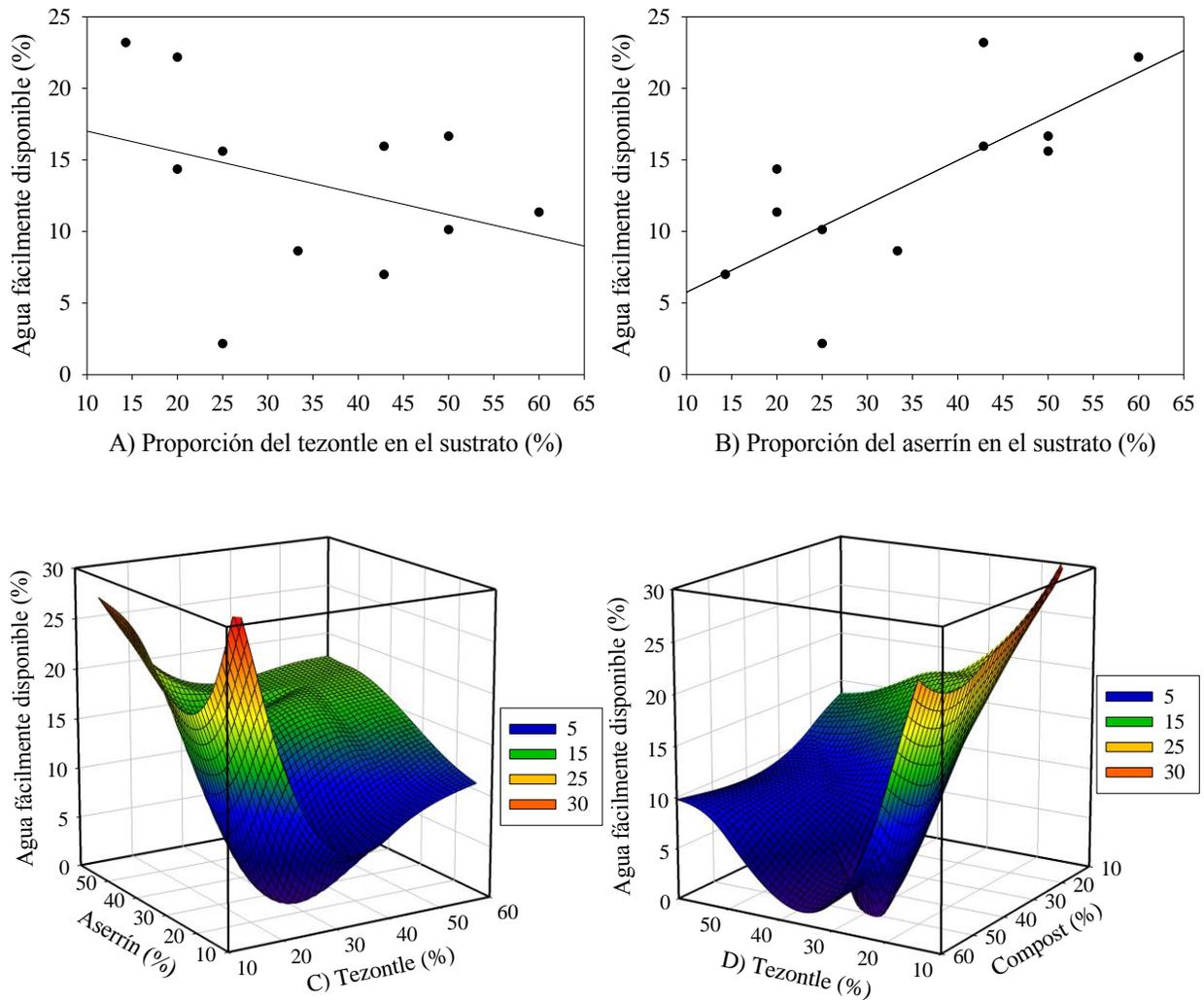


Figura 3.4. Efecto lineal del tezontle y el aserrín (A y B), interacciones del tezontle con el aserrín (C) y el tezontle con el compost (D) sobre el agua fácilmente disponible.

En la Figura 3.4A se observó el incremento del AFD cuando existió bajo contenido del tezontle en el sustrato: cantidades entre 15 y 20 % del tezontle aumentaron el AFD en alrededor de 24 %, pero si las proporciones fueron mayores el AFD osciló entre 8 y 15 %. En contraste al material anterior, mayor cantidad del aserrín en la mezcla acrecentó el porcentaje del AFD (Figura 3.4B); niveles de hasta 60 % de este material, incrementó el AFD arriba del 20 %. No obstante, el efecto lineal de aserrín fue afectado si el tezontle sobresale en la mezcla, es decir, el AFD

disminuyó por efecto de interacción (Figura 3.4B). Se observó también que si la cantidad del tezontle no supera el 20 % y además predomina el aserrín, el AFD no se redujo. La interacción del tezontle y el compost presentó igual comportamiento que la relación del tezontle y el aserrín (Figura 3.4C). Si el contenido del tezontle en la mezcla es igual o menor a 20 % y además se agrega mayor cantidad del compost respecto a este, el AFD puede llegar arriba de 20 %. Cuando se drena el sustrato, los poros que se mantienen llenos de agua son los de menor tamaño (Abad *et al.*, 2004), en este caso, una proporción mayor del aserrín favoreció el incremento del AFD.

#### **3.4.4 Agua difícilmente disponible (ADD)**

El análisis de varianza del ADD mostró significancia en el modelo general ( $p\text{-value} = 0.017$ ). El coeficiente de determinación explicó el 82.9 % ( $R^2 = 0.83$ ) del ADD con CME de 5.57. Se obtuvo el siguiente modelo de regresión:

$$ADD (\%) = -4.23 + 14.71T + 35.45C + 77.78TA + 92.66AC$$

La ecuación que explica el comportamiento del ADD estuvo en función del tezontle y el compost en el sustrato, además de las interacciones del aserrín con el tezontle y con el compost.

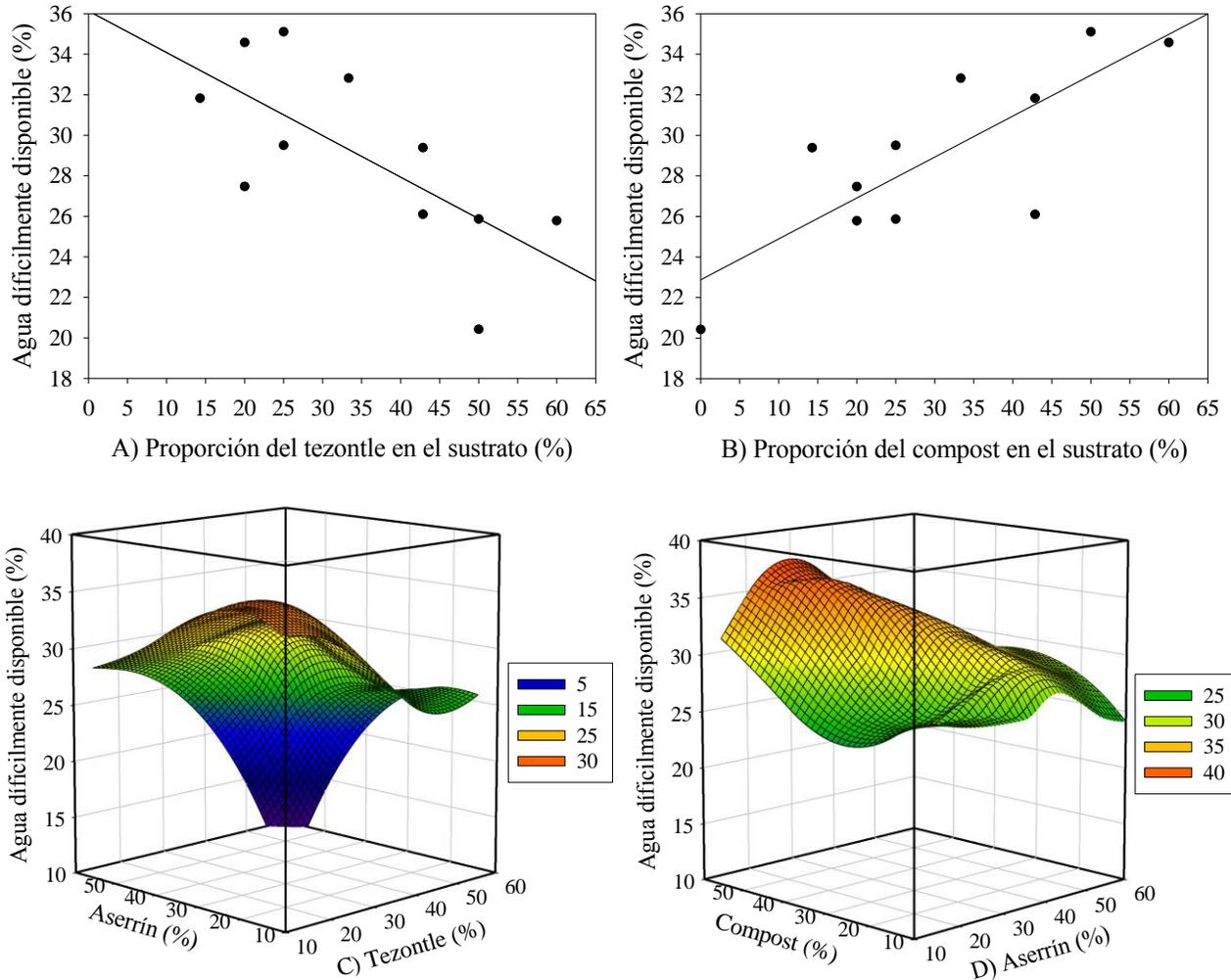


Figura 3.5. Efecto lineal de tezontle y de compost (A y B); de las interacciones del aserrín con el tezontle y con el compost (C y D) sobre el agua difícilmente disponible.

El ADD se mantuvo constante alrededor de 26 a 35 % cuando el tezontle se encontró en proporción entre 10 y 35 % de la mezcla, pero disminuyó en torno a 26 % si la cantidad del tezontle fue superior a 35 % en el sustrato (Figura 3.5A). Asimismo, el ADD llegó a 20 % en respuesta al tezontle y el aserrín en proporciones de 50% cada una, donde el compost no se incluyó en el sustrato (Mezcla 11) (Figura 3.5A y 3.5B). El incremento del ADD fue exponencial en función del compost cuando osciló entre 30 y 60 % en la mezcla, el ADD alcanzó valores

entre 32 y 35 %, excepto cuando es suprimido por la interacción con el tezontle o el aserrín (Figura 3.5B).

La interacción del tezontle y el aserrín en el sustrato indicó que en cantidades menores de 30 % de cada uno, el ADD se incrementó alrededor de 30 a 35 %; sin embargo, si en la mezcla se agregó entre 35 y 50 % de ambos, el valor del ADD descendió alrededor de 20 a 26 % (Figura 3.5C).

En la interacción del aserrín y el compost con predominancia del segundo, existió incremento del ADD hasta llegar a un tope de 35 % (Figura 3.5D). Sin embargo, existe un punto medio donde el ADD ascendió entre 32 y 35 % por efecto del aserrín cuando estuvo presente en alrededor de 20 a 40 % de la mezcla (una baja proporción de tezontle provocó este comportamiento, (Figura 3.5A y 3.5C). Asimismo, las cantidades altas y de igual magnitud (alrededor de 45 %) tanto del aserrín como del tezontle, redujeron el efecto lineal que ejerce el compost sobre el ADD del sustrato (Figura 3.5D). El nivel alto del ADD que tiene el compost y el nivel bajo del tezontle, coincide con lo reportado por Zamora *et al.* (2005). Abad *et al.* (2004) mencionan que este comportamiento ocurre por la diferencia del tamaño de poros en los materiales de textura gruesa y fina y la capacidad que tienen los microporos en la retención del agua.

#### **3.4.5 Agua de reserva (AR)**

En el modelo general no se encontró diferencia para el AR ( $p\text{-value} = 0.51$ ). Sin embargo, el modelo mejor ajustado obtuvo una  $R^2 = 0.49$  y  $CME = 18.18$ . La ecuación que explicó el comportamiento del AR fue la siguiente:

$$AR (\%) = -34.30 - 19.62T + 5.18A + 174.44TA + 162.52TC + 106.17AC$$

En la ecuación se observa el efecto lineal que ejercen el tezontle (negativo) y el aserrín (positivo) sobre el porcentaje del AR en el sustrato. Asimismo, las interacciones que incrementaron el AR del sustrato fueron del tezontle con el aserrín y/o el compost, y del aserrín con el compost.

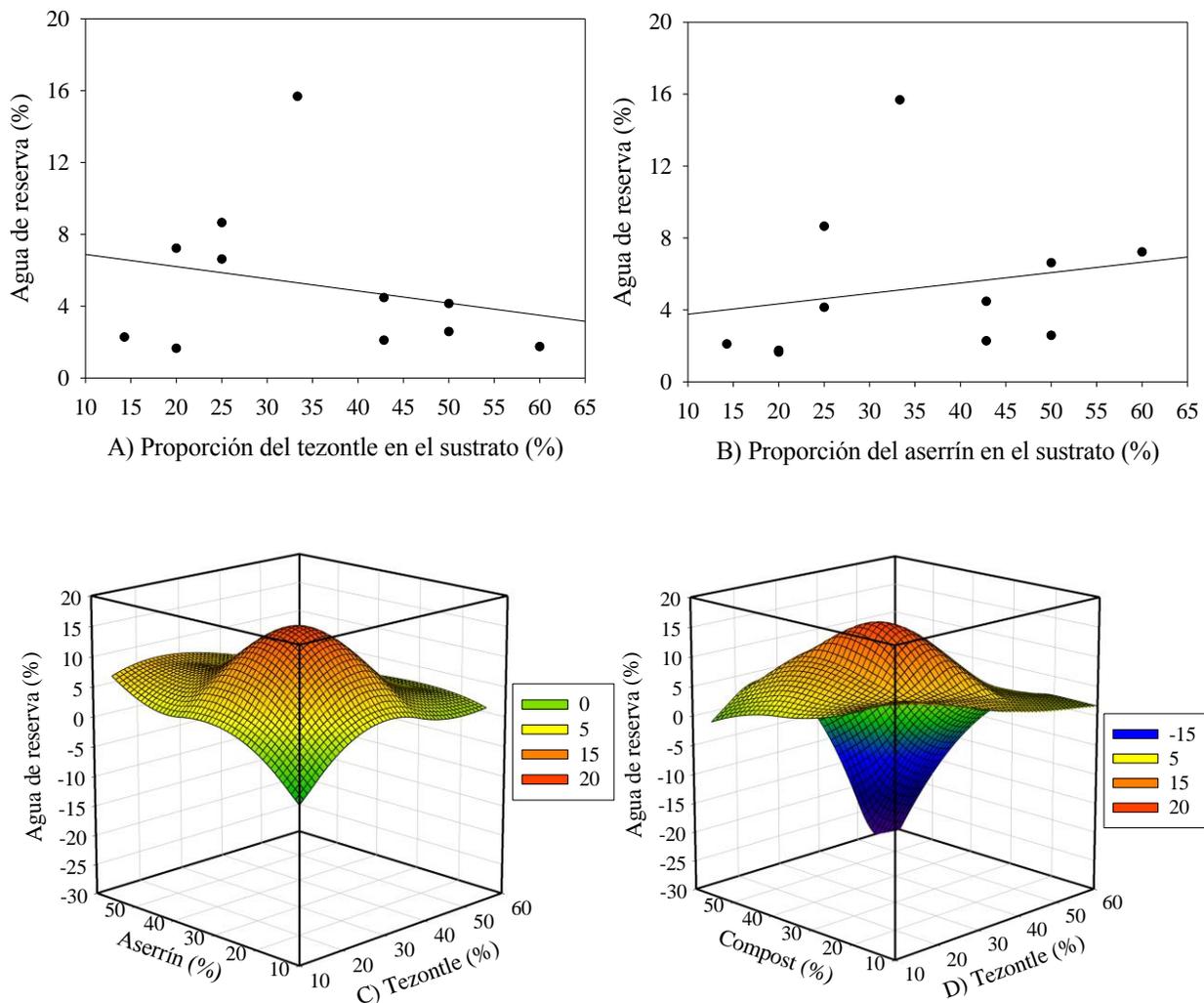


Figura 3.6. Efecto lineal del tezontle y el compost (A y B); interacciones del tezontle con el aserrín y el compost (C y D) sobre el agua de reserva en la mezcla.

En la Figura 3.6A y 3.6B se muestra el efecto inestable tanto del tezontle como del aserrín sobre el AR, donde se obtuvieron valores del AR entre 2 y 5 % en las mezclas con proporciones

alrededor a 15 y 50 % de cada material. Asimismo, ocurrió un efecto lineal estable sobre el AR cuando en ambos materiales se elevó la proporción de cada uno en la mezcla a 33 %, sin embargo, el incremento de dicha proporción en uno de los materiales y por efecto de interacción, propició el descenso del AR a niveles inferiores a 8 % (Figura 3.6C). La interacción del tezontle y el compost con cantidades superiores a 40 % de cada uno redujeron la respuesta del AR, sin embargo, con niveles de 30 % de cada material elevaron el AR hasta 15% (Figura 3.6D). Los valores bajos del AR en el compost y el tezontle concuerdan con lo reportado por Zamora *et al.* (2005).

### **3.5 CONCLUSIONES**

La metodología de superficie de respuesta ofrece un panorama amplio de los efectos de los materiales sobre las propiedades físicas de los sustratos; además permite identificar las interacciones que modifican el comportamiento lineal cuando aumentan o disminuyen los componentes. Las variables mejor explicadas por esta metodología fueron: el espacio poroso total, la capacidad de aireación y el agua fácil y difícilmente disponible.

El tezontle favoreció la aireación del sustrato, que mejora el intercambio gaseoso del medio; mientras que el aserrín se manifiesta positivamente en el espacio poroso total, el agua fácil y difícilmente disponible y el agua de reserva, que proporciona mayor cantidad de humedad para la planta. En el caso del compost aumenta la proporción del agua difícilmente disponible, sin embargo, es una reserva que evita la deshidratación del medio de cultivo.

El diseño “San Cristóbal” permitió identificar la influencia de los materiales en los componentes de la curva de liberación y redujo el tiempo de los ensayos para la optimización de los sustratos.

## **CAPÍTULO IV. EFICIENCIA DE FERTILIZANTES DE LIBERACIÓN CONTROLADA EN LA PRODUCCIÓN Y CALIDAD DE PLANTA EN VIVERO**

### **4.1 RESUMEN**

La producción de plantas forestales requiere de un adecuado aporte nutrimental y los fertilizantes de liberación controlada surgen como alternativa para eficientizar este proceso. El objetivo de la presente propuesta fue evaluar la eficiencia de dos fertilizantes de liberación controlada sobre el crecimiento y los atributos de calidad de planta del cedro rojo (*Cedrela odorata* L.) en vivero. Las plantas fueron cultivadas durante 4 meses en contenedores de 1 L usando como sustrato una mezcla de tezontle, aserrín y lombricompost (1:2:1 de v/v), en la cual se agregaron Osmocote® y Multicote® con tres dosis (3, 5 y 7 g L<sup>-1</sup> de sustrato). El diseño experimental fue completamente al azar. Las variables morfológicas analizadas fueron: altura de planta, diámetro de tallo y peso seco total de planta (aéreo y de raíz), así como los atributos de calidad: índice de Dickson, índice de esbeltez y la relación del peso seco aéreo y el radical. Solo en la altura y el diámetro de planta se encontró efecto del fertilizante y la respuesta de ambas fue mayor con Osmocote Plus® que con Multicote®. Las plántulas mostraron mayor incremento en las variables de respuesta con las dosis intermedia y alta de ambos fertilizantes (excepto en el índice de esbeltez). En las variables morfológicas y de calidad no se encontró diferencia cuando fueron tratadas con la misma dosis de cada fertilizante, excepto en el diámetro. En la distribución de la biomasa aérea y radical se observaron cambios, que alteraron los atributos de calidad de planta. Es importante evaluar dosis inferiores y en contenedores más pequeños para lograr planta de menor tamaño y mayor calidad.

**Palabras clave:** *Cedrela odorata*, Osmocote, Multicote.

## 4.2 INTRODUCCIÓN

El alto costo de los fertilizantes y el impacto en el ambiente ha motivado el interés de diseñar nuevos productos que logren mayor eficiencia en el cultivo (Castro *et al.*, 2006; Trenkel, 2010). De acuerdo con Hasse *et al.* (2007), el uso de fertilizantes de liberación controlada (FLC) para intensificar la producción de planta forestal en el vivero va en aumento. Los FLC recubiertos con polímeros son considerados los de mayor avance tecnológico debido a su alta eficiencia del aporte nutrimental y la duración del producto con respecto a los fertilizantes convencionales e hidrosolubles de rápida entrega (Fan *et al.*, 2004; Rose *et al.*, 2004; Landis y Dumroese, 2009); principalmente, el suministro de nutrimentos en forma gradual a las plantas en periodos prolongados con una sola aplicación, que reduce la probabilidad de causar toxicidad a las plantas y la pérdida por lixiviación y volatilización (Jacobs *et al.*, 2005; Hasse *et al.*, 2007; Baligar y Fageria, 2015). La finalidad de los FLC es la entrega de los nutrimentos a una tasa que coincida con la demanda de la planta, sin embargo, el comportamiento de liberación es variable según el producto y depende de los niveles de humedad del suelo, la temperatura y/o la actividad microbiológica (Rose *et al.*, 2004). La fertilización con los FLC puede conducir a la mejora de la eficiencia nutrimental tanto en el crecimiento como en la calidad de plántula forestal (Oliet *et al.*, 2004; Baligar y Fageria, 2015), sin embargo, cada especie responde de manera diferente a la adición de nutrimentos y por lo tanto, es necesario investigar la respuesta de las plantas de estas formulaciones antes de realizar aplicaciones a escalas mayores (Bustos *et al.*, 2008; Villar, 2003). Dentro de la investigación referente a la producción de plantas en vivero se han obtenido logros relevantes con FLC tales como Nutricote® (Reddell *et al.*, 1999), Osmocote® (Walker, 1999; Oliet *et al.*, 2004) y Apex® (Hasse *et al.*, 2007), entre otros. El objetivo del presente

trabajo fue evaluar la respuesta a dos tipos de fertilizantes de liberación controlada sobre el crecimiento y los atributos de calidad de planta en el cedro rojo (*Cedrela odorata* L.) en vivero.

#### **4.3 MATERIALES Y MÉTODOS**

El experimento se estableció en el mes de mayo de 2013 en condiciones de vivero, ubicado en la región de “Las Montañas” en el estado de Veracruz (latitud 19° 03’ 05’’ Norte, longitud 96° 58’ 16’’ Oeste, elevación de 1180 msnm (comunidad de Zacamitla, Mpio. de Ixhuatlán del Café, Veracruz). La semilla de cedro rojo se obtuvo del campo experimental El Palmar del INIFAP; fue sembrada en bolsas de polietileno calibre 400 con capacidad de 1 L. Como sustrato se utilizó la mezcla de tezontle, aserrín y lombricompost en relación (v/v) de 1:2:1. Los tratamientos consistieron en mezclas por litro de sustrato con 3, 5 y 7 g de los FLC: a) Osmocote Plus 4-5® 15-9-12 (O. M. Scotts Co.) y b) Multicote 4® 18-6-12 (Haifa Chemicals Ltd.). Se manejaron seis tratamientos con cinco repeticiones de 16 plantas (30 unidades experimentales) completamente aleatorizados en el vivero. Las plantas, a 4 meses de establecidas fueron evaluadas mediante altura de planta (AP), diámetro de tallo (DT), peso seco total de planta (PSP), así como el peso seco de la parte aérea (PSA) y el peso seco de raíz (PSR). Además las variables de calidad de planta fueron calculadas a través del índice de esbeltez (IE), la relación de peso seco aéreo y radical (RAR) e índice de Dickson (ID). Para normalizar los datos y homogeneizar las varianzas se aplicaron transformaciones logarítmicas natural y raíz cuadrada, dependiendo del caso, excepto en AP y DT. El análisis de varianza se realizó con el paquete Statistical Analysis System SAS 9.0 (SAS Institute, 2002) con los modelos completamente al azar y en arreglo factorial jerárquico (formulaciones anidadas en los fertilizantes) (Kuehl, 2001). Se realizó la comparación

de medias ( $\alpha = 0.05$ ) a través de contrastes ortogonales (dosis por fertilizante y dosis iguales) y Tukey (tratamientos y efecto principal de fertilizante).

#### 4.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

##### 4.4.1 Variables morfológicas y distribución de biomasa

En la Figura 4.1 se muestra el efecto de las dosis de fertilizante en el crecimiento promedio en altura y diámetro (1A y 1B), así también las variables de peso seco total planta, aéreo y de raíz (2A, 2B y 2C, respectivamente) de las plantas de cedro rojo en vivero. Las dosis partieron de 3 a 7 g L<sup>-1</sup> con el Osmocote Plus® y el Multicote®.

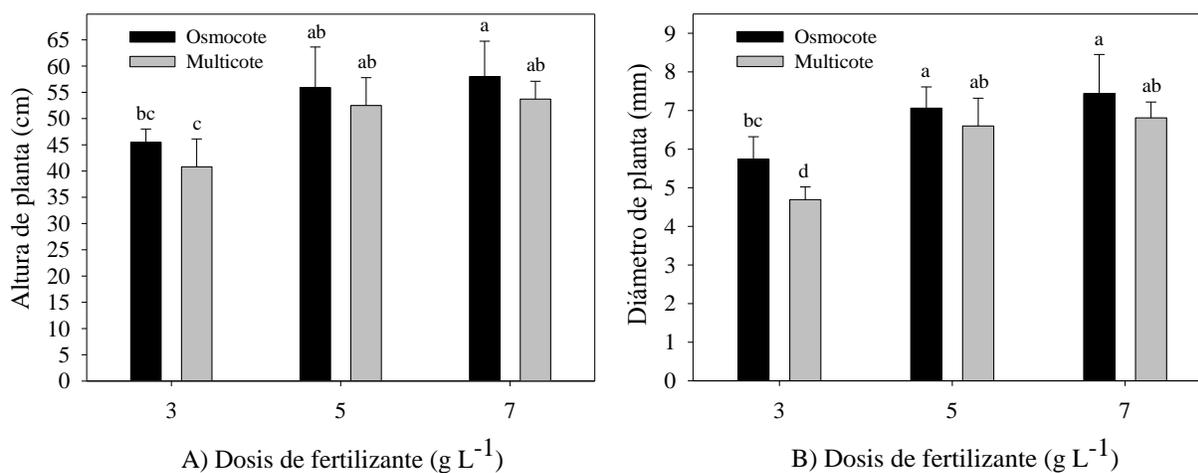


Figura 4.1. Efecto de las dosis de fertilizante en el crecimiento promedio en altura y diámetro (A y B) de las plantas de *C. odorata* en vivero. Las medias con distinta letra son diferentes estadísticamente. La comparación fue entre los pares de dosis (Contrastes) y como tratamientos (Tukey  $P \leq 0.05$ ).

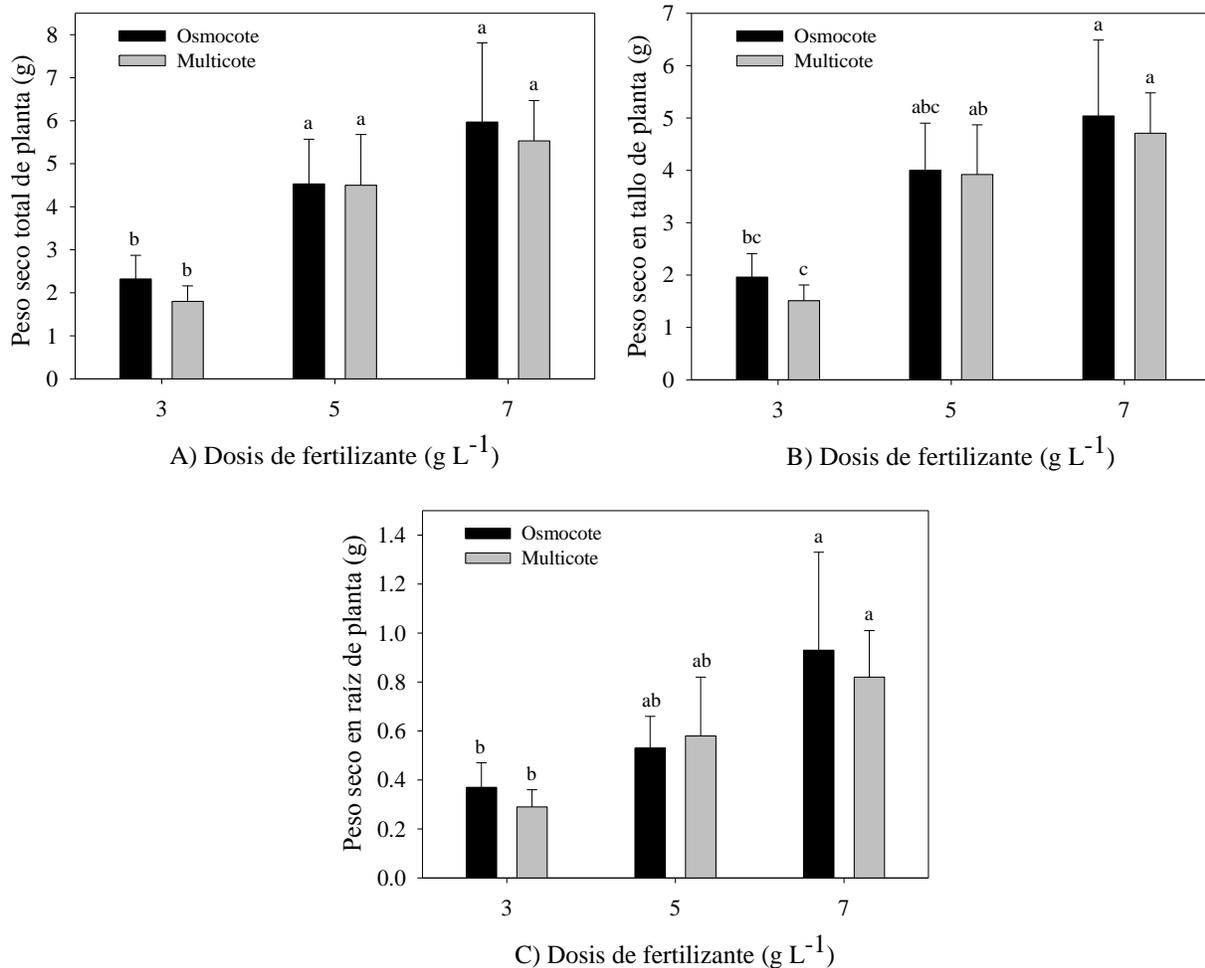


Figura 4.2. Efecto de las dosis de fertilizantes en la distribución de la biomasa total, la aérea y la radical (A, B y C) de las plantas de *C. odorata* en vivero. Las medias con distinta letra son diferentes estadísticamente. La comparación fue entre los pares de dosis (Contrastes) y como tratamientos (Tukey  $P \leq 0.05$ ).

La fuente de fertilizante provocó diferencia significativa en la altura y el diámetro de planta ( $P = 0.0491$  y  $0.0053$ ), pero no en las variables de distribución de biomasa (Cuadro 4.1). La respuesta promedio en la altura y el diámetro con el Osmocote Plus® fue de 53.1 cm y 6.7 mm contra 49.0 cm y 6.0 mm con el Multicote®, respectivamente. Se encontró diferencia estadística por efecto del tratamiento y entre las dosis por fertilizante para todas las variables (Cuadro 4.1).

Cuadro 4.1. Significancia estadística ( $P \leq 0.05$ ) del efecto de fertilizante, tratamientos y dosis por fertilizante en el análisis de varianza en las plantas de *C. odorata* de 4 meses.

Factor	AP*	DT	PSP	PSA	PSR
Fertilizante	0.0491	0.0053	0.3437	0.4819	0.590
Formulación (Dosis)	0.0003	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
<i>Contraste</i>					
Dosis_Osmocote	0.003	0.0008	< 0.0001	0.0013	0.0011
Dosis_Multicote	0.0016	< 0.0001	< 0.0001	0.0004	0.0007
CV (%)	10.71	9.98	12.60	17.99	17.48

\*AP = altura de planta; DT = diámetro de tallo; PSP = peso seco total de planta; PSA = peso seco de la parte aérea; PSR = peso seco de raíz; CV = Coeficiente de variación de las variables.

Los tratamientos sometidos a niveles intermedios y altos de fertilización de ambos materiales fueron estadísticamente iguales entre ellos, pero diferentes a las dosis de 3 g L<sup>-1</sup> en la respuesta de las variables evaluadas (Figura 4.1 y 4.2). Entre dosis iguales de Osmocote Plus® y el Multicote® no se observaron diferencias estadísticas en AP y las variables de distribución de biomasa de la planta (PSP, PSA y PSR), excepto en DT, que tuvo mayor respuesta a la dosis de 3 g L<sup>-1</sup> de Osmocote Plus® (Figura 4.1B).

La dosis de 5 g de Osmocote Plus® y Multicote® en relación a la dosis de 3 g mostraron incremento en AP de 23 y 28% (Figura 4.1A); en DT de 23 y 40% (Figura 4.1B); en PSP de 104 y 159 % (Figura 4.2A); en PSA de 95 y 150% (Figura 4.2B); y en PSR de 45 y 99% (Figura 4.2C), respectivamente.

En las plantas tratadas con 7 g L<sup>-1</sup>, el incremento en AP y DT en relación a las dosis intermedias, fue mínimo (Figura 4.1), pero fue mayor en PSP de 32 y 23 %, PSA de 26 y 20 % y el PSR de 75

y 40%, respectivamente (Figura 4.2). El Multicote® provocó mayor respuesta en todas las variables al aumentar la dosis de 3 a 5 g L<sup>-1</sup>. Sin embargo, cuando la dosis aplicada fue 7 g se observó mayor incremento en las variables de respuesta con el Osmocote Plus® cuando se aumentó. Navarro *et al.* (2013) encontraron mayor crecimiento en las plantas de *Abies religiosa* con las dosis altas e intermedias de la aplicación de fertilizantes. Las plantas en general presentaron un crecimiento reducido y menor acumulación de la biomasa con la dosis más baja de fertilizantes y coincide con lo reportado para otras especies forestales (Bustos *et al.*, 2008; Jacobs *et al.*, 2005; Navarro *et al.*, 2013).

En un experimento paralelo se evaluaron las dosis de ambos fertilizantes aplicados en *C. odorata in situ*, pero sin plantas. El lixiviado se capturó durante el tiempo que permaneció la planta en vivero y en él se determinó el nitrógeno y el fósforo soluble total. Se detectó una menor disponibilidad de fósforo respecto a la cantidad de nitrógeno, a medida que las dosis se incrementaron (Figura 4.3).

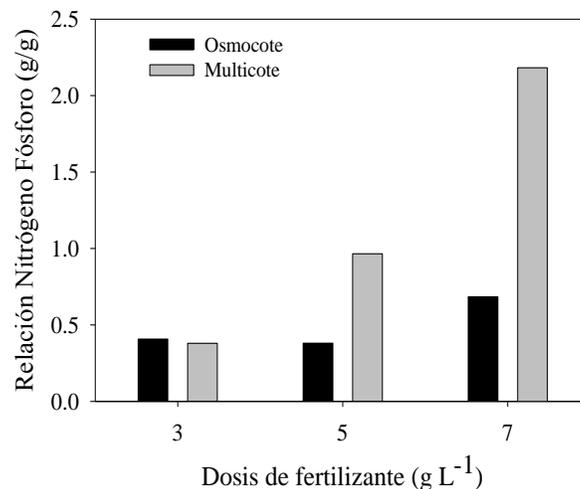


Figura 4.3. Relación de nitrógeno y fósforo liberados *in situ* del Osmocote y el Multicote durante el ciclo de producción en vivero de *C. odorata*.

De acuerdo con Rose *et al.* (2004), la alta relación del N/P en la solución del sustrato e inadecuados niveles del fósforo afectan el desarrollo de la planta. Asimismo, mayor crecimiento en la AP y el DT muestran relación con concentraciones altas del nitrógeno (Hernández y Rubilar, 2012; Villar, 2003), sin embargo, en la respuesta de la planta pueden causar detrimento con ciertos niveles (Duan *et al.*, 2013) sobretodo en la reducción de la raíz (Larimer y Struve, 2002; Schoene y Yeager, 2006).

#### **4.4.2 Atributos de calidad de la planta**

En la Figura 4.4 se muestra el efecto de las dosis de fertilizante en el crecimiento promedio en altura y diámetro (1A y 1B), así también las variables peso seco total planta, aéreo y de raíz (2A, 2B y 2C, respectivamente) de las plantas de cedro rojo en vivero. Las dosis partieron de 3 a 7 g L<sup>-1</sup> con el Osmocote Plus® y el Multicote®.

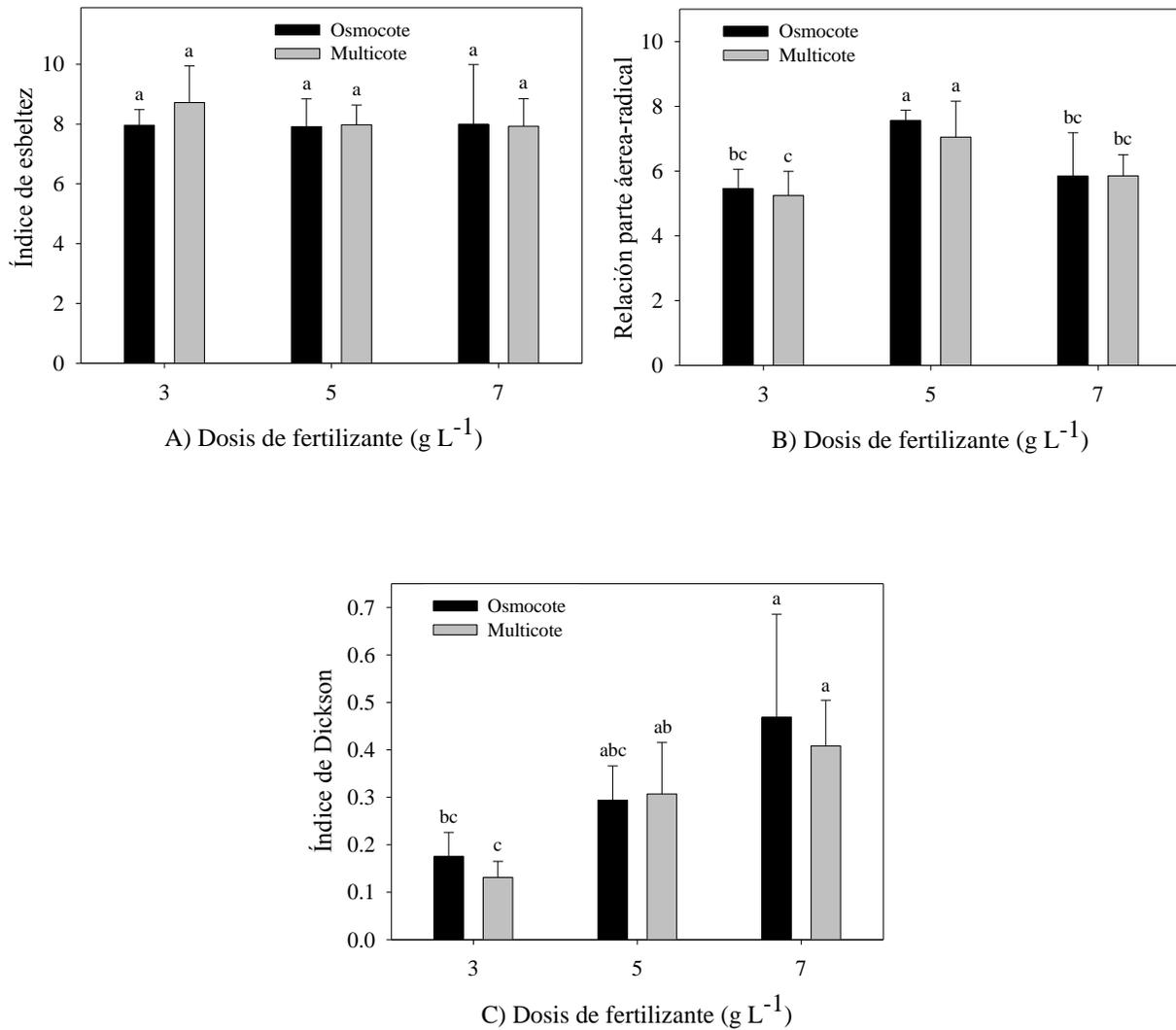


Figura 4.4. Efecto de las dosis de Osmocote y Multicote en las variables de calidad Índice de esbeltez (A), relación peso seco aéreo y radical (B) e Índice de Dickson (C) de *C. odorata* en vivero. Las medias con distinta letra son diferentes estadísticamente. La comparación fue entre los pares de dosis (Contrastes) y como tratamientos (Tukey  $P \leq 0.05$ ).

En el Cuadro 4.2 se muestra el análisis de varianza para los atributos de calidad de planta, así como la significancia en tratamientos y las dosis por fertilizante

Cuadro 4.2. Significancia estadística ( $P \leq 0.05$ ) del efecto de fertilizante, tratamientos y dosis por fertilizante en el análisis de varianza de indicadores de calidad de planta de cedro rojo.

Factor	IE*	RAR	ID
Fertilizante	0.496	0.5060	0.4819
Formulación (Dosis)	0.839	0.0009	< 0.0001
<i>Contraste</i>			
Dosis_Osmocote	0.979	0.0023	0.0013
Dosis_Multicote	0.513	0.0108	0.0004
CV (%)	6.63	7.84	17.99

\*IE = índice de esbeltez; RAR = relación parte aérea/parte de raíz de peso seco; ID = índice de Dickson; CV = coeficiente de variación de la variable.

No se encontró diferencia estadística para el IE, el RAR y el ID por efecto del fertilizante y tampoco entre las dosis iguales, en contraste se detectó significancia solo en el RAR y el ID entre los tratamientos y las dosis por fertilizante (Cuadro 4.2).

El incremento de la fertilización favoreció tanto al DT como a la AP y por lo tanto no se presentaron cambios en el IE (Figura 4.4A). En algunas especies de coníferas el IE cambia al aumentar la dosis de N en la fertilización (Islam *et al.*, 2009; Wilson *et al.*, 2013).

El Índice RAR fue mayor en ambas dosis de 5 g con el Osmocote Plus® y el Multicote® con respecto a las dosis de 3 y 7 g. Con estas dos últimas dosis la respuesta fue similar (Figura 4.4B). Las plantas tratadas con 5 g tuvieron una distribución de biomasa seca de alrededor 87.5 % en la parte aérea y 12.5% en la zona radical, mientras que las dosis 3 y 7 g tuvieron en promedio 85.5% en la parte aérea y 14.5% en la raíz. Hutchings y John, (2004), Vance *et al.* (2003) y Hermans *et al.* (2006) encontraron que cuando existe baja disponibilidad o deficiencia de fósforo estimula en la planta un cambio en la redistribución de biomasa hacia la parte de la raíz.

Los valores del ID más altos se obtuvieron con las dosis de 5 y 7 g L<sup>-1</sup> de ambos fertilizantes; en la dosis intermedia (5 g L<sup>-1</sup>) el incremento con el Osmocote Plus® fue 67 % y el Multicote® 134 % mayor en relación a las dosis bajas, y en la dosis de 7 g, el ID se incrementó 59 % con Osmocote Plus® y en Multicote® 33 % respecto a las dosis intermedias (Figura 4.4C).

#### **4.5 CONCLUSIONES**

El fertilizante Osmocote fue el de mayor efecto para generar incrementos en altura y el diámetro de planta. Todas las variables morfológicas y de la calidad de planta presentaron incremento con la dosis intermedia y alta de ambos fertilizantes, sin embargo, no hubo diferencias entre las dosis equivalentes de estos materiales.

Los niveles de fertilización afectaron la distribución de biomasa en la parte aérea y radical, que a su vez alteraron la relación del peso seco aéreo y el radical. La relación del mayor peso seco por planta con los valores bajos del índice de esbeltez y la relación parte aérea radical obtuvieron el índice de Dickson más alto en la dosis de 7 g, lo que se traduce como un mayor equilibrio morfológico en la planta.

Las variables (morfología y atributos de calidad) fueron elevadas en todas las dosis, por lo cual es importante evaluar niveles de fertilizantes más bajos con contenedores pequeños.

## CAPÍTULO V. LITERATURA CITADA

Abad B., M., P. Noguera M. y C. Carrión B. 2004. Los sustratos en los cultivos sin suelo. *In:* Urrestarazu G., M. (ed). Tratado de cultivo sin suelo. Mundi-Prensa. Almería, España. pp. 113 – 158.

Aklibasinda, M., T. Tunc, Y. Bulut and U. Sahim. 2011. Effect of different growing media on Scotch pine (*Pinus sylvestris*) production. *J. Anim. Plant. Sci.* 21: 535 – 541.

Alderete C., Á., G. del J. Zapata C., E. Ojeda T., E. Guevara, N. De la Cruz N., J. J. Guerra S., R. Brito and L. E. Amador del A. 2010. Evaluation of growth *Cedrela odorata* L. in a secondary vegetation area. *Research Journal of Forestry* 4: 145 – 150.

Ansorena M., J. 1994. Sustratos. Propiedades y caracterización. Mundi-Prensa. Madrid, España. 171 p.

Baligar, V. C. and N. K. Fageria. 2015. Nutrient use efficiency in plants: an overview. *In:* Rakshit A., Sing B. H. and Sen A. (eds). Nutrient use efficiency: from basics to advances. Springer. New Delhi, India. Pp. 1 – 16.

Benítez G., M. Equihua y M. T. Pulido S. 2002. Diagnóstico de la situación de los viveros oficiales de Veracruz y su papel para apoyar programas de reforestación y restauración. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 8: 5 – 12.

- Blok, C., C. de Kreig, R. Baas and G. Wever. 2008. Chapter 7. Analytical methods used in soilless cultivation. *In*: M. Raviv and J. H. Lieth (eds). *Soilless culture: theory and practice*. Elsevier. USA. pp: 245 – 290.
- Briones E., F. y Á. Martínez G. 2002. Eficiencia de algunos diseños experimentales en la estimación de una superficie de respuesta. *Agrociencia* 36: 201– 210.
- Burés, S. 1997. *Sustratos*. Ediciones Agrotécnicas S. L. Madrid España. 342 p.
- Bustos F., M. González, P. Donoso, V. Gerding, C. Donoso y B. Escobar. 2008. Efectos de distintas dosis de fertilizante de liberación controlada (Osmocote®) en el desarrollo de plantas de coigüe, raulí y ulmo. *Bosque* 29: 155 – 161.
- Castro L., I., F. Gavi R., J. J. Peña C., R. Núñez E. y J. D. Etchevers B. 2006. Eficiencia de recuperación de N y K de tres fertilizantes de lenta liberación. *Terra Latinoamericana* 24: 277 – 282.
- Cochran, W. G., y G. M. Cox. 1990. *Diseños experimentales*. Trillas. México, D. F. 661 p.
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). 2015. Principales especies maderables establecidas en PFC por año en el periodo 2000 – 2014. Revisado online el 13 de junio de 2015. [www.conafor.gob.mx](http://www.conafor.gob.mx).

- Cruz C., E., M. Sandoval V., V. Volke H., V. Ordaz C., J. L. Tirado T. y J. Sánchez E. 2010. Generación de mezclas de sustratos mediante un programa de optimización utilizando variables físicas y químicas. *Terra Latinoamericana* 28: 219 – 229.
- Cruz C., E., M. Sandoval V., V. Volke H., A. Can C. y J. Sánchez E. 2012. Efecto de mezclas de sustratos y concentración de la solución nutritiva en el crecimiento y rendimiento de tomate. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 3: 1361 – 1373.
- De Boodt, M., O. Verdonk, and I. Cappaert. 1974. Method for measuring the water release curve of organic substrates. *Acta Hort.* 37: 2054 – 2062.
- Díaz G., J. A. and R. Requejo L. 2012. Use of nonlinear regression and nonlinear mathematical programming in the formulation of substrate mixtures for soil-less culture –a review-. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 12: 87 – 97.
- Duan, J., C. Xu, D. F. Jacobs, L. Ma, H. Wei, L. Jiang and J. Ren. 2013. Exponential nutrient loading shortens the cultural period of *Larix olgensis* seedlings. *Scandinavian Journal of Forest Research* 28: 409 – 418.
- Dumroese, R. K., J. Parkhurst and J. P. Barnett. 2005. Controlled release fertilizer improves quality of container longleaf pine seedlings. *USDA Forest Service Proceedings RMRS-P-35: 3 – 8.*

- Fan, Z., J. A. Moore and D. L. Wenny. 2004. Growth and nutrition of container-grown ponderosa pine seedlings with controlled-released fertilizer incorporated in the root plug. *Ann. For. Sci.* 61: 117 – 124.
- Goertz, H. M. 1993. Controlled release technology. In: Howe-Grant, M. *Encyclopedia of chemical technology*. 4th ed. John Wiley & Sons Inc. New York, USA. p. 254 – 274.
- González C., A., G. N. Grenón C., L. M. Vázquez G., A. González N. y A. Pérez H. 2011. Desarrollo de estacas de *Prunus salicina* injertadas en diferentes sustratos con lombrihumus. *Agronomía Mesoamericana* 22: 329 – 337.
- Gordillo L., E. 2000. Evaluación de la regeneración natural de cedro rojo (*Cedrela odorata* L.) y caoba (*Swietenia macrophylla* K.) en la zona Maya de Quintana Roo. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo, México. 111 p.
- Grossnikle, S. C. 2000. *Ecophysiology of Northern Spruce Species: The Performance of Planted Seedlings*. NRC Research Press Ottawa. Ontario, Canadá. 409 pp.
- Gungor, F. and E. Yildirim. 2013. Effect of different growing media on quality, growth and yield of pepper (*Capsicum annum* L.) under greenhouse conditions. *Pak. J. Bot.* 45: 1605 – 1608.

- Handreck, K. A. and N. D. Black. 2005. Growing media for ornamental plant and turf. Revised edition. New South Wales University Press. Kensington, Australia. 544 p.
- Hasse, D. L., P. Alzugaray, R. Rose and D. F. Jacobs. 2007. Nutrient-release rates of controlled-release fertilizers in forest soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 38: 739 – 750.
- Hermans, C., J. P. Hammond, P. J. White and N. Verbruggen. 2006. How do plants respond to nutrient shortage by biomass allocation? *Trends in Plant Science* 11: 610 – 617.
- Hernández C., A. y R. Rubilar P. 2013. Efecto de la fertilización nitrogenada y fosforada en el desarrollo y fenología de brotes de setos de *Pinus radiata*. *Bosque* 33: 53 – 61.
- Hutchings, M. J. and E. A. John. 2004. The effects of environmental heterogeneity on root growth and root/shoot partitioning. *Annals of Botany* 94: 1 – 8.
- Islam, M. A., K. G. Apostol, D. F. Jacobs and R. K. Dumroese. 2009. Fall fertilization of *Pinus resinosa* seedlings: nutrient uptake, cold hardiness, and morphological development. *Annals of Forest Science*. 66: 704 – 712.
- Jacobs, D. F., K. F. Salifu and J. R. Seifert. 2005. Growth and nutritional response of hardwood seedlings to controlled-release fertilization at outplanting. *Forest Ecology and Management* 214: 28 – 39.

- Kuehl, R. O. 2001. Diseño de experimentos. Thompson Learning. Segunda edición. México, D. F. 666 p.
- Landis, T. D. 1985. Mineral nutrition as an index of seedling quality. *In*: Duryea, M. (ed). Evaluating seedling quality: principles, procedures and predictive abilities of major tests. Forest Research Laboratory. Oregon State University. pp. 29 – 48.
- Landis, T. D. 1989. Mineral nutrients and fertilization. *In*: Landis, T. D., Tinus, R. W., McDonald, S. E., Barnett, J. P. (eds). The container tree nursery Manual, vol 4. Agriculture Handbook no. 674. USDA Forest Service. pp. 1 – 70.
- Landis, T. D., and R. K. Dumroese. 2009. Using Polymer-coated controlled-release fertilizers in the nursery and after outplanting. Forest Nursery Notes Winter 2009: 5 – 12.
- Larimer, J. and D. Struve. 2002. Growth, dry weight and nitrogen distribution of red oak and ‘autumn flame’ red maple under different fertility levels. Journal of Environmental Horticulture 20: 28 – 35.
- Maene, L. M. 1995. Changing perception of fertilizer worldwide. Fertilizer Industry Round Table. 163 p.
- Martínez G., A. 1988. Diseños experimentales. Métodos y elementos de teoría. Trillas. México, D. F. Pp. 329 – 404.

- Malik, V. and V. R. Timmer. 1998. Biomass partitioning and nitrogen retranslocation in black spruce seedlings on competitive mixedwood sites: a bioassay study. *Canadian Journal of Forest Research*. 28: 206 – 215.
- Mateo S., J. J., R. Bonifacio V., S. R. Pérez R., J. Capulín G. y L. Mohedano C. 2011. Producción de (*Cedrela odorata* L.) en aserrín crudo con diferentes dosis de fertilización, en Tecpan de Galeana, Guerrero. *Ra Ximhai* 7: 195 – 204.
- Melgar R., R. and M. I. Pascual A. 2010. Characterization and use of a vegetable waste vermicompost as an alternative component in substrates for horticultural seedbeds. *Spanish Journal of Agricultural Research* 8: 1174 – 1182.
- Navarro S., J. L., J. J. Vargas H., A. Gómez G., L. de M. Ruiz P. y P. Sánchez G. 2013. Morfología, biomasa y contenido nutrimental en *Abies religiosa* con regímenes diferentes de fertilización en vivero. *Agrociencia* 47: 707 – 721.
- Oliet, J., R. Planelles, M. L. Segura, F. Artero and D. F. Jacobs. 2004. Mineral nutrition and growth of containerized *Pinus halepensis* seedlings under controlled-release fertilizer. *Scientia Horticultrae* 103: 113 – 129.
- Ordaz C., V. M. y R. Ávila A. 2013. Producción de cedro rojo en vivero con diferentes mezclas de tezontle, aserrín y composta en el estado de Veracruz. *In: Memorias VIII Reunión de Innovación Forestal*. Del 10 al 13 de Septiembre de 2013. Veracruz, Veracruz. p. 42.

- Pennington, T. D. y J. Sarukhán. 1998. Árboles tropicales de México. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). México, D. F. 238 p.
- Pineda P., J., F. Sánchez del C., A. Ramírez A., A. M. Castillo G., L. A. Valdés A. y E. C. Moreno P. 2012. Aserrín de pino como sustrato hidropónico. I: Variación en características físicas durante cinco ciclos de cultivo. Revista Chapingo. Serie Horticultura 18: 95 – 111.
- Raviv, M., R. Wallach, A. Silber, and A. Bar-Tal. 2002. Substrates and their analysis. *In*: Savvas D. and Passam H. (eds). Hydroponic production of vegetables and ornamentals. Embryo Publications. Atenas, Grecia. pp. 25-101.
- Reddell, P., M. J. Webb, D. Poa and D. Aihuna. 1999. Incorporation of slow-release into nursery media. *New Forests* 18: 277 – 287.
- Reyes R., J., A. Aldrete, V. M. Cetina A. y J. López U. 2005. Producción de plántulas de *Pinus pseudostrabus* var. *Apulcensis* en sustratos a base de aserrín. Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente 11: 105 – 110.
- Rojas B., A. 1962. The San Cristobal design for fertilizer. Proceedings of the 11th Congress of the International Society for Sugar Cane Technology 11: 197 – 203.  
<http://www.issct.org/proceedings/1962.html>. Citado el 3 de junio de 2015.

- Romero A., O., R. López E., M. Á. Damián H., I. Hernández T., J. F. Parraguirre L. y M. Huerta L. 2012. Evaluación del residuo de cáscara de nuez (*Juglans regia* L.) en la producción de plántulas de *Pinus patula*, en vivero. *Agronomía Costarricense* 36: 103 – 110.
- Rose, R., D. L. Haase y E. Arellano. 2004. Fertilizantes de entrega controlada: potencial para mejorar la productividad de la reforestación. *Bosque* 25: 89 – 100.
- Rossi, F. 2001. Blending response Surface methodology and principal components analysis to match a target product. *Food Quality and Preference* 12: 457 – 465.
- Sánchez-Córdova, T., A. Aldrete, V. M. Cetina A. y J. López U. 2008. Caracterización de medios de crecimiento compuestos por corteza de pino y aserrín. *Madera y Bosques* 14:41 – 49.
- SAS Institute Inc. 2002. Statistical Analysis System. User's guide Statistics. Version 9.0. Cary, NC. USA. 595 p.
- Schoene, G. and T. Yeager 2006. Influence of nitrogen application rate on the magnitude of root and shoot growth flushes of *Viburnum odoratissimum* Ker-Gawl. *Plant and Soil* 284: 121 – 128.
- Shoji, S. and A. T. Gandeza. 1992. Controlled release fertilizer with polyolefin resin coating. Kanno Printing Co. Ltd. Sendai, Japan. pp 1 – 7.

Stat-Ease Inc. 2013. Design–Expert 9 user’s guide. Multifactor RSM Tutorial. 53 p.

Systat Software. 2006. User’s guide Sigma Plot version 10.0. Sigma Plot for Windows. Washington, D. C. USA. 900 p.

Terés T., V. 2001. Relaciones aire-agua en sustratos de cultivo como base para el control del riego. Metodología de laboratorio y modelización. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. Madrid, España. Julio de 2001. 483 p.

Terés T., V., B. Abad M., E. Sáenz de la M. y M. Lezaun. 2007. Curva de retención de agua en sustratos de cultivo. Modelo de porosidad logarítmico normal. Actas de Horticultura 47: 21–26.

Trenkel, M. E. 1997. Improving fertilizer use efficiency: Controlled-release and stabilized fertilizers in agriculture. International Fertilizer Industry Association (IFA). Paris, Francia. 151 p.

Trenkel, M. E, W. Wichmann and K. F. Kummer. 1988. New challenges for the world fertilizer industry with regard to agriculture. International Fertilizer Industry Association (IFA) – Agro Economics Committee Montecarlo. 163 p.

- Trenkel, M. E. 2010. Slow and controlled release and stabilized fertilizers: an option for enhancing nutrient use efficiency in agriculture. International Fertilizer Industry Association (IFA). Paris, France. 160 p.
- Vance, C. P., C. Uhde-Stone and D. L. Allan. 2003. Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. *New Phytologist* 157: 423 – 447.
- Vargas T., P., J. Z. Castellanos R., J. J. Muñoz R., P. Sánchez G., L. Tijerina C., R.M. López R., C. Martínez S. y J. L. Ojodeagua A. 2008. Efecto del tamaño de partículas sobre algunas propiedades físicas del tezontle de Guanajuato, México. *Agricultura Técnica en México* 34: 323 – 331.
- Villar S., P. 2003. Importancia de la calidad de planta en los proyectos de revegetación. *In: Rey-Benayas J. M., Espigares Pinilla T. y Nicolau Ibarra J. M. (ed.). Restauración de ecosistemas mediterráneos. Asociación Española de Ecología Terrestre. Guadalajara, España. pp. 66 – 80.*
- Villar M., F., F. Millán T. y S. Di S. C. 2007. Uso de la metodología de superficie de respuesta en el estudio del protocolo de mezcla para obtención de emulsiones concentradas O/W. *Interciencia* 32: 404 – 409.

Walker, R. F. 1999. Artificial regeneration of *Jeffrey pine* in the Sierra Nevada. *Journal of Sustainable Forestry* 9: 23 – 28.

Wilson, A. R., P. Nzokou, D. Güney and S. Kulac. 2012. Growth response and nitrogen use physiology of Fraser fir (*Abies fraseri*), red pine (*Pinus resinosa*), and hybrid poplar under amino acid nutrition. *New Forests* 44: 281 – 295.

Zamora M., B. P., P. Sánchez G., V. H. Volke H., D. Espinosa V. y A. Galvis S. 2005. Formulación de mezclas de sustratos mediante programación lineal. *Interciencia* 30: 365 – 369.