

USO Y BIORREMEDIACION DE SUSTRATO
CONTAMINADO CON HIDROCARBURO
Y SU EVALUACION EN EL DESARROLLO DE
DOS CULTIVARES DE *Kalanchoe blossfeldiana* Poelln
BAJO INVERNADERO.

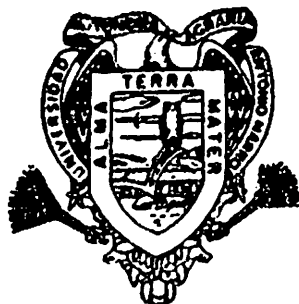
HOMERO CARLOS CASTELLANOS DIAZ

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS
EN SUELOS



BIBLIOTECA
EGIDIO G. REBONATO
BANCO DE TESIS
U.A.A.A.N.



Universidad Autónoma Agraria
Antonio Narro

PROGRAMA DE GRADUADOS

Buenavista, Saltillo, Coah.

MARZO DE 1999

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
ANTONIO NARRO

SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO

USO Y BIORREMEDIACIÓN DE SUSTRATO CONTAMINADO CON
HIDROCARBURO Y SU EVALUACIÓN EN EL DESARROLLO DE DOS
CULTIVARES DE *Kalanchoe blossfeldiana* Poelln
BAJO INVERNADERO.

TESIS

POR

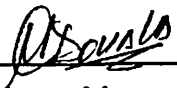
HOMERO CARLOS CASTELLANOS DÍAZ

Elaborada bajo la supervisión del Comité Particular de Asesoría y aprobada
como requisito parcial para optar al grado de:

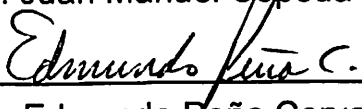
MAESTRO EN CIENCIAS
EN SUELOS

COMITÉ PARTICULAR

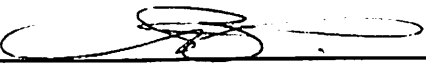
Asesor principal:


M.C. Juan Manuel Cepeda Dovala

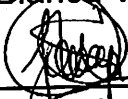
Asesor:

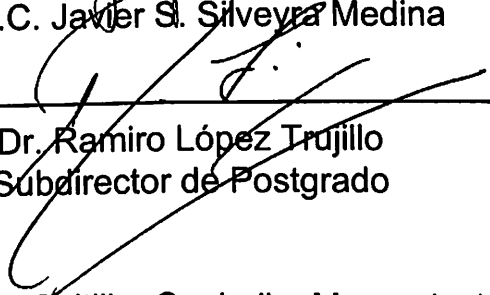

Dr. Edmundo Peña Cervantes

Asesor:

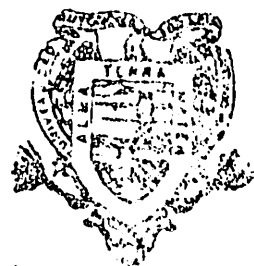

M.C. Blanca Valdivia Urdiales

Asesor:


M.C. Javier S. Silveira Medina


Dr. Ramiro López Trujillo
Subdirector de Postgrado

Buenavista, Saltillo, Coahuila. Marzo de 1999



AGRADECIMIENTOS

Deseo agradecer a nuestro Dios por la oportunidad y dirección que me ha dado para finalizar una etapa más en mi vida.

Agradezco sinceramente al M.C. Juan Manuel Cepeda Dovala, por la confianza puesta en mi a lo largo de este tiempo, asimismo, por su acertada participación en la elaboración, dirección y revisión del presente proyecto.

Al Dr. Edmundo Peña Cervantes, por el gran interés mostrado, disponibilidad y sugerencias en la elaboración del trabajo.

A la maestra M.C. Blanca Valdivia Urdiales, por sus acertadas sugerencias en la escritura, presentación y revisión del trabajo. Así por la amistad a lo largo de este tiempo.

Al M.C. Javier S. Silveyra Medina, por su valiosa participación y revisión del documento.

Al Ing. Antonio Ilizaliturri Verastegui, por la confianza y apoyo ofrecido para la realización de la tesis.

Agradezco a la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales COMIMSA, todo el apoyo dado a través del LCQ. José Martín Molina Cardona, para el análisis y finalización del presente trabajo de investigación.

Agradezco también a todas aquellas personas que participaron en la realización del trabajo y que por falta de espacio sería imposible colocarlas. A *todos gracias*.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios nuestro Señor, quien sin su autorización nada de lo vemos existiría. "Clama a mí, y yo te responderé, y te enseñaré cosas grandes y ocultas que tú no conoces Jer 33:3".

A mis padres:

Sr. Homero Carlos Castellanos Azuela

Sra. María del Pilar Díaz de Castellanos

Con cariño y respeto, por ser el principal apoyo en cada meta que nos fijamos.

A mis hermanas:

María del Pilar, Arcelia y Lourdes Castellanos Díaz

A mis abuelos:

Sr. Eugenio Díaz Díaz (†)

Sra. Aurelia Ruíz de Díaz

A toda la familia en general: tíos, tías, primos (as)

A mi novia *Arcelia Aguilera García* con amor y cariño.

A todos mis compañeros y amigos : Bonifacio, Rogelio, Lucio, Indira, Juventino, Jaime, etc.

COMPENDIO

Uso y biorremediación de sustrato contaminado con hidrocarburo y su evaluación en el desarrollo de dos cultivares de *Kalanchoe blossfeldiana* Poelln bajo invernadero.

Por

HOMERO CARLOS CASTELLANOS DÍAZ

**MAESTRÍA
SUELOS**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA. MARZO DE 1999

M.C. JUAN MANUEL CEPEDA DOVALA - Asesor -

Palabras claves: Kalanchoe, Biorremediación, Hidrocarburos, Sustratos, Salinidad.

Los objetivos del presente trabajo de investigación fueron: dar una alternativa de uso a hidrocarburos de desecho como ingrediente de sustratos, evaluar la biorremediación de sustratos contaminados sobre el desarrollo del kalanchoe, seleccionar el sustrato que favorezca el mejor desarrollo de planta, además de disminuir la contaminación con respecto al tiempo.

El estudio se realizó en un invernadero de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, en donde los tratamientos consistieron en la mezcla de hidrocarburo con sulfato de calcio (CaSO_4) (1:3 p/p), a la que se le añadió tres fuentes de materia orgánica (gallinaza, estiércol y bagazo de caña) en dos dosis más un suelo orgánico. Las mezclas de materiales fueron evaluados con dos variedades de *Kalanchoe*: Letle Fhine y Golden Stipe. La calidad de planta en los tratamiento contaminados fue contrastada al utilizar dos tratamientos testigos compuestos de suelo de bosque, turba y perlita (1/3: 1/3: 1/3 v/v/v). La combinación de los factores dieron origen a 12 tratamientos contaminados más dos testigos, analizados bajo un completamente al azar con arreglo factorial $3 \times 2 \times 2 + 2$, con cuatro repeticiones.

A los nueve meses de biorremediación se evaluó la calidad de la planta a través de las siguientes variables: diámetro de tallo (mm), altura de planta (cm), número de hojas, largo de la hoja (cm) y ancho de la hoja (cm). La biorremediación de los sustratos fue evaluada con datos iniciales y finales de TPH's, además del comportamiento de pH, conductividad eléctrica, materia orgánica y cenizas a través del tiempo. Al término del experimento fueron tomadas muestras para determinar pH, conductividad eléctrica y materia orgánica.

Los resultados de la caracterización física y química inicial, muestran problemas de sales ($> 6 \text{ dS/m}$), pH mayor de 8.0 y contenido de materia orgánica elevado en los todos los tratamientos contaminados, mientras que en los tratamientos testigos la conductividad eléctrica y pH fue más adecuada (2.08 dS/m y pH 6.7) para el crecimiento vegetal.

En resultados de planta, ninguno de los tratamientos contaminados con hidrocarburo superaron en diámetro de tallo, altura de planta, número de hojas,

largo y ancho de la hoja a los tratamientos testigos para ambas variedades. Por lo tanto, no se produjo mejor calidad de plantas de kalanchoe en los sustratos contaminados.

Tanto en los sustratos testigos (T_1 y T_2) como en los contaminados, la variedad Letle Fhine (flor roja) mostró mejor calidad de planta para la mayoría de las variables evaluadas que la variedad Golden Stipe (flor amarilla).

Para producir kalanchoe en sustrato contaminados con hidrocarburos, se recomienda el uso de estiércol en dosis baja (1:1/2 con respecto al hidrocarburo) utilizando la variedad Letle Fhine (flor roja).

Se encontró que al usar estiércol en la dosis alta en cualquiera de las dos variedades fue la combinación que favoreció una mayor eliminación de hidrocarburo.

Se redujo la concentración de hidrocarburos en los tratamientos contaminados en un 62.3 por ciento para el mejor tratamiento en nueve meses de biorremediación.

Los resultados iniciales y finales de las propiedades químicas y físicas para los tratamientos indican una disminución de fósforo, potasio, sulfatos y de la capacidad de intercambio catiónico, además de la acidificación del medio y reducción de la salinidad, debido a lixiviación por el riego continuo.

ABSTRACT

Use and bioremediation of a substrate contaminated with hidrocarbon and its evaluation in the development of two cultivars of *Kalanchoe bloosfeldiana* Poelln in a greenhouse.

By

HOMERO CARLOS CASTELLANOS DÍAZ

Master of Science

Soils

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA.

MARCH, 1999

M.C. JUAN MANUEL CEPEDA DOVALA - Adviser -

Key words: *Kalanchoe*, bioremediation, hidrocarbons, substrates, salinity.

The objectives of this study were to: give an alternative use to surplus hydrocarbons as a components of plant substrates, evaluate the bioremediation of contaminated substrates used for kalanchoe cultivation, select the best substrate for the plant's growth and to lower contamination with time.

The study was carried out in a greenhouse in the Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro and the substrates were a mixture of a hydrocarbon with CaSO_4 (1:3 w/w), to which was added three types of organic matter (chicken dung, manure, and sugarcane waste) in two doses and an organic soil. The mixtures were evaluated with two varieties of kalanchoe: Letle Fhine and Golden Stipe. Plant quality in the treated substrates was contrasted with two control treatments that included forest soil, peat moss and perlite (1/3; 1/3, 1/3 v/v/v). A combination of all factors rendered 12 contaminated and two control treatments, analyzed in a completely randomized design with a factorial $3 \times 2 \times 2 + 2$ arrangement with four replicates.

Plant quality was evaluated nine months after the treatments were established considering the following variables: shoot diameter (mm), plant height (cm), number of leaves, leaf length (cm), and leaf width (cm). Substrate bioremediation was evaluated by initial and final TPH data, pH, electric conductivity, organic matter and ashes at different intervals. At the end of the experiment samples were taken to determine pH, electric conductivity and organic matter.

Results of the physical and chemical characterization show problems with salinity (> 6 dS/m), pH above 8.0 and high organic matter in all the contaminated treatments while the control treatments had electric conductivity and pH values more suitable (2.08 dS/m and pH 6.7) for plant growth.

None of the hydrocarbon treatments produced plants with better shoot diameter, plant height, number of leaves, leaf length or leaf width superior to the plants grown in the control treatments for either of the kalanchoe varieties. Therefore, the contaminated substrates did not produce better quality kalanchoe plants.

Letle Fhine (red flower) showed better plant quality for most of the variables evaluated than Golden Stripe (yellow flower) in both control (T_1 and T_2) and hydrocarbon contaminated treatments.

Recommend that if kalanchoe is to be produced in hydrocarbon contaminated substrates, manure in low dose (1:1/2) and variety Letle Fhine should be used.

Hydrocarbon concentration was reduced in the contaminated treatments by 62.3 per cent in nine months of bioremediation.

Initial and final results with regard to the physical and chemical properties of the treatments indicate a reduction in phosphorus, potassium and sulfate content as well as interchangeable cationic capacity. Furthermore, substrates were acidified and salinity was reduced because of lixiviation due to watering.

INDICE DE CONTENIDO

	Página
Indice de cuadros.....	xiii
Indice de figuras.....	xvi
Introducción.....	1
Hipótesis.....	3
Objetivos.....	3
Revisión de Literatura.....	4
Cultivo del Kalanchoe.....	4
Importancia económica.....	4
Descripción del cultivo.....	5
Propagación.....	6
Enmacetado.....	8
Espaciado de las macetas.....	9
Despunte.....	9
Intensidad luminosa.....	10
Riego.....	10
Temperatura.....	11
Fertilización.....	11
Floración.....	11
Sustrato o medio de crecimiento.....	12
Composición de los sustratos.....	14
Residuos utilizados en los sustratos.....	15
Clasificación de los sustratos.....	16
Características de un buen medio de crecimiento.....	17
Biorremediación.....	19
Generalidades.....	19
Ventajas y desventajas de la biorremediación.....	20
Materiales y Métodos.....	23
Localización del experimento.....	23
Descripción de materiales.....	24
Estiércol de bovino.....	24
Bagazo de caña.....	24
Gallinaza.....	25
Perlita.....	26
Turba.....	26
Suelo de bosque.....	27
Suelo de barranco.....	28
Kalanchoe.....	28
Hidrocarburo.....	28
Sulfato de calcio.....	31
Selección de tratamientos.....	31
Diseño experimental y los tratamientos.....	32
Preparación de las mezclas de sustratos.....	36

	Página
Preparación de las macetas.....	40
Propagación de los Kalanchoes	40
Transplantes.....	41
Fertilización del cultivo.....	41
Riego del cultivo.....	42
Labores de cultivo.....	43
Iluminación suplementaria.....	43
Evaluación de los tratamientos.....	44
Mediciones en los sustratos.....	44
Mediciones en planta.....	46
Resultados y Discusión.....	48
Variables de planta.....	48
Diámetro de tallo.....	48
Altura de planta.....	56
Número de hojas.....	63
Longitud de hoja.....	73
Ancho de la hoja.....	79
Variables del suelo.....	86
Contenido de materia orgánica.....	86
Conductividad eléctrica.....	93
pH de los sustratos.....	100
TPH's en lixiviados.....	107
Porcentaje de eliminación del hidrocarburo.....	114
Evaluación de la biorremediación.....	123
Conclusiones.....	136
Resumen.....	139
Literatura Citada.....	143
Apéndice.....	147

INDICE DE CUADROS

Cuadro	Página
3.1 Algunas propiedades físicas y químicas de los materiales orgánicos utilizados como ingredientes de sustratos para el cultivo del <i>Kalanchoe blossfeldiana</i> Poelln. (Laboratorio de Química de Suelos Departamento de Suelos, UAAAN. 1998).....	29
3.2 Algunas propiedades físicas y químicas de suelo de bosque y barranco utilizadas como ingredientes en la elaboración de sustratos para el cultivo de <i>Kalanchoe blossfeldiana</i> Poelln. (Laboratorio de Química de Suelos Departamento de Suelos, UAAAN 1998).....	30
3.3 Descripción de los tratamientos evaluados para determinar el efecto de los sustratos sobre el desarrollo de <i>Kalanchoe blossfeldiana</i> Poelln.....	33
3.4 Análisis inicial físico y químico del sustrato utilizado para los tratamientos testigos. (Laboratorio de Química de Suelos Departamento de Suelos, UAAAN 1998).....	37
3.5 Análisis químico de la mezcla de hidrocarburo y yeso (relación 1:3) utilizada en los tratamientos.....	38
3.6 Análisis inicial de algunas propiedades físicas y químicas de los tratamientos contaminados con hidrocarburos utilizados como sustratos para el cultivo de <i>Kalanchoe blossfeldiana</i> Poelln. (Laboratorio de Química de Suelos Departamento de Suelos, UAAAN. 1998).....	39
3.7 Evaluación de las plantas de <i>Kalanchoe</i> antes de su transplante a los tratamientos, después de un período de acondicionamiento en macetas pequeñas.....	42
4.1 Análisis de varianza para la variable diámetro de tallo correspondiente a los tratamientos contaminados con hidrocarburo.....	49
4.2 Análisis de varianza para la variable altura de planta correspondiente a los tratamientos contaminados con hidrocarburos.....	57
4.3 Análisis de varianza para la variable número de hojas correspondiente a los tratamientos contaminados con hidrocarburo.....	65
4.4 Prueba de Tukey al uno por ciento sobre las medias de respuesta para la interacción (AxB), en la variable número de hojas de <i>kalanchoe</i>	69
4.5 Análisis de varianza para la variable longitud de hoja correspondiente a los tratamientos contaminados con hidrocarburo.....	74

Cuadro	Página
4.6 Análisis de varianza para la variable ancho de la hoja en plantas de kalanchoe correspondiente a los tratamientos contaminados con hidrocarburo.....	81
4.7 Análisis de varianza para la variable contenido de materia orgánica a los nueve meses de biorremediación correspondiente a los tratamientos contaminados con hidrocarburo.....	88
4.8 Análisis de varianza para la variable conductividad eléctrica (dS/m) a los nueve meses de biorremediación, correspondiente a los tratamientos contaminados con hidrocarburo.....	96
4.9 Análisis de varianza para la variable pH en los sustratos a los nueve meses de biorremediación, correspondiente a los tratamientos contaminados con hidrocarburo.....	102
4.10 Prueba de Tukey al uno por ciento sobre las medias de las combinaciones de (AxC) sobre el pH de los sustratos contaminados al final del experimento.....	104
4.11 Análisis de varianza para la variable TPH's (mg/kg) sobre los lixiviados a los nueve meses de biorremediación correspondiente a los tratamientos contaminados con hidrocarburo.....	108
4.12 Análisis de varianza para la variable porcentaje de eliminación del hidrocarburo en los tratamientos contaminados a los nueve meses de biorremediación.....	115
4.13 Prueba de Tukey al uno por ciento sobre las medias de respuesta para la combinación de los factores fuentes de materia orgánica y dosis de materia orgánica (AxB) sobre el porcentaje de eliminación de hidrocarburo en sustratos contaminados al final del experimento.....	121
4.14 Resultados de una cuenta bacteriana efectuada en muestras tomadas de los tratamientos contaminados al final del experimento. (Laboratorio de Microbiología de Suelos Departamento de Suelos UAAAN 1998).....	122
4.15 Concentración de hidrocarburos totales del petróleo (TPH's) en los tratamientos contaminados al inicio y al final del experimento, después de nueve meses de biorremediación en invernadero.....	124
4.16 Evolución de la conductividad eléctrica (dS/m) en sustratos contaminados con hidrocarburo a lo largo de nueve meses de biorremediación. (Laboratorio de Química de Suelos, Departamento de Suelos UAAAN, 1998).....	128

Cuadro	Página
4.17 Evolución del pH en los sustratos contaminados con hidrocarburo a lo largo de nueve meses de biorremediación. (Laboratorio de Química de Suelos, Departamento de Suelos UAAAN, 1998).....	131
4.18 Evolución del contenido en la materia orgánica y cenizas en los sustratos contaminados con hidrocarburo a lo largo de nueve meses de biorremediación. (Laboratorio de Química de Suelos Departamento de Suelos UAAAN, 1998).....	133
4.19 Análisis final de algunas propiedades químicas de muestras tomadas a los tratamientos después de nueve meses de biorremediación. (Laboratorio de Química de Suelos. Departamento de Suelos UAAAN. 1998).....	135

INDICE DE FIGURAS

Figura	Página
3.1 Plano de distribución de los tratamientos en los bancales de invernadero, diseñados bajo un factorial completamente al azar.....	34
4.1 Efecto de la interacción de las fuentes de materia orgánica (factor A) con las dosis de materia orgánica (factor B) y las variedades de kalanchoe (factor C) sobre el diámetro de tallo.....	50
4.2 Efecto de la fuente de materia orgánica (factor A), dosis de materia orgánica (factor B) y dos genotipos de kalanchoe (factor C) sobre el diámetro de tallo.....	51
4.3 Efecto de la interacción entre los niveles del factor FA (fuentes de materia orgánica) con los niveles del factor FB (dosis de materia orgánica), sobre el diámetro de tallo de plantas de kalanchoe.....	53
4.4 Efecto de la interacción entre las fuentes de materia orgánica (factor A) y las variedades de kalanchoe (factor C) sobre el diámetro de tallo de las plantas.....	54
4.5 Efecto de la interacción entre los niveles del factor FB (dosis de materia orgánica), con los niveles del factor FC (variedades de kalanchoe), sobre el diámetro de tallo.....	55
4.6 Efecto de la fuente de materia orgánica (factor A), dosis de materia orgánica (factor B) y dos genotipos de kalanchoe (factor C) sobre la altura de planta.....	58
4.7 Efecto de la interacción entre los niveles del factor FA (fuentes de materia orgánica) con los niveles del factor FB (dosis de materia orgánica), sobre la altura de planta de kalanchoe.....	60
4.8 Efecto de la interacción entre los niveles del factor FA (fuentes de materia orgánica) con los niveles del factor FC (variedades de kalanchoe) sobre la altura de planta.....	61
4.9 Efecto de la interacción entre los niveles del factor FB (dosis de materia orgánica) con los niveles del factor FC (variedades de kalanchoe) sobre la altura de planta.....	62
4.10 Efecto de la interacción de las fuente de materia orgánica (factor A) con las dosis de materia orgánica (factor B) y variedades de kalanchoe (factor C) sobre la altura de planta.....	63
4.11 Efecto de la interacción de las fuentes de materia orgánica (factor A) con las dosis de materia orgánica (factor B) y variedades de kalanchoe (factor C) sobre el número de hojas.....	66
4.12 Efecto de la fuente de materia orgánica (factor A), con las dosis de materia orgánica (factor B) y dos genotipos de kalanchoe (factor C) sobre el número de hojas.....	67

Figura	Página
4.13 Efecto de la interacción entre los niveles del factor FA (fuentes de materia orgánica) con los niveles del factor FB (dosis de materia orgánica) sobre el número de hojas de plantas de kalanchoe.....	70
4.14 Efecto de la interacción entre los niveles del factor FA (fuentes de materia orgánica) con los niveles del factor FC (variedades de kalanchoe) sobre el número de hojas.....	71
4.15 Efecto de la interacción entre los niveles del factor FB (dosis de materia orgánica) con los niveles del factor FC (variedades de kalanchoe) sobre el número de hojas.....	72
4.16 Efecto de la interacción de las fuentes de materia orgánica (factor A) con las dosis de materia orgánica (factor B) y variedades de kalanchoe (factor C) sobre la longitud de hoja.....	75
4.17 Efecto de la fuente de materia orgánica (factor A), con las dosis de materia orgánica (factor B) y dos variedades de kalanchoe (factor C) sobre la longitud de hoja.....	76
4.18 Efecto de la interacción entre los niveles del factor FA (fuentes de materia orgánica) con los niveles del factor FB (dosis de materia orgánica) sobre la longitud de hojas de plantas de kalanchoe.....	78
4.19 Efecto de la interacción entre los niveles del factor FB (dosis de materia orgánica) con los niveles del factor FC (variedades de kalanchoe) sobre la longitud de hojas.....	78
4.20 Efecto de la interacción entre los niveles del factor FA (fuentes de materia orgánica) con los niveles del factor FC (variedades de kalanchoe) sobre la longitud de hoja.....	79
4.21 Efecto de la interacción de las fuentes de materia orgánica (factor A) con las dosis de materia orgánica (factor B) y variedades de kalanchoe (factor C) sobre el ancho de la hoja.....	82
4.22 Efecto de la fuente de materia orgánica (factor A), con las dosis de materia orgánica (factor B) y dos variedades de kalanchoe (factor C) sobre el ancho de la hoja.....	83
4.23 Efecto de la interacción entre los niveles de los factores FA (fuentes de materia orgánica) y FB (dosis de materia orgánica) sobre el ancho de la hoja de plantas de kalanchoe.....	84
4.24 Efecto de la interacción entre los niveles de los factores FB (dosis de materia orgánica) y FC (variedades de kalanchoe) sobre el ancho de la hoja.....	85
4.25 Efecto de la interacción entre los niveles de los factores FA (fuentes de materia orgánica) y FC (variedades de kalanchoe) sobre el ancho de la hoja.....	86

Figura	Página
4.26 Efecto de la fuente de materia orgánica (factor A), dosis de materia orgánica (factor B) y dos variedades de kalanchoe (factor C) sobre el contenido de materia orgánica en los sustratos al final del experimento.....	89
4.27 Efecto de la interacción entre los niveles de los factores FA (fuentes de materia orgánica) y FB (dosis de materia orgánica) sobre el contenido de materia orgánica en los sustratos al final del experimento.....	90
4.28 Efecto de la interacción entre los niveles de los factores FA (fuentes de materia orgánica) y FC (variedades de kalanchoe) sobre el contenido de materia orgánica en los sustratos al final del experimento.....	91
4.29 Efecto de la interacción entre los niveles de los factores FB (dosis de materia orgánica) y FC (variedades de kalanchoe) sobre el contenido de materia orgánica en los sustratos al final del experimento.....	92
4.30 Efecto de la interacción de las fuentes de materia orgánica (factor A) con las dosis de materia orgánica (factor B) y las variedades de kalanchoe (factor C) sobre el contenido de materia orgánica.....	93
4.31 Efecto de la interacción de las fuentes de materia orgánica (factor A) con las dosis de materia orgánica (factor B) y las variedades de kalanchoe (factor C) sobre la conductividad eléctrica (dS/m) en los sustratos contaminados al final del experimento.....	97
4.32 Efecto de la fuente de materia orgánica (factor A), dosis de materia orgánica (factor B) y dos variedades de kalanchoe (factor C) sobre la conductividad eléctrica (dS/m) en los sustratos contaminados al final del experimento.....	98
4.33 Efecto de la interacción entre los niveles de los factores FA (fuentes de materia orgánica) y FB (dosis de materia orgánica) sobre la conductividad eléctrica (dS/m) de los sustratos.....	99
4.34 Efecto de la interacción entre los niveles de los factores FA (fuentes de materia orgánica) y FC (variedades de kalanchoe) sobre la conductividad eléctrica (dS/m) de los sustratos.....	99
4.35 Efecto de la interacción entre los niveles de los factores FB (dosis de materia orgánica) y FC (variedades de kalanchoe) sobre la conductividad eléctrica (dS/m) de los sustratos al final del experimento.....	100
4.36 Efecto de la interacción de las fuentes de materia orgánica (factor A) con las dosis de materia orgánica (factor B) y las variedades de kalanchoe (factor C) sobre el pH de los sustratos contaminados al final del experimento.....	104

Figura	Página
4.37 Efecto de la fuente de materia orgánica (factor A), dosis de materia orgánica (factor B) y dos variedades de kalanchoe (factor C) sobre el pH de los sustratos contaminados al final del experimento.....	105
4.38 Efecto de la interacción entre los niveles de los factores FA (fuentes de materia orgánica) y FB (dosis de materia orgánica) sobre el pH de los sustratos al final del experimento.....	106
4.39 Efecto de la interacción entre los niveles de los factores FB (dosis de materia orgánica) y FC (variedades de kalanchoe) sobre el pH de los sustratos al final del experimento.....	106
4.40 Efecto de la fuente de materia orgánica (factor A), dosis de materia orgánica (factor B) y dos variedades de kalanchoe (factor C) sobre los hidrocarburos totales del petróleo TPH's en lixiviados efectuados a los sustratos contaminados al final del experimento.....	110
4.41 Efecto de la interacción entre los niveles de los factores FA (fuentes de materia orgánica) y FB (dosis de materia orgánica) sobre la concentración de los hidrocarburos totales del petróleo TPH's en los lixiviados de los sustratos contaminados al final del experimento	111
4.42 Efecto de la interacción entre los niveles de los factores FA (fuentes de materia orgánica) y FC (variedades de kalanchoe) sobre la concentración de los hidrocarburos totales del petróleo TPH's sobre los lixiviados de los sustratos contaminados al final del experimento	112
4.43 Efecto de la interacción entre los niveles de los factores FB (dosis de materia orgánica) y FC (variedades de kalanchoe) en la concentración de los hidrocarburos totales del petróleo TPH's en los lixiviados.....	113
4.44 Efecto de la interacción de las fuentes de materia orgánica (factor A) con las dosis de materia orgánica (factor B) y las variedades de kalanchoe (factor C) sobre los hidrocarburos totales del petróleo TPH's en lixiviados a los sustratos contaminados al final del experimento.....	114
4.45 Efecto de los niveles del factor FA (fuentes de materia orgánica), de los niveles del factor FB (dosis de materia orgánica) y los niveles del factor FC (variedades de kalanchoe) sobre la eliminación de hidrocarburo en sustratos contaminados al final del experimento.....	116
4.46 Efecto de la interacción de los niveles del factor FA (fuentes de materia orgánica) con los del factor FC (variedades de kalanchoe) sobre la eliminación de hidrocarburo en sustratos contaminados al final del experimento.....	117

Figura	Página
4.47 Efecto de la interacción de los niveles de los factores FB (dosis de materia orgánica) y FC (variedades de kalanchoe) sobre la eliminación de hidrocarburo en sustratos contaminados al final del experimento.....	118
4.48 Efecto de la interacción de las fuentes de materia orgánica (factor A) con las dosis de materia orgánica (factor B) y variedades de kalanchoe (factor C) sobre la eliminación de hidrocarburos en sustratos contaminados al final del experimento.....	119
4.49 Efecto de la interacción entre los niveles de los factores FA (fuentes de materia orgánica) y FB (dosis de materia orgánica) sobre la eliminación de hidrocarburos en sustratos contaminados al final del experimento.....	120

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente al principal reto que se enfrenta la humanidad, es el crecimiento desmedido de la población y el conjunto de problemas que están en función de ella (Turk *et al.*, 1983). Esta problemática es muy diversa, debido que en la medida que se incrementa la población hay mayor necesidad de todo, entiéndase esto último como mayor cantidad de alimentos, más habitaciones, más y mejor educación y benefactores diversos con un costo ecológico bastante alto. Precisamente por eso se afirma, que un incremento en la población significa aumento en todo tipo de contaminación ambiental lo cual produce un acelerado agotamiento de los recursos naturales (Strobbe, 1973).

El uso excesivo de los recursos es resultado de una sociedad de consumo que está logrando degradar su propio ambiente natural (Oliver, 1977). El uso del petróleo contribuye fuertemente a la contaminación del medio, sin embargo es una de las principales fuentes energéticas y de materia prima para muchos procesos industriales. En México, país productor de petróleo y cuya economía está basada fuertemente en esta industria, representa además una importante fuente en la captación de divisas. Pese a todas las cualidades que posee este hidrocarburo es importante resaltar el gran impacto que tiene sobre los recursos naturales en todo el mundo, debido a los procesos de extracción, transporte, almacenamiento, producción y uso del petróleo (UNAM, 1990).

Los daños causados por el petróleo al medio van desde la contaminación de mares y lagos, provocando la muerte de animales y la desaparición de la vegetación; de hecho, se le considera como el principal contaminante de los mares (Freedman, 1989). Sin embargo, no debemos olvidar su efecto negativo sobre los suelos agrícolas cercanos a los puntos de

extracción, conducción, almacenamiento y refinación del hidrocarburo. Dicho impacto se da por derrames directos al suelo ocasionados por accidentes propios de la industria petrolera (INEGI, 1994).

Si consideramos al agua y al suelo como los principales elementos que intervienen en la producción de alimentos, es muy importante que éstos (agua y suelo), se encuentren libres de todo tipo de contaminantes (hidrocarburos) para obtener alimentos sanos y que aseguren una alta producción para una población que está en constante crecimiento.

Por lo anterior, una de las principales labores del hombre debe ser la conservación de su propio hábitat, recuperando su entorno y evitando su creciente desgaste. Tal es el caso de la rehabilitación de los suelos contaminados por derrames de hidrocarburos. Las diversas técnicas utilizadas con esta finalidad permiten disminuir el grado de contaminación y reutilizar el suelo en el cultivo de plantas.

En la actualidad se utilizan un sin número de materiales para la fabricación de buenos medios de crecimiento (sustratos) para el cultivo de diversas plantas de ornato. Entre los materiales utilizados se encuentran los residuos urbanos y de la industria, incluyendo los hidrocarburos. Lo anterior nos da pauta en usar hidrocarburos de desecho como ingrediente de sustratos para el cultivo de plantas ornamentales, provocando su degradación continua a través de técnicas de biorremediación.

Por otro lado, la industria florícola en México representa un potencial económico importante sobre todo para el productor. Algunos países como Holanda, consideran que México superará a los Países Bajos en la producción de flor de corte para el año 2003, exportando material vegetativo, flor de maceta y follajes a todo el mundo. Debido a lo anterior, se consideró para el

presente estudio el uso de *Kalanchoe blossfeldiana* Poelln, ya que es una planta ornamental que se maneja como flor en maceta, apreciada por su forma de la hoja y colores llamativos de su flor, siendo una planta que figura entre los follajes más cotizados en México sólo después del *Ficus*, *Trasinas* y *Azaleas*, representando para el productor un cultivo altamente redituable (SARH, 1994).

Hipótesis

- La utilización de sustratos contaminados con hidrocarburos producen plantas de kalanchoe de igual o mejor calidad que el testigo.
- El incremento de la proporción de materia orgánica en el medio de crecimiento fomentará la calidad de las plantas de kalanchoe.

Objetivos

- Dar una nueva alternativa de uso a los hidrocarburos de desecho, durante el proceso de biorremediación.
- Dar seguimiento al proceso de biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos.
- Disminuir el grado de contaminación con respecto al tiempo.
- Evaluar el desarrollo del kalanchoe en sustratos contaminados.
- Seleccionar el sustrato que permita el mejor desarrollo del kalanchoe.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

Cultivo del Kalanchoe

Importancia económica

El cultivo del kalanchoe es considerada como el segundo de importancia económica entre las plantas de flor en maceta en Oklahoma y Texas (Larson, 1994). Esta planta se encuentra dentro de las 10 primeras en cuanto a ventas en los mercados europeos (Jiménez y Caballero, 1990).

Con su variación en la forma de la hoja, colores florales y buena calidad de mantenimiento en el hogar, el kalanchoe tiene un buen potencial como planta para flor en maceta para muchos floricultores (Larson, 1994).

Vidalie (1992) reporta que es un cultivo cuya producción se encuentra en plena expansión. Francia importa más de cinco millones de plantas por año de Dinamarca y Holanda los cuales producen unos 20 millones de plantas, siendo la producción francesa: un millón de macetas

En la actualidad el kalanchoe es la planta para maceta número uno en Dinamarca, y durante los últimos 20 años, ha tenido un rápido incremento en importancia comercial para la producción de planta en maceta en los Estados Unidos. Actualmente Mikkelsen, Inc.; Ashtabula, OH., es la principal fuente de kalanchoes (todas propagadas asexualmente) en los Estados Unidos.

Uno de los principales atractivos que tiene el kalanchoe es su larga duración de floración como planta de maceta para el hogar, además de que requiere de poco cuidado (Pertuit, 1992).

Descripción del cultivo

El *Kalanchoe blossfeldiana* Poelln planta originaria de Madagascar, pertenece a la familia de la Crasulaceas. Es una planta de naturaleza herbácea, de hojas carnosas y suculentas las cuales se encuentran dispuestas en pares a lo largo de los tallos, cada par en ángulos rectos al par superior o inferior, con flores pequeñas en forma de estrellas, las cuales se producen en condiciones de día corto. (Larson, 1994).

De las 200 especies que se conocen, la de mayor importancia económica es el género *K. blossfeldiana*, cultivándose también, pero en menor importancia; *K. tomentosa*, *K. marmorata* y *K. pumila*. El *K. blossfeldiana* ha sido sometida a numerosas hibridaciones, con lo que el mercado ofrece hoy variedades compactas de colores que van del rojo vivo al amarillo pasando por el rosa (Jiménez y Caballero, 1990).

Con respecto a las características morfológicas sobresalientes del cultivo, Vidalie (1992) enfatiza que el kalanchoe es de tamaño bastante reducido de 15 a 35 cm de altura; con follaje oscuro, hojas gruesas y glabras; pequeñas flores en corimbo; siendo la típica planta que se compra "para uno mismo".

El *Kalanchoe blossfeldiana* Poelln, es una hierba suculenta con hojas y tallos que presentan baja superficie y volumen, aunque puede desarrollar tejido leñoso con la edad de la planta. Es nativa de Madagascar, isla ubicada en el Océano Indico al sudeste de las costas de África. Es una dicotiledonea

miembro de la familia Crassulaceae (Orpine), la cual incluye alrededor de 30 géneros y 1500 especies. El *K. blossfeldiana* tiene un hábito de crecimiento vertical con hojas opuestas arregladas de manera muy tupida. Las hojas son obtusas y agudas de una a tres pulgadas de longitud y los peciolo delgados de alrededor de una pulgada de longitud.

La inflorescencia es una cima del tipo dicásica, los ejes producen una flor terminal entre dos ramas iguales, cada rama repite el proceso una o más veces (en una cima dicásica compuesta) o cada una produce solamente una flor terminal (una cima dicásica simple). Cuando la cima es grande, esta se convierte en cincino (una cima enrollada con sus ramas desarrolladas de izquierda a derecha o mejor dicho de una sola dirección). Los colores de las flores van desde el rojo hasta el amarillo (Pertuit , 1992).

Propagación

Las plantas de kalanchoe pueden ser propagadas vía sexual por semilla (semilla muy pequeña 75,000 unidades por gramo) o por medios asexuales utilizando esquejes. Pertuit (1992) afirma que la mayoría de los cultivares de kalanchoes producidos en los Estados Unidos son propagados asexualmente por cortes terminales. Jiménez y Caballero (1990) mencionan que la propagación vía semilla es un método que suele utilizarse fundamentalmente para la obtención de nuevos híbridos. Estos investigadores recomiendan la multiplicación por esquejes, dado que es mucho más sencilla, utilizando esquejes apicales que enraizan fácilmente en tres a cuatro semanas a una temperatura de 22 a 25 °C, aunque también pueden multiplicarse a partir de esquejes de hoja, que se obtendrán desgarrando ésta sin cortarla. Por otra parte, Larson (1994) establece que los esquejes para enraizamiento pueden ser cortados de lotes de plantas madres o bien pueden adquirirse esquejes no enraizados a propagadores especialistas. Así mismo, este autor recomienda la

utilización de esquejes de cinco a siete centímetros de longitud, con solo dos juegos de hojas y los cuales no requieren del uso de alguna hormona de enraizamiento dado que son de fácil enraizamiento. Pertuit (1992) coincide con Larson (1994) al afirmar que los esquejes enraizan fácilmente, por lo que realmente no hay necesidad de que los tallos sean sumergidos en auxinas antes de meterlos en el medio de enraizamiento, pero si una auxina es usada debería ser a una concentración muy baja.

Con respecto al sustrato a utilizar en la fase de enraizamiento de esquejes de kalanchoe, Pertuit (1992) reporta que se han tenido excelentes resultados cuando se utilizan como medio de propagación (v/v) peat moss y perlita o también se puede utilizar un medio altamente orgánico como la combinación de peat moss y una composta arenosa (v/v) o utilizar vermiculita de grado cuatro. Este autor recomienda que es conveniente que el medio sea esterilizado antes de usarse preferentemente utilizando vapor y ajustar el pH entre 6 a 6.5. Sin embargo, Larson (1994) recomienda que el medio de enraizamiento deberá ser suelto, bien drenado y aireado, agrega además, que la combinación de dos partes de musgo de pantano y una parte de perlita áspera en base volumen es adecuada.

La temperatura nocturna adecuada para el enraizamiento debe ser de 16.5 a 18 °C mientras que la diurna debe ser de 21 a 24 °C. La temperatura del medio de propagación debe ajustarse a 21 °C para lograr un enraizamiento óptimo (Larson, 1994).

Para acelerar la fase de enraizamiento, Pertuit (1992) afirma que el rocío intermitente es ideal para el enraizamiento de los kalanchoes. Esto permite que los esquejes sean mantenidos a altas intensidades de luz sin que se marchiten, permitiendo mayor fotosíntesis que la que puede ocurrir a bajas intensidades de luz; por lo tanto, los esquejes producen más alimento en un

cociente mayor y de esta forma enraizan más rápido. El ciclo de rocío debería ser de seis segundos cada tres a cinco minutos durante el verano (cuando las temperaturas son cálidas y la intensidad lumínica es alta) mientras que en el invierno son seis segundos cada seis a 10 minutos.

Enmacetado

La mayoría de los kalanchoes en los Estados Unidos son comercializados en macetas de plástico de 4 a 6 ½ pulgadas de diámetro (Pertuit, 1992). Por otra parte, Jiménez y Caballero (1990) recomiendan que si se desean plantas pequeñas se pondrán en macetas de 10 cm, mientras que en macetas de 12 cm se pondrán tres esquejes enraizados para obtener plantas más grandes.

Larson (1994) cita que en las macetas pequeñas se utilizan para los cultivares de follaje pequeño, mientras que los recipientes grandes son para los tipos de hojas grandes y carnosas. Agrega además, que los recipientes pequeños de 7.5 a 10 cm requieren sólo una planta de un cultivar pequeño, aunque puede utilizarse un solo esqueje enraizado de kalanchoe de un cultivar grande en una maceta de 15.25 a 16.5 cm.

Es recomendable que las macetas de plástico que se utilicen para el cultivo de kalanchoe o de cualquier otra planta, se encuentren limpias de todo organismo patógeno, por lo que éstas deberán lavarse y esterilizarse. Hartmann y Kester (1995) mencionan al respecto que las macetas (y charolas) de plástico no pueden esterilizarse con vapor, pero algunos de los organismos patógenos vegetales más comunes pueden eliminarse con una inmersión en agua caliente a 70 °C durante tres minutos sin que se dañe el plástico.

Espaciado de las macetas en el Invernadero

Con respecto a este apartado Pertuit (1992) afirma que la clave del espaciado es la experiencia y por lo tanto no hay una recomendación general que se pueda hacer, más bien, se deben considerar algunos factores como: el cultivar de kalanchoe, si las plantas son o no despuntadas (y cuándo), si serán plantados una, dos o tres esquejes por maceta, la estación, la localización del área de producción, el tamaño final proyectado de las plantas, el período vegetativo de las plantas, y, si serán o no aplicados retardantes de crecimiento.

Despunte

El despunte es la eliminación del punto terminal de crecimiento vegetativo, regularmente se hacen despuntes suaves removiendo de uno a 1.5 cm del extremo del brote, y es una práctica necesaria en algunos cultivares de kalanchoe. Cultivares de lento crecimiento requieren de despunte. Plantas cultivadas en macetas de 10 cm se despuntan inmediatamente después de plantados y luego se les da tratamiento de día corto, mientras que cultivares en macetas de 15.25 cm requieren cuatro semanas de día largo después de plantación y luego se despuntan. Los cultivares de rápido crecimiento se despuntan una semana después de comenzado los días cortos (Larson 1994). Por otro lado, Pertuit (1992) afirma que el despunte no debería ser universalmente recomendado para la producción de kalanchoes, por que éste no siempre es necesario para el crecimiento y desarrollo axilar. Algunos cultivares de kalanchoe crecen mucho donde el desarrollo lateral ocurre sin el despunte.

Vidalie (1992) afirma que se despunta el tallo para ramificarlo y obtener plantas compactas y floríferas a las cuatro o siete semanas después del

esquejado, regularmente se practica un despunte o bien dos o tres si se desean plantas grandes.

Intensidad luminosa

Las plantas de kalanchoe no deben cultivarse con luz ilimitada, por lo que se sugiere cultivar las plantas con luz completa durante el otoño, invierno y primavera, por lo que no se requiere sombra de noviembre hasta febrero, mientras que se requiere luz reducida durante los meses del verano (Larson 1994). Por ejemplo, Pertuit (1992) señala que las plantas madres deben mantenerse en condiciones vigorosas, por lo que deben crecer a temperaturas e intensidades luminosas cerca de lo óptimo, recomendando temperaturas nocturnas de 60 °F y diurnas de 72 °F y alrededor de 49.5 klx ó 4500 fc (foot-candles) de intensidad luminosa.

El kalanchoe se cultiva en invernaderos muy luminosos, siendo el óptimo 30,000 lux (Vidalie, 1992).

Riego

Aunque los kalanchoes son plantas suculentas éstas no deberan estar sujetas a un estrés hídrico, sobre todo durante la producción (Pertuit, 1992). Vidalie (1992) recomienda que los riegos sean regulares pero es muy importante que éstos no sean excesivos.

El kalanchoe sobrevive largos periodos sin agua, sin embargo algunos cultivares requieren de riego frecuente para mantener un follaje y flores de alta calidad, pero se recomienda un medio de crecimiento seco y regarlo cuando sea necesario. Algunos floricultores recomiendan regar las plantas por las mañanas y evitar el contacto del agua con el follaje, por lo que no es factible el

uso del riego por aspersión. Los métodos comunes de riego son el uso de tubos en forma de espagueti y el riego con esterilla (Larson, 1994).

Temperatura

Se debe ajustar temperatura nocturna a 21 °C para el crecimiento acelerado de la mayoría de los cultivares y también ajustar la temperatura diurna entre 27 a 28 °C. La temperatura ideal para el desarrollo de la raíz es de 21 °C recomendándose dar calor a la base (Larson, 1994). Vidalie (1992) reporta de 20 a 22 °C en el aire y 24 a 25 °C en el fondo, agrega además, que es una planta poco exigente en temperatura de 16 a 18 °C en invierno; si la temperatura es inferior a 15 °C la floración se retarda.

Fertilización

Se recomienda un abonado de mantenimiento utilizando fertilizantes solubles (equilibrio 1 - 0.25 - 0.8) cada 8 a 10 días en dosis de 1g/L en invierno y 2 g/L en el verano, aunque también se puede realizar un abonado de fondo utilizando un abono completo en dosis de 2 a 3 kg/m³, sin embargo es poco practicada (Vidalie, 1992). Se recomienda una fertilización constante o por inyección, con una dosis de 200 a 300 ppm de nitrógeno, de 50 a 200 ppm de fósforo y de 150 a 250 ppm de potasio cada 7 a 10 días (Larson, 1994).

Floración

El kalanchoe es una planta típica de día corto, es decir presenta floración en condiciones de día corto y noche larga, mientras que en condiciones de día largo y noche corta su respuesta es vegetativa o no hay presencia de flores. Vidalie (1992) opina que la reacción al fotoperiodo de esta planta permite programar la producción, por ejemplo, si se desea provocar la

floración en días largos, él recomienda oscurecer durante cuatro a siete semanas (según cultivares, ver catálogos), de las 5:00 p.m. hasta las 8:00 a.m. del día siguiente, de esta forma se tendrán 15 horas de oscuridad por nueve horas de día o luz; la floración se produce de tres a cuatro semanas después del comienzo de los días cortos. Si se desea retardar la floración en días cortos, se recomienda iluminar durante 4 a 8 semanas (según los cultivares y la altura de las plantas que se desea obtener), a razón de 3 a 5 horas por la noche aplicando 50 a 100 lux/m².

Sustrato o medio de crecimiento

El sustrato en horticultura es todo aquel material sólido distinto del suelo *in situ*, natural, de síntesis o residual, mineral u orgánico que colocado en un contenedor, en forma pura o en mezcla, permite el anclaje del sistema radical, desempeñando, por tanto, un papel de soporte para la planta (Abad, 1991; Abad *et al.*, 1996).

El sustrato es el soporte de la planta donde se desarrollan las raíces y donde éstas deben encontrar el agua y los elementos necesarios para su crecimiento. En los cultivos ornamentales en maceta raramente se utiliza tierra en el sentido habitual (Jiménez y Caballero, 1990).

Con respecto al medio de crecimiento adecuado para la producción de kalanchoes, Pertuit (1992) afirma que es muy importante que el medio de crecimiento sea bien aireado y drenado, así recomendando que el medio contenga la mitad de turba o un medio altamente orgánico. Agrega además, que el pH del medio deberá encontrarse en el rango de seis a siete, debido a que la deficiencia de zinc es agravada por un alto contenido de fósforo, por lo tanto un pH de 6 a 6.5 sería ideal. En este rango, el zinc es altamente disponible, siendo también disponible el fósforo pero no excesivamente.

Recomienda que el pH deberá ser ajustado usando carbonato de calcio y magnesio.

Larson (1994) afirma que el kalanchoe debe ser cultivado en un medio bien aireado y drenado, dado que estas plantas no crecen bien con los "pies mojados", así recomienda un medio que contenga 1/3 de turba, 1/3 de perlita y 1/3 de tierra vegetal, o bien cinco partes de tierra vegetal, cuatro partes de turba y cuatro partes de arcilla verde, o 45 por ciento de turba de pantano gruesa, 45 por ciento de vermiculita gruesa y 10 por ciento de caliza gruesa. Utilizar tres partes de corteza de pino molida una parte de arena y una parte de turba de pantano.

Este mismo autor recomienda ajustar el pH del medio entre seis a siete, dado que plantas producidas en medios con pH de 5.5 tienen una coloración café en las hojas superiores, mientras que a pH arriba de siete causan un amarillamiento de las hojas superiores. También es indispensable que el medio antes de usarse sea esterilizado. Con respecto a esto último Hartmann y Kester, (1995) aclaran que es común utilizar el término esterilización del suelo, sin embargo, es más correcto emplear el término pasteurización, debido a que los procesos de calentamiento utilizados no matan a todos los organismos. Recomendán que es preferible la pasteurización de los medios utilizando vapor. Es necesario calentar el suelo húmedo a 82 °C por 30 minutos para matar a la mayoría de las bacterias y hongos dañinos, nemátodos, insectos y a la mayoría de las semillas de malezas. Se puede utilizar una temperatura menor como 60 °C por 30 minutos.

Jiménez y Caballero (1990) mencionan que el uso del sustrato "tipo" es ideal para el cultivo del kalanchoe. Este sustrato consiste en la mezcla de cuatro partes de turba rubia por una parte de arena fina o poliuretano o perlita, a esta mezcla se añade de 1 a 3 g de la siguiente mezcla: superfosfato de

calcio 1 g; nitrato de amonio $\frac{1}{2}$ g; nitrato de calcio $\frac{1}{2}$ g; sulfato de potasio 1 g; mezcla de microelementos 0.05 g; sulfato de magnesio 0.5 g; carbonato de calcio o hidróxido de calcio, lo necesario para alcanzar el pH requerido.

Vidalie (1992) recomienda para el kalanchoe sustratos de pH de seis a siete, muy permeables al aire y al agua como por ejemplo: 1/3 tierra de jardín + 1/3 turba + 1/3 arena gruesa o, más frecuentemente, turba rubia + arcilla expandida (o puzolana o polvo de roca) y también turba fibrosa sola.

Composición de los Sustratos

La importancia del cultivo en sustratos es obvia: la mayor parte de la producción de planta ornamental tienen lugar en contenedores o macetas, y por lo tanto, en sustratos, del mismo modo que existe un aumento en la demanda de sustratos para el cultivo de hortalizas bajo invernadero en banquetas o sacos. También la jardinería y los espacios de ocio y deportes consumen sustratos distintos del suelo cuando se realizan sobre espacios confinados o delimitados (Burés, 1997).

Los sustratos empleados en la actualidad para el crecimiento de plantas en maceta y contenedor pueden tener una composición muy variable, desde suelo mineral u otros componentes inorgánicos, hasta materiales orgánicos naturales o sintéticos, pasando por mezclas de ambos tipos de ingredientes, en proporciones variables (Ansorena, 1994).

Muchos de los materiales que se utilizan como sustratos o como componentes de sustratos son subproductos de actividades agrícolas o industriales que encuentran así una aplicación, contribuyendo a una mejora de la calidad medioambiental (Burés, 1997).

Residuos utilizados en los sustratos

Los sustratos han ido evolucionando con el tiempo, desde los primeros basados en tierra mineral hasta las mezclas actuales basados en componentes orgánicos. Paralelamente a esta evolución, se ha incrementado el uso de los sustratos y de los componentes de ellos en el cultivo de plantas ornamentales y arbustivas, jardinería y campos deportivos. Sin embargo, este creciente uso ha provocado un constante agotamiento de los recursos naturales no renovables. Todo ello ha favorecido el uso de materiales muy diversos, inclusive residuos no deseables (lodos de depuradora), o subproductos de escaso valor (cortezas de árbol, paja de cereales, etc.). Algunos materiales de origen urbano o industrial que a menudo pueden utilizarse en la agricultura o en la fabricación de sustratos:

- Industria de la madera; corteza, aserrín y viruta.
- Residuos urbanos; hojarasca, lodos de depuradora, residuos de jardinería y basuras.
- Industria textil; residuos de lino, lana y algodón.
- Bioindustria; gallinaza, estiércol de porcino y paja.
- Industria alimentaria; desechos de soja, desperdicios de negro de humo, residuos de frutas, café y lúpulo, paja, fibra de coco y cascarilla de arroz.
- Industria del tabaco; polvo y restos de la hoja de tabaco.
- Recursos naturales; lignito.
- Industria del papel; corteza, lodo de depuración.
- Industria siderúrgica; escorias de fundición. (Ansorena, 1994).

Burés (1997) reporta los siguientes materiales que pueden ser utilizados como sustratos:

- **Explotación forestal;** mantillo vegetal o tierra de bosque, hojas, acículas, tierra de castaño, corteza, serrín o virutas de madera, corcho, piñas y cáscaras de piñones.
- **Explotación agrícola;** paja, composta de champiñones, restos de poda, restos de tallos del tabaco, restos de caña de azúcar, fibra de coco y restos de regaliz.
- **Explotación ganadera;** estiércol, gallinaza, pieles y lana, y animales muertos como: aves y peces.
- **Industria agroalimentaria;** orujo de uva, orujo de aceituna, lúpulo, malta, hojas de té, marros de café, cascarilla de arroz, harinera, azucarera, alcoholera, carbonos activos y tierras de filtrado colmatados, cáscara de frutos secos, vainas de algarroba.
- **Actividades industriales diversas;** algodón, lino, fibras acrílicas, escorias de altos hornos, escorias del carbón y lodos de la industria papelera.
- **Núcleos urbanos;** basuras, lodos de depuradoras de aguas residuales urbanas, restos vegetales de jardinería urbana.
- **Yacimientos naturales, explotación minera y construcción;** turbas, tierra, arena, sablón, granito, yacimientos + síntesis mineral, perlita expandida, vermiculita exfoliada, arcilla expandida, arcilla calcinada, lana de roca, fibra de vidrio, puzolanas volcánicas y piedra pómez.
- **Plantas cultivadas para uso como sustrato;** kenaf, álamo y cardos.
- **Explotación marinas;** algas y plantas marinas.
- **Policarbonatos de síntesis;** poliestireno expandido y poliuretanos.

Clasificación de los sustratos

Winsor (1990) clasifica a los sustratos en orgánicos (turbas, cortezas, etc.) y en inorgánicos o inertes (perlita vermiculita entre otros). Esta última denominación se refiere principalmente a la estabilidad química o resistencia a la descomposición.

Abad y Noguera (1998) clasifican a los materiales utilizados para sustratos en: **1) Materiales inorgánicos o minerales**; dentro de éste grupo tenemos los de **origen natural** que son los obtenidos de rocas o minerales y son modificados mediante tratamientos físicos sencillos, no son biodegradables; arena, grava, tierra volcánica, etc.; los **transformados o tratados** a partir de rocas o minerales, mediante tratamientos físicos (a veces químicos), ejemplos: arcilla expandida, lana de roca, perlita, vermiculita, etc.; y los **residuos y subproductos industriales** comprende materiales procedentes de actividades industriales como: escorias de altos hornos, estériles del carbón, ladrillo molido, etc.; **2) Materiales orgánicos**, comprende los **de origen natural** y son sujetos a la descomposición biológica (turberas); los **de síntesis** que son polímeros orgánicos no biodegradables y se obtienen mediante síntesis química: espuma de poliuretano, espuma de urea-formaldehído, poliestireno expandido; **subproductos y residuos de diferentes actividades agrícolas, industriales y urbanas**, muchos de éstos requieren un proceso de compostaje como: cascarilla de arroz, estiércoles, corteza de árboles, serrín, fibra de madera, fibra de coco, residuos de corcho, residuos sólidos urbanos, lodos de depuración de aguas residuales, etc.

Características de un buen medio de crecimiento

Para obtener buenos resultados durante el crecimiento de las plantas, se requieren las siguientes características del sustrato:

- Elevada capacidad de retención de agua fácilmente disponible.
- Suficiente suministro de aire.
- Distribución del tamaño de las partículas que mantengan las condiciones antes descritas.
- Baja densidad aparente.
- Elevada porosidad total.
- Estructura estable, que implica la contracción o hinchazón del sustrato.

- Baja o apreciable capacidad de intercambio catiónico.
- Suficiente nivel de nutrimentos asimilables.
- Salinidad reducida.
- pH ligeramente ácido y moderada capacidad tampón, así como mínima velocidad de descomposición.
- Libre de semillas de malas hierbas, nematodos y otros patógenos, y sustancias fitotóxicas.
- Reproductibilidad y disponibilidad.
- Bajo costo.
- Fácil de preparar y manejar.
- Fácil de desinfectar y estabilidad frente a la desinfección
- Resistencia a cambios extremos físicos, químicos y ambientales. (Raviv *et al.*, 1986; Abad, 1991, 1995).

Bowman *et al.*, (1994) efectuaron un estudio para determinar la potencialidad del uso de las llantas de automóvil trituradas como un mejorador de medios para contenedor y evaluaron el crecimiento de crisantemo *Chrysanthemum x morifolium* var. "Bright Golden Anne" sobre estos sustratos. El cultivo se plantó en macetas de 1.56 L los cuales contenían arena y aserrín en relación de 1:2 (v/v) o medios en los cuales las partículas finas o granulares de hule sustituyeron el 33 por ciento, 67 por ciento o el 100 por ciento del aserrín. El mejoramiento con el material granular disminuyó la porosidad total y la capacidad de contenedor e incrementó la porosidad ocupada por aire así como la densidad aparente en relación al control con aserrín. El mejoramiento del medio con el material fino no alteró apreciablemente la porosidad total, capacidad de contenedor, o densidad aparente, pero hizo incrementar la porosidad ocupada por aire. La altura de planta, el peso fresco, el peso seco y el número de flores abiertas se redujeron significativamente en los medios mejorados con las partículas de hule comparados con el control con aserrín. El mejoramiento con las partículas de hule redujo la concentración de N, P, K, Ca,

Mg y Cu en el tejido de los brotes, pero incrementó el Zn al doble sobre los valores obtenidos en el control. No hubo acumulación de metales pesados (Cr, Cd, Ni, Pb) o de Na en los tejidos con los tratamientos con las partículas de hule. Se demostró que las llantas trituradas pueden ser usadas como un componente de medios para contenedores en la producción de crisantemos en invernadero. De cualquier modo, la reducción del crecimiento y la posible toxicidad por Zn puede limitar la utilidad de las llantas como un sustituto de los mejoradores orgánicos convencionales.

Biorremediación

Generalidades

En la actualidad existen varios métodos para tratar los suelos contaminados con materiales peligrosos incluyendo la excavación y colocación de los productos químicos en las llamadas áreas de relleno, extracción con vapor, estabilización y solidificación, lavado de suelos, extracción crítica de fluidos, precipitación química e incineración. Muchos de estos tratamientos físicoquímicos no logran destruir los compuestos dañinos, sólo los une a una matriz modificada o los transfiere de un lugar a otro. Puesto que estos métodos son costosos y no destruyen la contaminación, se han desarrollado métodos sobre el suelo (*ex situ*) y en el lugar de la contaminación (*in situ*) para eliminar el problema. Otra alternativa para tratar los suelos contaminados es la biorremediación o utilización de microorganismos que, mediante reacciones químicas o procesos físicos, contribuyen a eliminar o reducir la contaminación.

El tratamiento microbiológico de los suelos químicamente contaminados comprende la transformación de compuestos tóxicos a formas no tóxicas. Los microorganismos modifican los compuestos inorgánicos mediante diferentes mecanismos: a) concentran los metales dentro de sus células, b) alteran la

movilidad de los metales en el medio por que modifican las condiciones fisicoquímicas y c) destruyen los compuestos inorgánicos como el NO_3 que puede resultar tóxicos si están presentes en altas concentraciones (Atlas, 1984).

La biorremediación comprende una serie de técnicas que utilizan microorganismos capaces de transformar los contaminantes orgánicos en compuestos químicamente más sencillos, e incluso logran una completa mineralización, llevándolos hasta bióxido de carbono (Saval, 1997).

La agencia de protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) define a la biorremediación como “el proceso en el que microbios típicamente bacterias u hongos, degradan químicos peligrosos a compuestos menos tóxicos”

La solución a la contaminación ambiental requiere de una amplia variedad de tecnologías. La más antigua es la biorremediación, proceso natural en el cual los microorganismos convierten metabólicamente las sustancias orgánicas en agua y bióxido de carbono. El éxito de la biorremediación depende de la utilización eficiente de los procesos microbianos y de la creación de un medio de crecimiento adecuado para el desarrollo del microorganismo (Ensley, 1991).

Ventajas y desventajas de la biorremediación

La principal ventaja de la biorremediación es que es un proceso natural. Al menos en teoría es el camino a seguir para la destrucción completa de una amplia variedad de contaminantes. Los compuestos dañinos pueden transformarse en productos inocuos y en la mayoría de los casos, la biomasa y otros productos de la degradación microbiana no dañan al medio.

La principal desventaja es que muchos procesos biológicos son altamente específicos, en donde se deben de considerar varios factores del sitio de biorremediación incluyendo el tipo y tamaño de la población microbiana, condiciones de crecimiento, composición del suelo y las concentraciones de sustratos y nutrimentos. Se tienen dificultades cuando hay sitios con contaminantes mixtos, como en suelos contaminados con compuestos orgánicos y metales pesados. Los productos de la biorremediación pueden ser persistentes o resultar más dañinos que el compuesto inicial, por ejemplo, la biotransformación de tricloroetileno alifático (TCE) puede dar origen al cloruro de vinilo, que es un posible carcinógeno (Ensley, 1991).

Metting (1993) menciona algunos de los compuestos que se han logrado biorremediar en el laboratorio, agua subterránea, agua marina y suelo como: petróleo crudo, hidrocarburos del petróleo como: gasolina, diesel, combustibles para jets, conservadores de madera como: pentaclorofenol y creosote, además de solventes como: acetona, butanol, cloruro de metileno y tricloroetileno.

Saval (1997) en una investigación cuya meta principal era la de sanear y regenerar un suelo contaminado con diesel, se practicó la biorremediación del suelo en campo, mediante la bioestimulación de la flora microbiana autóctona. La investigación se inició con la evaluación de las características del suelo y el grado de contaminación. Al mismo tiempo se trabajó en una superficie de 2,625 m², removiendo el suelo manualmente y con maquinaria. Posteriormente se aplicaron nutrimentos nitrógeno y fósforo en forma de fertilizantes y agua para estimular la actividad microbiana. Se encontró que después de dos meses la concentración de diesel se redujo en 80 por ciento y a los seis meses alcanzó 98 por ciento de eliminación, quedando una concentración residual en el suelo de 10.24 mg/kg. Se observó que durante la época de lluvias hubo crecimiento de especies autóctonas, además de las que se habían sembrado. Con la

bioestimulación se proporcionó al suelo una actividad biológica que no tenía, por lo cual se considera lograda la biorremediación del suelo y la restauración del sitio.

Cepeda *et al.*, (1997) realizaron una investigación de laboratorio e invernadero, en donde probaron el método *PEMEX* de biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos contra el método *PEMEX MODIFICADO POR COMIMSA-UAAAN*, sobre el comportamiento y producción del zacate Rye grass, así como la evaluación de la biorremediación a través del contenido de hidrocarburos, pH y conductividad eléctrica (CE). Los tratamientos incluyeron el uso de cuatro fuentes de materiales orgánicos como: aserrín, estiércol, bagazo de caña y gallinaza, así como el uso de dos tipos de suelos: "suelo vega" y "un suelo local". Las semillas del pasto se sembraron en macetas de cinco kilogramos de capacidad. Los resultados muestran valores de pH y CE mayores en los tratamientos con cal, que los observados en los sustratos con yeso. En este último, no existen problemas de salinidad y presentan una alcalinidad media. Se observó una disminución del contenido de hidrocarburos en el suelo con respecto a los contenidos en 1996 para ambos métodos. Al final concluyeron que el método *PEMEX MODIFICADO POR COMIMSA-UAAAN* es más eficiente, dado que tiene un mayor impacto en la disminución del hidrocarburo en el suelo, teniendo además, un mejor efecto sobre las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del experimento

Este trabajo de investigación se condujo a lo largo de nueve meses, de diciembre de 1997 a finales de septiembre de 1998, en el invernadero de alta tecnología de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, que se localiza aproximadamente a siete kilómetros al sur de la ciudad de Saltillo, Coahuila, México, en la coordenada 25° 25' 41'' latitud norte y 100° 59' 57'' longitud oeste, a 1742 msnm.

Las condiciones de temperatura que prevalecieron a lo largo del experimento, fueron de 26 °C durante el día y 18 °C por la noche, con un 55 por ciento de humedad relativa. Dentro del invernadero, el experimento se localizó en una sección al fondo de éste junto a la pared húmeda, siendo las condiciones de temperatura menor y con una humedad relativa ligeramente mayor que en el resto del invernadero.

El experimento consistió de dos etapas, la primera fue la preparación de los materiales y la elaboración de las mezclas de sustratos, mientras que la segunda fue la biorremediación del sustrato y su evaluación a través del tiempo.

Descripción de los materiales

Estiércol de bovino

En forma general, el estiércol consiste en la fracción sólida de los excrementos del ganado, mezclados con la cama y restos de comida (Burés, 1997). Se utilizó una composta de estiércol de bovino, proporcionada por el Rancho SK Su Carne (engorda de bovinos) localizado en Gral. Escobedo, Nuevo León, México. La composta fue preparada sin la adición de otros materiales como tierra o fertilizante, compostada aproximadamente tres meses en montículos grandes. El material maduro resultante fue tamizado en malla grande, de color negro en húmedo y café oscuro en seco. Antes de su utilización en las mezclas de sustratos, se secó a la sombra sobre plástico de polietileno y posteriormente se tamizó con malla de un centímetro, con el objeto de uniformizar más el material, eliminar piedras grandes y otros objetos que pudiera contener. En el Cuadro 3.1 se presenta la caracterización física y química efectuada a la composta de estiércol, dichas determinaciones fueron realizadas en el laboratorio de Química de Suelos del Departamento de Suelos de la UAAAN, con el objeto de conocer el estado en el que se encontraba el material antes de su utilización en las mezclas de los tratamientos.

Bagazo de caña

El bagazo de caña de azúcar utilizado, fue generosamente donado por el ingenio azucarero "Mante" en Cd. Mante, Tamaulipas. Es un material orgánico, fibroso de color café claro. Este material consiste en la fibra procedente de los restos de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) una vez que se procesa en los molinos de azúcar, es utilizado como sustrato para el cultivo de plantas ornamentales (Burés, 1997).

Para el experimento se utilizó una composta de bagazo de caña con suelo, fabricándose en las instalaciones del Departamento de Suelos. La composta se hizo de 1 m³ de volumen, para ello se trazó en el terreno un cuadro de 1 m² aflojando el suelo hasta unos 30 cm de profundidad, en seguida se colocó una capa de bagazo de unos 10 cm, luego encima de ella, una capa de 2 a 3 cm de suelo de jardín de buena calidad y se distribuyó urea como fuente de nitrógeno (1 kg/m³ de composta), se repitieron las capas hasta completar un metro de altura. El proceso de compostaje fue de cinco meses y a lo largo de dicho período se regó continuamente de manera que siempre estuviera húmedo. Al final se recogió un material menos fibroso, de color café claro a oscuro. El material obtenido se colocó a secar en capas de 20 cm al Sol, posteriormente se tamizó para uniformizar partículas y eliminar piedras utilizando una malla de un centímetro. Antes de utilizarse en las mezclas de los tratamientos se pasteurizó en estufa a una temperatura de 60 °C por 30 minutos. En el Cuadro 3.1 se muestra los resultados obtenidos de la caracterización física y química efectuada sobre la composta de bagazo de caña antes de su utilización en los tratamientos.

Gallinaza

La gallinaza son los excrementos de aves, mezclados con materiales diversos que forman el lecho de las mismas (Burés, 1997). Este material orgánico fue donado por la compañía Procesadora de Gallinaza, S.A. de C.V., en Gral. Zuazua, Nuevo León, México. Este es un producto natural 100 por ciento orgánico, comercializado por esta empresa con el nombre de MEYFER; es utilizado por los agricultores como un mejorador y fertilizante de suelos, y como fuente de materia orgánica. Esta gallinaza no es un producto compostado, sino un material recolectado de las granjas avícolas sometido a un proceso de esterilización en hornos a temperaturas de 150 a 200 °C por

siete a 10 minutos, posteriormente es cribado y encostalado. Tiene un aspecto similar al suelo, de color gris oscuro, de olor fuerte que evidencia su origen. Este material fue utilizado en las mezclas de tratamientos tal como viene de la procesadora. Resultados de la caracterización física y química efectuada al material antes de su uso en el experimento se muestra en el Cuadro 3.1.

Perlita

La perlita natural es una roca volcánica vítrea y se extrae de los escurrimientos de lava. Este mineral, se granula y precalienta a 300-400 °C y se vierte en hornos a 1000 °C, en donde se expande, posteriormente se muele y se criba, donde se obtiene la granulometría deseada (Burés, 1997). La perlita comercial, también llamada termolita, está formada por pequeños gránulos esponjosos de color blanco y es muy pulverulenta, es decir, contiene cantidades variables de polvo fino. Según algunos autores (Burés, 1997; Hartmann y Kester, 1995), es un material inerte, estéril, no se descompone biológica o químicamente, de pH 6.5 -7.2 (neutro) o hasta 8 (alcalino), de conductividad eléctrica muy baja (0.01 - 0.12 dS/m), no tiene capacidad de intercambio catiónico, ni nutrimentos minerales. La perlita es un material ligero que proporciona aireación y retención de humedad a los sustratos. Sólo cabe agregar que este material fue utilizado como ingrediente en la formación de los testigos tal como viene del proveedor sin ningún acondicionamiento adicional.

Turba

Conocido también en la práctica como "peat moss". La turba es un nombre genérico que se aplica a diversos materiales que proceden de la descomposición de los vegetales, dependiendo su naturaleza del origen botánico y de las condiciones climáticas predominantes durante su formación, que determinan a su vez el estado de descomposición (Burés, 1997). La turba

se forma por los restos de vegetación acuática, de pantanos o marismas que han sido conservados debajo del agua en estado de descomposición parcial (Hartmann y Kester, 1995).

Se utilizó una turba de musgo canadiense del género *Sphagnum*, como un ingrediente en la elaboración de los tratamientos testigos. Es un material orgánico fibroso de color café claro en seco, compuesta de ramas y troncos pequeños, fibras y gránulos, con alta capacidad de retención de humedad y pH ácido. Antes de su utilización en el experimento se desmenuzó y cribó en malla de un centímetro, posteriormente fue sometida a un proceso de pasteurización en estufa a una temperatura de 60-80 °C por 30 minutos quedando lista para ser usada. Se aprecia en el Cuadro 3.1 los resultados del análisis físico-químico efectuado a la turba antes de su utilización en el experimento.

Suelo de bosque

Un suelo forestal o de bosque es una entidad natural que se ha desarrollado bajo la influencia de una cubierta forestal; presenta propiedades físicas, químicas y biológicas únicas y distintas de los suelos agrícolas (Pritchett, 1986). Este tipo de suelo está formado por restos de hojas, raíces, ramas y pequeños troncos, arbustos pequeños, plantas herbáceas, helechos y musgos, además, también contiene algo de la fracción de suelo mineral (Burés, 1997).

El suelo de bosque utilizado fue proporcionado por el Departamento Forestal de la UAAAN. El suelo se secó al Sol distribuyéndolo en capas delgadas sobre un plástico de polietileno, luego se cribó con una malla de un centímetro con el fin de uniformizar el material antes de su uso. En el Cuadro 3.2 se presentan los resultados de los análisis efectuados de algunas

propiedades físicas y químicas del suelo forestal utilizado como ingrediente en los sustratos testigos en esta investigación.

Suelo de barranco

El suelo de barranco utilizado fue un suelo orgánico, oscuro, de buena calidad, ampliamente usado en jardinería, así como a nivel de invernadero en la elaboración de sustratos para el cultivo de plantas. Fue obtenido en el ejido San Juan de la Vaquería, que se ubica aproximadamente a 30 km al sur de la ciudad de Saltillo rumbo a General Cepeda, Coahuila, México. Es un suelo con buenas propiedades físicas y químicas (Cuadro 3.2), siendo utilizado en la conformación de los tratamientos contaminados como más adelante se explica. El suelo fue secado al Sol y luego tamizado en malla de un centímetro para eliminar piedras y secciones de raíces. En el Cuadro 3.2 se presenta la caracterización efectuada al suelo de barranco antes de su uso en el ensayo.

Kalanchoe

Se utilizaron esquejes de dos variedades de kalanchoe: Letle fhine (flor de color roja) y Golden stipe (flor de color amarilla). Los esquejes de tres centímetros de longitud fueron cosechados de un lote de plantas madres, en los invernaderos del Rancho Calderón productores de flores, en Guadalajara, Jalisco, México, en el mes de octubre de 1997.

Hidrocarburo

Los hidrocarburos son compuestos orgánicos formados exclusivamente por átomos de carbono e hidrógeno, siendo en la actualidad, el petróleo y los gases naturales asociados a él la principal fuente de hidrocarburos. El petróleo líquido es una mezcla compleja, en los que predominan los hidrocarburos

Cuadro 3.1. Algunas propiedades físicas y químicas de los materiales orgánicos utilizados como ingredientes de sustratos para el cultivo del *Kalanchoe blossfeldiana* Poelln. (Laboratorio de Química de Suelos Departamento de Suelos, UAAAN 1998).

Determinación	Método	Valor			
		Composta Estiércol	Bagazo de caña	Gallinaza	Turba
pH _{agua}	Potenciómetro (1:1)	7.9	7.51	8.0	3.86
Conductividad eléctrica (CE)	Pasta de saturación	> 10 dS/m	> 10 dS/m	> 10 dS/m	0.27 dS/m
Materia orgánica (MO)	Walkley and Black	31.68 %	19.6 %	15.41 %	46.02 %
Cenizas (Ce)	Combustión	57.5 %	35 %	25 %	95 %
Densidad aparente (Da)	Combustión	42.5 %	65 %	75 %	5 %
Densidad de sólidos (Ds)	Probeta	0.51 g/cm ³	0.43 g/cm ³	0.73 g/cm ³	0.156 g/cm ³
Porosidad total (Pt)	Picnómetro modificado para sustratos	2.33 g/cm ³	2.155 g/cm ³	2.303 g/cm ³	1.46 g/cm ³
Nitrógeno total (Nt)	Estimado	78.11 %	80 %	68.3 %	89.31 %
Fósforo total (P)	Kjeldahl	2.95 %	1.36 %	1.94 %	0.178 %
Potasio disponible (K)	Combustión	3,699.5 mg/kg	193.4 mg/kg	3,355.3 mg/kg	48.0 mg/kg
Potasio disponible (K)	NaNO ₃ 25% atómica	2.9x10 ⁴ mg/kg	1750 mg/kg	1.7x10 ⁴ mg/kg	1400 mg/kg
Capacidad de intercambio catiónico (CIC)	Acetato de amonio NH ₄ C ₂ H ₃ O ₂ 2N pH 7	243.5 meq/100 g	195.7 meq/100g	188.9 meq/100g	257.12 meq/100g

saturados (Hein, 1992). El hidrocarburo utilizado fue recolectado en Poza Rica, Veracruz, tiene un contenido de TPH's de 623,271 mg/kg y un pH 6.59.

Cuadro 3.2. Algunas propiedades físicas y químicas de suelo de bosque y barranco utilizadas como ingredientes en la elaboración de sustratos para el cultivo de *Kalanchoe blossfeldiana* Poelln. (Laboratorio de Química de Suelos Departamento de Suelos, UAAAN 1998).

Determinación	Método	Valor	
		Suelo de bosque	Suelo de barranco
pH _{agua}	Potenciometro (1:1)	6.83	7.65
Conductividad eléctrica (CE)	Pasta de saturación	2.4 dS/m	1.275 dS/m
Materia orgánica (MO)	Walkley and Black Combustión	12.22 %	8.24 %
		37.5 %	15 %
Cenizas (Ce)	Combustión	62.5 %	85 %
Densidad aparente (Da)	Probeta	0.544 g/cm ³	0.999 g/cm ³
Densidad de sólidos (Ds)	Picnómetro modificado para sustratos	2.04 g/cm ³	2.497 g/cm ³
Porosidad total (Pt)	Estimado	73.33 %	59.9 %
Nitrógeno total (Nt)	Kjeldahl	1.12 %	0.589 %
Fósforo disponible (P)	Olsen	30.81 mg/kg	27.71 mg/kg
Potasio disponible (K)	NaNO ₃ 25% Absorción atómica	1,600 mg/kg	2,450 mg/kg
Capacidad de intercambio catiónico (CIC)	Acetato de amonio NH ₄ C ₂ H ₃ O ₂ 2N (pH 7)	187.9 meq/100 g	227.8 meq/100 g
Arena	Hidrómetro Bouyoucos	78.93 %	65.42 %
Limo	Hidrómetro Bouyoucos	15.05 %	26.93 %
Arcilla	Hidrómetro Bouyoucos	6.05 %	7.65 %
Textura	Triángulo de texturas USDA	Arenosa Franca	Franco Arenosa
Carbonatos totales (CaCO ₃)	HCl 1N y NaOH 1N	No hay presencia	No hay presencia

Sulfato de Calcio ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

Conocido también como yeso agrícola, el sulfato de calcio dihidratado es una sal neutra, utilizada ampliamente en la agricultura como un fertilizante fuente de calcio, así también como un mejorador de suelos sódicos, como lo afirma Cadahia, (1998) quien agrega que el yeso se aplica para eliminar el exceso de Na en suelos sódicos. El yeso es un polvo fino de color azul claro (polverulento). El sulfato de calcio es también una fuente de iones Ca^{2+} y SO_4^{2-} , muy insoluble, barato y tiene una relación de solubilidad del soluto al agua de 1:500 (Resh, 1992).

Selección de los tratamientos

El presente trabajo consistió en la utilización de un hidrocarburo como un ingrediente de sustratos tratado previamente con yeso agrícola ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), que funciona como dispersante y acondicionante del mismo. A la anterior mezcla, se le añadió tres fuentes de materia orgánica evaluados en dos dosis, además de suelo de barranco. El suelo y la materia orgánica adicionada estimularán la descomposición rápida del hidrocarburo al mejorar la vida microbiana del sustrato.

3

Asimismo, se evaluó el efecto de la biorremediación del sustrato contaminado sobre el crecimiento de dos variedades de kalanchoe, comparando el crecimiento obtenido con el de un sustrato testigo. La combinación de los factores antes mencionados dieron origen a 14 tratamientos, siendo los dos primeros las mezclas testigos (sustrato recomendada para el cultivo), mientras que los restantes corresponden a los contaminados.

Es importante aclarar que estas mezclas son el producto de trabajos de investigación anteriormente efectuados por investigadores de la UAAAN y COMIMSA. Dichos trabajos han logrado determinar la dosis adecuada de yeso agrícola con la que se tiene que tratar al hidrocarburo utilizado.

Diseño experimental y tratamientos

El presente estudio se analizó bajo un diseño completamente al azar con arreglo de tratamientos factorial $3 \times 2 \times 2 + 2$, en donde el factor **A** representa a las tres fuentes de materia orgánica: gallinaza, composta de estiércol de bovino y composta de bagazo de caña, el factor **B** representa a las dosis de materia orgánica y finalmente el factor **C** representa a las variedades de kalanchoe, Letle Fhine, plantas con flores rojas, y Golden Stipe con flores amarillas, más dos testigos, que son los sustratos recomendados para el cultivo comercial del kalanchoe.

De la combinación de los tres factores con sus niveles respectivos y los dos testigos, resulta un experimento con 14 tratamientos, probándose con cuatro repeticiones cada uno de ellos. En el Cuadro 3.3 se presenta la descripción de los tratamientos evaluados.

El experimento constó de 56 unidades experimentales, cada una formada por dos macetas de plástico color negro de ocho pulgadas de diámetro, conteniendo cada maceta dos plantas de kalanchoe, por lo tanto la unidad experimental tenía cuatro plantas de kalanchoe.

Cuadro 3.3. Descripción de los tratamientos evaluados para determinar el efecto de los sustratos sobre el desarrollo de *Kalanchoe blossfeldiana* Poelln.

Trata- miento	Descripción	
	Sustrato	Variedad
1	(Testigo 1) 1/3 turba + 1/3 perlita + 1/3 SB ₁)	Letle Fhine
2	(Testigo 2) 1/3 turba + 1/3 perlita + 1/3 SB ₁)	Golden Stipe
3	H + SC + G(1/2 del H) + SB	Letle Fhine
4	H + SC + G(1/2 del H) + SB	Golden Stipe
5	H + SC + G(1 del H) + SB	Letle Fhine
6	H + SC + G(1 del H) + SB	Golden Stipe
7	H + SC + E(1/2 del H) + SB	Letle Fhine
8	H + SC + E(1/2 del H) + SB	Golden Stipe
9	H + SC + E(1 del H) + SB	Letle Fhine
10	H + SC + E(1 del H) + SB	Golden Stipe
11	H + SC + BC(1/2 del H) + SB	Letle Fhine
12	H + SC + BC(1/2 del H) + SB	Golden Stipe
13	H + SC + BC(1 del H) + SB	Letle Fhine
14	H + SC + BC(1 del H) + SB	Golden Stipe

H = Hidrocarburo

SC= Sulfato de calcio

SB = Suelo de "barranco"

SB₁ = Suelo de bosque

BC = Bagazo de caña

E = Estiércol

G = Gallinaza

Los tratamientos fueron acomodados en el invernadero, sobre dos bancales de un metro de ancho por tres metros de largo, con una separación entre las macetas de 10 cm. En la Figura 3.1 se aprecia la forma en la que los tratamientos se distribuyeron en los bancales. Cabe recalcar que los tratamientos fueron sorteados aleatoriamente, teniendo éstos la misma oportunidad de ocupar cualquiera de las unidades experimentales en las que se dividió el lote experimental.

Cama N° 1

$T_{11}R_1$	$T_{13}R_2$	T_7R_3	$T_{14}R_1$	$T_{14}R_4$	T_6R_1	T_5R_2
T_7R_4	$T_{10}R_1$	T_6R_3	T_8R_4	T_3R_1	T_1R_2	T_9R_1
T_1R_4	T_8R_2	$T_{14}R_3$	T_5R_3	T_2R_2	T_8R_3	$T_{10}R_4$
T_4R_1	T_5R_1	T_3R_3	$T_{13}R_1$	T_3R_2	$T_{12}R_2$	T_6R_4

Cama N° 2

T_9R_3	T_1R_3	T_9R_4	T_9R_2	$T_{13}R_4$	$T_{12}R_3$	T_7R_2
T_4R_2	$T_{11}R_3$	T_4R_3	$T_{12}R_1$	$T_{11}R_4$	$T_{10}R_2$	T_5R_4
$T_{13}R_3$	T_8R_1	T_7R_1	T_6R_2	T_2R_3	T_3R_4	T_4R_4
T_2R_4	T_1R_1	T_2R_1	$T_{10}R_3$	$T_{14}R_2$	$T_{11}R_2$	$T_{12}R_4$

Figura 3.1. Plano de distribución de los tratamientos en los bancales de invernadero, diseñados bajo un factorial completamente al azar.

De esta forma, el modelo estadístico lineal que describe la respuesta en los tratamientos testigos T_1 y T_2 (sustratos no contaminados) bajo un diseño completamente al azar es la siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, t \text{ tratamientos}$$

$$j = 1, 2, 3, \dots, r \text{ repeticiones del tratamiento } i.$$

$$\varepsilon_{ij} \approx N(0, \sigma^2)$$

Y_{ij} = respuesta del tratamiento i -ésimo en su repetición j -ésima.

μ = media general común a cada una de las unidades experimentales.

τ_i = efecto del i-ésimo tratamiento.

ε_{ij} = error experimental a la cual se le asume distribución normal e independencia con media cero y varianza constante σ^2 .

El modelo estadístico correspondiente a los tratamientos contaminados ($T_3, T_4, \dots, T_{14}$) bajo un diseño experimental completamente al azar con arreglo de factores $3 \times 2 \times 2$ es el siguiente:

$$Y_{ijkl} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \gamma_k + (\alpha\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\alpha\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl}$$

$i = 1, 2, 3, \dots, a$ niveles del factor A

$j = 1, 2, 3, \dots, b$ niveles del factor B

$k = 1, 2, 3, \dots, c$ niveles del factor C

$l = 1, 2, \dots, r$ repeticiones

$$\varepsilon_{ijkl} \approx NI(0, \sigma^2)$$

Y_{ijkl} = respuesta de la ijk -ésima combinación de los niveles de los factores en su l -ésima repetición.

μ = media general que es común a cada unidad experimental.

α_i = efecto del i -ésimo nivel del factor A.

β_j = efecto del j -ésimo nivel del factor B.

$(\alpha\beta)_{ij}$ = interacción o efecto conjunto del i -ésimo nivel del factor A con el j -ésimo nivel del factor B.

γ_k = efecto del k -ésimo nivel del factor C.

$(\alpha\gamma)_{ik}$ = interacción o efecto conjunto del i -ésimo nivel del factor A con el k -ésimo nivel del factor C.

$(\beta\gamma)_{jk}$ = interacción o efecto conjunto del j -ésimo nivel del factor B con k -ésimo nivel del factor C.

$(\alpha\beta\gamma)_{ijk}$ = interacción del i-ésimo nivel del factor A, j-ésimo nivel del factor B y el k-ésimo nivel del factor C.

ε_{ijkl} = error experimental a la cual se le asume distribución normal e independencia con media cero y varianza constante σ^2 .

Preparación de las mezclas de sustratos

En el Cuadro 3.3, donde se describen los tratamientos que se utilizaron en el presente trabajo, se pueden distinguir dos clases de mezclas de sustratos, la primera corresponde a los sustratos testigos (T_1 y T_2), mientras que la segunda clase, son los contaminados con el hidrocarburo ($T_3, T_4, \dots, T_{14}$). Para la preparación de cada uno de ellos se utilizó una metodología diferente, por lo tanto serán descritos por separado.

Para la elaboración de la primera clase de sustratos, se usó como componentes orgánicos un suelo de bosque y una turba de musgo *Sphagnum*, mientras que como material inorgánico se utilizó perlita. Las propiedades y el acondicionamiento previo de cada componente ya fue descrito con anterioridad. La preparación del sustrato consistió en la mezcla de los materiales en base a volumen, manejándose 1/3 de tierra de bosque, más 1/3 de turba y 1/3 de perlita. La mezcla se hizo en forma manual, dentro de un recipiente limpio y desinfectado con una solución de cloro al 10 por ciento. Se homogeneizó el material mezclándolo perfectamente, posteriormente se humedeció y se pasteurizó a una temperatura de 60 a 80 °C por 30 minutos y al final se guardó en una bolsa de plástico. En el Cuadro 3.4 se presenta la caracterización física y química del sustrato utilizado para los T_1 y T_2 , antes de su uso en el experimento.

Para la elaboración de los sustratos contaminados, fue necesario primero preparar la mezcla de hidrocarburo más sulfato de calcio (mezcla A).

Lo anterior se hizo en base a peso y en una proporción de 1:3, es decir, por cada kilogramo de hidrocarburo se agregaron tres kilogramos de yeso agrícola.

Cuadro 3.4. Análisis inicial físico y químico del sustrato utilizado para los tratamientos testigos. (Laboratorio de Química de Suelos Departamento de Suelos, UAAAN 1998).

Determinación	Método utilizado	Valor
pH _{agua}	Potenciometro (1:1)	6.7
Conductividad eléctrica (CE)	Pasta de saturación	2.075 dS/m
Materia orgánica (MO)	Walkley and Black	24.04 %
	Combustión	37.5 %
Cenizas (Ce)	Combustión	62.5 %
Densidad aparente (Da)	Probeta	0.40 g/cm ³
Densidad de sólidos (Ds)	Picnómetro modificado para sustratos	1.65 g/cm ³
Porosidad total (Pt)	Estimado	75.8 %
Nitrógeno total (Nt)	Kjeldahl	0.985 %
Potasio disponible (K)	NaNO ₃ 25% Absorción atómica	1200 mg/kg
Capacidad de intercambio catiónico (CIC)	Acetato de amonio NH ₄ C ₂ H ₃ O ₂ 2 N (pH 7)	525.95 meq/100 g
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	NMX-AA-74	809.8 mg/kg

Se elaboraron aproximadamente 100 kg de la mezcla A, que corresponden a unos 25 kg de hidrocarburo. La preparación se hizo en forma fraccionada, pesando uno ó dos kg de hidrocarburo y añadiendo su equivalente de yeso, hasta terminar con los 25 kg de hidrocarburo. La mezcla total se realizó en julio de 1997, para ello las dos sustancias fueron colocadas dentro de una cubeta metálica, en donde se revolvieron hasta que el hidrocarburo, por efecto del yeso, perdiera su naturaleza pegajosa, aceitosa y adquiriera la mezcla un aspecto a tierra negra aceitosa, manejable, con partículas pequeñas y olor fuerte a petróleo. En el Cuadro 3.5 se presenta el análisis químico efectuado a la mezcla A antes de su uso en los tratamientos.

Cuadro 3.5. Análisis químico de la mezcla de hidrocarburo y yeso (relación 1:3) utilizada en los tratamientos.

Determinación	Método	Valor
TPH's (Hidrocarburos totales del petróleo)	EPA 418.1 modificado para suelos	199,297.0 mg/kg
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	Gravimétrico	48.8 %
CaO (Óxido de calcio)	Volumétrico	31.7 %

La mezcla A se utilizó en todos los tratamientos contaminados. De esta mezcla se pesó una cierta cantidad, a la cual se le determinó la cantidad de hidrocarburo presente y en base a esta cantidad se procede a mezclarla con cualquiera de las fuentes de materia orgánica en las dos dosis 1: ½ y 1:1 (mezcla B). A la mezcla B, que resulta de la combinación de la mezcla A más la materia orgánica en cualquiera de las dos dosis, se le agregó suelo de barranco en una proporción 1:1 con respecto al peso de la mezcla B. Por ejemplo, imaginemos que se necesita preparar el T₃ (Cuadro 3.3), estamos de acuerdo que dicho tratamiento está compuesto por la mezcla **A** más **gallinaza** en dosis de ½ al hidrocarburo más **suelo de barranco**. Los cálculos dicen que requerimos de 10 kg de la mezcla **A**, se entiende que aquí tenemos 2.5 kg de hidrocarburo y 7.5 kg de CaSO₄, solo se tendrá que agregar 1.25 kg de gallinaza a la mezcla A, debido que la dosis es a 1: ½, si fuera 1:1 se utilizarían 2.5 kg de gallinaza. Al sumar el peso de la mezcla A y la gallinaza dan un valor de 11.25 kg a esto se le agregarán 11.25 kg de suelo de barranco para obtener una masa total de 22.5 kg. Así sucesivamente se prepararon todas las demás mezclas de sustratos. En el Cuadro 3.6 se presenta la caracterización inicial física y química de algunas propiedades para los tratamientos contaminados.

Las sustratos contaminados fueron mezclados perfectamente dentro de un recipiente de metal con el objeto de obtener un material lo más homogéneo posible.

Cuadro 3.6. Análisis inicial de algunas propiedades físicas y químicas de los tratamientos contaminados con hidrocarburos utilizados como sustratos para el cultivo de *Kalanchoe blossfeldiana* Poelln. (Laboratorio de Química de Suelos Departamento de Suelos, UAAAN 1998).

Determinación		Método	Valor					
pH agua		Potenciómetro (1:1)	T ₃ -T ₄	T ₅ -T ₆	T ₇ -T ₈	T ₉ -T ₁₀	T ₁₁ -T ₁₂	T ₁₃ -T ₁₄
			8.2	8.38	8.38	8.28	8.55	8.40
Conductividad eléctrica (CE)		Pasta de saturación	8.0 dS/m	10.0 dS/m	9.5 dS/m	>10.0 dS/m	6.0 dS/m	7.0 dS/m
Materia orgánica (MO)		Walkley and Black	13.1 %	13.1 %	21.63 %	15.1 %	15.5 %	11.7 %
		Combustión	17.5 %	15.0 %	20.0 %	25.0 %	20.0 %	17.5 %
Cenizas (Ce)		Combustión	82.5 %	85.0 %	80.0 %	75.0 %	80.0 %	82.5 %
Densidad aparente (Da)		Probeta	1.06 g/cm³	1.04 g/cm³	1.034 g/cm³	1.004 g/cm³	0.967 g/cm³	0.944 g/cm³
Densidad de sólidos (Ds)		Picnómetro modificado para sustratos	2.25 g/cm³	2.23 g/cm³	2.22 g/cm³	2.22 g/cm³	2.224 g/cm³	2.231 g/cm³
Porosidad total (Pt)		Estimado	52.8 %	53.27 %	53.42 %	54.8 %	56.5 %	57.7 %
Nitrógeno total (Nt)		Kjeldahl	0.468 %	0.535 %	0.420 %	0.565 %	0.411 %	0.491 %
Fósforo disponible (P)		Olsen	131.4 mg/kg	248.5 mg/kg	152.93 mg/kg	140.25 mg/kg	29.82 mg/kg	29.82 mg/kg
Potasio disponible (K)		NaNO ₃ 25% Absorción atómica	2,550 mg/kg	2,635 mg/kg	3,700 mg/kg	5,700 mg/kg	1,350 mg/kg	1,900 mg/kg
Capacidad de intercambio catiónico (CIC)		Acetato de amonio NH ₄ C ₂ H ₃ O ₂ 2N pH 7	211.3 meq/100 g	175.2 meq/100 g	165.5 meq/100 g	204.5 meq/100 g	201.55 meq/100 g	195.7 meq/100 g
		EPA 418 modificado para suelos	76,927 mg/kg	59,017 mg/kg	72,919 mg/kg	75,237 mg/kg	82,188 mg/kg	72,238 mg/kg
TPH's		NMX-AA-74	5,891.6 mg/kg	3,000.7 mg/kg	1,544.6 mg/kg	1,868.3 mg/kg	3,562.8 mg/kg	3,893.1 mg/kg
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)								

Preparación de las macetas

La preparación de las macetas antes de su uso en el experimento consistió primero en lavarlas con agua y jabón, después se sumergieron en agua caliente a una temperatura de 70 °C por un tiempo de tres minutos, con el objeto de eliminar cualquier contaminación que pudieran tener.

En el fondo de cada maceta se colocó una capa de cascajo o grava de aproximadamente tres centímetros de grosor, con el objeto de favorecer el drenado del sustrato y evitar problemas de excesos de humedad en el medio de crecimiento durante el transcurso del experimento. El cascajo fue lavado con una solución de cloro al 10 por ciento, luego se secó al Sol extendiéndolo en capas delgadas sobre un plástico.

El llenado y la identificación de las macetas se realizó a principios de noviembre de 1997, colocando dos litros de sustrato por maceta que previamente se había preparado. En el mes de diciembre de 1997, las macetas fueron acomodadas en los bancales del invernadero de acuerdo al plano descrito en la Figura 3.1. La biorremediación de los tratamientos comenzó con el primer riego efectuado en diciembre de 1997.

Propagación de los esquejes de kalanchoe

Las plantas de kalanchoe fueron propagadas asexualmente, para ello se hizo uso de esquejes o secciones de tallos que conservan su meristemo apical. Dichos esquejes se cosecharon de un lote de plantas madres en los invernaderos del rancho Calderón "Productores de Flores" a fines del mes de octubre de 1997. Los esquejes de tres centímetros de longitud, se enraizaron en dos charolas de 200 cavidades cada una. El sustrato de enraizamiento consistió en la combinación de 50 por ciento turba más 50 por ciento de perlita,

la mezcla fue humedecida y luego se pasteurizó en estufa entre 60-80 °C por 30 minutos. El proceso de enraizamiento duró alrededor de un mes y medio.

Transplantes

Al término de la fase de propagación, las plantas fueron transplantadas a macetas pequeñas de 2.5 pulgadas de diámetro en un medio compuesto de 50 por ciento de turba y 50 por ciento de perlita, actividad realizada a mediados del mes de diciembre de 1997 e inmediatamente se llevaron al invernadero, donde quedaron acomodadas en el área experimental. El objetivo de transplantarlas a estas macetas fue la de favorecer el desarrollo del sistema radical de la planta, aquí el cultivo permaneció un mes y medio. A fines de enero de 1998 se realizó un segundo transplante, colocándolas ahora en macetas de cuatro pulgadas de diámetro y utilizando el mismo medio de crecimiento, la finalidad del enmacetado a recipiente más grande fue con la misma intención. En abril de 1997 se realizó el último transplante, ahora a las macetas grandes que contenían los tratamientos. El transplante se efectuó a raíz desnuda eliminando el sustrato anterior y dejando dos plantas por maceta. En el Cuadro 3.7 se muestra una evaluación previa efectuada a las plantas antes de su transplante en los tratamientos del experimento.

Fertilización del cultivo

La primera fertilización se llevó a cabo en diciembre de 1997, día en que comenzó la biorremediación de los tratamientos. La fertilización se hizo manejando una solución nutritiva que contenía 200 ppm de N, 50 ppm de P y 150 ppm de K. Las fuentes fertilizantes utilizadas fueron: nitrato de amonio (NH_4NO_3) con un 34.5 por ciento de N en forma amoniacal; como fuente de fósforo se usó superfosfato simple de calcio con 20 por ciento de P_2O_5 y sulfato de potasio (K_2SO_4) con 50 por ciento de K_2O como fuente de K.

Cuadro 3.7. Evaluación de las plantas de kalanchoe antes de su transplante a los tratamientos, después de un período de acondicionamiento en macetas pequeñas.

VARIABLE	VARIEDADES	
	Golden Stipe (Flor amarilla)	Letle Fhine (flor roja)
Altura promedio de planta	3.6 cm	3.53 cm
Diámetro promedio de tallo	5.16 mm	5.03 mm
Número promedio de hojas por planta	11.8 hojas	11.0 hojas
Número promedio de inflorescencias por planta	3.7 inflorescencias	3.12 inflorescencias
Número promedio de pétalos por flor	4 pétalos	4 pétalos
Número promedio de flores por planta	21.9 flores/planta	25.9 flores/planta

En un principio, la aplicación de la solución nutritiva se hizo una vez por semana, pero debido a que los sustratos tenían problemas con sales, es decir, una alta conductividad eléctrica, al final se suministró cada dos semanas.

A partir del último transplante efectuado a los sustratos contaminados, la solución nutritiva se acondicionó modificando el pH hacia un valor de seis (ácido), debido a que los sustratos presentaban pH alcalinos. La solución acidificada se usó a partir de esta fecha hasta la conclusión del experimento a fines de septiembre de 1998.

Riego del cultivo

El riego se hizo en forma manual y dirigido al suelo de manera de no mojar el tallo y las hojas del cultivo. Se manejó siempre un volumen igual en todos los tratamientos para que el sustrato estuviera siempre a capacidad de contenedor. Ni muy húmedo para evitar pudriciones en planta, ni tampoco muy

seco. De hecho, el kalanchoe es un cultivo que crece mejor en condiciones ligeramente secas, no de alta humedad.

Labores de cultivo

Las labores de cultivo consistieron básicamente en el control de plagas, eliminación de hojas secas y el aflojado del sustrato alrededor de la planta. El cultivo no presentó problemas graves de plagas ni enfermedades. En un principio se observó la presencia de una mosca negra que dañaba levemente los bordes de las hojas y de mosquita blanca. Estos problemas fueron controlados con la aplicación de un insecticida a base de piretroides en aerosol. En etapa de floración se notó la presencia de pulgones sobre una o dos plantas, los cuales fueron controlados manualmente ya que la incidencia fue muy reducida. Con referencia a la incidencia de enfermedades no hubo presencia de éstas.

El aflojado del sustrato se hizo en todos los tratamientos, sobre todo en los contaminados con el hidrocarburo, con la finalidad de favorecer la aireación y con ello la oxigenación del medio de crecimiento, provocando una mayor velocidad de descomposición del material contaminante. Esta práctica se efectuó una vez por mes.

Iluminación suplementaria

El cultivo del kalanchoe es de día corto, es decir, las plantas manifiestan condiciones reproductivas o de floración en día corto-noche larga, condiciones que en forma natural se dan en el invierno, mientras que en día largo y noche corta la respuesta de las plantas será vegetativa. Dado lo anterior, se manejó la iluminación suplementaria para lograr alargar la duración del día y acortar la longitud de la noche, y evitar la floración de las plantas en invierno y fomentar

su crecimiento vegetativo. La iluminación se consiguió colocando dos focos de luz incandescente de 100 watts de potencia en el área experimental. Los focos se colocaron a 1.5 m de separación y un metro sobre las plantas. La iluminación consistió en la interrupción del período de oscuridad por un período de luz, para ello los focos se encendieron a las 10:00 p.m. y se apagaron a las 2:00 a.m. El inicio de la iluminación suplementaria fue en enero de 1998 y se finalizó en abril de ese mismo año.

Evaluación de los tratamientos

Mediciones en los sustratos

El presente estudio inicio en diciembre de 1997 y finalizó en septiembre de 1998. A lo largo de este período, la evaluación de los tratamientos consistió en el seguimiento de la biorremediación de los sustratos contaminados. Dicho monitoreo se logró con la toma mensual de muestras de sustrato, para determinar pH (1:1), conductividad eléctrica (pasta saturada), contenido de materia orgánica (método Walkley and Black y combustión) y cenizas (combustión). A partir del sexto mes de evaluación y hasta el término del ensayo, el pH se evaluó tanto en lixiviados como en muestras de suelo. Los lixiviados consistieron en agregar suficiente agua al sustrato en la maceta y recoger el drenado en una charola de plástico colocada en la parte inferior, posteriormente en el líquido obtenido se realizó la medición de pH y conductividad eléctrica. La conductividad eléctrica fue evaluada hasta el quinto mes en las muestras de suelo, y a partir del sexto mes la lectura se hizo en el efluente obtenido de la lixiviación de los tratamientos. Tanto las muestras de suelo y de lixiviados fueron muestras compuestas de cada tratamiento. El muestreo en el sustrato se hizo a una profundidad de 3 a 5 cm, a un costado de las plantas procurando no dañar el sistema radical del cultivo.

Para conocer las condiciones de los materiales utilizados, se realizó una caracterización física y química inicial, tanto de los ingredientes de los sustratos como de las mezclas de ellos, es decir de cada uno de los tratamientos. Los análisis consistieron en determinar pH (1:1), materia orgánica, cenizas, conductividad eléctrica, nitrógeno total, fósforo disponible, potasio disponible, capacidad de intercambio catiónico, carbonatos totales, densidad aparente y de sólidos, porosidad total y textura (solamente al suelo de barranco y bosque).

En los tratamientos se determinó además, sulfatos (SO_4^{2-}) inicial y final, hidrocarburos totales del petróleo (TPH's) en suelo inicial y final y TPH's en lixiviados a los nueve meses o final del experimento. La determinación de TPH's sólo se realizaron en los tratamientos contaminados. Además, se cuantificó la población microbiana en muestras compuestas de los tratamientos al final del experimento. Para esta última determinación se utilizó la técnica microbiológica de dilución seriada y siembra en placa usando agar nutritivo como sustrato de cultivo.

Los análisis finales de los tratamientos consistieron en la determinación de pH, materia orgánica, cenizas, conductividad eléctrica, capacidad de intercambio catiónico, nitrógeno total, fósforo y potasio disponible y contenido de sulfatos de muestras compuestas de suelo y lixiviados.

Gran parte de los análisis fueron hechos en los Laboratorios de Química y de Microbiología del Departamento de Suelos de la UAAAN, solamente la determinación de TPH's y sulfatos (SO_4^{2-}) se efectuaron en los Laboratorios de Análisis Químico de la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales S.A de CV. (COMIMSA).

Mediciones en planta

Para conocer el efecto que tiene la biorremediación de los sustratos sobre la calidad de las plantas de kalanchoe, se realizaron mediciones de altura de planta (cm), diámetro de tallo (mm), número de hojas y ancho y largo de la hoja (cm) al final del experimento, para lo cual se seleccionaron dos plantas al azar de cada unidad experimental. La evaluación de la planta fue llevada a cabo a mediados de septiembre de 1998. La manera en la que se efectuaron las mediciones se describe a continuación.

La altura de planta se determinó directamente en el invernadero en dos plantas de kalanchoe y se obtuvo una media para cada unidad experimental. Dicha variable se evaluó desde la base del tallo hasta el extremo de la hoja más alta, usando una regla graduada.

Las mediciones de diámetro de tallo también se realizaron en el invernadero sobre dos plantas de kalanchoe tomadas al azar. Las determinaciones se hicieron utilizando un vernier, con el cual se midió el diámetro de la base, de la parte media y superior del tallo. De los tres valores obtenidos por planta se calculó una media que constituyó el diámetro reportado.

La variable número de hojas se determinó en el invernadero en dos plantas por unidad experimental. Se contaron todas las hojas producidas por planta y se obtuvo un valor medio por unidad experimental.

Para estimar el ancho y largo de la hoja, se tomaron cinco hojas al azar de cada planta, es decir, 10 hojas por unidad experimental, en las que se midió con regla las dos variables. El ancho de la hoja se determinó en la parte media,

mientras que para el largo de la hoja la medición se hizo desde el ápice hasta la parte basal de ésta.

Con la información obtenida tanto del suelo como de la planta, se alimentaron los cuadros de concentración para cada variable, los cuales fueron analizados estadísticamente de acuerdo al modelo que describe el diseño experimental utilizado, para observar si hay o no diferencias entre los tratamientos propuestos. La comparación de medias se realizó mediante la prueba de Tukey al 0.01 de significancia. Se efectuaron contrastes ortogonales entre los tratamientos contaminados y los no contaminados (C_1), así como entre los testigos (C_2). También la información generada se analizó con el uso de cuadros y gráficos para resumir la información y observar de mejor manera la tendencia de los resultados.

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presentan y discuten individualmente cada una de las variables evaluadas.

Variables de Planta

Diámetro de tallo de plantas de kalanchoe

En el Cuadro 4.1, se aprecia que se realizaron dos contrastes o comparaciones (C_1 y C_2). En la primera, se comparó la media de los tratamientos testigos contra la media de los tratamientos contaminados, mientras que en el segundo contraste se comparó la media del testigo uno contra la del testigo dos. Se observa, que para la primera comparación resultó altamente significativa, de esta forma la media de los tratamientos testigos (6.403 mm) difiere en forma altamente significativa del promedio de las medias de los sustratos contaminados (5.05 mm), concluyendo que la mejor respuesta en diámetro de tallo es para los sustratos no contaminados.

Se produjo mejor calidad de planta en los tratamientos testigos, debido a que es un medio de crecimiento con un mayor contenido de materia orgánica, menor conductividad eléctrica y un pH ligeramente ácido (Cuadro. 3.4). Al respecto Narro (1994) afirma que las mejores condiciones físicas, químicas y biológicas para los cultivos se encuentran preferentemente en suelos con alto contenido de materia orgánica. Mientras que las condiciones de alta salinidad y alto pH en los sustratos contaminados fueron la principal causa que afectaron el desarrollo del tallo de la planta (Cuadro. 3.6).

Al analizar el segundo contraste, se observa que la prueba resultó significativa, es decir, que las medias obtenidas por los T_1 y T_2 son diferentes entre si al cinco por ciento, siendo la mejor respuesta para el T_2 (Fig. 4.1). Dado que los sustratos testigos son similares en características físicas y químicas (Cuadro. 3.4), se atribuye que el mejor desarrollo de la variedad Golden Stipe se debió a que es un genotipo diferente a la Letle Fhine, mostrando mejor adaptación al medio.

En el Cuadro 4.1 también se presenta el análisis de varianza para la variable diámetro de tallo. Se observa que para el factor fuentes de materia orgánica (FA) la F calculada no supera a la F_{α} al cinco por ciento, por lo tanto, las medias producidas por la gallinaza, estiércol y bagazo de caña sobre el diámetro de tallo no difieren significativamente entre ellas, es decir, estadísticamente son iguales, por lo que se puede utilizar cualquier fuente de materia orgánica de las evaluadas como un ingrediente del sustrato.

Cuadro 4.1. Análisis de varianza para la variable diámetro de tallo correspondiente a los tratamientos contaminados con hidrocarburos.

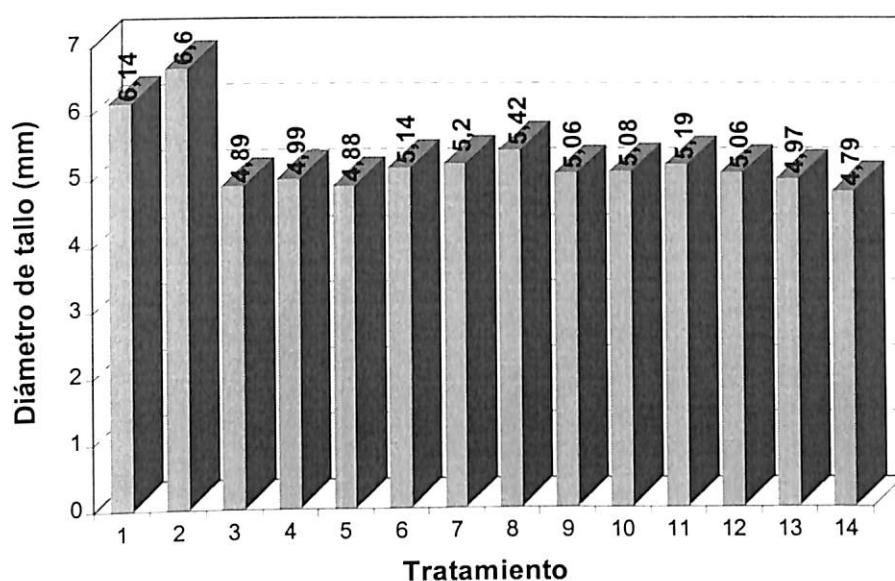
F.V	G.L	S.C	C.M	Fc	F_{α}	
					0.05	0.01
$C_1: T_1, T_2$ vs $T_3, \dots, T_{14}$	1	12.4617	12.4617	131.31 **	4.072	7.287
$C_2: T_1$ vs T_2	1	0.5618	0.5618	5.92 *	4.072	7.287
FA	2	0.43621017	0.2181051	2.274 ns	3.266	5.264
FB	1	0.23129633	0.23129633	2.412 ns	4.116	7.41
AB	2	0.25507517	0.12753758	1.329 ns	3.266	5.264
FC	1	0.030603	0.030603	0.319 ns	4.116	7.41
AC	2	0.2615735	0.13078675	1.364 ns	3.266	5.264
BC	1	0.002883	0.002883	0.030 ns	4.116	7.41
ABC	2	0.0610685	0.03053425	0.318 ns	3.266	5.264
Error	36	3.452254	0.095895944			
Total	47	4.73096367				

C.V. = 6.127%

* = significativo, ** = Altamente significativo

ns = No significativo

En la Figura 4.1, se observa que los diámetros de tallo obtenidos en los sustratos testigos (T_1 y T_2), superaron a los diámetros de tallo en plantas que se desarrollaron en los sustratos contaminados con hidrocarburo. La mejor respuesta en los tratamientos con hidrocarburo se consiguió para el T_8 con 5.42 mm, siendo estadísticamente igual al T_1 pero diferente al T_2 .



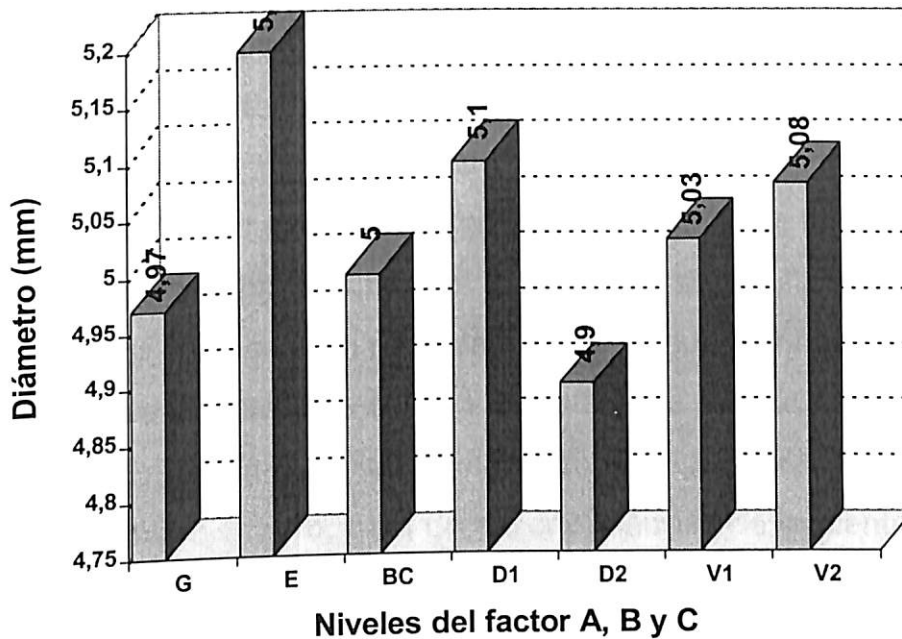
Tratamientos testigos = T_1, T_2 . Tratamientos contaminados = $T_3, \dots, T_{14}$

Figura 4.1. Efecto de la interacción de las fuentes de materia orgánica (factor A) con las dosis de materia orgánica (factor B) y variedades de kalanchoe (factor C) sobre el diámetro de tallo.

Se aprecia en la Figura 4.2 las medias alcanzadas por los niveles del factor FA (fuentes de materia orgánica), donde el estiércol supera a los demás produciendo un diámetro de 5.2 mm, en contraste con la gallinaza que fue la que produjo el menor diámetro sólo con 4.97 mm. El mejor desarrollo de tallo producido en el estiércol se debe a que es un material compostado, rico en humus y elementos nutritivos, lo que favoreció un mejor desarrollo del tallo. El análisis de laboratorio (Cuadro. 3.1) muestra que el estiércol es más rico en

nitrógeno, fósforo, potasio, materia orgánica y CIC que la gallinaza, mejorando así en mayor grado la fertilidad del sustrato.

En el Cuadro 4.1, se muestra que para el factor dosis de materia orgánica (FB) la prueba resultó no significativa, es decir, las medias producidas por los niveles de este factor (baja D_1 y alta D_2) son estadísticamente iguales no habiendo diferencia entre ellas, por lo que se puede utilizar cualquier dosificación de las evaluadas. Sin embargo, en la Figura 4.2 se aprecia que, con la dosis baja (D_1) se obtiene un mayor diámetro con 5.1 mm que con la dosis alta (D_2).



G= Gallinaza, E= Estiércol, BC= Bagazo caña, D1= Dosis baja de materia orgánica, D2= Dosis alta de materia orgánica, V1= variedad Letle Fhine, V2= variedad Golden Stipe.

Figura 4.2. Efecto de la fuente de materia orgánica (factor A), dosis de materia orgánica (factor B) y dos genotipos de kalanchoe (factor C) sobre el diámetro de tallo.

Lo anterior se debe a que los materiales orgánicos evaluados son una fuente importante de sales al presentar una CE bastante alta (Cuadro. 3.1) y por lo tanto, al incrementarse la proporción en el sustrato se aumenta la salinidad total de éste. Lo anterior coincide con Ansorena (1994), quien menciona que una de las razones de que se produzca una excesiva acumulación de sales en los medios para contenedor, es por la presencia de concentraciones elevadas de sales en algunos de los componentes del sustrato. Agrega además, que si las sales se elevan excesivamente la planta puede llegar a padecer un déficit hídrico, semejante al que se produce en condiciones de sequía.

Para la interacción entre las fuentes de materia orgánica y las dosis utilizadas (AxB) tampoco hay diferencia significativa al cinco por ciento, esto quiere decir que las medias que producen las combinaciones entre estos dos factores son iguales, por lo que se puede utilizar cualquier combinación de las evaluadas esperando una respuesta similar para diámetro de tallo. En la Figura 4.3, se aprecia que cuando se utiliza el estiércol en su dosificación baja (ED_1) se obtiene la mejor respuesta en diámetro, mientras que con la combinación de bagazo de caña en la dosis alta (BCD_2) se obtiene la menor respuesta. Por lo anterior, se puede recomendar al estiércol en su dosis baja en un sustrato contaminado con hidrocarburo, para un mejor desarrollo de la planta en cuanto al diámetro de tallo.

En la Figura 4.3 se muestra, que en la medida que se incrementa la dosis de estiércol o bagazo de caña en el sustrato contaminado, la respuesta de la planta en diámetro de tallo disminuye, sin embargo para la gallinaza, el comportamiento es a la inversa, es decir, en la medida que se incrementa la dosis también lo hace el diámetro, siendo las variables involucradas directamente proporcionales.

Para el factor genotipos de kalanchoe (FC) no se encontró diferencias significativas, por lo que las medias producidas por los niveles de este factor son estadísticamente iguales. Lo anterior se observa en la Figura 4.2 donde las medias producidas por las variedades Letle Fhine (V_1) y Golden Stipe (V_2) son muy parecidas.

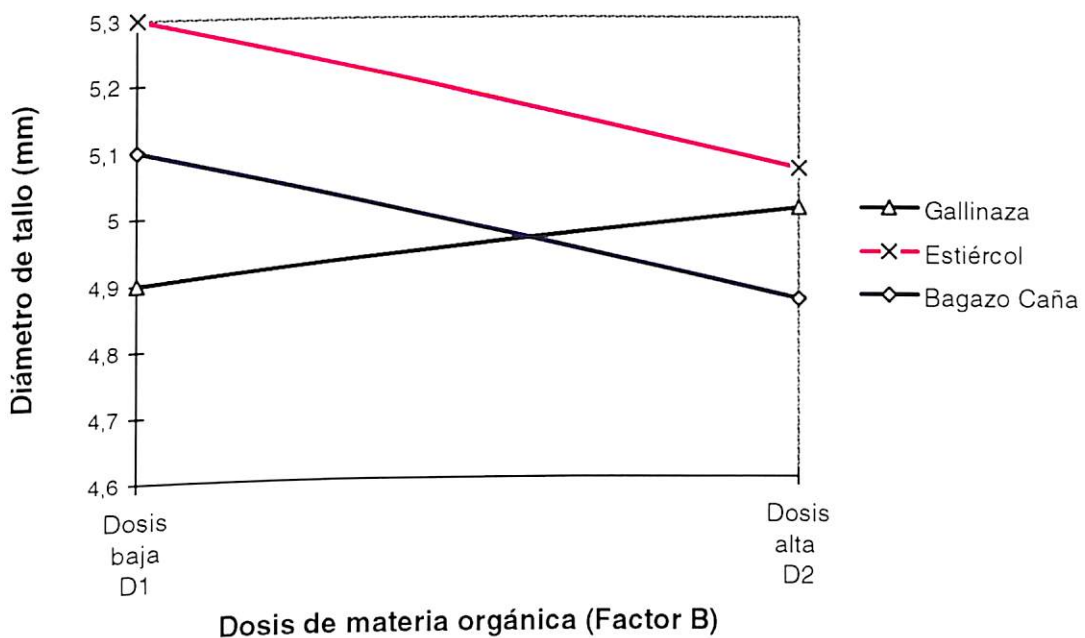


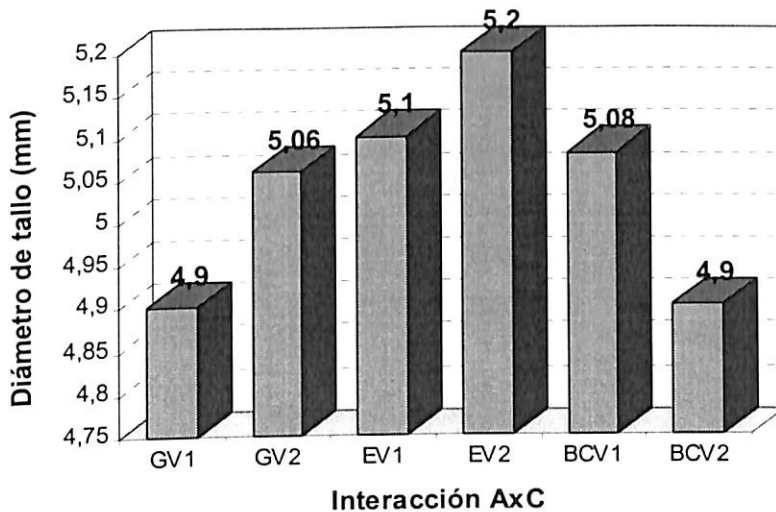
Figura 4.3. Efecto de la interacción entre los niveles del factor FA (fuentes de materia orgánica) con los niveles del factor FB (dosis de materia orgánica), sobre el diámetro de tallo de plantas de kalanchoe.

Para las interacciones de los factores en $A \times C$, $B \times C$ y $A \times B \times C$ ninguno es significativo (Cuadro 4.1), es decir, las medias producidas por las combinaciones de los factores en cada interacción son iguales pudiendo utilizar cualquiera de ellas en espera de una misma respuesta. Al analizar el efecto combinado por las fuentes de materia orgánica y las variedades de kalanchoe ($A \times C$), se aprecia en la Figura 4.4 que la respuesta más conveniente fue para la

combinación entre el estiércol y la variedad dos (Golden Stipe) al presentar una mejor respuesta en diámetro, aunque como se dijo anteriormente se puede utilizar cualquier combinación dado que las diferencias mostradas no son significativas.

En ese mismo gráfico se observa que la variedad Golden Stipe combinada con gallinaza o estiércol tienen respuesta mayor que la variedad Letle Fhine, pero en el bagazo de caña, la respuesta es a la inversa en donde sobresale la Letle Fhine sobre la Golden Stipe.

En la Figura 4.5 se muestran las medias de respuesta para la interacción entre las dosis de materia orgánica y los genotipos (BxC). Se observa, que la combinación de la dosis baja y la variedad Golden Stipe (D_1V_2) sobresale de todas las demás combinaciones con 5.2 mm, siendo ésta la que se podría recomendar, aunque estadísticamente se puede utilizar cualquier combinación.



G= Gallinaza, E= Estiércol, BC= Bagazo caña, V1= variedad Letle Fhine, V2= variedad Golden Stipe.

Figura 4.4. Efecto de la interacción entre las fuentes de materia orgánica (factor A) y las variedades de kalanchoe (factor C) sobre el diámetro de tallo de las plantas.

En ese mismo gráfico se muestra que al incrementar la dosis de materia orgánica en el sustrato disminuye el diámetro de tallo de las plantas en ambas variedades.

Finalmente en la Figura 4.1 se presenta las medias para la interacción $A \times B \times C$, así como las medias producidas por los tratamientos testigos (no contaminados). Dentro de los sustratos contaminados la mejor combinación es para el sustrato en donde se empleó estiércol en su dosis baja y con la variedad Golden Stipe (T_8), sin embargo dicha media no difiere significativamente de los demás sustratos contaminados. Al comparar esta media (T_8) con la mejor obtenida entre los testigos, se observa que existe diferencia altamente significativa (Cuadro A.2).

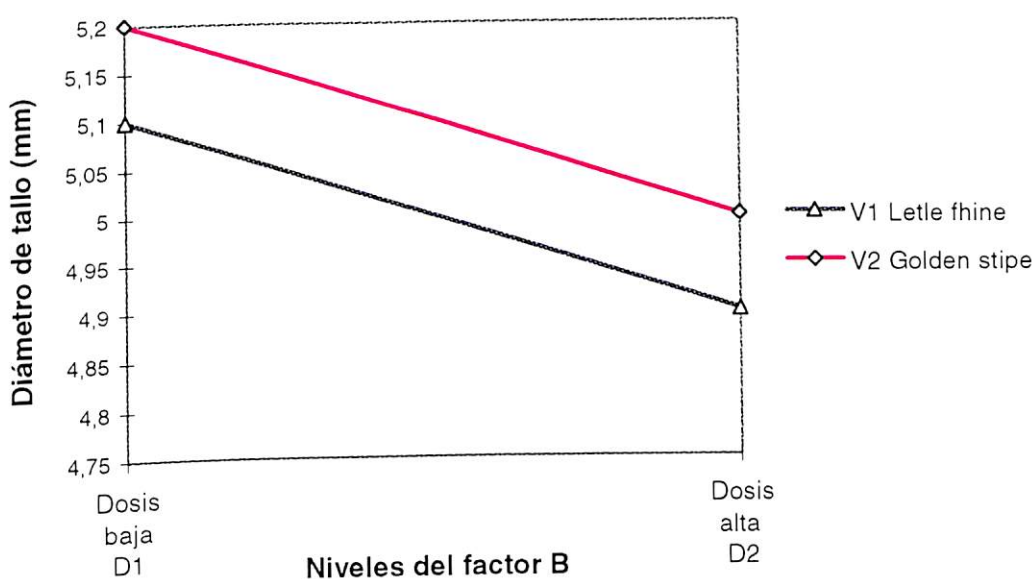


Figura 4.5. Efecto de la interacción de los niveles del factor FB (dosis de materia orgánica) con los niveles del factor FC (variedades de kalanchoe), sobre el diámetro de tallo.

Altura de planta en kalanchoe

En el cuadro de análisis de varianza efectuado sobre los tratamientos contaminados (Cuadro 4.2), se observa que para el contraste uno (C_1), en donde se compara los tratamientos libres de contaminación contra los contaminados, se obtuvo una respuesta altamente significativa, por lo tanto, la altura de planta en los tratamientos contaminados es estadísticamente inferior a la altura en los tratamientos testigos (T_1 y T_2). En ese mismo cuadro, se muestra también respuesta altamente significativa para el contraste número dos (C_2), concluyendo que la media del T_1 es diferente de la media del T_2 , por lo tanto, el T_1 (sustrato testigo con la variedad Letle Fhine) fue el de mejor respuesta en altura de planta.

La altura de planta es una variable que nos muestra la calidad de kalanchoe, de manera que las alturas que muestren proporcionalidad con la maceta serán las mejores, es decir, en maceta grandes mayor altura de planta. En el contraste uno, las plantas producidas en los sustratos contaminados fueron todas de baja calidad al presentar alturas muy pequeñas y desproporcionada con respecto a la maceta que las contiene, es decir, plantas pequeñas en macetas muy grandes. Todo lo contrario se observó en los sustratos testigos. La alta salinidad y pH arriba de 7.5 en los tratamiento contaminados fueron la principal causa que favoreció la mala calidad de la planta (Cuadro 3.6), mientras que las mayores alturas de planta en las dos variedades en los sustratos testigos se debe a su baja CE y pH más cercano al óptimo para el cultivo (Cuadro 3.4). Estos resultados coinciden por los obtenidos por Francois (1994), quien experimentó con cuatro líneas mejoradas de ajo que sometió a seis tratamientos salinos, sus resultados revelaron que el rendimiento relativo del bulbo se redujo en un 14.3 por ciento con cada incremento de unidad en la salinidad del suelo mayor de $3.9 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$. Con esto

se confirma que los altos niveles de sales en el suelo favorecen una baja calidad de las plantas cultivadas.

Cuadro 4.2. Análisis de varianza para la variable altura de planta correspondiente a los tratamientos contaminados con hidrocarburos.

F.V	G.L	S.C	C.M	Fc	F α	
					0.05	0.01
C₁: T₁,T₂ vs						
T₃,...,T₁₄	1	335.220551	335.220551	994.923 **	4.08	7.32
C₂: T₁vsT₂	1	9.768200	9.768200	28.9917 **	4.08	7.32
FA	2	19.556396	9.778198	34.2776 **	3.266	5.26
FB	1	0.015015	0.015015	0.0526 ns	4.116	7.41
FC	1	5.844849	5.844849	20.4892 **	4.116	7.41
AB	2	0.015869	0.007935	0.0278 ns	3.266	5.26
AC	2	1.700439	0.850220	2.9805 ns	3.266	5.26
BC	1	0.135742	0.135742	0.4758 ns	4.116	7.41
ABC	2	0.439209	0.219604	0.7698 ns	3.266	5.26
Error	36	10.269531	0.285265			
Total	47	37.977051				

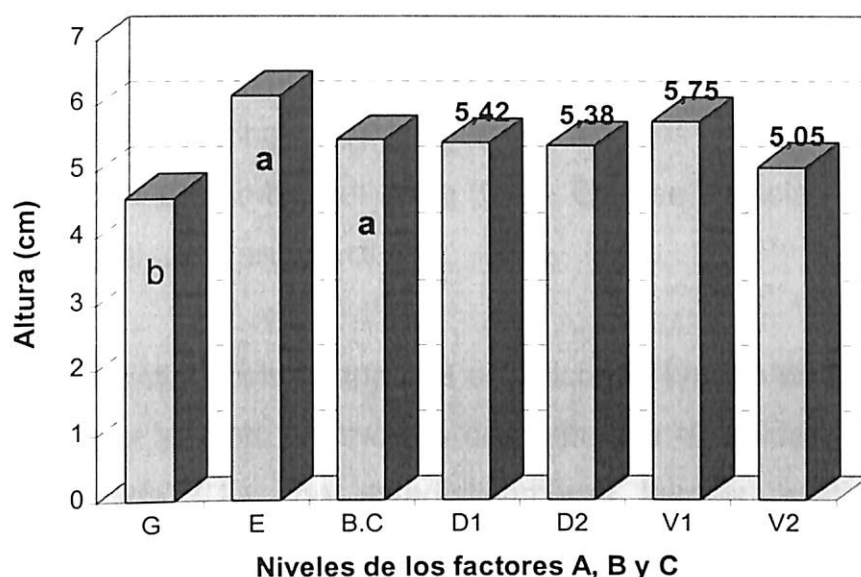
C.V. = 9.8851%

** = Altamente significativo

ns = No significativo

La mejor altura producida por la Letle Fhine dentro de los sustratos se debió a una mejor adaptación de la variedad a las condiciones del medio, ya que no hay diferencias en las condiciones del sustrato.

De acuerdo con el análisis de varianza, la prueba resultó altamente significativa para las medias de respuesta de los niveles del factor fuentes de materia orgánica (FA) a un nivel de significancia del uno por ciento. Esto quiere decir que las medias producidas por la gallinaza, estiércol y el bagazo de caña son estadísticamente diferentes. En la Figura 4.6, se muestran los niveles del factor fuentes de materia orgánica (FA), en donde se aprecia que el estiércol produjo la mejor altura de planta, mientras que con la gallinaza se consiguió la menor respuesta.



G= Gallinaza, E= Estiércol, B.C= Bagazo caña, D1= Dosis baja de materia orgánica, D2= Dosis alta de materia orgánica, V1= variedad Letle Fhine, V2= variedad Golden Stipe.

Figura 4.6. Efecto de la fuente de materia orgánica (factor A), dosis de materia orgánica (factor B) y dos genotipos de kalanchoe (factor C) sobre la altura de planta.

Según la prueba de Tukey al uno por ciento de significancia efectuada sobre las fuentes de materia orgánica, resultó que la mejor media fue para el estiércol (6.15 cm), en segundo orden quedó el bagazo de caña (5.47 cm) y finalmente la gallinaza (4.59 cm) ocupó el último sitio (E: a; B.C: a; G: b, $T_{0.01} = 0.6954$). Dado que estadísticamente la media del estiércol es igual a la del bagazo, en un momento dado se puede recomendar, cualquiera de las dos fuentes como ingrediente de sustratos contaminados, esperando una respuesta similar en altura de planta.

La razón por la que el estiércol produjo una mayor altura de planta se atribuye a que es un material más rico en nitrógeno, fósforo y potasio que la gallinaza y el bagazo (Cuadro 3.1), teniendo una mayor influencia en la fertilidad del sustrato. Además, el estiércol es un material compostado formado

por una gran cantidad de materia orgánica en forma de humus (coloides). Bohn *et al.*, (1993) menciona que el humus es un complejo o una mezcla de sustancias amorfas y coloidales, resistente a los microorganismos, modificada a partir de los tejidos originales de las plantas, además en los suelos incrementa la capacidad de intercambio catiónico (CIC). Esto se aprecia en el Cuadro 3.1 donde el estiércol tiene un mayor CIC.

Para el factor dosis de materia orgánica (FB) no se encontró diferencias significativas, por lo tanto las medias de respuesta obtenidas en la dosis baja (D_1) y dosis alta (D_2) son estadísticamente iguales, pudiéndose utilizar cualquiera de ellas en el sustrato (Cuadro 4.2). Aunque en la Figura 4.6, se muestra que con la dosis baja se tiene una altura de planta ligeramente mayor que con la dosis alta. Esto lo podemos atribuir al origen de las fuentes de materia orgánica, donde todas ellas son altamente salinas (> 10 dS/m). Al incrementarse la dosis se aumenta las sales en el sustrato esto origina disminución del agua y nutrimentos para el cultivo lo cual se expresa en menor altura de planta.

Se encontró diferencia altamente significativa al uno por ciento, para los niveles del factor variedades de kalanchoe (FC), indicando que las medias de respuesta no son iguales. Se aprecia en la Figura 4.6, que al utilizar la variedad Letle Fhine (V_1) se obtiene mayor altura de planta que con la Golden Stipe (V_2), siendo la V_1 la de mejor respuesta dado que ambas son diferentes.

Para ninguna de las interacciones entre los factores A, B y C, se encontró diferencia significativa, es decir, todas resultaron no significativas. Esto indica que los factores en estudio en esta variable actúan en forma independiente. Sin embargo al analizar las medias obtenidas para la interacción fuentes de materia orgánica y dosis ($A \times B$), se nota en la Figura 4.7, que en la medida que se incrementa la cantidad de materia orgánica en el medio de

crecimiento, la altura de planta en gallinaza y en bagazo disminuye, sin embargo esa disminución es muy pequeña y estadísticamente no significativa. En estiércol es a la inversa, es decir, se tiene la mayor altura con la dosis menor de materia orgánica, pero estadísticamente no significativa. Por lo tanto, se puede utilizar cualquier combinación dado que las respuestas son iguales, pero se esperaría una respuesta en altura de planta mayor si se emplea la combinación de estiércol en su dosis baja en la composición del sustrato.

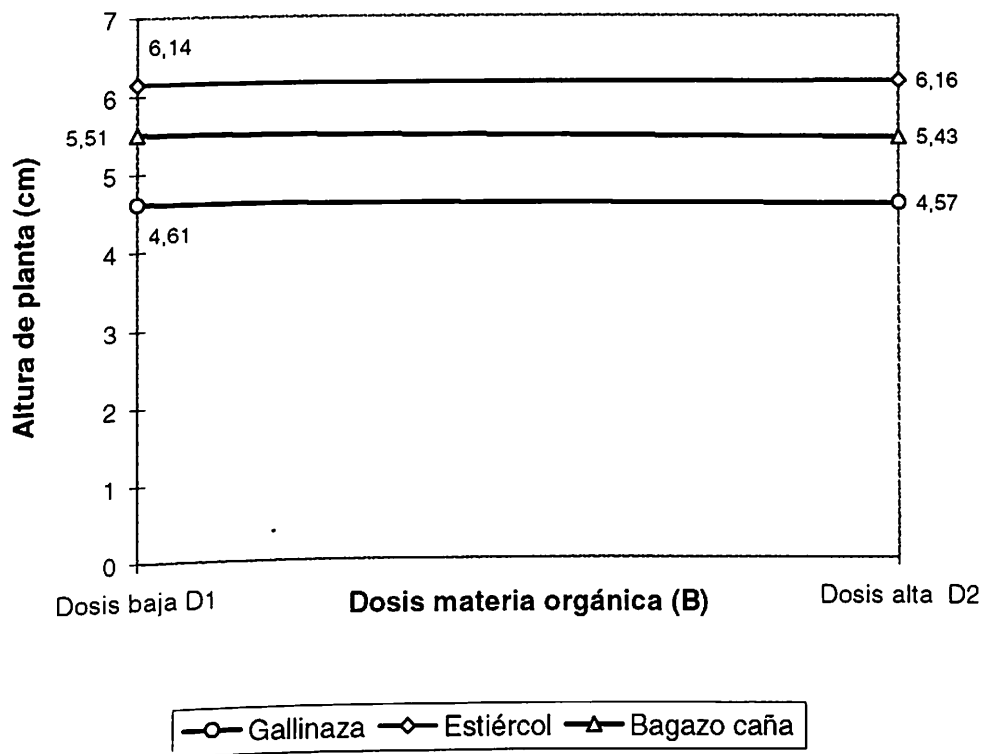
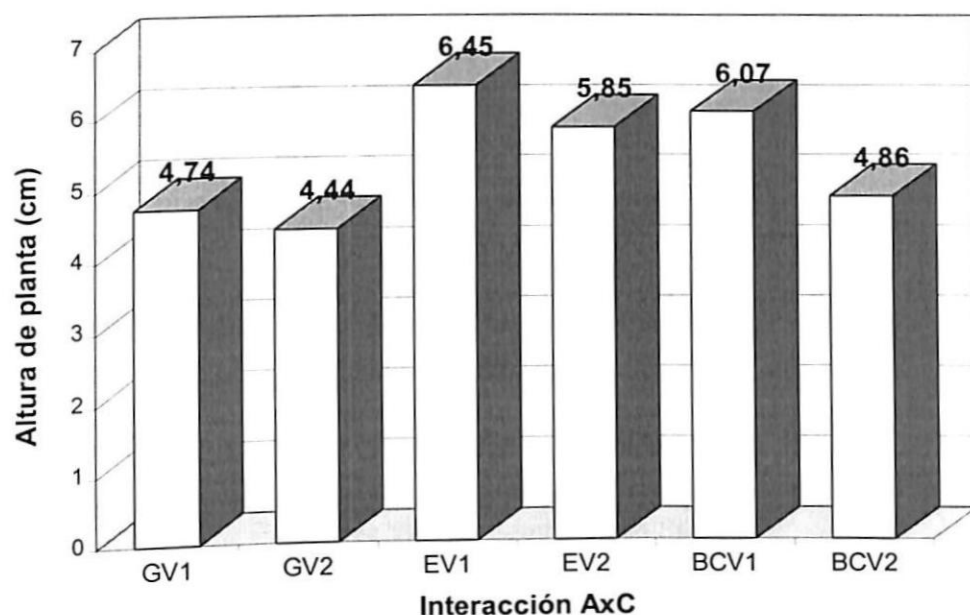


Figura 4.7. Efecto de la interacción entre los niveles del factor FA (fuentes de materia orgánica) con los niveles del factor FB (dosis de materia orgánica) sobre la altura de planta de kalanchoe.

Al analizar el efecto combinado de las fuentes de materia orgánica con las variedades de kalanchoe (AxC), se observa en la Figura 4.8, que la combinación entre el estiércol y la variedad Letle Fhine (EV₁) alcanzó la mayor

altura, en segundo sitio quedó la combinación de bagazo con la variedad Letle Fhine (BCV₁) y la combinación que favoreció menos la altura fue la gallinaza con la variedad Golden Stipe (GV₂). No hay que olvidar que estadísticamente no hay diferencias entre las medias de estas combinaciones. Cabe hacer notar que en la combinación de las fuentes de materia orgánica con la variedad Letle Fhine (V₁) mostró mayor altura que la Golden Stipe (V₁).

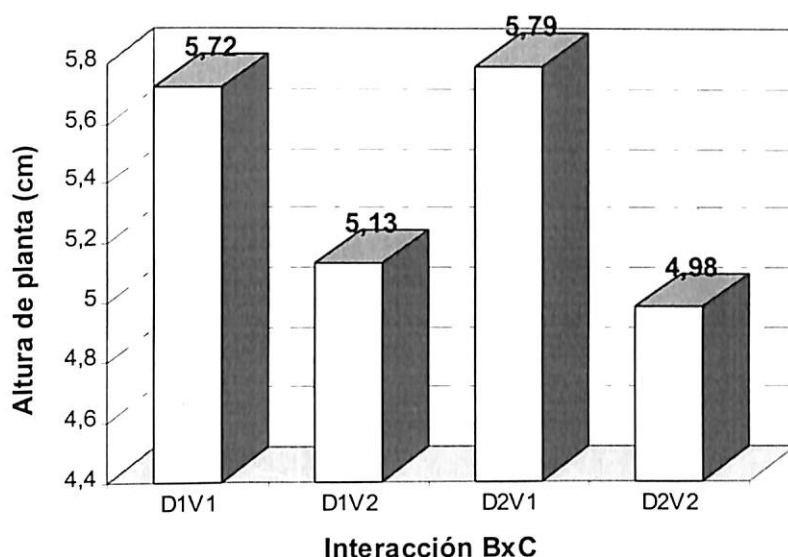


G= Gallinaza, E= Estiércol, BC= Bagazo caña, V1= variedad Letle Fhine, V2= variedad Golden Stipe.

Figura 4.8. Efecto de la interacción entre los niveles del factor FA (fuentes de materia orgánica) con los niveles del factor FC (variedades de kalanchoe) sobre la altura de planta.

En la Figura 4.9 se muestran las medias para la interacción entre las dosis de materia orgánica y las variedades de kalanchoe (BxC). Se nota que en la medida que se incrementa la dosis de materia orgánica en la variedad Letle Fhine (V₁), se incrementa ligeramente la altura, mientras que en la variedad Golden Stipe (V₂) la altura disminuye. En cualquiera de las dosis utilizadas la V₁

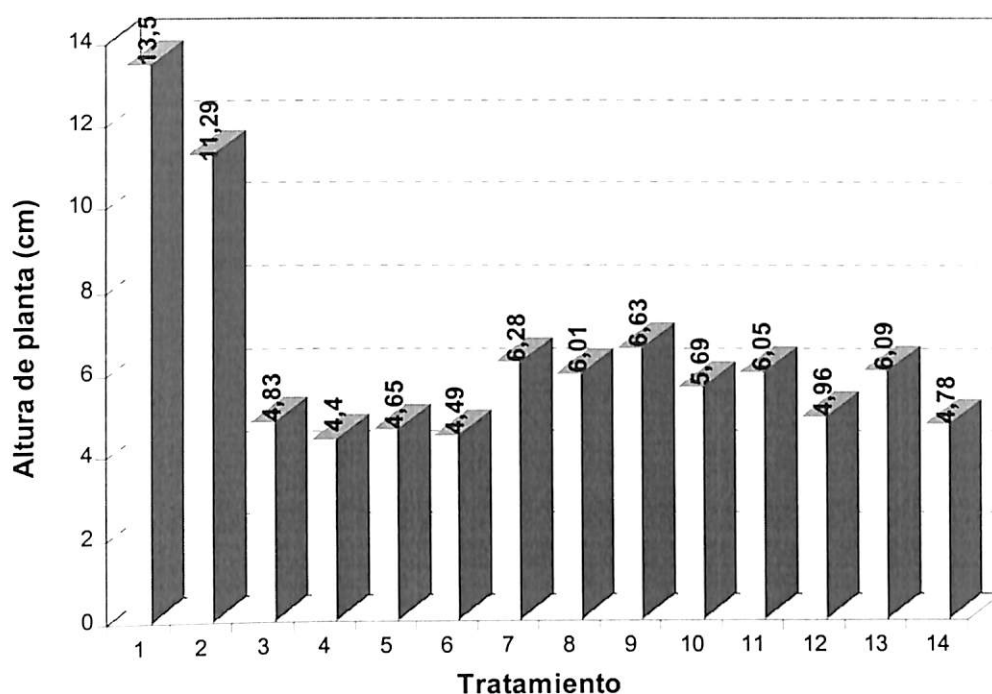
supera en altura de planta a la V₂. La mejor respuesta fue para la combinación entre la dosis alta con la variedad Letle Fhine, aunque estadísticamente todas son iguales.



D1= Dosis baja de materia orgánica, D2= Dosis alta de materia orgánica, V1= variedad Letle Fhine, V2= variedad Golden Stipe.

Figura 4.9. Efecto de la interacción entre los niveles del factor FB (dosis de materia orgánica) con los niveles del factor FC (variedades de kalanchoe) sobre la altura de planta.

Finalmente en la Figura 4.10 se presenta las medias alcanzadas por la interacción de los factores AxBxC, así como las medias producidas por los sustratos testigos (T₁ y T₂). En esta figura se comparan las alturas presentadas por los testigos contra los tratamientos contaminados. Así notamos que ninguno de los contaminados superó a los testigos. Dentro de los contaminados el T₉ fue el que mostró la mejor respuesta en altura de planta, pero estadísticamente diferente de los tratamientos uno y dos y similar a los tratamientos 7, 13, 11, 8, 10 y 12, siendo con el resto diferente.



Tratamientos testigos = T_1, T_2 . Tratamientos contaminados = $T_3, \dots, T_{14}$

Figura 4.10. Efecto de la interacción de las fuentes de materia orgánica (factor A) con las dosis de materia orgánica (factor B) y variedades de kalanchoe (factor C) sobre la altura de planta.

Número de hojas en kalanchoe

En el Cuadro 4.3 se muestra el análisis de varianza para la variable número de hojas en plantas de kalanchoe para los sustratos contaminados ($T_3, T_4, \dots, T_{14}$). Nótese en ese mismo cuadro que para el contraste uno (C_1), donde se comparó las medias de los tratamientos testigos contra las medias de los tratamientos contaminados, la prueba resultó altamente significativa al uno por ciento de significancia, de tal manera que el número de hojas en las plantas testigos fueron estadísticamente superior al número que se alcanzó en las plantas cultivadas en los sustratos contaminados. Lo anterior se muestra en la Figura 4.11. No se encontró diferencias significativas al cinco por ciento para el contraste dos (C_2), en donde se comparó la media de T_1 contra el T_2 ,

concluyendo que hay igualdad en el número de hojas producidas por la variedad Letle Fhine y Golden Stipe cultivadas sobre un mismo medio. Sin embargo en la Figura 4.11, se aprecia que al utilizar la variedad Letle Fhine presentó más hojas que la Golden Stipe, pero la diferencia no es significativa.

La respuesta encontrada en el contraste uno se debe principalmente a las características del sustrato. Los sustratos contaminados presentaron alta salinidad, sulfatos y pH, mientras que el testigo no presentó problemas de sales y su pH se aproxima más al recomendado para el cultivo (Vidalie, 1992). Narro (1994) menciona que las sales en la solución del suelo es uno de los factores que afectan el potencial hídrico total, agrega además, que la presencia de iones en el agua reduce la energía de ésta y baja la disponibilidad del agua para el cultivo.

En el contraste dos, la variedad Letle Fhine presentó mejor respuesta. Debido a que es un genotipo diferente, mostrando una mejor adaptación al sustrato y condiciones del experimento. El análisis del sustrato testigo (Cuadro 4.19) no muestra diferencias en pH, conductividad eléctrica, nitrógeno, fósforo y potasio siendo muy similares, esto último reafirma lo antes mencionado.

Dentro de los sustratos contaminados (Fig. 4.11), se nota que la mejor respuesta es para el tratamiento nueve con 43.5 hojas producidas, siendo ésta estadísticamente igual al tratamiento dos (testigo) y al resto de los sustratos contaminados.

Se encontró diferencia significativa al uno por ciento para el factor fuentes de materia orgánica (FA), es decir, las medias que producen la gallinaza, el estiércol, y el bagazo de caña sobre el número de hojas son diferentes. Según la prueba de Tukey al uno por ciento efectuado sobre las

Cuadro 4.3. Análisis de varianza para la variable número de hojas correspondiente a los tratamientos contaminados con hidrocarburo.

F.V	G.L	S.C	C.M	Fc	F α	
					0.05	0.01
C₁: T ₁ ,T ₂ vs T ₃ ,...,T ₁₄	1	0.034074	0.034074	72.1894 **	4.08	7.32
C₂: T ₁ vsT ₂	1	0.001342	0.001342	2.8424 ns	4.08	7.32
FA	2	0.003628	0.001814	4.1085 *	3.266	5.26
FB	1	0.000141	0.000141	0.3186 ns	4.116	7.41
FC	1	0.015423	0.015423	34.9282 **	4.116	7.41
AB	2	0.003012	0.001506	3.4112 *	3.266	5.26
AC	2	0.000550	0.000275	0.6226 ns	3.266	5.26
BC	1	0.000089	0.000089	0.2009 ns	4.116	7.41
ABC	2	0.000186	0.000093	0.2111 ns	3.266	5.26
Error	36	0.015896	0.000442			
Total	47	0.038925				

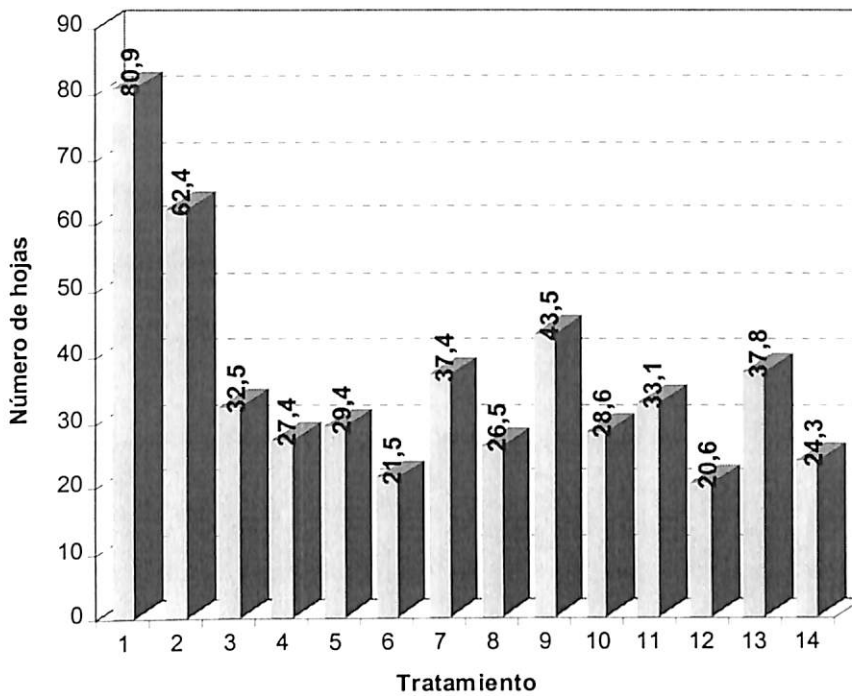
C.V. = 9.0322%

** = Altamente significativa

* = Significativa

ns = No significativa

medias de los niveles de este factor, se encontró que la mejor respuesta fue para el estiércol, seguido por el bagazo y al final quedó la gallinaza (E: a; BC: a G: a, T_{0.01} = 8.91). En la Figura 4.12 se muestra los valores numéricos que alcanzaron los niveles del factor fuentes de materia orgánica (FA).



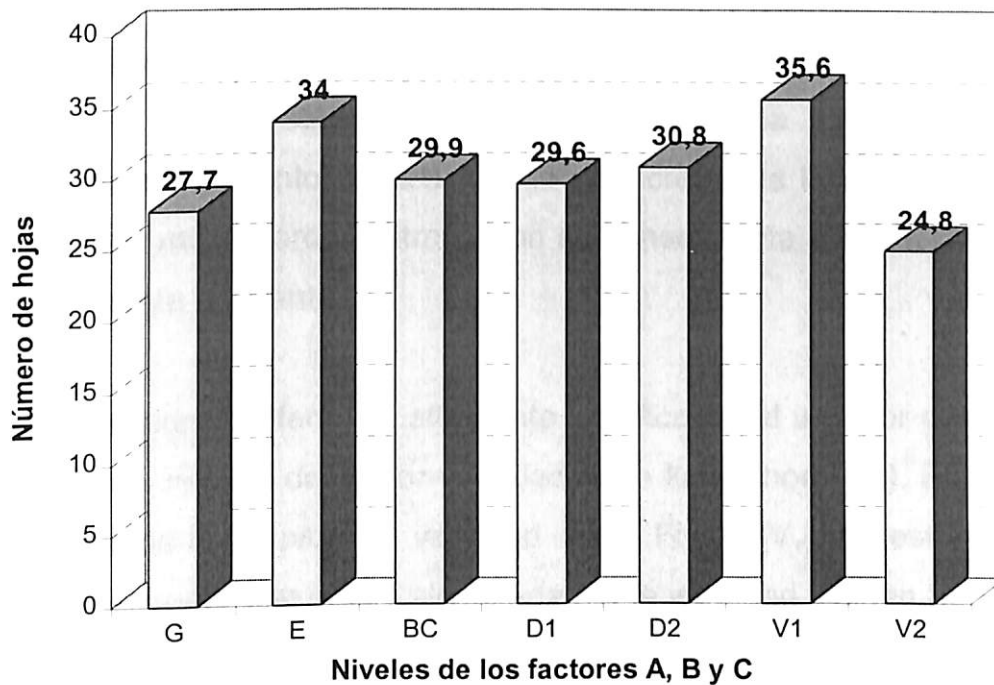
Tratamientos testigos = T_1, T_2 . Tratamientos contaminados = $T_3, \dots, T_{14}$

Figura 4.11. Efecto de la interacción de las fuentes de materia orgánica (factor A) con las dosis de materia orgánica (factor B) y variedades de kalanchoe (factor C) sobre el número de hojas.

Se atribuye la mejor respuesta producida por el estiércol al origen del material. El estiércol utilizado fue una composta formada por una gran cantidad de humus, el cual es una forma de materia orgánica que tiene un mayor efecto sobre las propiedades del suelo. Ansorena (1994) afirma que el humus da color oscuro a los suelos y tiene gran influencia en muchas propiedades, principalmente en la estructura y en la capacidad de retener nutrientes. Esto último correlaciona con los análisis, en donde el estiércol tiene una mayor capacidad de intercambio catiónico, N, P, K y MO que las otras fuentes utilizadas (Cuadro 3.1).

Para el factor dosis de materia orgánica (FB), los niveles probados resultaron no significativos al cinco por ciento sobre el número de hojas. Por lo

que se puede utilizar cualquier dosis de materia orgánica en el sustrato esperando una respuesta parecida. Sin embargo en la Figura 4.12 se aprecia que la dosis alta (D_2) produjo mayor número de hojas que con la dosis baja (D_1), aunque no hay diferencias estadísticas entre estas dos medias.



G= Gallinaza, E= Estiércol, BC= Bagazo caña, D1= Dosis baja de materia orgánica, D2= Dosis alta de materia orgánica, V1= variedad Letle Fhine, V2= variedad Golden Stipe.

Figura 4.12. Efecto de la fuente de materia orgánica (factor A), dosis de materia orgánica (factor B) y dos genotipos de kalanchoe (factor C) sobre el número de hojas.

Dado que todas las fuentes de materia orgánica utilizadas son salinas (Cuadro 3.1), se espera que al incrementar la dosis en el sustrato aumentará la salinidad y bajará la disponibilidad de agua para el cultivo con su consecuente disminución en la calidad del cultivo. Sin embargo con las dosis altas se tienen mejores respuestas. Lo anterior es debido a que la materia orgánica influye en la estructura al aglutinar partículas, formando agregados de mayor tamaño, esto origina una mayor porosidad al favorecer una mayor cantidad de

macroporos y drenaje, que fomentará una mayor lixiviación de sales disminuyendo el riesgo por salinidad.

Por otro lado, los sustratos que llevan bagazo están formados por fibras grandes lo cual origina en el sustrato una mayor porosidad total y menor densidad aparente que las otras fuentes de materia orgánica (Cuadro 3.6). Aquí la lixiviación de las sales es grande debido a una mayor proporción de macroporos, por lo tanto, a medida que se incrementa la dosis de bagazo se aumentan los macroporos sustrato con su consecuente eliminación de sales y mejor respuesta de planta.

Se encontró diferencia altamente significativa al uno por ciento para las medias de los niveles del factor variedades de *Kalanchoe* (FC). Por lo tanto, la media de respuesta para la variedad Letle Fhine (V_1) es estadísticamente diferente y superior a la media alcanzada por la variedad Golden Stipe (V_2). Fig. 4.12.

La razón por la cual se dio esta respuesta se atribuye a una mejor adaptación de la variedad Letle Fhine a las condiciones salinas y de contaminación del sustrato.

Para la interacción entre las fuentes de materia orgánica con las dosis de materia orgánica (AxB), se encontró diferencia significativa al uno por ciento, es decir las medias de respuesta de las combinaciones de estos dos factores son estadísticamente diferentes, además de que ambos factores actúan en forma conjunta. En el Cuadro 4.4 se muestra los resultados de la prueba de Tukey al uno por ciento efectuado sobre las medias de respuesta para cada una de las interacciones entre los factores A y B, se observa que la mejor interacción fue para la combinación de estiércol en su dosis mayor (ED_2), mientras que en contraste, la interacción compuesta por gallinaza en su dosis

alta (GD₂) fue la que favoreció menos la producción de hojas en plantas de kalanchoe. Pero según la prueba de Tukey todas estas medias son estadísticamente iguales, es decir, las diferencias que existen entre ellas no son lo suficientemente grandes como para que existan diferencias.

Cuadro 4.4. Prueba de Tukey al uno por ciento sobre las medias de respuesta para la interacción (AxB), en la variable número de hojas de kalanchoe.

Interacción	Media Nº de hojas	Tukey al 0.01
ED ₂	36.1	a
ED ₁	31.9	a
BCD ₂	31.0	a
GD ₁	29.9	a
BCD ₁	26.9	a
GD ₂	25.4	a

$T_{0.01} = 14.7$

Por otro lado en la Figura 4.13, se observa que en la medida que se aumenta la dosis de estiércol o de bagazo de caña en el sustrato se incrementa el número de hojas en las plantas de kalanchoe, por lo que las variables son directamente proporcionales. El comportamiento en la gallinaza es a la inversa, es decir, en la medida que se incrementa la cantidad en el sustrato, las plantas producen menor cantidad de hojas, por lo tanto las variables involucradas son inversamente proporcionales.

Se atribuye una mejor respuesta del estiércol en su dosis alta probablemente a que es un material que fomenta el crecimiento vegetal al poseer una mayor actividad enzimática y reguladores de crecimiento que el bagazo o la gallinaza. Además el estiércol por ser compostado posee una gran cantidad de humus. Burés (1997) menciona que el humus está formado por sustancias húmicas, las cuales influyen en la disponibilidad de nutrimentos para las plantas al formar complejos con metales de Fe, Mn, Zn y Cu, además mejoran la absorción de P, N, K, Ca y Mg.

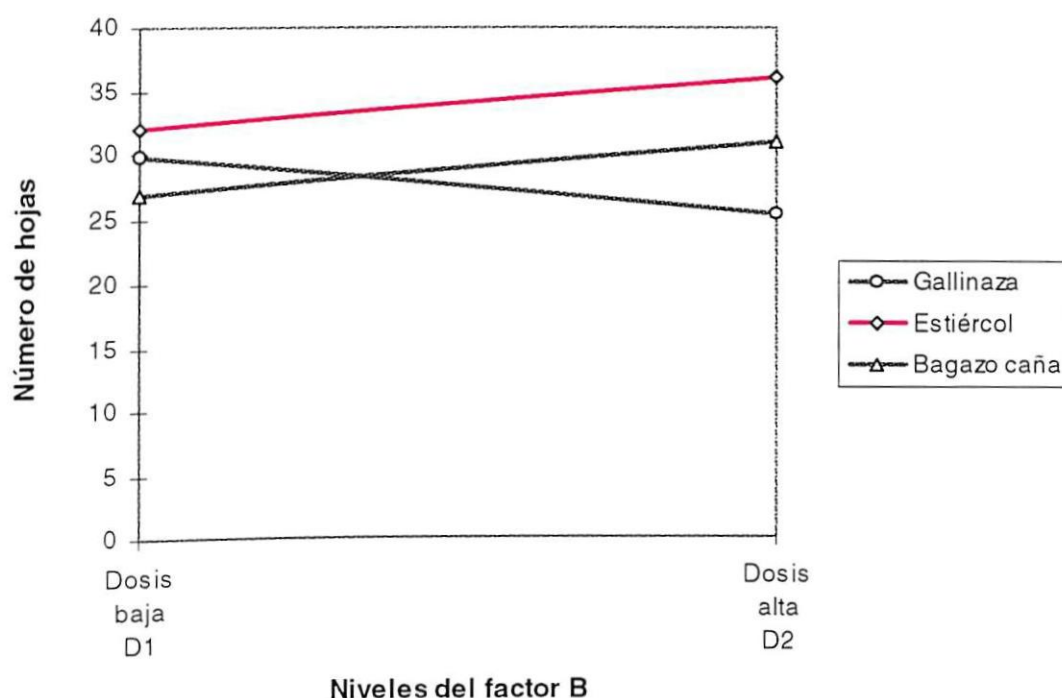
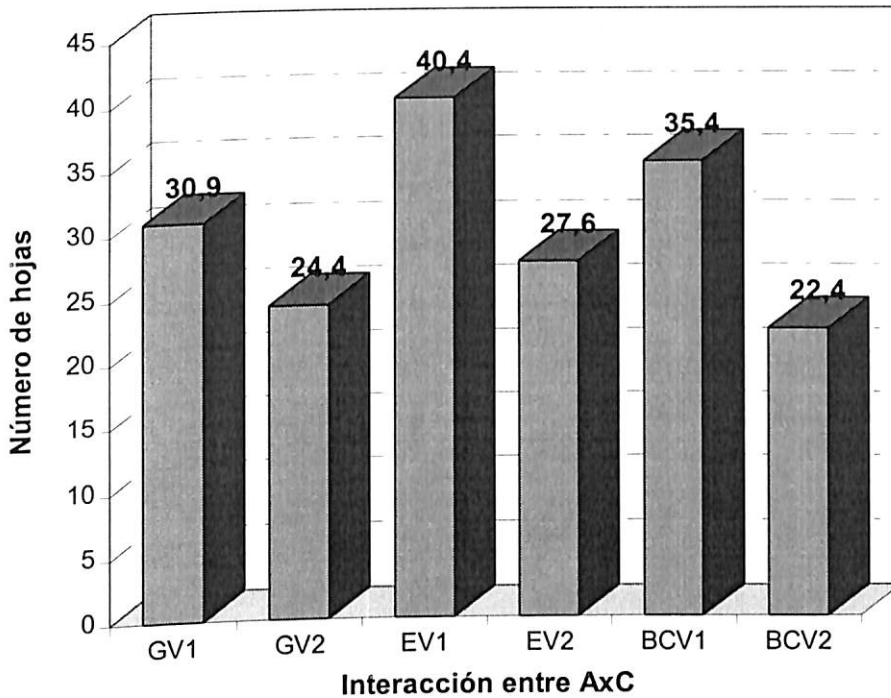


Figura 4.13. Efecto de la interacción entre los niveles del factor FA (fuentes de materia orgánica) con los niveles del factor FB (dosis de materia orgánica) sobre el número de hojas de plantas de kalanchoe.

Las dosis altas de bagazo en el medio fomentan una mayor lixiviación de sales debido a la gran cantidad de fibras que posee, las que fomentan una mayor presencia de macroporos cuya función es la de favorecer la aireación y el drenaje. Ansorena (1994) menciona que los tamaños grandes de partículas en el sustrato fomentan un mayor tamaño de los poros, esto origina que el sustrato esté bien aireado pero que retenga poca agua.

Apesar de que la gallinaza posee una mayor concentración de N, P y K que el bagazo de caña (Cuadro 3.1), la dosis alta favorece menos el número de hojas. Esto se atribuye a la alta salinidad del material que al incrementarse con la dosis disminuye la respuesta del cultivo.

Según el análisis de varianza, las interacciones AxC, BxC y AxBxC resultaron no significativas, es decir considerando un nivel de significancia del uno por ciento el efecto conjunto entre los factores involucrados en cada interacción no es significativa, por lo tanto los factores actúan en forma independiente o no se encuentran relacionados. Sin embargo, al analizar las medias producidas por la interacción de los niveles en AxC (Fig. 4.14), la mejor combinación es cuando se utiliza estiércol como fuente de materia orgánica con la variedad Letle Fhine (EV₁), seguido por la combinación de bagazo de caña con la variedad Letle Fhine (BCV₁), mientras que la combinación de bagazo con la variedad Golden Stipe (BCV₂) fue la que produjo menos número de hojas en plantas.



G= Gallinaza, E= Estiércol, BC= Bagazo caña, V1= variedad Letle Fhine, V2= variedad Golden Stipe.

Figura 4.14. Efecto de la interacción entre los niveles del factor FA (fuentes de materia orgánica) con los niveles del factor FC (variedades de kalanchoe) sobre el número de hojas.

También se observa en el gráfico anterior que en todas las fuentes de materia orgánica la variedad Letle Fhine (V_1) supera en número de hojas producidas a la variedad Golden Stipe (V_2).

Se observa en la Figura 4.15 la interacción de los factores en BxC, donde la combinación entre la dosis mayor de materia orgánica con la variedad Letle Fhine supera a las demás combinaciones. Nótese también, como en la medida que se incrementa la cantidad de materia orgánica en el sustrato se aumenta la producción de hojas en la variedad Letle Fhine, sin embargo la variedad Golden Stipe no responde a la cantidad orgánica en el sustrato, ya que se tiene la misma respuesta en ambas dosis.

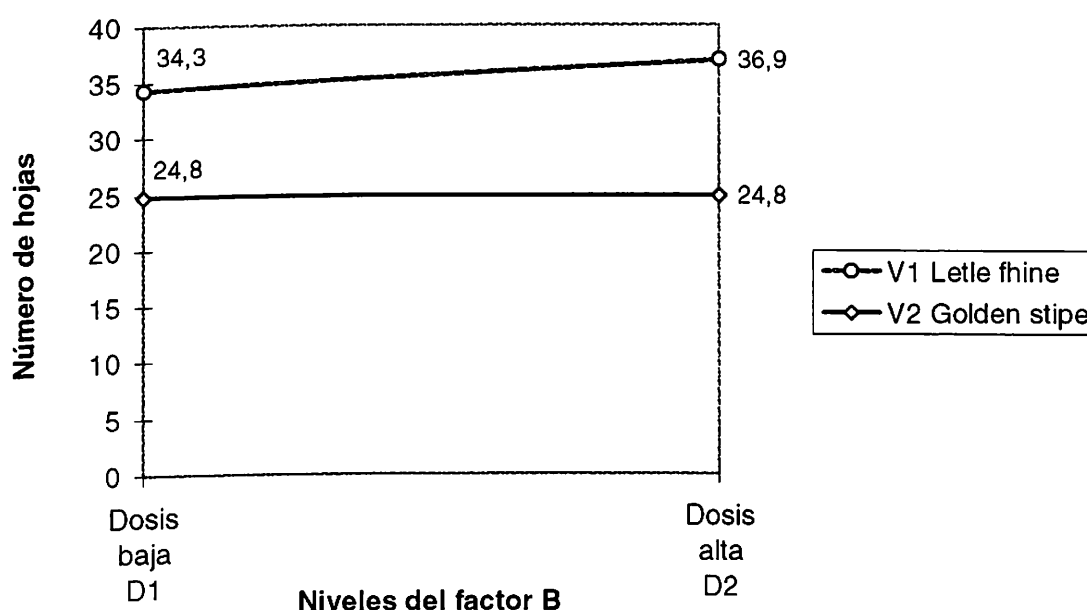


Figura 4.15. Efecto de la interacción entre los niveles del factor FB (dosis de materia orgánica) con los niveles del factor FC (variedades de kalanchoe) sobre el número de hojas.

Longitud de hoja

En el Cuadro 4.5 se muestran los resultados del análisis de varianza para los sustratos contaminados, notamos que para el contraste uno (C_1) entre los tratamientos testigos y los contaminados la prueba resultó altamente significativa, esto quiere decir que la media de los T_1 y T_2 (3.42 cm) es diferente a la media de los tratamientos contaminados (1.54 cm), y dado que la primera es mayor que la segunda, los testigos superaron a los tratamientos contaminados en longitud de hoja. En el contraste dos (C_2) se encontró diferencia altamente significativa entre los T_1 y T_2 , por lo tanto las medias de ambos tratamientos son diferentes, y dado que la media del T_1 (3.62 cm) es mayor que T_2 (3.22 cm) la primera es la de mejor respuesta. Lo anterior se aprecia en la Figura 4.16, donde se compara la respuesta producida en los testigos y la obtenida por los contaminados. Se observa que la mejor respuesta dentro de los contaminados es para el tratamiento T_7 , compuesto de estiércol en la dosis baja con la variedad Letle Fhine (V_1), seguido por el T_9 , compuesto de estiércol en su dosis alta y también con la variedad Letle Fhine (V_1), aunque estadísticamente la diferencia entre las dos no es significativa. Por último, se aprecia que el tratamiento compuesto por gallinaza en la dosis alta y con la variedad Letle Fhine fue la de menor respuesta (T_5).

La respuesta encontrada en el contraste uno se atribuye a las condiciones de alta salinidad, pH alcalino no adecuado para el cultivo, concentración elevada de sulfatos además de la presencia de hidrocarburo en el medio, produjeron plantas muy pequeñas, de hojas y tallos reducidos, follaje ligeramente amarillo que en algunos casos se desprendían al contacto.

La respuesta en el contraste dos se debe principalmente a diferencias en el genotipo de la planta, ya que el análisis final del sustrato testigo indica que las diferencias encontradas son mínimas (Cuadro 4.19).

En el proceso de descomposición del hidrocarburo por los microorganismos del suelo, se produce cantidades importantes de CO_2 , agua y otras sustancias. Al respecto, (Narro, 1994) menciona que el CO_2 es un componente de la atmósfera del suelo, sin embargo si se encuentra en concentraciones relativamente altas puede producir efectos tóxicos en las plantas, agrega además, que tanto la falta de O_2 como la acumulación de CO_2 alrededor de las raíces pueden reducir su crecimiento

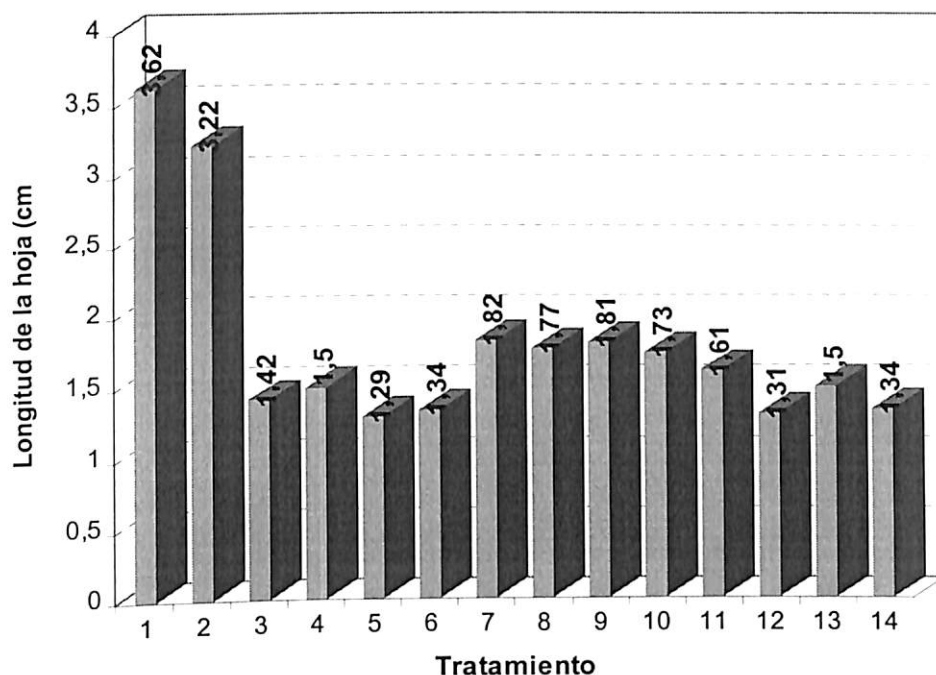
Cuadro 4.5. Análisis de varianza para la variable longitud de hoja correspondiente a los tratamientos contaminados con hidrocarburo.

F.V	G.L	S.C	C.M	Fc	F α	
					0.05	0.01
C₁: T ₁ , T ₂ vs						
T ₃ , ..., T ₁₄	1	24.338051	24.338051	887.829 **	4.08	7.32
C₂: T ₁ vs T ₂	1	0.326028	0.326028	11.8932 **	4.08	7.32
FA	2	1.454773	0.727386	37.4916 **	3.266	5.264
FB	1	0.063049	0.063049	3.2497 ns	4.116	7.41
FC	1	0.065987	0.065987	3.4011 ns	4.116	7.41
AB	2	0.035156	0.017578	0.9060 ns	3.266	5.264
AC	2	0.167137	0.083569	4.3074 *	3.266	5.264
BC	1	0.002159	0.002159	0.1113 ns	4.116	7.41
ABC	2	0.019264	0.009632	0.4965 ns	3.266	5.264
Error	36	0.698448	0.019401			
Total	47	2.505974				

C.V. = 9.0742 %, * = Significativo, ** = Altamente significativo, ns = No significativo

Según el ANVA se encontró diferencia altamente significativa al uno por ciento para el factor fuentes de materia orgánica (FA), es decir, las medias de los niveles de este factor (G, E y BC) son diferentes entre si. Según la prueba de Tukey al uno por ciento se encontró que la mejor media fue para el estiércol, seguido por el bagazo y en última posición quedó la gallinaza (E: a; B.C: b; G: b; T_{0.01} = 0.1661). Los valores numéricos se aprecian en la Figura 4.17.

El estiércol superó a las otras fuentes de materia orgánica debido a sus componentes (Cuadro 3.1), los cuales tuvieron una mayor influencia tanto en el suelo como en la planta.

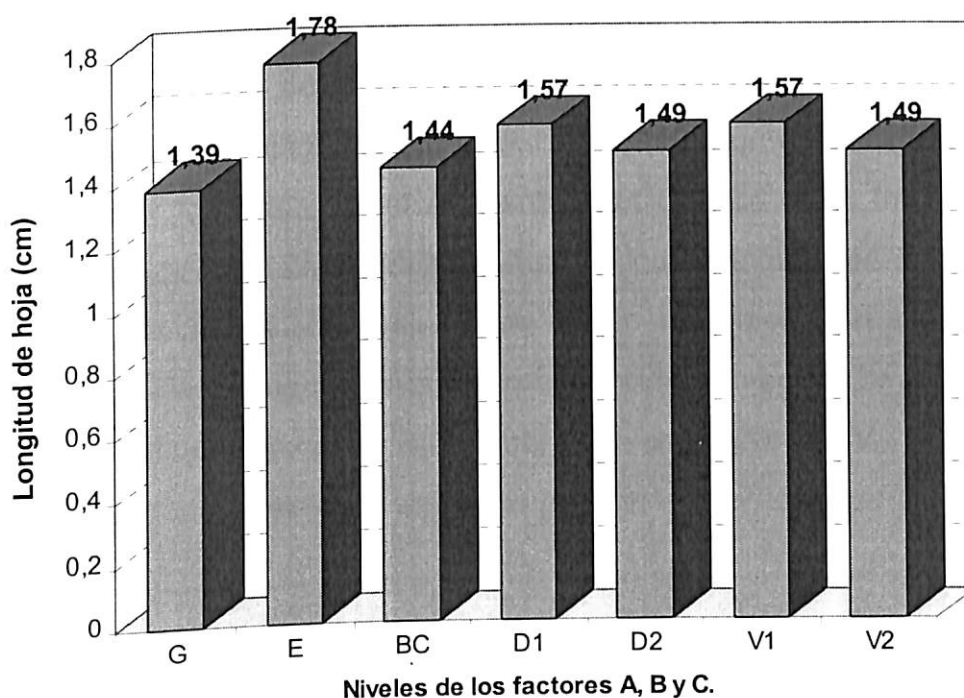


Tratamientos testigos = T_1, T_2 . Tratamientos contaminados = $T_3, \dots, T_{14}$

Figura 4.16. Efecto de la interacción de las fuentes de materia orgánica (factor A) con las dosis de materia orgánica (factor B) y variedades de kalanchoe (factor C) sobre la longitud de hoja.

Para los factores dosis de materia orgánica (FB) y variedades (FC), no se encontró diferencias significativas al uno por ciento, por lo que las medias de respuesta de los niveles de estos factores son estadísticamente iguales. En la Figura 4.17 se observa como la dosis baja (D_1) produce mayor longitud de hoja que la dosis alta (D_2) en plantas de kalanchoe. En ese mismo gráfico se aprecia como la variedad Letle Fhine (V_1) muestra mayor longitud que la Golden Stipe (V_2).

Para la interacción entre las fuentes de materia orgánica y sus dosis (AXB), no hay diferencia significativa al uno por ciento, por lo tanto las medias que exhiben las combinaciones entre los niveles de estos factores son iguales. Pero la combinación de estiércol en su dosis baja en el sustrato genera una mayor longitud de hoja (1.79 cm), que la combinación de gallinaza en su dosis alta (1.31 cm), que fue la que menos favoreció la longitud (Fig. 4.18). Nótese que el estiércol en ambas dosis es superior que las otras fuentes, además no hay cambios significativos en longitud con incrementos de estiércol o bagazo en el sustrato. Incrementos de gallinaza tienden a disminuir la longitud de hoja en kalanchoe, aunque estadísticamente no es significativo.



G= Gallinaza, E= Estiércol, BC= Bagazo caña, D1= Dosis baja de materia orgánica, D2= Dosis alta de materia orgánica, V1= variedad Letle Fhine, V2= variedad Golden Stipe.

Figura 4.17. Efecto de la fuente de materia orgánica (factor A), dosis de materia orgánica (factor B) y dos variedades de kalanchoe (factor C) sobre la longitud de hoja.

No se encontró diferencias significativas al uno por ciento para la combinación de factores en BxC y AxBxC, por lo que los factores involucrados en cada interacción actúan en forma independiente no en conjunto. Se aprecia en la Figura 4.19 la interacción BxC, en donde, para ambas variedades, incrementos de materia orgánica en los sustratos disminuyen la longitud de hoja, por lo tanto las mejores respuestas se dieron en las dosis bajas, superando la variedad Letle Fhine (1.62 cm) a la Golden Stipe (1.53 cm).

Para la interacción de los factores fuentes de materia orgánica y las variedades (AxC), se encontró diferencia significativa al cinco por ciento, por lo tanto los factores involucrados actúan conjuntamente. Según la prueba de Tukey al uno por ciento efectuada sobre las medias de la interacción de los niveles de estos factores, resultó que la combinación de estiércol con la variedad Letle Fhine (EV₁) fue la de mejor respuesta, en contraste con la combinación de bagazo con la variedad Golden Stipe (BCV₂) que quedó en último sitio (EV₁: a; EV₂: ab; BCV₁: bc; GV₂: c; GV₁: c; BCV₂: c). En la Figura 4.20 se muestra los valores numéricos para esta interacción.

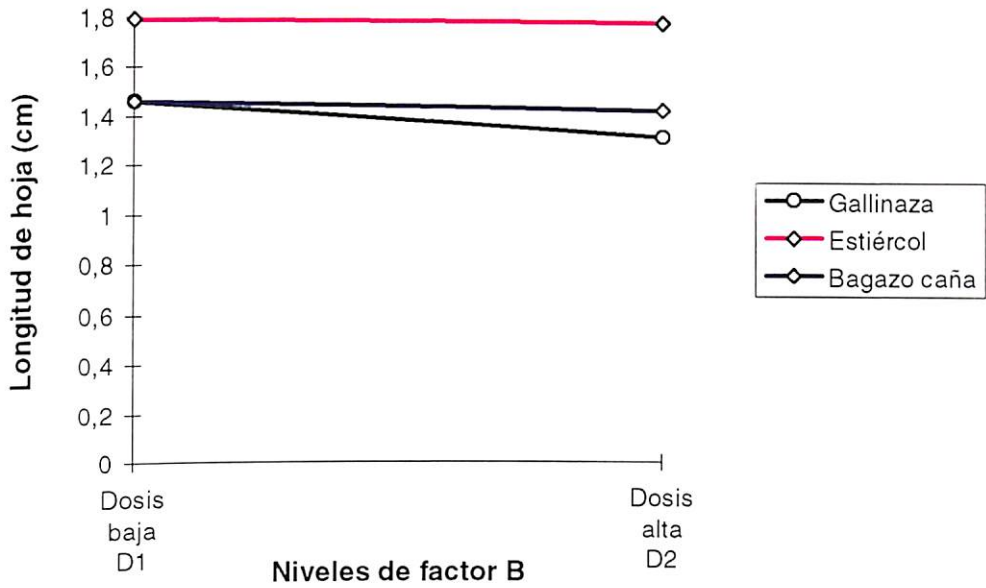


Figura 4.18. Efecto de la interacción de los niveles del factor FA (fuentes de materia orgánica) con los niveles del factor FB (dosis de materia orgánica) sobre la longitud de hojas de plantas de kalanchoe.

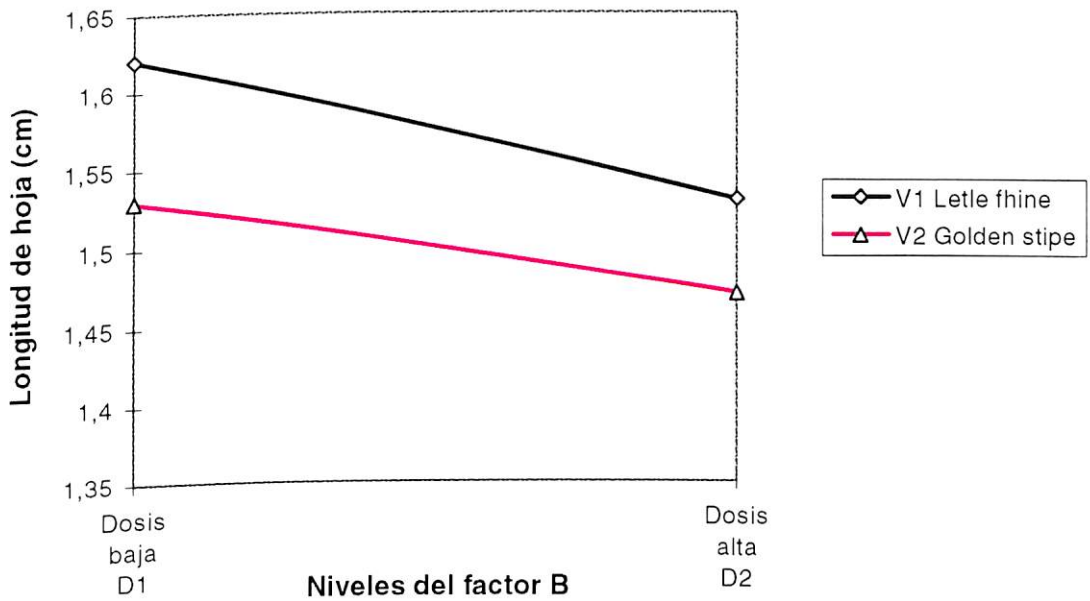
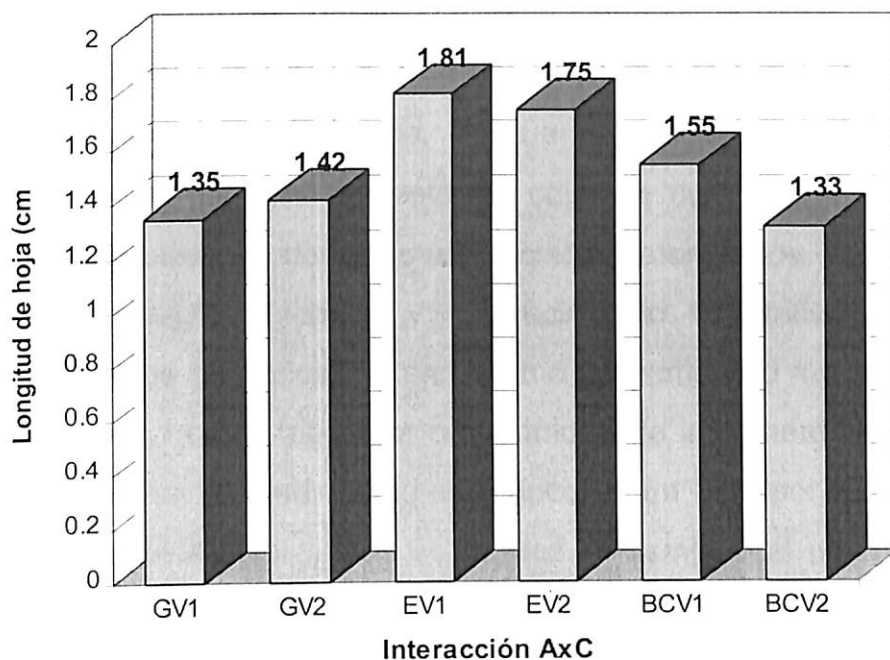


Figura 4.19. Efecto de la interacción de los niveles del factor FB (dosis de materia orgánica) con los niveles del factor FC (variedades de kalanchoe) sobre la longitud de hoja.



G= Gallinaza, E= Estiércol, BC= Bagazo caña, V1= variedad Letle Fhine, V2= variedad Golden Stipe.

Figura 4.20. Efecto de la interacción de los niveles del factor FA (fuentes de materia orgánica) con los niveles del factor FC (variedades de kalanchoe) sobre la longitud de hoja.

Ancho de la hoja

En el Cuadro 4.6 se muestra el análisis de varianza para la variable ancho de la hoja de plantas de kalanchoe en los sustratos contaminados. Se observa también, que para el primer contraste (C_1) la prueba resultó altamente significativa al uno por ciento, es decir, el promedio de las medias para los tratamientos testigos es estadísticamente diferente al promedio de las medias producidas por los tratamientos contaminados, y dado que la media para los testigos (2.70 cm) es mayor que para los contaminados (1.32 cm), se

concluye que ningún tratamientos contaminado logró superar al testigo en ancho de la hoja en plantas de kalanchoe.

La razón de este hecho se atribuye principalmente a las condiciones salinas del sustrato contaminado, el cual afecta al reducir la calidad y crecimiento de las plantas. En esto se coincide con (Francois, 1995), que efectuó un experimento donde evaluó cinco tratamientos salinos sobre el rendimiento de brotes (yemas) y el crecimiento vegetativo de alcachofa. Encontró que a los dos años, el rendimiento de yemas no fue afectado por la salinidad hasta 6.1 dS/m, pero por cada unidad de incremento en la salinidad arriba de este valor, el rendimiento se reduce en un 11.5 por ciento. Concluye que el rendimiento de las yemas se reduce al disminuir el peso de ellas. En cuanto al crecimiento vegetativo no fue afectado. Con esto se confirma que el incremento de la salinidad en el suelo afecta la calidad de las plantas.

En el segundo contraste (C_2), donde se comparó las medias de respuesta de los tratamientos testigos T_1 y T_2 , se encontró diferencia altamente significativa al uno por ciento, es decir, las medias involucradas no son iguales, siendo la variedad Letle Fhine la mejor ya que presentó una respuesta mayor que la Golden Stipe. Lo anterior se aprecia en la Figura 4.21, en donde además, se presenta las medias de respuesta para los tratamientos contaminados.

El crecimiento del kalanchoe en los sustratos testigos fue mejor debido a las condiciones del suelo (Cuadro 3.4 y 4.19), donde los valores de pH y conductividad eléctrica son menores que los sustratos contaminados.

Según el ANVA hay diferencia altamente significativa al uno por ciento sobre los niveles del factor fuentes de materia orgánica (FA). Por otro lado, con la prueba de Tukey al uno por ciento, se encontró que la mejor respuesta

correspondió al estiércol, seguido por el bagazo y en último sitio se ubicó a la gallinaza (E: a; BC: b; G: b; $T_{0.01} = 0.1519$), aunque vemos como estadísticamente entre el bagazo y la gallinaza no hay diferencia (Fig. 4.22).

Cuadro 4.6. Análisis de varianza para la variable ancho de la hoja en plantas de kalanchoe correspondiente a los tratamientos contaminados con hidrocarburo.

F.V	G.L	S.C	C.M	Fc	F α	
					0.05	0.01
C₁: T₁,T₂ vs T₃,...,T₁₄	1	13.189178	13.189178	607.7402 **	4.08	7.32
C₂: T₁vsT₂	1	0.232903	0.232903	10.73187 **	4.08	7.32
FA	2	0.853844	0.426922	31.0817 **	3.266	5.264
FB	1	0.076790	0.076790	5.5906 *	4.116	7.41
FC	1	0.165672	0.165672	12.0617 **	4.116	7.41
AB	2	0.031563	0.015781	1.1490 ns	3.266	5.264
AC	2	0.101250	0.050625	3.6857 *	3.266	5.264
BC	1	0.008537	0.008537	0.6216 ns	4.116	7.41
ABC	2	0.000214	0.000107	0.0078 ns	3.266	5.264
Error	36	0.494476	0.013735			
Total	47	1.732346				

C.V. = 8.9209%

* = Significativo

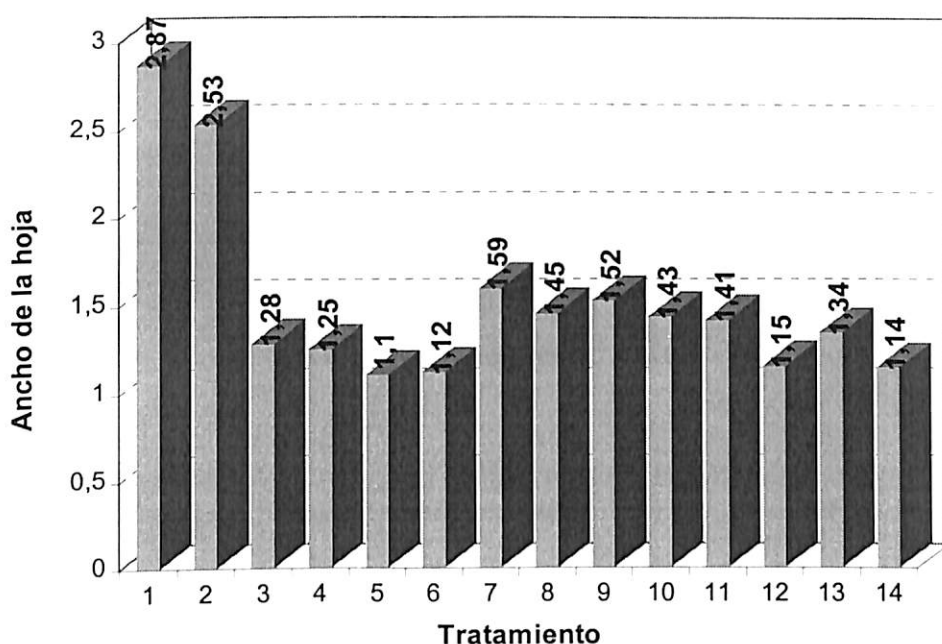
** = Altamente significativo

ns = No significativo

Según el ANVA hay diferencia altamente significativa al uno por ciento sobre los niveles del factor fuentes de materia orgánica (FA). Por otro lado, con la prueba de Tukey al uno por ciento, se encontró que la mejor respuesta correspondió al estiércol, seguido por el bagazo y en último sitio se ubicó a la gallinaza (E: a; BC: b; G: b; $T_{0.01} = 0.1519$), aunque vemos como estadísticamente entre el bagazo y la gallinaza no hay diferencia (Fig. 4.22).

La razón es que la materia orgánica tiene una gran influencia sobre el suelo y por consiguiente en la planta. Hanay y Yardiimcii (1992), reportan que la aplicación de estiércol y composta municipal al suelo mejoran las propiedades de éste positivamente, agregan que las compostas municipales

incrementan la conductividad hidráulica y la infiltración en un cociente superior que al estiércol. En este caso el estiércol fue superior a las otras fuentes debido principalmente a sus componentes y a la gran cantidad de humus que posee, cosa que las otras fuentes no tienen (Cuadro 3.1).



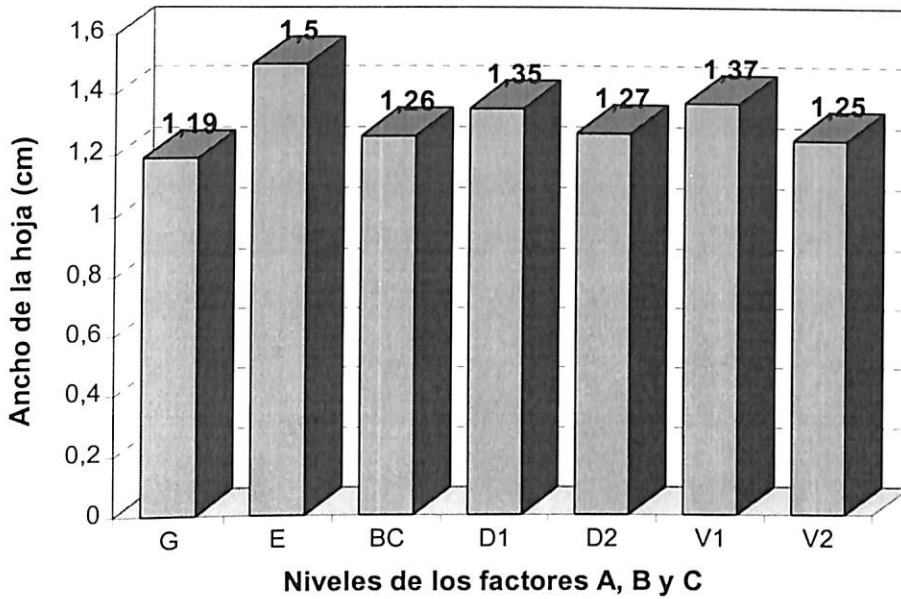
Tratamientos testigos = T_1, T_2 . Tratamientos contaminados = $T_3, \dots, T_{14}$

Figura 4.21. Efecto de la interacción de las fuentes de materia orgánica (factor A) con las dosis de materia orgánica (factor B) y variedades de kalanchoe (factor C) sobre el ancho de la hoja.

Para el factor dosis de materia orgánica (FB) se detectó diferencia significativa al cinco por ciento, por lo tanto las medias de los niveles de este factor son diferentes, siendo la mejor respuesta para la dosis baja (D_1) de materia orgánica en el sustrato (Fig. 4.22).

Se encontró diferencia altamente significativa al uno por ciento para las variedades (FC), siendo la variedad Letle Fhine (V_1) la mejor al producir hojas

de mayor anchura que las producidas por la variedad Golden Stipe (V_2) (Fig. 4.22).



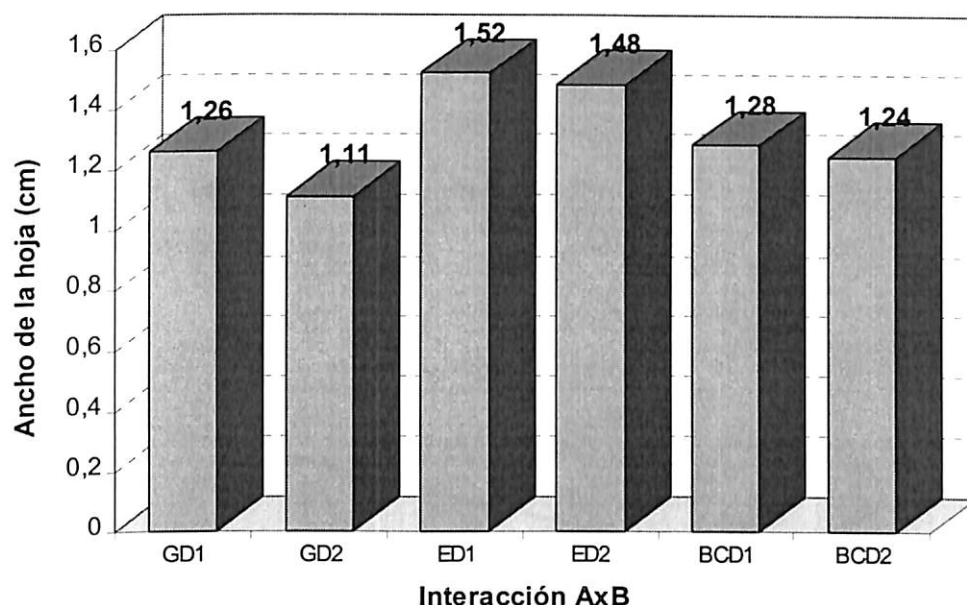
G= Gallinaza, E= Estiércol, BC= Bagazo caña, D1= Dosis baja de materia orgánica, D2= Dosis alta de materia orgánica, V1= variedad Letle Fhine, V2= variedad Golden Stipe.

Figura 4.22. Efecto de la fuente de materia orgánica (factor A), dosis de materia orgánica (factor B) y dos variedades de kalanchoe (factor C) sobre el ancho de la hoja.

Para las interacciones de factores en $A \times B$, $B \times C$ y $A \times B \times C$, no se encontró diferencias significativas al uno por ciento, por lo que los factores involucrados en cada interacción actúan en forma independiente o no se encuentran relacionados. Sin embargo para la combinación fuentes orgánicas con sus dosis ($A \times B$), se observa en la Figura 4.23 que la mejor correspondió para la interacción entre el estiércol con su dosis baja (ED_1), mientras tanto la peor fue para la gallinaza en su dosis alta (GD_2), aunque entre ellas no hay diferencias.

Para la interacción entre las dosis de materia orgánica y las variedades ($B \times C$), destaca la combinación de la dosis baja de materia orgánica con la

variedad Letle Fhine (D_1V_1) con el mayor ancho de hoja, en contraste con la combinación de la dosis alta con la variedad Golden Stipe (D_2V_2) que presentó el ancho de hoja más pequeño. Aunque se puede utilizar cualquiera de las combinaciones dado que todas son iguales. Se observa también en ambas variedades como incrementos en la cantidad de materia orgánica tienden a disminuir el ancho de la hoja (Figura 4.24).



G= Gallinaza, E= Estiércol, BC= Bagazo caña, D1= Dosis baja de materia orgánica, D2= Dosis alta de materia orgánica.

Figura 4.23. Efecto de la interacción entre los niveles de los factores FA (fuentes de materia orgánica) y FB (dosis de materia orgánica) sobre el ancho de la hoja de plantas de kalanchoe.

La interacción de los tres factores ($A \times B \times C$), se aprecia en la Figura 4.21, donde sobresale el T_7 compuesto de estiércol en dosis baja con la variedad Letle Fhine con la mejor respuesta, seguido por el T_9 que incluye estiércol en dosis alta y con la variedad Letle Fhine, siendo la combinación que menos

menos favoreció el ancho de hoja para el T₅ compuesta de gallinaza en dosis alta y con la variedad Letle Fhine.

Según el ANVA se encontró diferencia significativa al cinco por ciento para la interacción de las fuentes de materia orgánica y variedades de kalanchoe (AxC), por lo tanto, las medias de respuesta de la interacción de los niveles son diferentes entre si. Por otro lado al realizar la prueba de Tukey al uno por ciento, se detectó que la mejor media fue para la combinación de estiércol con la variedad Letle Fhine (EV₁), seguido por la combinación de estiércol con la variedad Golden Stipe (EV₂), en última posición quedó la combinación bagazo con la variedad Golden Stipe (BCV₂). (EV₁: **a**; EV₂: **a**; BCV₁: **ab**; GV₁: **bc**; GV₂: **bc**; BCV₂: **c**; T_{0.01}=0.2175). Los valores numéricos se aprecian en la Figura 4.25.

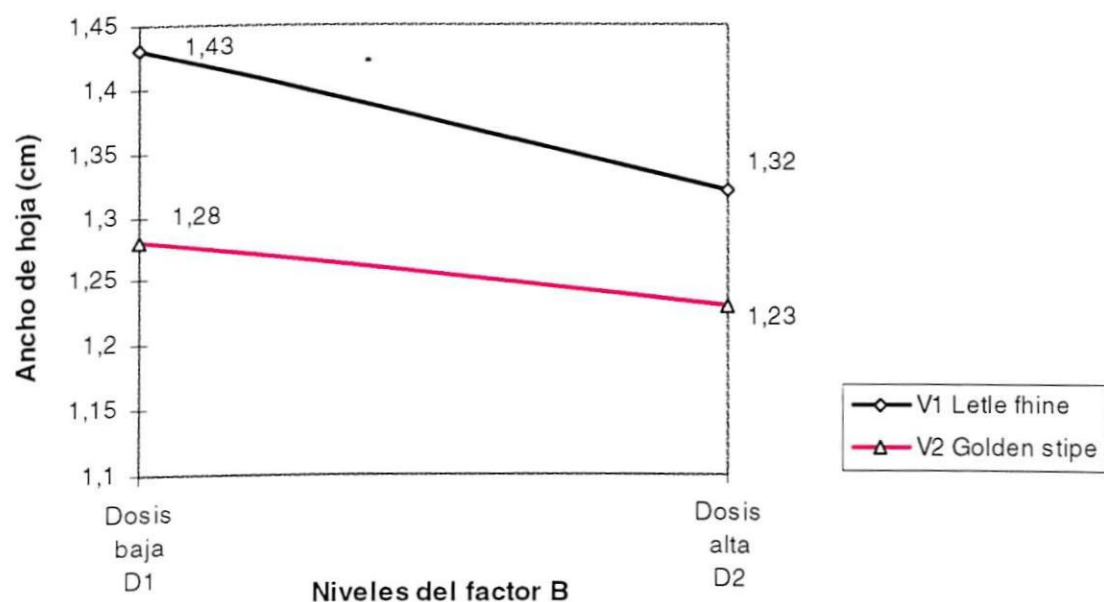
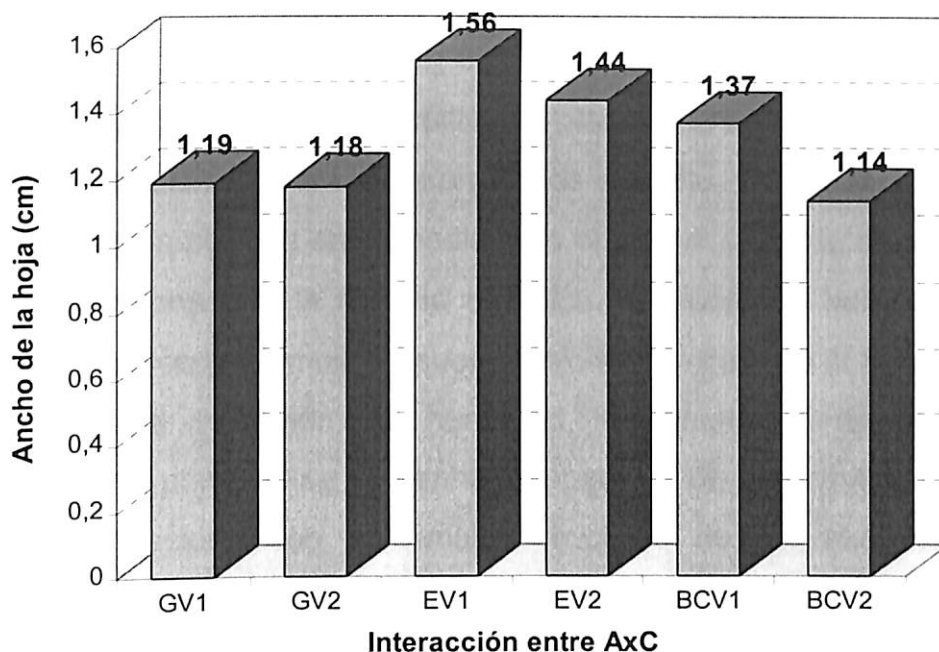


Figura 4.24. Efecto de la interacción entre los niveles de los factores FB (dosis de materia orgánica) y FC (variedades de kalanchoe) sobre el ancho de la hoja.



G= Gallinaza, E= Estiércol, BC= Bagazo caña, V1= variedad Letle Fhine, V2= variedad Golden Stipe.

Figura 4.25. Efecto de la interacción entre los niveles de los factores FA (fuentes de materia orgánica) y FC (variedades de kalanchoe) sobre el ancho de la hoja.

Variables del Suelo

Contenido de materia orgánica

En el Cuadro 4.7 se presenta el análisis de varianza para el contenido de materia orgánica en los tratamientos contaminados al final del experimento. Se observa también para el primer contraste (C_1), diferencia altamente significativa al uno por ciento. Esto significa que el promedio de las medias de los T_1 y T_2 (26.1%) es estadísticamente diferente al promedio de las medias de los tratamientos contaminados (18.8 %), y dado que el contenido de materia

orgánica es mayor para los testigos éstos superaron a los sustratos contaminados.

En un sustrato para el cultivo de plantas en maceta, lo que se busca es que la proporción en materiales orgánicos sea alto, ya que la materia orgánica tiene influencia positiva en el medio y en el desarrollo de la planta. Bohn *et al.*, (1993) menciona que la materia orgánica es fuente de nutrimentos para las plantas y microorganismos del suelo, mejora la estructura al agregar partículas, incrementa la retención de humedad, disminuye la densidad aparente, incrementa la porosidad y aumenta la capacidad de intercambio catiónico. Esto último correlaciona con los análisis iniciales de los sustratos testigos y contaminados (Cuadro 3.4 y 3.6), en donde se observa que los sustratos testigos poseen mayor contenido de materia orgánica y capacidad de intercambio que los contaminados, esto le confiere mayor capacidad de retener e intercambiar nutrimentos con la planta. Por ello, el desarrollo de las plantas en las dos variedades en los testigos fue mejor que en los contaminados.

No se encontró diferencia significativa al uno por ciento para la comparación de las medias del T_1 (26.3 %) contra el T_2 (25.8 %)(C_{21}), siendo éstas iguales (Cuadro 4.7). Aunque es ligeramente superior el T_1 que el T_2 , la diferencia del 0.5 por ciento no es significativa. Quizás esto favoreció ligeramente un mejor desarrollo de las plantas de la variedad Letle Fhine que las Golden Stipe. Lo anterior nos muestra que ambos sustratos son homogéneos y que las diferencias obtenidas en desarrollo de planta se debe más a la variedad que al sustrato.

Según el ANVA se encontró diferencia altamente significativa al uno por ciento para los niveles del factor fuentes de materia orgánica (FA), por lo tanto, las medias que producen la gallinaza, estiércol y el bagazo no son iguales. Según la prueba de Tukey al uno por ciento reporta que la mejor media

fue para el estiércol (19.9%), seguido por el bagazo (18.3%) y al final la gallinaza (17.8%), éstas dos últimas son estadísticamente iguales pero diferentes a la primera (E: **a** ; B.C: **b** ; G: **b**, $T_{0.01} = 1.6629$). Los valores numéricos se observan en la Figura 4.26.

Cuadro 4.7. Análisis de varianza para la variable contenido de materia orgánica a los nueve meses de biorremediación correspondiente a los tratamientos contaminados con hidrocarburo.

F.V	G.L	S.C	C.M	Fc	F α	
					0.05	0.01
C₁: T₁,T₂ vs						
T₃,...,T₁₄	1	365.416809	365.416809	123.0203 **	4.08	7.32
C₂: T₁vsT₂	1	0.500000	0.500000	0.16832 ns	4.08	7.32
FA	2	35.976563	17.988281	7.8381 **	3.266	5.264
FB	1	8.921875	8.921875	3.8876 ns	4.116	7.41
FC	1	3.146484	3.146484	1.3710 ns	4.116	7.41
AB	2	5.091797	2.545898	1.1093 ns	3.266	5.264
AC	2	0.908203	0.454102	0.1979 ns	3.266	5.264
BC	1	3.800781	3.800781	1.6561 ns	4.116	7.41
ABC	2	0.714844	0.357422	0.1557 ns	3.266	5.264
Error	36	82.619141	2.294976			
Total	47	141.179688				

C.V. = 8.0912%

** = Altamente significativo

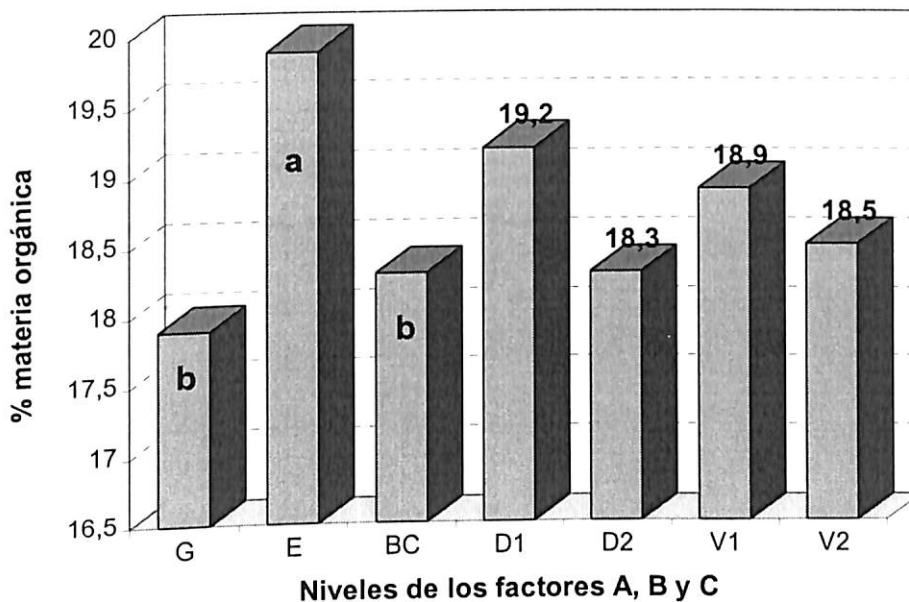
ns = No significativo

Los resultados anteriores se correlacionan con el análisis de las fuentes orgánicas (Cuadro 3.1), donde el estiércol tiene un mayor contenido de materia orgánica que las otras fuentes orgánicas.

Para los niveles del factor dosis de materia orgánica (FB) no se encontró diferencias significativas al uno por ciento, por lo tanto las medias de respuesta para cada nivel son iguales, lo que permite manejar cualquier dosis en la preparación del sustrato esperando una mismo contenido de materia orgánica. En la Figura 4.26 se observa como al utilizar la dosis más baja (D₁) se tiene un contenido mayor de materia orgánica.

Se esperaba que al incrementar la dosis de estiércol, bagazo o gallinaza el contenido se incremente, sin embargo se aprecia lo contrario. Esto es quizás por errores en la determinación de materia orgánica o en el muestreo del sustrato.

Para el factor variedades de kalanchoe (FC) tampoco se encontró diferencias significativas al uno por ciento sobre el contenido de materia orgánica en el sustrato, lo que permite emplear cualquiera de ellas. En la Figura 4.26 se muestra las medias de respuesta de los niveles de este factor.



G= Gallinaza, E= Estiércol, BC= Bagazo caña, D1= Dosis baja de materia orgánica, D2= Dosis alta de materia orgánica, V1= variedad Letle Fhine, V2= variedad Golden Stipe.

Figura 4.26. Efecto de la fuente de materia orgánica (factor A), dosis de materia orgánica (factor B) y dos variedades de kalanchoe (factor C) sobre el contenido de materia orgánica en los sustratos al final del experimento.

Para ninguna de las interacciones de factores en AxB, AxC, BxC y AxBxC se encontró diferencia significativa al uno por ciento, esto muestra que los factores actúan en forma independiente. Sin embargo al analizar la interacción entre las fuentes de materia orgánica y sus dosis (AxB) vemos como la combinación de estiércol en su dosis baja (ED_1) presenta la mejor respuesta con 20.3 por ciento, seguido por la combinación de estiércol en su dosis alta (ED_2) con 19.6 por ciento, mientras que el bagazo en su dosis alta (BCD_2) muestra la menor respuesta (17.4 por ciento). Nótese en la Figura 4.27, como al incrementar la dosis de materia orgánica en el sustrato contaminado en las tres fuentes utilizadas, disminuye el contenido de materia orgánica al final del experimento.

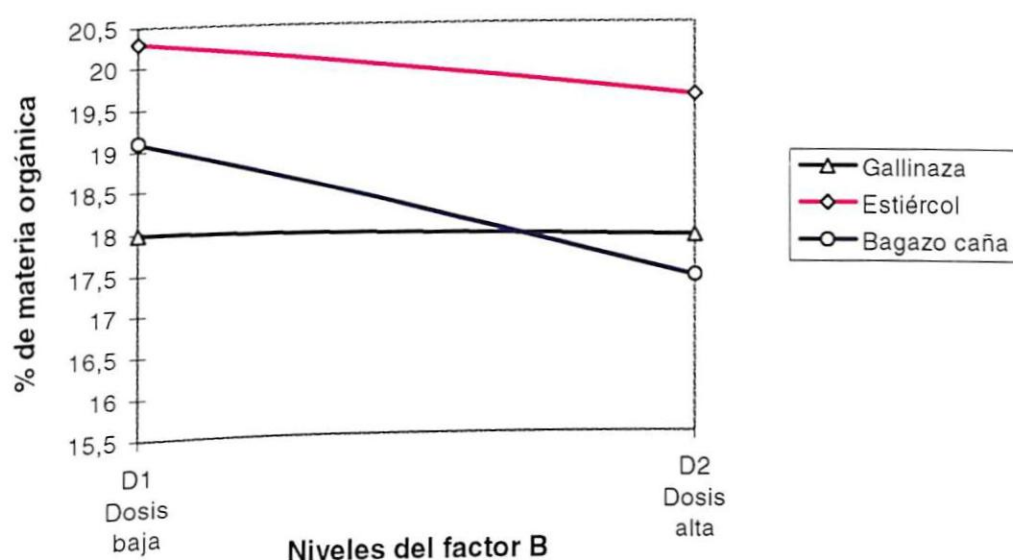
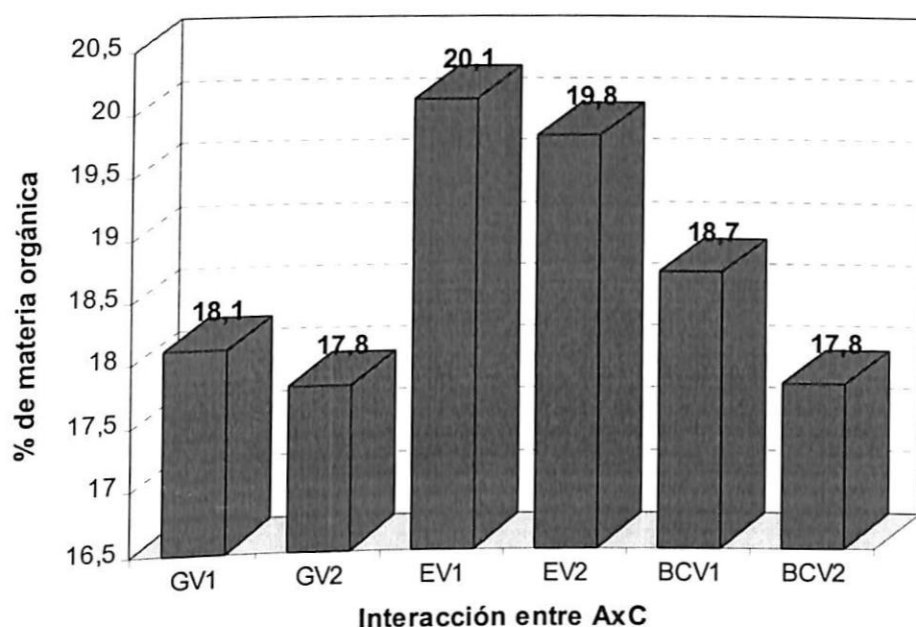


Figura 4.27. Efecto de la interacción entre los niveles de los factores FA (fuentes de materia orgánica) y FB (dosis de materia orgánica) sobre el contenido de materia orgánica en los sustratos al final del experimento.

En la Figura 4.28 se presenta las medias de respuesta para la interacción de las fuentes de materia orgánica y las variedades de kalanchoe (AxC), se nota como en la interacción de estiércol con la variedad Letle Fhine

(EV₁) se observa el más alto contenido de materia orgánica, mientras que al utilizar bagazo con la variedad Golden Stipe (BCV₂) tenemos el menor contenido.

En la interacción de las dosis de materia orgánica con las variedades de kalanchoes (BxC), se nota que al combinar la dosis baja con la variedad Letle Fhine (D₁V₁) se consigue la respuesta más alta, mientras que con la dosis alta en ambas variedades (D₂V₁ y D₂V₂) se tiene la respuesta menor. Además, es importante notar que en la medida que se incrementa la dosis en el sustrato disminuye el contenido de materia orgánica en el sustrato a los nueve meses de biorremediación para ambas variedades. Debido a que estadísticamente no hay diferencias entre las medias, se puede utilizar cualquier combinación. (Fig. 4.29).



G= Gallinaza, E= Estiércol, BC= Bagazo caña, V1= variedad Letle Fhine, V2= variedad Golden Stipe.

Figura 4.28. Efecto de la interacción entre los niveles de los factores FA (fuentes de materia orgánica) y FC (variedades de kalanchoe) sobre el contenido de materia orgánica en los sustratos al final del experimento.

Se aprecia en la Figura 4.30 las medias de respuesta de los tratamientos (AxBxC). Se nota que el T₇ formado de estiércol en su dosis baja y con la variedad Letle Fhine fue el de mejor respuesta al producir un mayor contenido de materia orgánica, mientras que el T₁₄ compuesto de bagazo de caña en su dosis alta y con la variedad Golden Stipe fue el de menor respuesta. Sin embargo se puede utilizar cualquier combinación ya que estadísticamente todas son iguales.

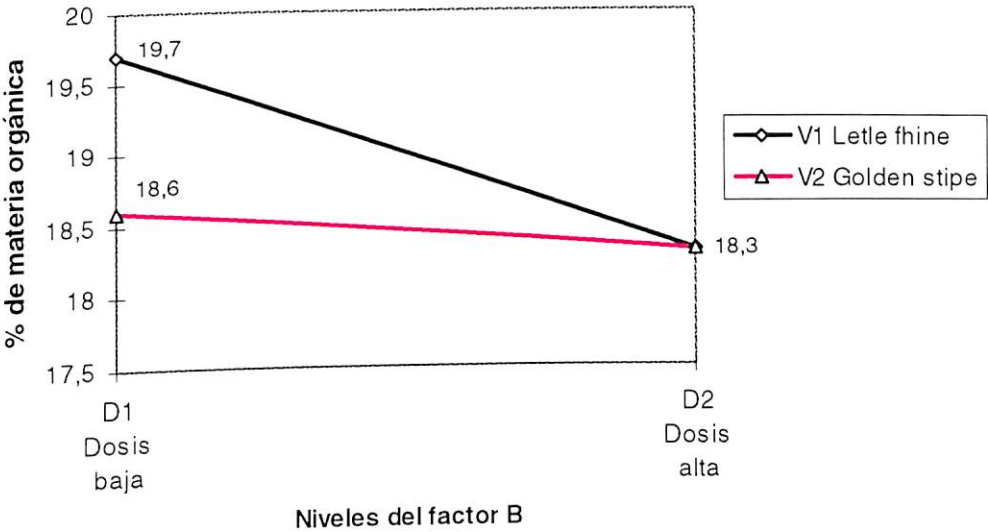
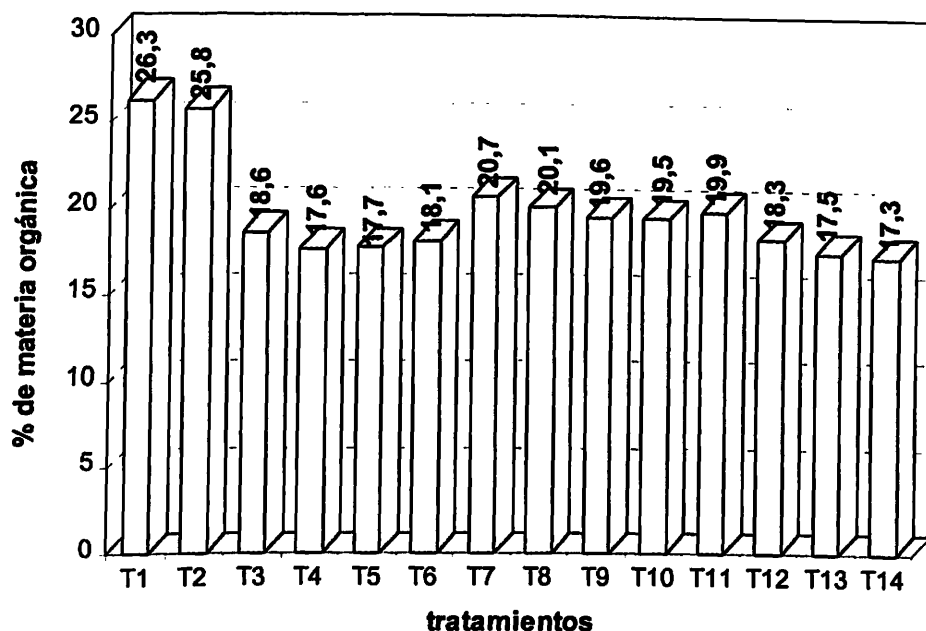


Figura 4.29. Efecto de la interacción entre los niveles de los factores FB (dosis de materia orgánica) y FC (variedades de kalanchoe) sobre el contenido de materia orgánica en los sustratos al final del experimento.



Tratamientos testigos = T₁, T₂. Tratamientos contaminados = T₃, ..., T₁₄

Figura 4.30. Efecto de la interacción de las fuentes de materia orgánica (factor A) con las dosis de materia orgánica (factor B) y las variedades de kalanchoe (factor C) sobre el contenido de materia orgánica.

Conductividad eléctrica

Se presenta en el Cuadro 4.8, los resultados del análisis de varianza para la conductividad eléctrica (dS/m) de los sustratos contaminados al final del experimento. Se observa que para el primer contraste (C₁) la prueba resultó altamente significativa al uno por ciento, esto quiere decir que el efecto de los tratamientos testigos son estadísticamente diferente al efecto que tienen los tratamientos contaminados sobre la conductividad.

Lo que se busca en esta variable es que los valores de conductividad eléctrica sean pequeños, lo que indicará menos problemas de sales, por lo tanto en la medida que la conductividad se incrementa aumentará también la concentración de sales en el sustrato.

En este caso ninguno de los sustratos contaminados superó a los tratamientos testigos, debido a que presentaron valores de conductividad (3.673 dS/m) mayores que los testigos (1.04 dS/m). Fig. 4.31.

El efecto de la alta concentración de sales en la solución del sustrato es negativo para el desarrollo y crecimiento de las plantas. Bohn *et al.*, (1993) afirma que los altos niveles de sal en el suelo impiden que las plantas obtengan el agua para su crecimiento.

El agua en el suelo se mueve de un punto a otro a favor de gradientes de energía, de mayor a menor. El estado energético del agua en el suelo se denomina potencial hídrico y es resultado de la interacción del agua con diferentes materiales. En el suelo cuando la concentración de sales se incrementa, el potencial hídrico total disminuye (adquiere valores negativos), es decir, el agua no se mueve del suelo al interior de las raíces de la planta sufriendo de escasez, incluso el movimiento del agua puede darse del interior de la células de la raíz hacia el suelo salino, sufriendo de deshidratación con su consecuente disminución en la calidad de la planta.

Dado que los sustratos contaminados presentaron a lo largo del experimento concentraciones altas de sales y que el crecimiento de la planta no fue de calidad, se concuerda con Raviv *et al.*, (1986) y Abad (1991, 1995) quienes afirman que para obtener buenos resultados en crecimiento de planta el medio debe presentar baja salinidad.

Para el segundo contraste (C_2) la prueba reporta que no hay diferencia significativa al uno por ciento, concluyendo que el T_1 (0.97 dS/m) es igual al T_2 (1.11dS/m), es decir que el sustrato testigo es homogéneo. Si esto último se correlaciona con el crecimiento de planta en estos sustratos, en la mayoría de las variables la variedad Letle Fhine superó a la Golden Stipe, esto es debido a que se desarrolló en un medio ligeramente menos salino. Pero si ambos medios son muy parecidos, se podría pensar que la diferencia en planta se debió más al genotipo que a las condiciones del suelo. Fig. 4.31.

Según el ANVA se encontró diferencia altamente significativa al uno por ciento, para los niveles del factor fuentes (FA) y dosis (FB) de materia orgánica, también para la interacción entre estos factores (AxB). En la Figura 4.32 y 4.33 se puede observar las medias de respuesta para los factores y para la interacción respectivamente.

La prueba de Tukey al uno por ciento reporta para los niveles de FA (fuentes de materia orgánica), que la mejor media correspondió al bagazo (3.12 dS/m), seguido por la gallinaza (3.77 dS/m) y en último al estiércol (4.13 dS/m), aunque las dos últimas medias son estadísticamente iguales y diferentes a la primera (B.C: a ; G: b; E: b, $T_{0.01} = 0.407$). Para el factor dosis (FB) la mejor media correspondió a la dosis baja (D_1) dado que presentó menor conductividad. Fig. 4.32.

Se obtuvo una menor salinidad en los tratamientos con bagazo de caña, debido a que son medios que favorecieron el lixiviado de las sales en mayor grado que aquellos compuestos por estiércol o gallinaza. El bagazo de caña está integrado por una gran cantidad de fibras grandes, las cuales al mezclarse con los demás ingredientes forman un medio bastante poroso, donde la mayor parte de la porosidad está formada por macroporos los cuales facilitan el drenaje y la aireación del sustrato más eficientemente. Con lo anterior, la

probabilidad de eliminación de las sales es mayor en estos sustratos que en aquellos que llevan estiércol o gallinaza, formados en su mayoría por partículas pequeñas.

Cuadro 4.8. Análisis de varianza para la variable conductividad eléctrica (dS/m) a los nueve meses de biorremediación, correspondiente a los tratamientos contaminados con hidrocarburo.

F.V	G.L	S.C	C.M	Fc	F α	
					0.05	0.01
C₁: T₁, T₂ vs T₃, ..., T₁₄	1	47.550484	47.550484	708.6404 **	4.08	7.32
C₂: T₁ vs T₂	1	0.039200	0.039200	0.58419 ns	4.08	7.32
FA	2	8.359070	4.179535	55.5523 **	3.266	5.264
FB	1	2.318787	2.318787	30.8202 **	4.116	7.41
FC	1	0.056702	0.056702	0.7537 ns	4.116	7.41
AB	2	0.825684	0.412842	5.4873 **	3.266	5.264
AC	2	0.022217	0.011108	0.1476 ns	3.266	5.264
BC	1	0.012329	0.012329	0.1639 ns	4.116	7.41
ABC	2	0.357971	0.178986	2.3790 ns	3.266	5.264
Error	36	2.708496	0.075236			
Total	47	14.661255				

C.V. = 7.4684%

** = Altamente significativo

ns = No significativo

Se aprecia como para la interacción (AxB), en la medida que se incrementa la cantidad de materia orgánica en el sustrato para las tres fuentes, se incrementa la conductividad eléctrica en el medio de crecimiento. Según la prueba de Tukey al uno por ciento efectuado sobre la combinación de los niveles de estos factores, se encontró que la mejor combinación correspondió al bagazo en dosis baja (BCD₁) con 3.1 dS/m, seguido por bagazo en dosis alta (BCD₂) con 3.2 dS/m y en último quedó el estiércol en dosis alta (ED₂) con 4.35 dS/m (BCD₁: a; BCD₂: a; GD₁: a; ED₁: b; GD₂: b; ED₂: b, T_{0.01} = 0.4942). Fig. 4.33.

Todas las fuentes de materia orgánica utilizadas son altamente salinas (Cuadro 3.1), por lo tanto en la medida que se incrementa la proporción o cantidad se aumentará la salinidad en el sustrato, por tal razón la dosis baja presentó una menor salinidad.

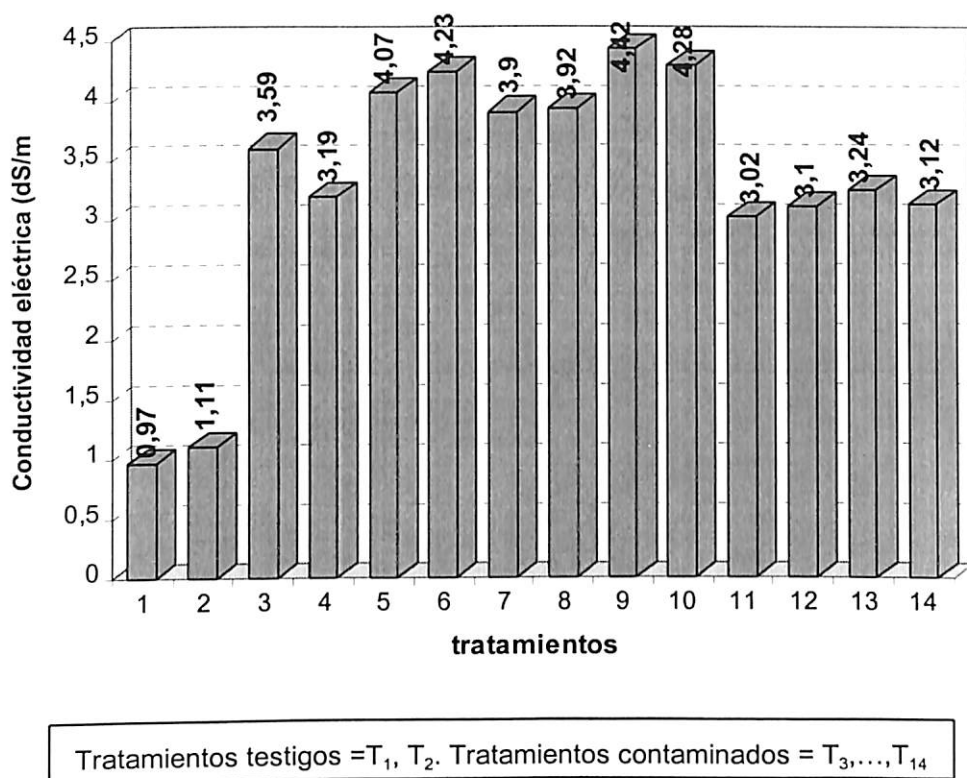
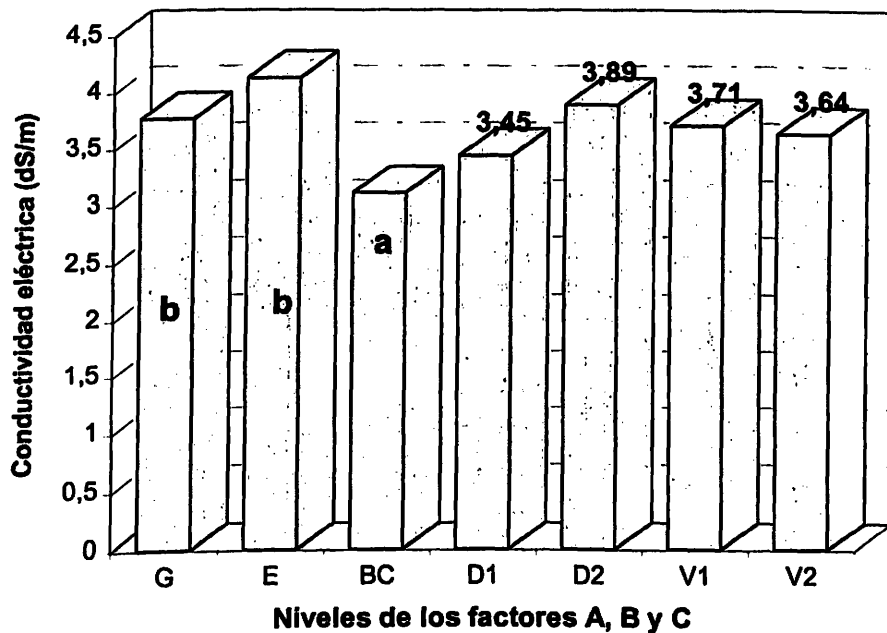


Figura 4.31. Efecto de la interacción de las fuentes de materia orgánica (factor A) con las dosis de materia orgánica (factor B) y las variedades de kalanchoe (factor C) sobre la conductividad eléctrica (dS/m) en los sustratos contaminados al final del experimento.

Para el factor variedades de kalanchoe (FC) y para las interacciones $A \times C$, $B \times C$ y $A \times B \times C$ no se encontró diferencia significativa al uno por ciento. Para el factor FC quiere decir que se puede utilizar cualquier variedad ya que éstas no influyen sobre la conductividad (Figura 4.32). En la interacción $A \times C$ los factores involucrados actúan en forma independiente, pero en la Figura 4.34 se aprecia que el bagazo en ambas variedades se produce los valores más bajos, y con el estiércol en ambas variedades se consigue los mayores valores.

En la interacción de las dosis y las variedades (BxC), sobresale la combinación de la dosis baja con la variedad Golden Stipe (D_1V_2) con 3.4 dS/m, mientras que en último sitio quedó la dosis alta con la variedad Letle Fhine (D_2V_1) con 3.91 dS/m. Pero se puede utilizar cualquiera ya que son iguales. Fig. 4.35.

La interacción $A \times B \times C$ se aprecia en la Figura 4.31 donde sobresales el T_{11} con la menor conductividad, mientras que la combinación que favorece más la conductividad fue el T_9 . Sin embargo se puede utilizar cualquiera ya que todas son iguales.



G= Gallinaza, E= Estiércol, BC= Bagazo caña, D1= Dosis baja de materia orgánica, D2= Dosis alta de materia orgánica, V1= variedad Letle Fhine, V2= variedad Golden Stipe.

Figura 4.32. Efecto de la fuente de materia orgánica (factor A), dosis de materia orgánica (factor B) y dos variedades de kalanchoe (factor C) sobre la conductividad eléctrica (dS/m) en los sustratos al final del experimento.

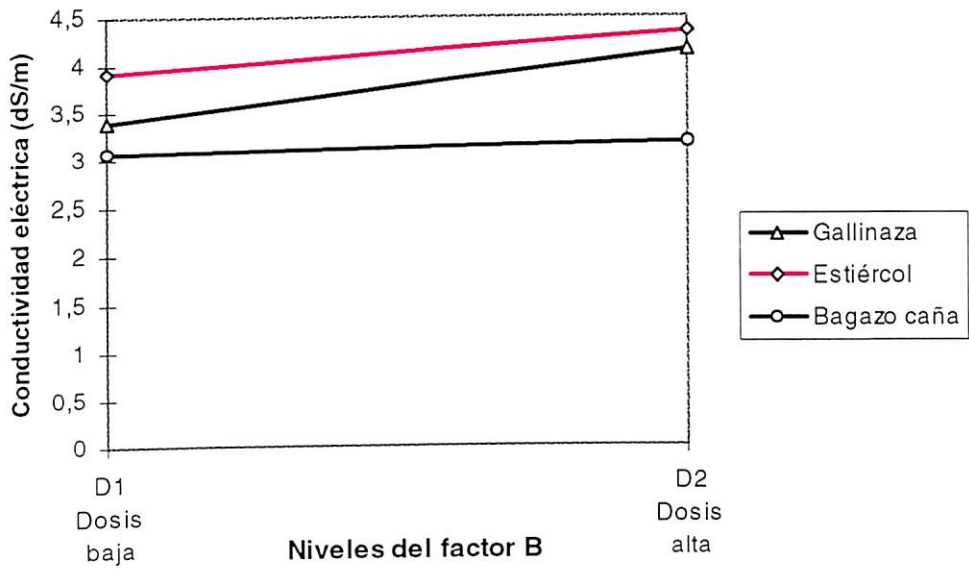
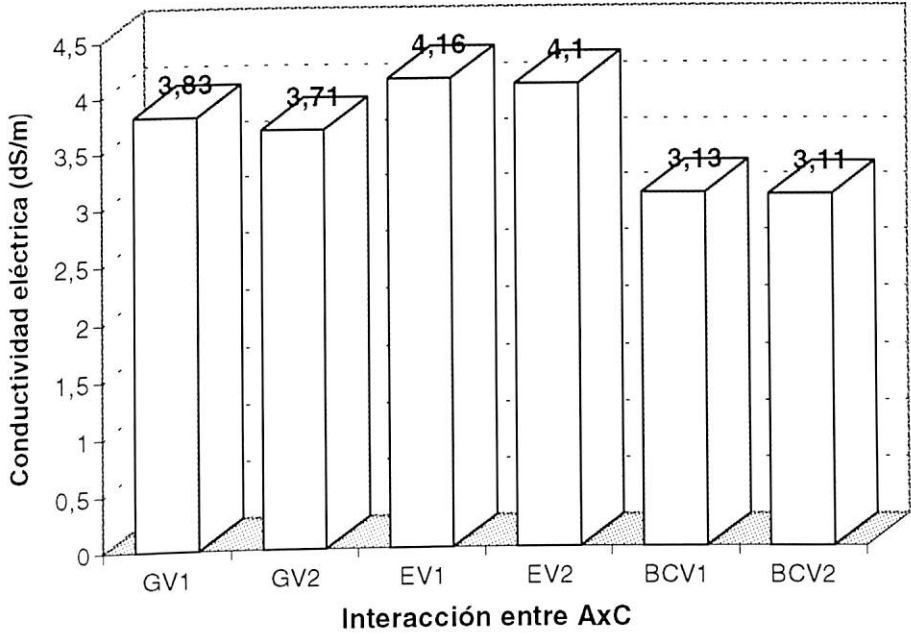


Figura 4.33. Efecto de la interacción entre los niveles de los factores FA (fuentes de materia orgánica) y FB (dosis de materia orgánica) sobre la conductividad eléctrica (dS/m) de los sustratos.



G= Gallinaza, E= Estiércol, BC= Bagazo caña, V1= variedad Letle Fhine, V2= variedad Golden Stipe.

Figura 4.34. Efecto de la interacción entre los niveles de los factores FA (fuentes de materia orgánica) y FC (variedades de kalanchoe) sobre la conductividad eléctrica (dS/m) de los sustratos.

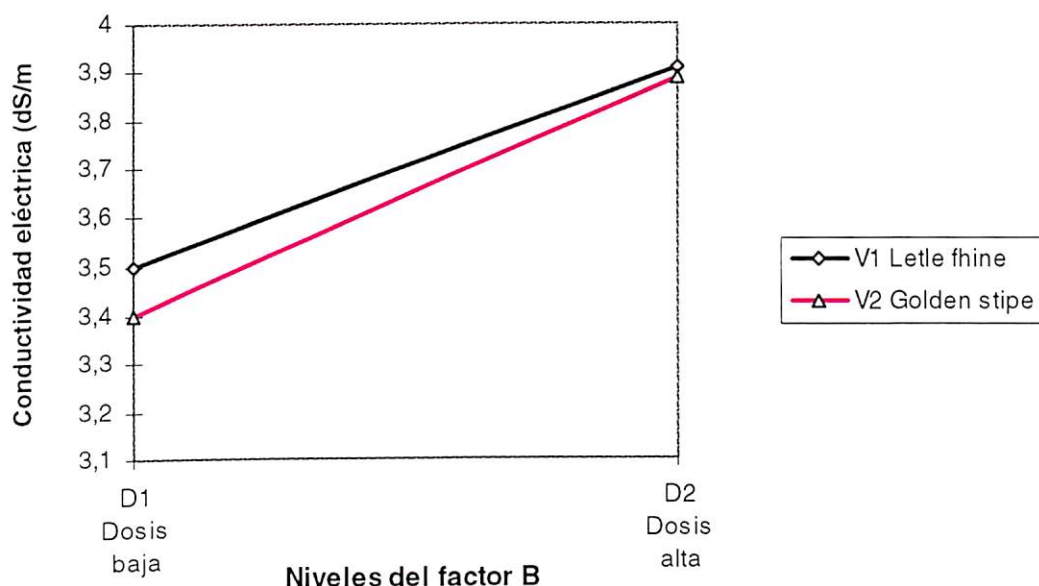


Figura 4.35. Efecto de la interacción entre los niveles de los factores FB (dosis de materia orgánica) y FC (variedades de kalanchoe) sobre la conductividad eléctrica (dS/m) de los sustratos al final del experimento.

pH en los sustratos

En el Cuadro 4.9, se puede apreciar el análisis de varianza para el pH de los sustratos al final del experimento. Además, se observa para el primer contraste (C_1) diferencia altamente significativa al uno por ciento, es decir, el promedio de las medias en los sustratos testigos (pH 7.032) es diferente al promedio de las medias en los sustratos contaminados (pH 7.59). Lo que se busca en esta variable es que los valores de pH se encuentren lo más cercano al óptimo para la planta. Algunos autores recomiendan un pH entre 6 a 6.5 en el sustrato (Pertuit, 1992; Vidalie, 1992). Por lo tanto, las respuestas que se ubiquen lo más próximo a los valores anteriores serán los más adecuados para el cultivo. En el caso del primer contraste, se puede afirmar que los sustratos testigos son estadísticamente diferentes y mejores a los contaminados.

El pH es una de las propiedades químicas más importantes del sustrato, ya que tiene gran influencia en la nutrición vegetal al favorecer o impedir la absorción de los nutrimentos para las plantas. La mayoría de los nutrimentos son altamente disponibles cuando el pH se ubica alrededor de la neutralidad. Por este motivo, se consiguió mejor desarrollo de planta en los sustratos testigos que en los sustratos contaminados.

En los análisis iniciales y finales para los tratamientos contaminados y testigos (Cuadros 3.4, 3.6 y 4.19), se aprecia como siempre el pH de los tratamientos contaminados es superior al de los testigos. Sin embargo, con el tiempo el pH disminuye en los contaminados, mientras que en los testigos se incrementa.

Es importante notar como en los tratamientos contaminados, en la medida que el pH disminuye (ácido) la CIC del medio disminuye. En esto se coincide con Ansorena (1994) quien afirma que algunos compuestos minerales y grupos ácidos del humus, pierden iones H^+ a medida que aumenta el pH, dando lugar a un incremento en la carga eléctrica negativa del sustrato y por ello la CIC. Aquí la respuesta es a la inversa disminuyendo la capacidad del medio para retener e intercambiar cationes en la medida que disminuye el pH y la CIC. En los sustratos testigos no se observa esta tendencia (Cuadros 3.4 y 4.19).

La razón por la que los sustratos contaminados tienen pH más altos que los testigos es debida a la naturaleza de los ingredientes que los forman. Hay que recordar que los tratamientos testigos estuvieron formados por turba, perlita y suelo de bosque, presentando todos ellos pH abajo de 7 siendo lo más cercano al recomendado para el cultivo (Cuadro 3.1, 3.2). Mientras que los ingredientes que formaron a los sustratos contaminados presentaron pH alcalinos. Las tres fuentes de materia orgánica son alcalinas con pH entre 7.5 a

8.0, el suelo de barranco también es alcalino que aunado al hidrocarburo y a la gran cantidad de sulfato de calcio utilizado, dieron origen a un sustrato fuertemente básico (Cuadros 3.1, 3.2).

No se encontró diferencia significativa al uno por ciento para la comparación de medias entre los sustratos testigos (C_2). La media del T_1 (pH 7.013) es estadísticamente igual al T_2 (pH 7.05), lo que muestra que el sustrato es homogéneo. Mientras que la diferencia obtenida en crecimiento de planta la atribuimos más al factor genotipo.

En la Figura 4.36 se muestra gráficamente lo obtenido en los testigos contra los contaminados, además se presenta la interacción de los factores fuentes, dosis y variedades ($A \times B \times C$). Estadísticamente no hay diferencia significativa al uno por ciento, por lo tanto, los factores actúan independientemente y por lo mismo se puede utilizar cualquier combinación. Se aprecia que los T_{11} y T_5 fueron los mejores, mientras que el T_9 fue el que menos favoreció al pH.

Cuadro 4.9. Análisis de varianza para la variable pH en los sustratos a los nueve meses de biorremediación, correspondiente a los tratamientos contaminados con hidrocarburo.

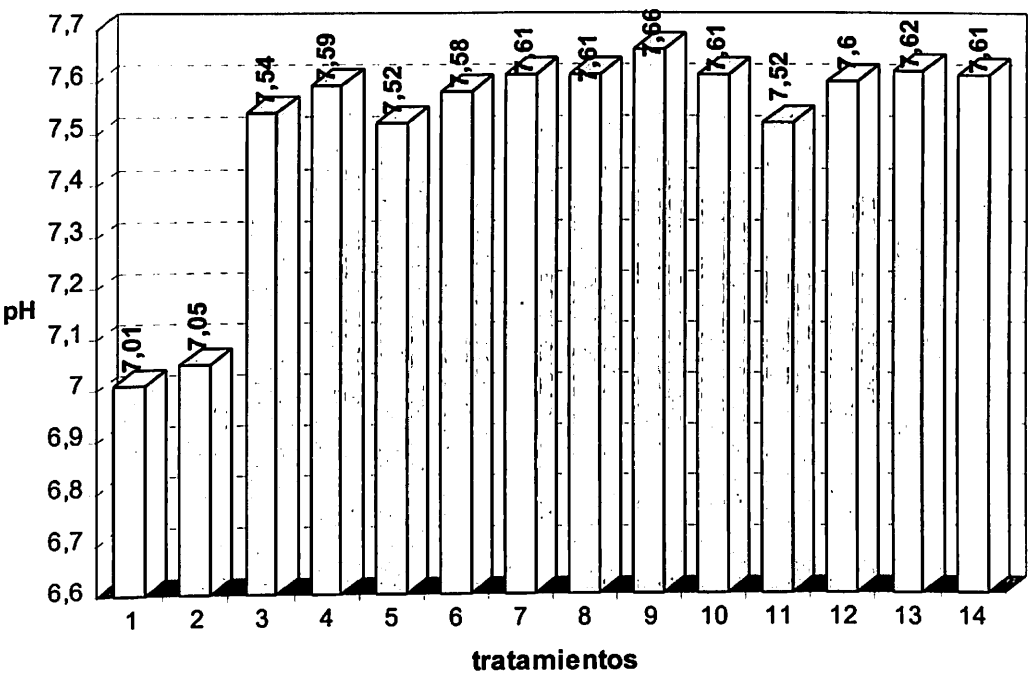
F.V	G.L	S.C	C.M	Fc	F α	
					0.05	0.01
$C_1: T_1, T_2$ vs $T_3, \dots, T_{14}$	1	2.138900	2.138900	744.7423 **	4.08	7.32
$C_2: T_1$ vs T_2	1	0.002738	0.002738	0.95335 ns	4.08	7.32
FA	2	0.031738	0.015869	7.200 **	3.266	5.264
FB	1	0.005859	0.005859	2.6585 ns	4.116	7.41
FC	1	0.007324	0.007324	3.3221 ns	4.116	7.41
AB	2	0.008789	0.004395	1.9938 ns	3.266	5.264
AC	2	0.014648	0.007324	3.3231 *	3.266	5.264
BC	1	0.006348	0.006348	2.8800 ns	4.116	7.41
ABC	2	0.005859	0.002930	1.3292 ns	3.266	5.264
Error	36	0.079346	0.002204			
Total	47	0.159912				

C.V. = 0.6186%, * = Significativo, ** = Altamente significativo, ns = No significativo

Según el ANVA para el factor fuentes de materia orgánica (FA), se encontró diferencia altamente significativa al uno por ciento, es decir, las medias de los niveles de este factor son diferentes. Para la interacción de las fuentes con las variedades (AxC), el ANVA reporta diferencia significativa al cinco por ciento, por lo tanto los factores actúan conjuntamente.

La prueba de Tukey al uno por ciento efectuada sobre las medias de los niveles del factor (FA) reporta que la mejor es para la gallinaza (7.56), seguido por el bagazo (7.58) y en último sitio quedó el estiércol (7.62), siendo la primera igual a la segunda pero diferente a la última (G: **a**; BC: **ab**; E: **b**, $T_{0.01} = 0.0586$) Figura 4.37. Esta respuesta se atribuye al efecto de las fuentes de materia orgánica en el medio de crecimiento, así como a la naturaleza del material. En el Cuadro 3.1 se aprecia como la gallinaza presenta un pH de 8.0, sin embargo los sustratos que llevan gallinaza al final presentan menor pH, estos se debe a que la gallinaza favoreció una mayor agregación de las partículas del suelo formando macroporos y con esto una mayor lixiviación de las sales. Posiblemente la gallinaza por no estar compostada entró en un proceso de descomposición en el cual hay liberación de CO_2 que al reaccionar con el agua del sustrato forman un ácido el cual al disociarse incrementa la presencia de iones H^+ con lo que se disminuye el pH. Estos resultado concuerdan con los obtenidos por COMIMSA (1998), quien al evaluar el efecto de varias fuentes de materia orgánica en la eliminación de hidrocarburo de sustratos contaminados, se encontró que con gallinaza se consiguió disminuir el pH inicial en mayor grado que con las otras fuentes orgánicas, concluyendo que esto se debió a que la gallinaza tiene un mayor residuo ácido en el suelo que las otras fuentes. Esta misma prueba fue realizada sobre las medias de las combinaciones de los niveles de AxC, en donde la mejor fue para gallinaza con la variedad Letle Fhine (GV_1), mientras la última posición fue para el estiércol con la variedad

Letle fhine (EV₁). Se aprecia en el cuadro 4.10 como la mayoría de ellas son similares.



Tratamientos testigos = T₁, T₂. Tratamientos contaminados = T₃,...,T₁₄

Figura 4.36. Efecto de la interacción de las fuentes de materia orgánica (factor A) con las dosis de materia orgánica (factor B) y las variedades de kalanchoe (factor C) sobre el pH de los sustratos contaminados al final del experimento.

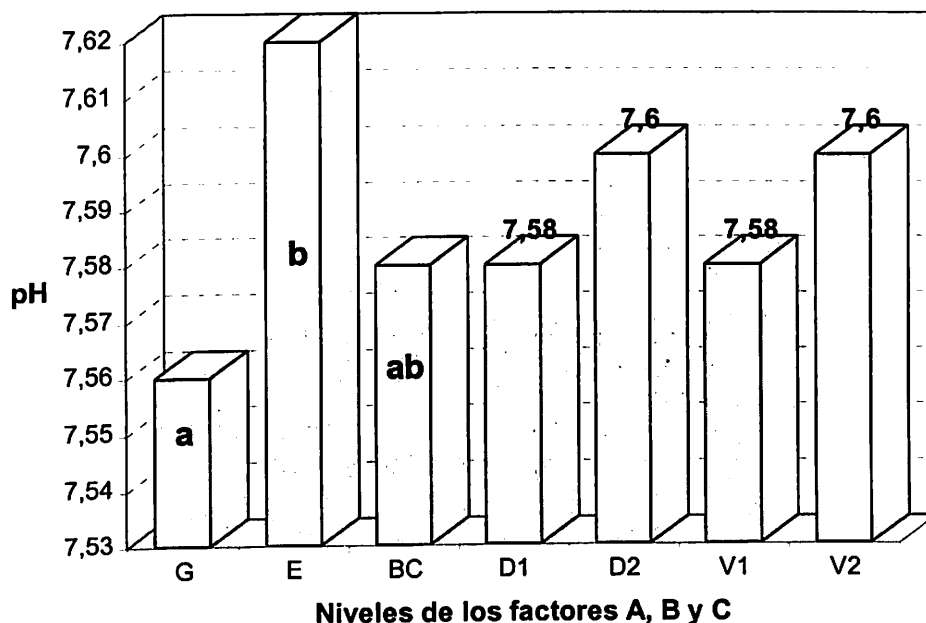
Cuadro 4.10. Prueba de Tukey al uno por ciento sobre las medias de las combinaciones de Ax C sobre el pH de los sustratos contaminados al final del experimento.

	GV ₁ :	BCV ₁ :	GV ₂ :	BCV ₂ :	EV ₂ :	EV ₁ :
Media	7.53	7.57	7.59	7.61	7.61	7.63
Tukey 0.01	a	a	ab	ab	ab	b

T_{0.01} = 0.0906

Para los factores dosis (FB) y variedades (FC) no se encontró diferencia significativa al uno por ciento, por lo que se puede utilizar cualquier dosis y

variedad ya que las medias son iguales. Sin embargo en la Figura 4.37 se aprecia para el factor (FB), como con la dosis baja tenemos menor pH, mientras que para el factor (FC), la variedad Letle Fhine supera a la Golden Stipe.



G= Gallinaza, E= Estiércol, BC= Bagazo caña, D1= Dosis baja de materia orgánica, D2= Dosis alta de materia orgánica, V1= variedad Letle Fhine, V2= variedad Golden Stipe.

Figura 4.37. Efecto de la fuente de materia orgánica (factor A), dosis de materia orgánica (factor B) y dos variedades de kalanchoe (factor C) sobre el pH de los sustratos contaminados al final del experimento.

No se encontró diferencia significativa al uno por ciento para las combinaciones AxB y BxC, por lo que los factores involucrados actúan en forma separada. En la Figura 4.38 se muestra la interacción AxB, nótese como en la medida que se incrementa la dosis de estiércol y bagazo se aumenta el pH en el sustrato. Mientras que el pH disminuye al incrementarse la dosis de gallinaza.

La interacción BxC se presenta en la Figura 4.39, donde se nota que incrementos de materia orgánica en el sustrato con la V₂ no hay cambios de

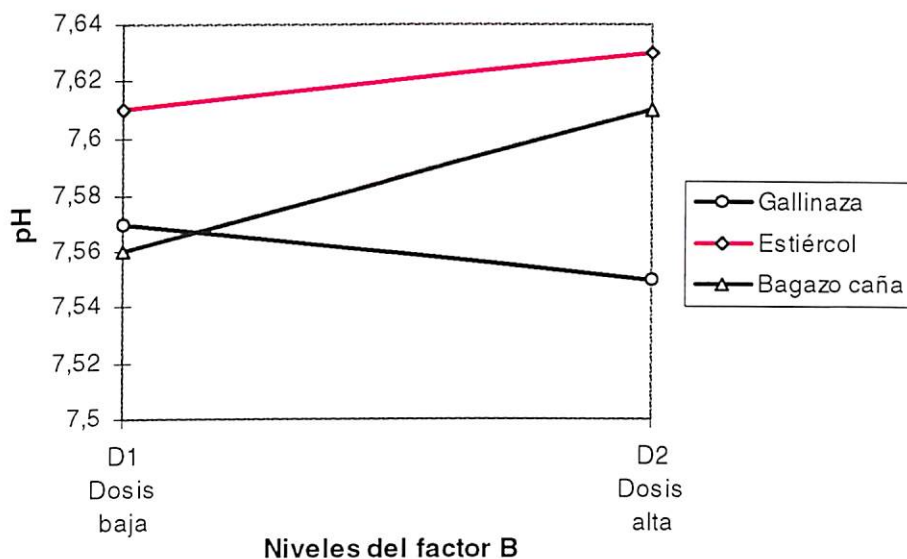


Figura 4.38. Efecto de la interacción entre los niveles de los factores FA (fuentes de materia orgánica) y FB (dosis de materia orgánica) sobre el pH de los sustratos al final del experimento.

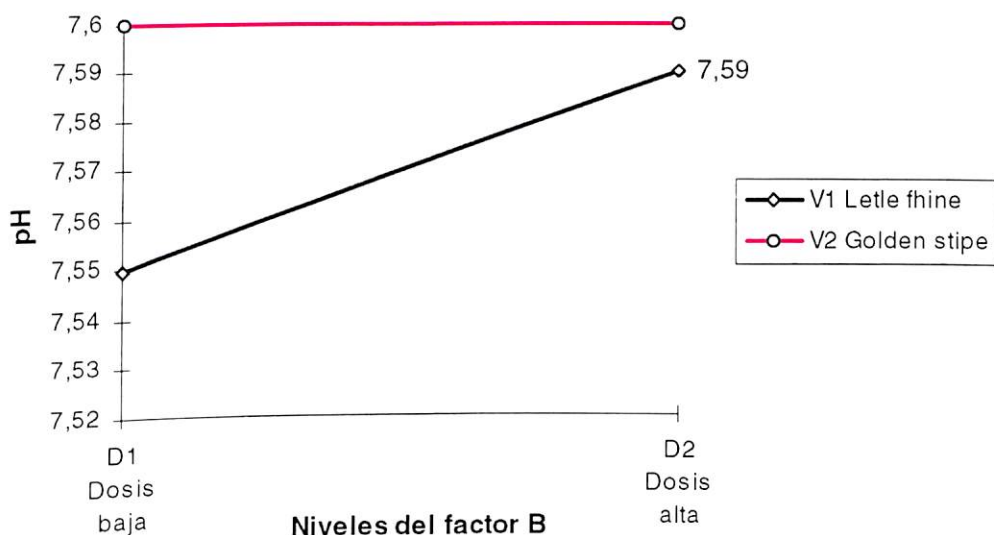


Figura 4.39. Efecto de la interacción entre los niveles de los factores FB (dosis de materia orgánica) y FC (variedades de kalanchoe) sobre el pH de los sustratos al final del experimento.

pH. Sin embargo incrementos de materia orgánica con la V_1 se aumenta el pH en el sustrato. Si se utiliza la combinación de V_1 con la dosis baja se tiene el menor pH.

Hidrocarburos totales del petróleo (TPH's) en lixiviados

Los hidrocarburos totales del petróleo (TPH) representan una amplia gama de hidrocarburos que constituyen al petróleo. Los hidrocarburos son compuestos que contienen solamente carbón e hidrógeno que se dividen en alifáticos y aromáticos. Los hidrocarburos alifáticos son alquenos, alcanos y compuestos cíclicos de cadena recta, estos hidrocarburos de cadena recta y ramificada son fácilmente biodegradables y no persisten, reduciendo el riesgo de exposición humana. En los compuestos aromáticos (benceno, tolueno) en general a más bajo peso molecular es más alta la biodegradabilidad y solubilidad en el agua. Los hidrocarburos aromáticos polinucleares (PNA/PAH, ejemplo: naftaleno) no son fácilmente biodegradables y son relativamente inamovibles y persisten en el suelo.

En el Cuadro 4.11 se muestra el análisis de varianza para los hidrocarburos totales del petróleo (mg/L) sobre lixiviados efectuados en los sustratos contaminados al final del experimento. Nótese que para ningún factor se encontró diferencia significativa al uno por ciento, esto quiere decir, que se puede utilizar cualquier fuente de materia orgánica, en cualquiera de las dosis y con cualquier variedad, en espera de una misma respuesta.

En la Figura 4.40 se muestra las medias de los niveles de los factores fuentes (FA), dosis (FB) y variedades (FC). Para las fuentes se observa que la menor concentración en el lixiviado es para la gallinaza siendo la mejor, le sigue el estiércol y al final el bagazo. Aunque se puede utilizar cualquiera de

ellas. Desde luego lo que se busca es que el hidrocarburo se descomponga en el mismo seno del sustrato y se pierda lo menos posible en los lixiviados que contaminen el subsuelo.

La mayor concentración de TPH's en los lixiviados se produjeron en aquellos sustratos que llevan bagazo de caña, por lo tanto se puede afirmar que gran parte se eliminó por lixiviación en lugar de ser degradado por las condiciones del medio. En esto se coincide con un trabajo similar efectuado por COMIMSA (1998) quienes concluyen que el hidrocarburo fue eliminado de sustratos contaminados por lixiviación y no por degradación.

La razón por la cual se dio esta respuesta en los sustratos que llevan bagazo es por que el medio presenta una mayor conductividad hidráulica que otros medios.

Cuadro 4.11. Análisis de varianza para la variable TPH's (mg/kg) sobre los lixiviados a los nueve meses de biorremediación correspondiente a los tratamientos contaminados con hidrocarburo.

F.V	G.L	S.C	C.M	Fc		F α	
						0.05	0.01
FA	2	0.011013	0.005507	1.8133	ns	3.266	5.264
FB	1	0.001270	0.001270	0.4183	ns	4.116	7.41
FC	1	0.000145	0.000145	0.0477	ns	4.116	7.41
AB	2	0.015770	0.007885	2.5966	ns	3.266	5.264
AC	2	0.003902	0.001951	0.6425	ns	3.266	5.264
BC	1	0.000134	0.000134	0.0440	ns	4.116	7.41
ABC	2	0.000660	0.000330	0.1087	ns	3.266	5.264
Error	36	0.109322	0.003037				
Total	47	0.142216					

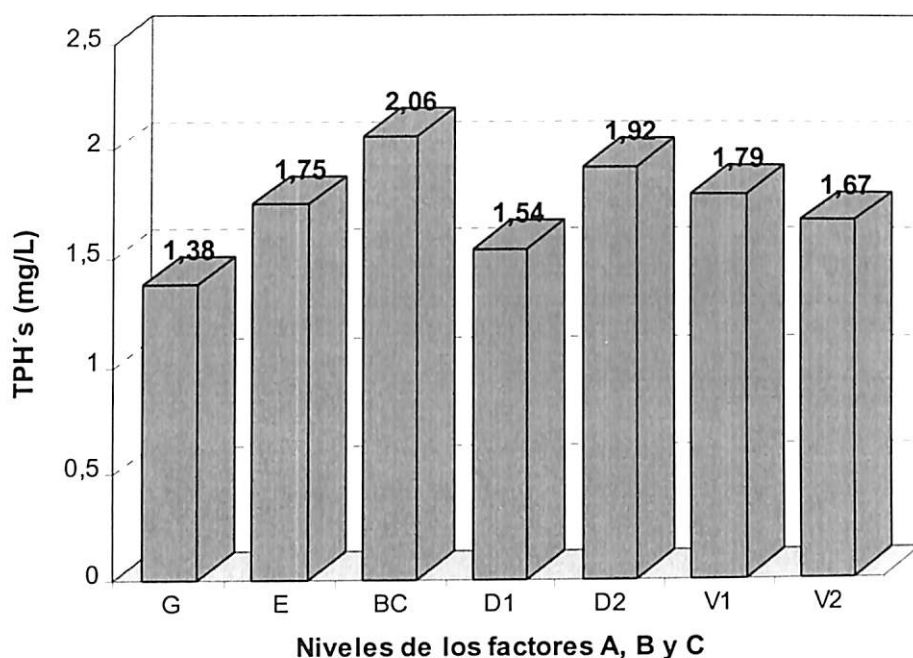
C.V. = 5.7977%
ns = No significativo

Para el factor dosis (FB) se nota como al emplear la dosis alta de materia orgánica se tiene una mayor concentración de hidrocarburo en los lixiviados que al utilizar la dosis baja. Aunque estadísticamente no hay diferencias. Fig. 4.40.

La materia orgánica en el sustrato o suelo tiene un gran impacto. Narro (1994) afirma que la materia orgánica favorece la estructuración y la formación de agregados, por lo que incrementa la porosidad, facilita la penetración de agua y aire del medio, aumenta la velocidad de infiltración y la conductividad hidráulica. Por lo anterior se concluye que a medida que se incrementa la proporción de materia orgánica en el sustrato, habrá mayor probabilidad de que actúe en él modificándolo, ya sea al favorecer la infiltración o la conductividad hidráulica, por ello los sustratos con mayor dosis de materia orgánica favorecieron una mayor concentración de TPH's en los lixiviados al presentar una mayor conductividad hidráulica que aquellos con dosis bajas.

En la Figura 4.40 se aprecia el factor variedades de kalanchoe (FC), en donde al utilizar la variedad Golden Stipe (V_2) se tiene una menor concentración de hidrocarburo que al utilizar la variedad Letle Fhine (V_1).

Para ninguna de las interacciones evaluadas se encontró diferencia significativa al uno por ciento, esto quiere decir que los factores involucrados en cada interacción no actúan en forma conjunta. Debido a lo anterior se puede utilizar cualquier combinación ya que se espera un resultado similar.



G= Gallinaza, E= Estiércol, BC= Bagazo caña, D1= Dosis baja de materia orgánica, D2= Dosis alta de materia orgánica, V1= variedad Letle Fhine, V2= variedad Golden Stipe.

Figura 4.40. Efecto de la fuente de materia orgánica (factor A), dosis de materia orgánica (factor B) y dos variedades de kalanchoe (factor C) sobre los hidrocarburos totales del petróleo TPH's en lixiviados efectuados a los sustratos contaminados al final del experimento.

En la Figura 4.41 se muestra la interacción de los niveles de las fuentes con las dosis (AxB). Se encontró que en la medida que se incrementa la dosis de estiércol o bagazo en el sustrato, aumenta la concentración de hidrocarburo en los lixiviados, mientras que en la gallinaza es lo contrario, es decir disminuye. La mayor concentración se presenta para el bagazo en dosis alta y la menor es para la gallinaza en dosis alta.

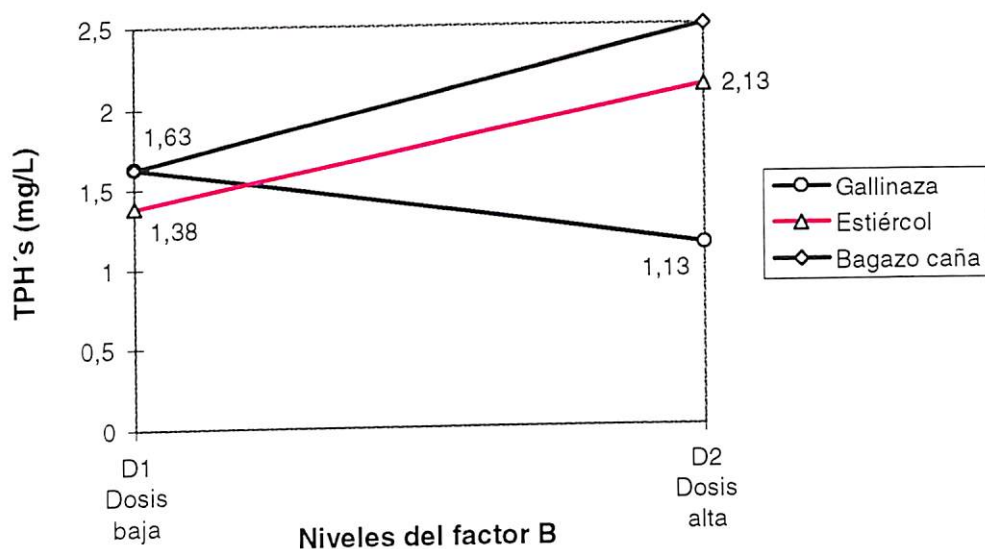
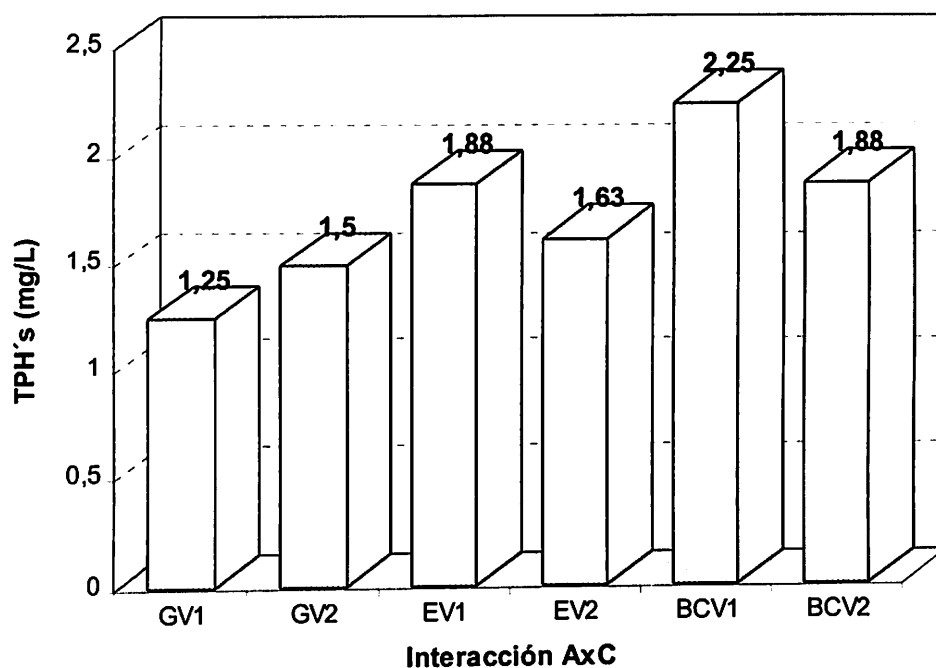


Figura 4.41. Efecto de la interacción entre los niveles de los factores FA (fuentes de materia orgánica y FB (dosis de materia orgánica) sobre la concentración de los hidrocarburos totales del petróleo TPH's en los lixiviados de los sustratos contaminados al final del experimento.

En la interacción fuentes y variedades (AxC) Figura 4.42, se observa que la combinación de gallinaza con la variedad Letle Fhine (GV₁) se tiene la menor concentración de hidrocarburo, en contraste a la combinación de bagazo con la variedad Letle Fhine (BCV₁) que presenta la más alta concentración.



G= Gallinaza, E= Estiércol, BC= Bagazo caña, V1= variedad Letle Fhine, V2= variedad Golden Stipe.

Figura 4.42. Efecto de la interacción entre los niveles de los factores FA (fuentes de materia orgánica) y FC (variedades de kalanchoe) sobre la concentración de los hidrocarburos totales del petróleo TPH's sobre los lixiviados de los sustratos contaminados al final del experimento.

Para la interacción de las dosis de materia orgánica con las variedades de kalanchoe (BxC), se encontró que a incrementos de la dosis en los sustratos contaminados para ambas variedades hay aumento de la concentración de hidrocarburo en los lixiviados. (Fig. 4.43).

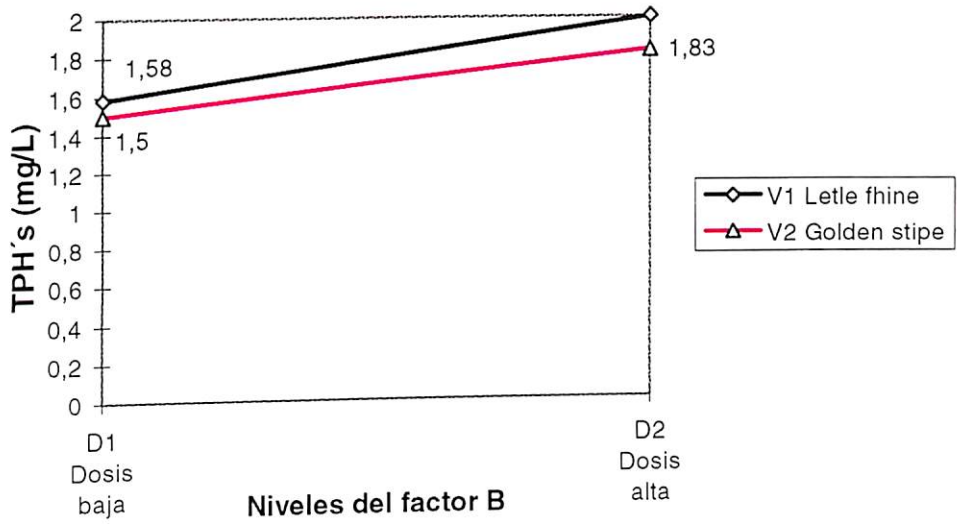


Figura 4.43. Efecto de la interacción entre los niveles de los factores FB (dosis de materia orgánica y FC (variedades de kalanchoe) en la concentración de los hidrocarburos totales del petróleo TPH's en los lixiviados.

En la Figura 4.44 se presenta las medias de respuesta para la interacción AxBxC, se aprecia que el T₅ (gallinaza en dosis alta con variedad Letle Fhine) fue el que presentó la menor concentración en el lixiviado. Por otra parte el T₁₃ (bagazo en dosis alta con la variedad Letle Fhine) obtuvo la mayor concentración de hidrocarburo en el lixiviado. Sin embargo, todas estas medias de respuesta son estadísticamente iguales.

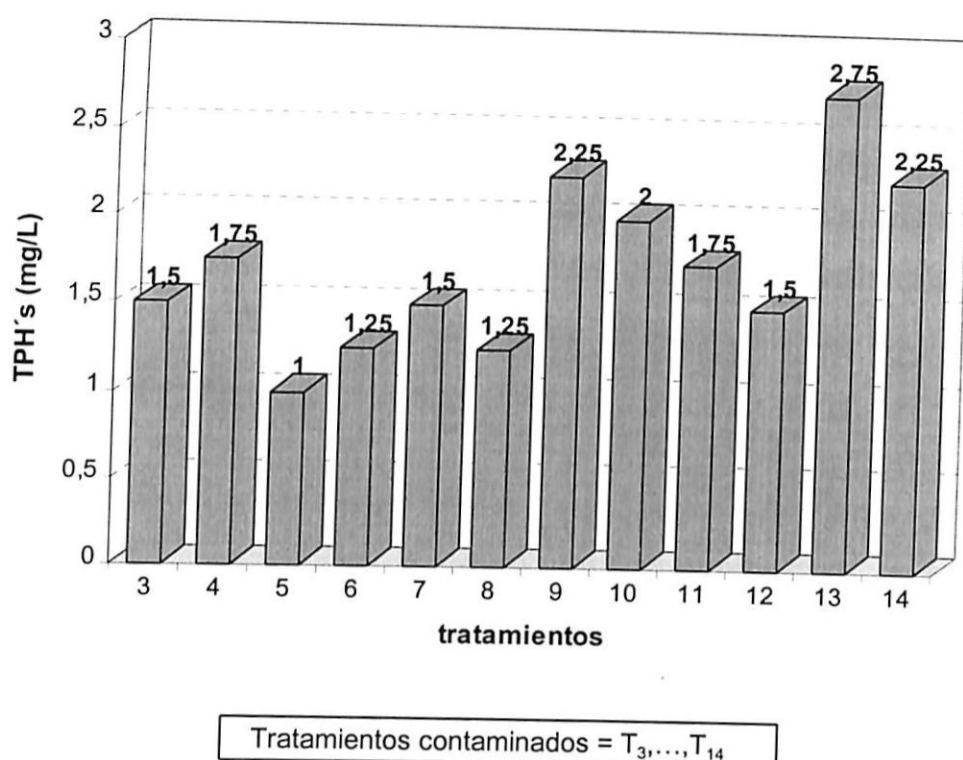


Figura 4.44. Efecto de la interacción de las fuentes de materia orgánica (factor A) con las dosis de materia orgánica (factor B) y las variedades de kalanchoe (factor C) sobre los hidrocarburos totales del petróleo TPH's en lixiviados a los sustratos contaminados al final del experimento.

Porcentaje de eliminación del hidrocarburo

Estamos de acuerdo, que a mayores concentraciones de hidrocarburo en los sustratos al final del experimento representan condiciones de menor eliminación de la contaminación, de modo contrario, será preferible obtener menores concentraciones dado que representan condiciones de mayor eliminación. Lo anterior es válido cuando la concentración inicial en todos los tratamientos es la misma, sin embargo en este caso las concentraciones iniciales no son homogéneas, por lo tanto, el uso del porcentaje de eliminación del hidrocarburo acotado a un cierto tiempo de biorremediación, es una variable más útil para estimar la eliminación de la contaminación al final del experimento.

De acuerdo al análisis de varianza que se presenta en el Cuadro 4.12, no se encontró diferencia significativa al uno por ciento para las fuentes de materia orgánica (FA) sobre la eliminación de la contaminación, por lo que se puede utilizar cualquier fuente para tratar al hidrocarburo. Sin embargo en la Figura 4.45, se observa que el bagazo produce una mayor eliminación, seguido por el estiércol y al final la gallinaza, pero estadísticamente las medias de respuesta son iguales.

Dado las características físicas del bagazo de fibras grandes y numerosas y que proporcionan al sustrato una alta porosidad con suficientes macroporos por donde circula aire y agua de drenaje, se atribuye que una gran parte de los hidrocarburos se eliminaron por lixiviación que por degradación.

Cuadro 4.12. Análisis de varianza para la variable porcentaje de eliminación del hidrocarburo en los tratamientos contaminados a los nueve meses de biorremediación.

F.V	G.L	S.C	C.M	Fc	F α	
					0.05	0.01
FA	2	47.822917	23.9114585	1.4462 ns	3.266	5.264
FB	1	650.476875	650.476875	39.34154 **	4.116	7.41
FC	1	11.900208	11.900208	0.71973 ns	4.116	7.41
AB	2	558.33875	279.169375	16.884 **	3.266	5.264
AC	2	4.875417	2.4377085	0.14743 ns	3.266	5.264
BC	1	15.526875	15.526875	0.93908 ns	4.116	7.41
ABC	2	26.33625	13.168125	0.79642 ns	3.266	5.264
Error	36	595.2275	16.53409722			
Total	47	1910.504792				

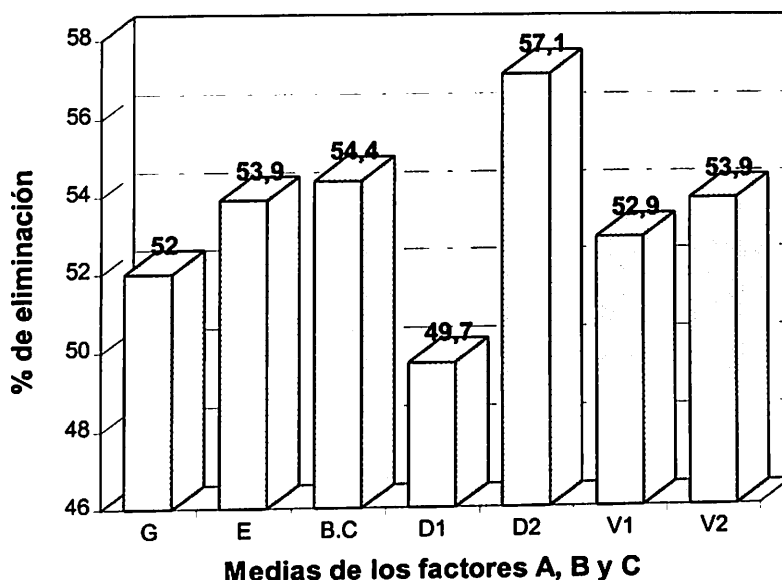
C.V. = 7.6118%

** = Altamente significativo

ns = No significativo

No se encontró diferencia significativa al uno por ciento para los niveles del factor genotipos (FC), por lo tanto, las medias de respuesta son iguales entre si. Sin embargo en la Figura 4.45, se aprecia que la variedad Golden

Stipe se ubica ligeramente arriba de la Letle Fhine, aunque la diferencia del uno por ciento no es significativa.

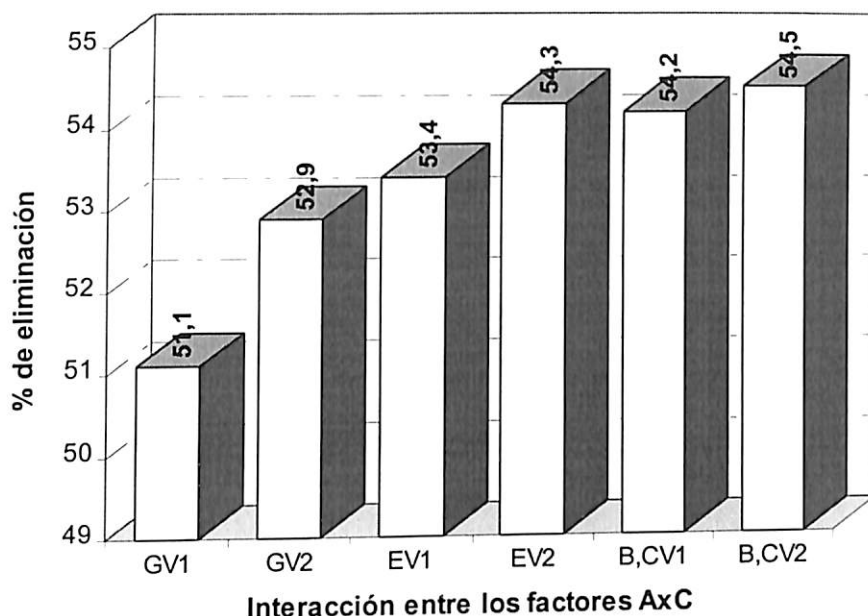


G= Gallinaza, E= Estiércol, B.C= Bagazo caña, D1= Dosis baja, D2= Dosis alta, V1= variedad Letle Fhine, V2= variedad Golden Stipe.

Figura 4.45. Efecto de los niveles del factor FA (fuentes de materia orgánica), de los niveles del factor FB (dosis de materia orgánica) y los niveles del factor FC (variedades de kalanchoe) sobre la eliminación de hidrocarburo en sustratos contaminados al final del experimento.

Para las interacciones de los factores en $A \times C$, $B \times C$ y $A \times B \times C$ no se encontraron diferencias significativas al uno por ciento, concluyendo que los factores en cada interacción actúan en forma independiente. En la Figura 4.46 se muestra las medias de respuesta para la interacción fuentes de materia orgánica y genotipos ($A \times C$), en donde la interacción de bagazo con la variedad Golden Stipe (BCV2) producen una mayor eliminación del hidrocarburo, siendo ligeramente mayor que la combinación de bagazo con la variedad Letle Fhine (BCV1). Se observa también, que la gallinaza en conjunto con la variedad Letle

Fhine (GV1) produjeron una menor eliminación. Sin embargo, se puede utilizar cualquier combinación dado que el efecto sobre la eliminación es estadísticamente igual.

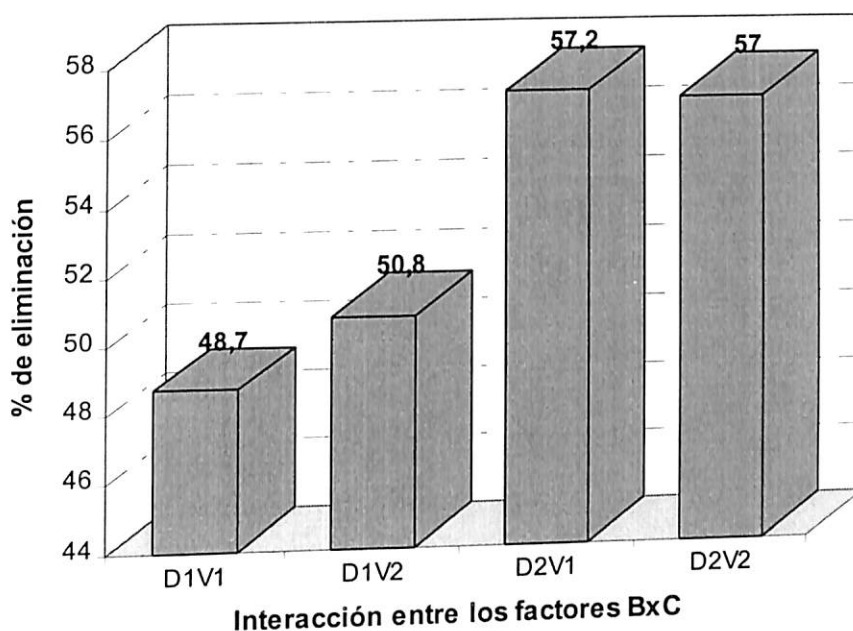


G= Gallinaza, E= Estiércol, B.C= Bagazo caña, V1= variedad Letle Fhine, V2= variedad Golden Stipe.

Figura 4.46. Efecto de la interacción de los niveles del factor FA (fuentes de materia orgánica) con los del factor FC (variedades de kalanchoe) sobre la eliminación de hidrocarburo en sustratos contaminados al final del experimento.

Al analizar la Figura 4.47 las medias de respuesta de la combinación de las dosis y genotipos (BxC), se encontró que al utilizar una mayor dosis de materia orgánica en conjunto con la variedad Letle Fhine (D2V1) produjo una mayor eliminación, que es ligeramente mayor a la presentada por la combinación de la dosis alta de materia orgánica y la variedad Golden Stipe (D2V2). Al usar la dosis baja con la variedad Letle Fhine (D1V1) se obtiene una menor eliminación, siendo en un 8.5 por ciento menor que la más alta, aunque estadísticamente estas diferencias no son significativas, por lo que se puede utilizar cualquiera de ellas.

Para la combinación de los tres factores: fuentes, dosis y genotipos (AxBxC), la mayor eliminación de hidrocarburo fue para la interacción en donde se utilizó estiércol en su dosis alta y con la variedad Letle Fhine (T_9), esto último coincide, en que fue el tratamiento que presentó la menor concentración de TPH's al final del periodo de biorremediación (Cuadro 4.15). En segundo sitio se ubica a la combinación de estiércol en su dosis alta pero con la variedad Golden Stipe (T_{10}) y finalmente la menor eliminación correspondió al T_7 formado por estiércol en su dosis baja y con la variedad Letle Fhine. Estadísticamente se puede utilizar cualquier combinación ya que todas son iguales. (Fig. 4.48).



D1= Dosis baja de materia orgánica, D2= Dosis alta de materia orgánica, V1= variedad Letle Fhine, V2= variedad Golden Stipe.

Figura 4.47. Efecto de la interacción de los niveles de los factores FB (dosis de materia orgánica) y FC (variedades de kalanchoe) sobre la eliminación de hidrocarburos en sustratos contaminados al final del experimento.

Con respecto a los niveles del factor dosis (FB) la prueba resultó altamente significativa, es decir, que las medias de respuesta son diferentes al

uno por ciento de significancia. En la Figura 4.45 se nota que la mejor media correspondió a la dosis alta de materia orgánica (D_2) al producir una mayor eliminación de hidrocarburos.

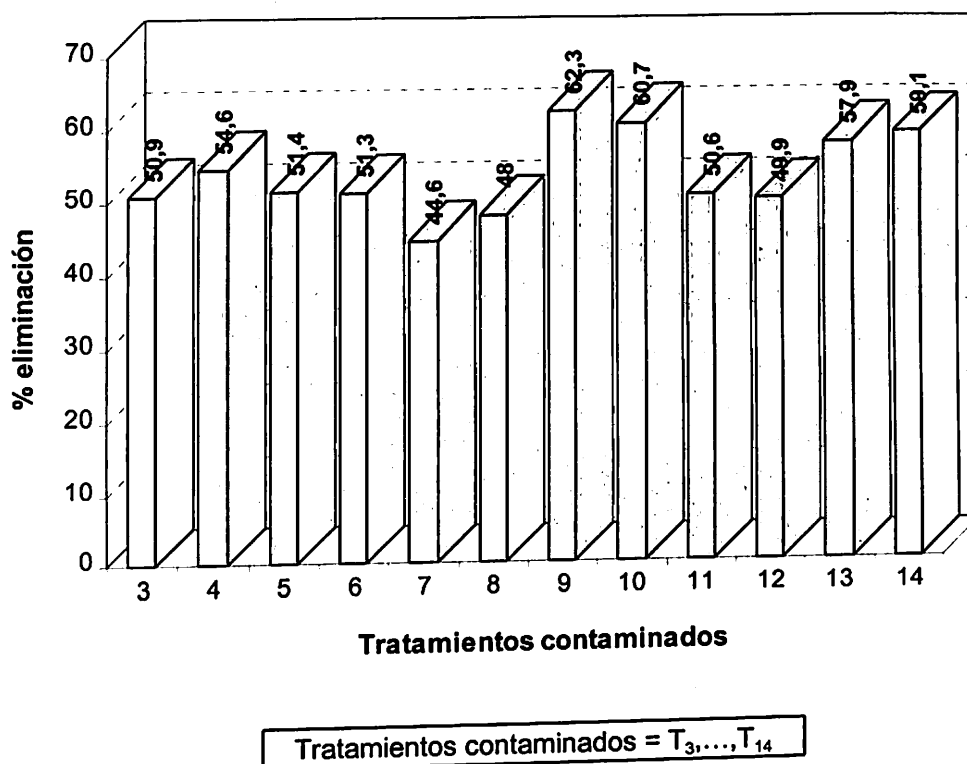


Figura 4.48. Efecto de la interacción de las fuentes de materia orgánica (factor A) con las dosis de materia orgánica (factor B) y variedades de kalanchoe (factor C) sobre la eliminación de hidrocarburos en sustratos contaminados al final del experimento.

La materia orgánica en el suelo actúa como una fuente de carbono y nutrientes para los microorganismos y para el cultivo, por lo tanto, se espera que a medida que se incrementa la proporción de ésta en el sustrato contaminado aumente la población microbiana al tener mayor fuente de alimento y nutrientes, que logrará degradar al hidrocarburo en mayor proporción que en dosis bajas donde habrá menor degradación y eliminación del contaminante.

Según el ANVA se encontró diferencia altamente significativa al uno por ciento en la combinación de las fuentes de materia orgánica y las dosis utilizadas (AxB), por lo que las medias de respuesta son diferentes entre sí y los factores involucrados actúan conjuntamente.

En la Figura 4.49 se aprecian las medias producidas por dicha interacción. Es claro que cuando se combina el estiércol en su dosis alta se obtiene la mayor eliminación de hidrocarburos en el sustrato, seguido por la combinación de bagazo en su dosis alta la que se ubica en segundo lugar, mientras que al combinar estiércol en su dosis baja se consigue el menor grado de eliminación. Lo anterior queda confirmado al realizar la prueba de Tukey al uno por ciento sobre las medias de cada una de las combinaciones, donde la media que presenta el estiércol en su dosis mayor es la mejor, estadísticamente igual a la segunda pero diferente al resto (Cuadro 4.13).

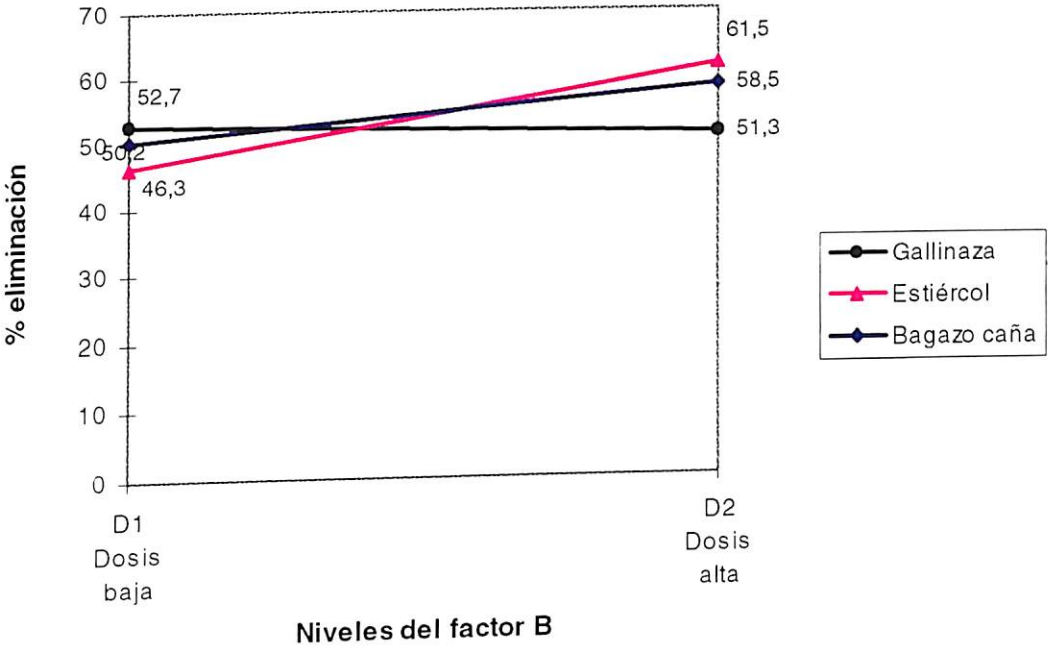


Figura 4.49. Efecto de la interacción entre los niveles de los factores FA (fuentes de materia orgánica) y FB (dosis de materia orgánica) sobre la eliminación de hidrocarburos en sustratos contaminados al final del experimento.

Cuadro 4.13. Prueba de Tukey al uno por ciento sobre las medias de respuesta para la combinación de los factores fuentes de materia orgánica y dosis de materia orgánica (AxB) sobre el porcentaje de eliminación de hidrocarburo en sustratos contaminados al final del experimento.

Media (%)	ED ₂ 61.5	BCD ₂ 58.5	GD ₁ 52.7	GD ₂ 51.3	BCD ₁ 50.2	ED ₁ 46.3
Tukey 0.01	a	ab	bc	c	c	c

G = Gallinaza, E = Estiércol, BC = Bagazo de caña

D₁ = Dosis baja de materia orgánica

D₂ = Dosis alta de materia orgánica

T_{0.01} = 7.1119

Lo anterior se atribuye a que el estiércol en su dosis alta influyó en las condiciones del suelo que favorecieron una mayor presencia de microorganismos degradadores de hidrocarburo, reflejándose en una mayor eliminación con respecto al tiempo. Además, el estiércol es la fuente orgánica que posee un mayor contenido de materia orgánica y nutrimentos que las otras fuentes utilizadas, inclusive puede favorecer una mayor retención de humedad en el suelo (por la presencia de humus en una alta proporción) lo que mantiene la actividad microbiana constante por largo tiempo (Cuadro 3.1).

Los principales factores que limitan la presencia de microorganismos en el suelo son la humedad, temperatura, pH, salinidad, oxígeno, nutrimentos y fuente de carbono. Si estos se encuentran en los rangos óptimos, el crecimiento y la población microbiana será abundante, pero si algún factor no se encuentra en el rango adecuado será limitante que impida el crecimiento de la población microbiana.

También se observa en el gráfico de la interacción (AxB), como en la medida que se incrementa la dosis de estiércol o bagazo de caña en el sustrato se incrementa la eliminación de hidrocarburos, mientras que para la gallinaza

se observa lo contrario, en donde incrementos de gallinaza disminuye el porcentaje de eliminación.

En la Figura 4.48, 4.49 y en el Cuadro 4.14, se observa como en los tratamientos que llevan estiércol y bagazo fueron en donde se presentó una mayor eliminación de TPH's, son también los que presentan un mayor número de unidades formadoras de colonias por gramo de suelo. Esto muestra como el estiércol en el sustrato fue un factor de inóculo y estímulo para el crecimiento y desarrollo microbiano con su consecuente mayor degradación al presentar una mayor eliminación de hidrocarburo.

Cuadro 4.14. Resultados de una cuenta bacteriana efectuada en muestras tomadas de los tratamientos contaminados al final del experimento. (Laboratorio de Microbiología de Suelos Departamento de Suelos UAAAN 1998).

Tratamiento	ufc/g de suelo			
	24 h		48 h	
	Dilución		Dilución	
	10^{-5}	10^{-6}	10^{-5}	10^{-6}
T ₃ (GD ₁ V ₁)	1.4×10^6	1.0×10^6	3.5×10^6	2.0×10^6
T ₄ (GD ₁ V ₂)	2.5×10^5	2.0×10^6	1.15×10^6	3.0×10^6
T ₅ (GD ₂ V ₁)	4.0×10^5	0	16.5×10^6	1.0×10^6
T ₆ (GD ₂ V ₂)	Inc.	5.0×10^5	Inc.	1.0×10^6
T ₇ (ED ₁ V ₁)	6.95×10^6	5.0×10^5	1.06×10^7	4.0×10^6
T ₈ (ED ₁ V ₂)	7.0×10^5	2.0×10^6	1.9×10^6	5.5×10^6
T ₉ (ED ₂ V ₁)	2.2×10^6	1.0×10^6	3.3×10^6	1.5×10^6
T ₁₀ (ED ₂ V ₂)	Inc.	2.0×10^6	Inc.	4.5×10^6
T ₁₁ (BCD ₁ V ₁)	2.0×10^6	1.0×10^6	2.3×10^6	2.0×10^6
T ₁₂ (BCD ₁ V ₂)	1.55×10^6	1.0×10^6	3.85×10^6	2.0×10^6
T ₁₃ (BCD ₂ V ₁)	6.0×10^6	2.0×10^6	8.35×10^6	2.0×10^6
T ₁₄ (BCD ₂ V ₂)	4.5×10^5	0	1.35×10^6	2.0×10^6

G = Gallinaza, E = Estiércol, BC = Bagazo de caña, D₁ = Dosis baja de materia orgánica, D₂ = Dosis alta de materia orgánica, V₁ = Variedad Letle Fhine, V₂ = Variedad Golden Stipe, Inc = Incontable. Ufc = Unidades formadoras de colonias.

Los resultados de la cuenta bacteriana muestra que el bagazo de caña también favoreció el desarrollo bacteriano en los sustratos. Por otro lado, se

aprecia en el Cuadro 4.14 que la gallinaza fue la que favoreció menos el desarrollo de los microorganismos en el suelo. Esto se explica por el manejo que se le dio al material antes de usarlo en los tratamientos, hay que recordar que no es una composta, si no que fue inicialmente sometido a altas temperaturas, en donde la mayoría de los microorganismos fueron eliminados, lo que confirma que la gallinaza sólo fue fuente de carbono y nutrimentos para los microorganismos nativos del suelo.

Las diferencias presentadas se atribuye a la naturaleza de los materiales, por ejemplo, el estiércol tiene mayor contenido de materia orgánica y nitrógeno que las otras fuentes, el bagazo también contiene suficiente materia orgánica pero en grado menor que el estiércol (Cuadro 3.1).

Evaluación de la biorremediación en los sustratos contaminados

En el Cuadro 4.15 se presenta el contenido de TPH's en los sustratos contaminados al inicio y al final del experimento. En aquellos tratamiento que llevan gallinaza (T_3 , T_4 , T_5 y T_6), se observa como la concentración inicial para los T_3 y T_4 es misma ya que es el mismo sustrato, en forma similar se observa para los T_5 y T_6 . Para ambos sustratos los TPH's iniciales disminuyen a lo largo del tiempo, y después de nueve meses la menor concentración observada fue para el T_5 compuesto de gallinaza en su dosis alta con la variedad Letle Fhine, sin embargo la mayor eliminación se produjo en el T_4 . Lo anterior muestra que hubo eliminación de los hidrocarburos en los tratamientos que llevan gallinaza.

Se observa también en ese mismo cuadro la concentración de hidrocarburos al inicio y al final para los sustratos tratados con estiércol. Se nota como la concentración inicial disminuye con el tiempo, siendo la menor observada para el T_9 formado por estiércol en su dosis alta y con la variedad

Lettle Fhine. Con lo anterior se confirma que también hubo eliminación de los hidrocarburos.

Finalmente, se presenta en la Cuadro 4.15 la concentración al inicio y al final de hidrocarburo para los sustratos tratados con bagazo. Obsérvese que también la concentración sufrió disminución con respecto al tiempo, en donde la menor concentración después de nueve meses fue favorecida por el T₁₄ con 29,561 mg/kg compuesto por bagazo en su dosis alta y con la variedad Golden Stipe.

Cuadro 4.15. Concentración de los hidrocarburos totales del petróleo (TPH's) en los tratamientos contaminados al inicio y al final del experimento, después de nueve meses de biorremediación en invernadero.

Tratamientos	TPH's mg/kg		% de eliminación
	Inicial	Final	
T ₃ (GD ₁ V ₁)	76,927	37,757.3	50.9
T ₄ (GD ₁ V ₂)	76,927	34,934.8	54.6
T ₅ (GD ₂ V ₁)	59,017	28,709.5	51.4
T ₆ (GD ₂ V ₂)	59,017	28,721.5	51.3
T ₇ (ED ₁ V ₁)	72,919	40,399.8	44.6
T ₈ (ED ₁ V ₂)	72,919	37,939.5	47.9
T ₉ (ED ₂ V ₁)	75,237	28,355.8	62.3
T ₁₀ (ED ₂ V ₂)	75,237	29,569.8	60.7
T ₁₁ (BCD ₁ V ₁)	82,188	40,620.8	50.6
T ₁₂ (BCD ₁ V ₂)	82,188	41,169.8	49.9
T ₁₃ (BCD ₂ V ₁)	72,238	30,445.5	57.9
T ₁₄ (BCD ₂ V ₂)	72,238	29,561.0	59.1

G = Gallinaza, E = Estiércol, BC = Bagazo de caña, D₁ = Dosis baja de materia orgánica, D₂ = Dosis alta de materia orgánica, V₁ = Variedad Lettle Fhine, V₂ = Variedad Golden Stipe, TPH's =Hidrocarburos totales del petróleo.

En el Cuadro 4.15 se aprecia que siempre al usar las dosis mayores de materia orgánica en cualquiera de la fuentes de materia orgánica evaluadas, fomentan una menor concentración de hidrocarburo al final del periodo de evaluación.

De todos los tratamientos evaluados el T₉, T₅ y el T₆ fueron los que presentaron una menor concentración de hidrocarburo.

Uno de los factores limitantes del suelo para el crecimiento de las plantas es sin duda la salinidad, es decir, la concentración sales en el ambiente suelo. Bohn *et al.*, (1993) afirma que en la medida que se incrementa las sales, también se incrementa el riesgo potencial de que la salinidad afecte al crecimiento de los cultivos. Uno de los métodos más sencillos y rápidos para evaluar la salinidad es mediante el uso de la conductividad eléctrica (CE), que no es otra cosa que la capacidad de conducir la corriente eléctrica. Por lo tanto, cuanto más elevada sea la concentración de sales disueltas, mayor será la conductividad de la solución (Ansorena, 1994).

En el Cuadro 4.16 se presentan los datos de conductividad eléctrica de muestras tomadas mensualmente a lo largo de nueve meses de biorremediación. Se aprecia como al inicio, todos los sustratos contaminados presentan valores de CE altos, lo que nos muestra que son sustratos que tienen problemas con sales (se considera un suelo salino CE > 4 dS/m) y el efecto sobre el crecimiento de la planta será negativo. En estas condiciones solamente prosperarán cultivos que toleren cierto grado de salinidad, precisamente por ello no se realizó el transplante al inicio de la biorremediación. Se observa como los sustratos que llevan bagazo fueron los que presentaron menor salinidad que los tratados con gallinaza y estiércol, esto lo explicamos por la naturaleza del material orgánico utilizado. Todos los materiales orgánicos utilizados poseen CE arriba de 10 dS/m (Cuadro 3.1), note que el bagazo es el más ligero, por lo tanto es un material que ocupa un volumen mayor, esto origina dilución de las sales en el sustrato final, lo que explica una menor conductividad. Es importante notar que en la medida que se utilice mayor cantidad de material orgánico en el sustrato se incrementará la CE. Por ejemplo, los T₃-T₄ llevan la dosis baja y tienen una conductividad menor que el

T_5 - T_6 que llevan la dosis alta de gallinaza. Lo anterior coincide con lo que afirma Ansorena (1994) quien explica que una de las causas de la excesiva salinidad en los sustratos es debido a la presencia de concentraciones elevadas de sales en algunos de los componentes del medio.

En el primer mes de biorremediación se incrementó la conductividad eléctrica para todos los tratamientos excepto para el T_3 - T_4 en donde disminuyó. La razón es que con el continuo humedecimiento algunas sales poco solubles se fueron solubilizando lentamente como el CaSO_4 (componente del medio), las que incrementaron la CE tiempo después de iniciado el proceso. Sin embargo, a partir del segundo mes en adelante la tendencia de la conductividad eléctrica fue de disminución para todos los tratamientos, es decir, se da una reducción de la salinidad en la medida que avanza el tiempo de biorremediación. En algunos casos la CE se incrementa de un mes a otro, debido quizás a la fertilización del cultivo, pero al final hubo una reducción neta significativa de la salinidad de los sustratos, alcanzándose valores de entre 3 a 4.25 dS/m. Por lo tanto, el suelo pasó de ser fuertemente salino a uno ligeramente salino (FitzPatrick, 1984). La reducción de la CE fue debida a las pérdidas por lixiviación de las sales. Con el riego constantemente, las sales primero fueron solubilizadas y luego fueron desplazadas lejos de la zona radical, disminuyendo con esto su concentración.

En un trabajo similar, COMIMSA (1998) encontró que al utilizar el método COMIMSA-UAAAN en la biorremediación de suelo contaminado con hidrocarburos y cultivado con zacate rye grass, la conductividad eléctrica disminuyó con respecto a los valores iniciales ubicándose al final entre 1.7 y 3.6 dS/m para los diferentes tratamientos evaluados.

A pesar de que hubo reducción de la salinidad, los valores de conductividad eléctrica obtenidos al final del experimento se consideran altos,

lo que nos muestra la gran cantidad de sales que tienen estos sustratos, por lo que se considera que la salinidad fue el principal factor limitante del desarrollo de las plantas de kalanchoe más que el propio hidrocarburo presente.

La salinidad en los tratamientos compuestos por bagazo de caña (T_{11} , T_{12} , T_{13} y T_{14}) al noveno mes, fueron los que presentaron los valores más bajos. Lo anterior es debido a la configuración granulométrica del material. El bagazo de caña es un material ligero, compuesto de fibras relativamente grandes, que al utilizarlo como ingrediente en sustratos incrementará la presencia de macroporos, los que dan al medio una mayor aireación y drenaje. Debido a que en estos sustratos la proporción de macroporos es mayor a los microporos, gran parte del agua añadida se perdió por drenaje y con ella cierta cantidad de sales, quedando una pequeña porción de agua retenida en los microporos.

Por otro lado, los tratamientos compuestos por estiércol (T_7 , T_8 , T_9 y T_{10}) son los que presentan una mayor salinidad tanto al inicio como al final del experimento, esto se explica por que es un material muy salino (incluso más salino que la gallinaza y bagazo), que al incrementarse la cantidad se aumenta la CE en el sustrato, sin embargo se nota que hay una reducción de la salinidad, debido a que el estiércol es un material que fomenta la agregación de las partículas aumentando la porosidad, la capacidad de retención de humedad y el drenaje. Esto se aprecia en el Cuadro 3.6, en donde a incrementos de estiércol la porosidad total y el nitrógeno total se incrementa mientras que la densidad aparente disminuye. Esto último también lo observamos en los sustratos tratados con gallinaza y bagazo (Cuadro 3.6).

El origen de la salinidad en los sustratos contaminados se debe principalmente a la gran cantidad de sulfato de calcio usado para acondicionar al hidrocarburo. La función del sulfato de calcio es romper químicamente las cadenas de hidrocarburo, lo encapsula e inmoviliza, es decir, el sulfato

transforma al hidrocarburo que es pegajoso y difícil de manejar en un material con aspecto a suelo, manejable y reactivo, ya que incrementa la superficie

Cuadro 4.16. Evolución de la conductividad eléctrica (dS/m) en sustratos contaminados con hidrocarburo a lo largo de nueve meses de biorremediación. (Laboratorio de Química de Suelos, Departamento de Suelos UAAAN, 1998).

Tratamiento	Muestreo (meses)									
	Inicial	1	2	3	4	5	6	7	8	9
T ₃ -T ₄ (GD ₁)	8.0	5.8	3.9	4.0	3.75	3.6	4.51	2.55	3.25	3.87
T ₅ -T ₆ (GD ₂)	10.0	>10	6.0	5.0	4.0	4.5	4.33	3.15	3.57	4.0
T ₇ -T ₈ (ED ₁)	9.5	>10	6.0	4.0	4.0	4.25	4.31	4.25	3.35	4.2
T ₉ -T ₁₀ (ED ₂)	>10	>10	8.5	5.25	4.9	5.50	4.90	3.55	4.25	4.25
T ₁₁ -T ₁₂ (BCD ₁)	6.0	7.5	4.5	3.25	2.95	3.20	3.47	3.20	3.05	3.05
T ₁₃ -T ₁₄ (BCD ₂)	7.0	9.9	3.5	3.25	3.0	3.5	3.46	2.55	2.95	3.62

G = Gallinaza, E = Estiércol, BC = Bagazo de caña, D₁ = Dosis baja de materia orgánica, D₂ = Dosis alta de materia orgánica.

específica de éste. Burés (1997) menciona que todas las reacciones que se dan en los sustratos están influidas por la superficie de contacto sólido-líquido y la fase gaseosa, por lo tanto, los materiales más disgregados tienen a igual volumen mayor superficie de contacto y por lo tanto mayor reactividad. El hidrocarburo así tratado expone mayor área superficial por unidad de volumen o masa, por lo que es más reactivo con el medio al ofrecer mayor contacto con el agua y microorganismos, que al final serán los que degradan al contaminante con mayor facilidad y más rápido que si el material a degradar tuviera una menor área de contacto. Alexander (1994) afirma que la velocidad de descomposición está regida por el tamaño de las partículas orgánicas sujetas a ataque, agregando que como regla general los materiales de partículas pequeñas son degradados más fácilmente que los de partículas más grandes.

Se puede observar en el Cuadro 4.17 la evolución del pH a lo largo de nueve meses de biorremediación. Al inicio los sustratos presentaron valores de pH altos, es decir, son de mediana a fuertemente alcalino, en estas condiciones

la nutrición y crecimiento de la planta se vería seriamente afectado. Thompson y Troeh (1980), mencionan que la mayoría de los suelos con pH superior a ocho poseen un exceso de sales o bien un elevado porcentaje de Na^+ en sus sitios de intercambio catiónico. Estos mismos autores afirman que el efecto del pH en la planta es a nivel de la nutrición, en la solubilidad de los materiales del suelo y en la cantidad de iones nutritivos almacenados en los sitios de intercambio.

En estas condiciones se tendrían problemas de deficiencias de Fe, Mn, Cu, Zn, Al y P en plantas, debido a que son elementos que precipitan a compuestos poco solubles en la medida que el pH se incrementa. Por otra parte no se tendrían problemas con Mo ya que es soluble a pH altos, tampoco con N, K y S, debido que son elementos solubles a cualquier pH. Dadas las condiciones salinas y alcalinas se espera sustratos ricos en Ca, Mg y K ocupando los sitios de intercambio (Cuadro 3.6). Sin embargo, como el pH es mayor de ocho se espera un exceso de calcio en el medio, en estas condiciones se crea antagonismo iónico entre el Ca y el K, donde el exceso de Ca impide la absorción de potasio.

Estos problemas nutritivos se notarían con mayor claridad en aquellas plantas cultivadas en los sustratos compuestos por bagazo, ya que son los que presentan una mayor alcalinidad alrededor de pH 8.5, superando incluso al estiércol y gallinaza.

Al igual que en la conductividad eléctrica, se observa una reducción del pH en la medida que avanza el tiempo de biorremediación, es decir, los sustratos tienden a acidificarse. En este aspecto coincidimos con los resultados obtenidos por Saval (1997), donde en un trabajo similar encontró que el pH de un suelo contaminado con diesel disminuye de 8.14 a 7.87 en seis meses de biorremediación. La principal causa de la acidificación es debida a la

eliminación de las sales del sustrato como Ca, Mg, K y Na por lixiviación y su intercambio por iones H^+ , Al^{3+} , en los sitios de intercambio. Esto concuerda con Thompson y Troeh (1980), quienes afirman que los procesos de lavado eliminan las bases del suelo y por tanto, con el tiempo tienden a provocar un descenso del pH.

Otro de los factores que favoreció la acidificación, fue el efecto que tiene la respiración de las raíces del cultivo sobre la reacción del sustrato. En la respiración las raíces consumen O_2 y liberan CO_2 , este al combinarse con el agua de la solución del suelo forma un ácido que posteriormente se disocia en iones H^+ y HCO_3^- , aunado esto último con la absorción de las bases del suelo por el cultivo y el uso de una solución nutritiva ligeramente ácida.

Sin embargo, tanto el proceso de lavado mediante el riego, así como el consumo de los cationes básicos vía planta, provocan además, una disminución de la fertilidad del suelo. Esto se confirma con el análisis inicial y final de los sustratos contaminados. En los Cuadros 3.6 y 4.19, se observa en todos los tratamientos una disminución de las concentraciones de P disponible, K disponible, así como una disminución en la carga negativa total del medio de crecimiento (CIC) al final del experimento. La anterior tendencia no se observa para el contenido de N total, donde en algunos casos se incrementa al final de la etapa de evaluación. Por ejemplo, en los T_3 , T_4 , T_7 , T_8 , T_{11} , T_{12} , el N total se incrementa, mientras que para los T_5 , T_6 , disminuye y en los T_9 , T_{10} , T_{13} y T_{14} casi se mantiene igual disminuyendo muy poco. Se aprecia en el Cuadro 4.19 como los tratamientos con bagazo de caña fueron los que presentaron hacia el final una menor concentración de P disponible en contraste con los demás. Lo anterior lo atribuimos a que los sustratos con bagazo son medios muy permeables y gran parte del P y K se perdió por lixiviación en mayor proporción que en los otros tratamientos.

Cuadro 4.17. Evolución del pH en los sustratos contaminados con hidrocarburo a lo largo de nueve meses de biorremediación. (Laboratorio de Química de Suelos, Departamento de Suelos UAAAN, 1998).

Tratamiento	Muestreo (meses)									
	Inicial	1	2	3	4	5	6	7	8	9
T ₃ -T ₄ (GD ₁)	8.2	7.9	7.8	7.65	7.65	7.65	8.0	7.6	7.4	7.45
T ₅ -T ₆ (GD ₂)	8.38	7.9	7.8	7.8	7.8	7.75	8.0	7.77	7.4	7.6
T ₇ -T ₈ (ED ₁)	8.38	8.0	8.0	7.85	7.85	7.75	8.0	7.30	7.6	7.59
T ₉ -T ₁₀ (ED ₂)	8.28	8.1	8.0	8.0	8.0	7.90	8.1	7.5	7.5	7.7
T ₁₁ -T ₁₂ (BCD ₁)	8.55	7.8	7.8	7.8	7.8	7.70	7.6	7.4	7.5	7.45
T ₁₃ -T ₁₄ (BCD ₂)	8.40	7.8	7.75	7.7	7.9	7.80	7.9	7.4	7.4	7.7

G = Gallinaza, E = Estiércol, BC = Bagazo de caña, D₁ = Dosis baja de materia orgánica, D₂ = Dosis alta de materia orgánica.

En el Cuadro 4.18 se presenta la evolución de la materia orgánica (MO) a lo largo de la biorremediación. Lo que se esperaba encontrar es que en la medida que avanzara el proceso de biorremediación el contenido de MO disminuyera, gracias a un incremento en la actividad microbiana que degradara ésta, sin embargo no fue así. En esto no coincidimos con Saval (1997) quien en un trabajo de biorremediación de un suelo contaminado con diesel, encontró una disminución del contenido de MO a lo largo del tiempo, el cual disminuye de 1.96 por ciento a 1.39 por ciento en sólo seis meses de tratamiento. Se observa que los tratamientos son extremadamente ricos en MO tanto total (combustión) como fácilmente oxidable (Walkley - Black), razón por la cual tienen una alta CIC, ya que el humus (partícula orgánica coloidal muy pequeña) tiene una alta superficie específica y carga negativa. Por esto poseen también una alta porosidad, densidad aparente baja, una alta capacidad de retención de humedad e infiltración, alta capacidad tampón y sobre todo un alto nivel de fertilidad (Narro, 1994).

Sin embargo se nota que el contenido es prácticamente el mismo tanto al inicio como al final de la fase experimental, y los cambios de incrementos o disminuciones aparentes de un mes a otro, no lo atribuimos a una descomposición real del material sino a que el sustrato es heterogéneo originando errores en la determinación, o bien a que los materiales orgánicos utilizados en las mezclas son resistentes a la degradación como el hidrocarburo utilizado. Hay que recordar que las fuentes de MO utilizadas fueron compostas de estiércol y bagazo de caña ricos en MO y N total (Cuadro 3.1), así como la gallinaza acondicionada (Cuadro 3.1), quizás compuestas por un alto contenido de humus, que es una fracción de MO altamente estable y resistente a la degradación por microorganismos (Bohn *et al.*, 1993).

En la mayoría de los casos el contenido de MO total (combustión) se ubica igual o por abajo de la MO fácilmente oxidable (Walkley-Black), cuando lo común es que se presente lo inverso, dado que el método Walkley-Black detecta del 90 al 95 por ciento del C oxidable total (Jacobs, 1971). Posiblemente estos resultados se deban a que la MO utilizada se encontraba ya en un estado de degradación avanzada (en su mayoría humus) en donde el método Walkley-Black lo detecta fácilmente reportándolo igual o por arriba al método por combustión, el cual reporta toda la MO (humus y residuos orgánicos no degradados).

Además, se nota que en la medida que se incrementa la MO total (combustión) disminuye el contenido de cenizas y viceversa. Por lo tanto, se espera que a medida que el proceso de degradación avanza la MO del medio disminuye y el contenido de cenizas al final se incrementa siendo mayor que los valores iniciales, pero dicha respuesta no se observó, debido a que la MO usada se encontraba en un avanzado estado de descomposición microbiana que es muy estable.

Cuadro 4.18. Evolución del contenido en la materia orgánica y cenizas en los sustratos contaminados con hidrocarburos a lo largo de nueve meses de biorremediación. (Laboratorio de Química de Suelos Departamento de Suelos UAAAN 1998).

		% MO		% Ce			% MO		% Ce
Mes	Trat.	1	2		Mes	Trat.	1	2	
0 inicio	T ₃ -T ₄	17.5	13.1	82.5	5	T ₃ -T ₄	17.5	19.1	82.5
	T ₅ -T ₆	15	13.1	85		T ₅ -T ₆	17.5	15.7	82.5
	T ₇ -T ₈	20	21.6	80		T ₇ -T ₈	20	13.7	80
	T ₉ -T ₁₀	25	15.1	75		T ₉ -T ₁₀	20	15.7	80
	T ₁₁ -T ₁₂	20	15.5	80		T ₁₁ -T ₁₂	15	17.0	85
	T ₁₃ -T ₁₄	17.5	11.7	82.5		T ₁₃ -T ₁₄	15	12.4	85
1	T ₃ -T ₄	15	21.3	85	6	T ₃ -T ₄	17.5	19.2	82.5
	T ₅ -T ₆	20	21.9	80		T ₅ -T ₆	17.5	18.3	82.5
	T ₇ -T ₈	20	20.6	80		T ₇ -T ₈	20	20.1	80
	T ₉ -T ₁₀	20	22.6	80		T ₉ -T ₁₀	20	20.6	80
	T ₁₁ -T ₁₂	20	17.3	80		T ₁₁ -T ₁₂	20	19.7	80
	T ₁₃ -T ₁₄	15	19.3	85		T ₁₃ -T ₁₄	15	18.0	85
2	T ₃ -T ₄	15	21.3	85	7	T ₃ -T ₄	17.5	15.7	82.5
	T ₅ -T ₆	17.5	16.5	82.5		T ₅ -T ₆	17.5	17.0	82.5
	T ₇ -T ₈	20	21.3	80		T ₇ -T ₈	20	20.8	80
	T ₉ -T ₁₀	20	21.9	80		T ₉ -T ₁₀	20	18.8	80
	T ₁₁ -T ₁₂	20	20.6	80		T ₁₁ -T ₁₂	15	16.4	85
	T ₁₃ -T ₁₄	17.5	16.5	82.5		T ₁₃ -T ₁₄	15	20.1	85
3	T ₃ -T ₄	15	19.9	85	8	T ₃ -T ₄	15	15.6	85
	T ₅ -T ₆	15	18.6	85		T ₅ -T ₆	15	15	85
	T ₇ -T ₈	17.5	17.2	82.5		T ₇ -T ₈	17.5	17.2	82.5
	T ₉ -T ₁₀	20	19.3	80		T ₉ -T ₁₀	15	19.0	85
	T ₁₁ -T ₁₂	17.5	16.6	82.5		T ₁₁ -T ₁₂	15	17.7	85
	T ₁₃ -T ₁₄	20	19.1	80		T ₁₃ -T ₁₄	15	16.0	85
4	T ₃ -T ₄	20	16.4	80	9	T ₃ -T ₄	16.3	17.1	83.7
	T ₅ -T ₆	15	17.0	85		T ₅ -T ₆	15	15.5	85
	T ₇ -T ₈	20	13.0	80		T ₇ -T ₈	20	18.4	80
	T ₉ -T ₁₀	20	21.1	80		T ₉ -T ₁₀	20	18.1	80
	T ₁₁ -T ₁₂	20	21.1	80		T ₁₁ -T ₁₂	20	18.2	80
	T ₁₃ -T ₁₄	15	15.1	85		T ₁₃ -T ₁₄	21.3	17	78.7

Ce = Cenizas

MO = Materia orgánica

1 = MO total (combustión)

2 = MO fácilmente degradable (Walkley-Black)

En los Cuadros 3.6 y 4.19 se presenta la concentración de sulfatos SO_4^{2-} en los tratamientos tanto al inicio como al final del experimento. Se puede apreciar, que en la mayoría de ellos (T_3 , T_4 , T_5 , T_6 , T_7 , T_{11} , T_{12} , T_{13} y T_{14}) hay una disminución de la concentración inicial en la medida que avanza el tiempo. Dicha disminución se debió simplemente a que los sustratos no lo lograron retenerlo perdiéndose por lavado, no olvidando también, que las plantas y microorganismos lo consumen como una fuente de S contribuyendo en su disminución. Fassbender (1982) afirma que las plantas absorben SO_4^{2-} , algunos aminoácidos y a veces SO_4 atmosférico, sintetizando proteínas y otros compuestos azufrados. Por otro lado, en los T_8 , T_9 y T_{10} se incrementó la cantidad de SO_4^{2-} hacia el final, esto probablemente se deba a que el estiércol facilitó la disolución del CaSO_4 presente en el medio, o bien es un material rico en azufre que al ser mineralizado vía microorganismos sintetizaron sulfatos.

Se aprecia en los Cuadros 3.4 y 4.19 como los sustratos testigos (T_1 y T_2) presentan una menor concentración de SO_4^{2-} que los contaminados, la razón es por que en estos últimos se utilizó sulfato de calcio para tratar al hidrocarburo. Sin embargo, se observa un incremento en la concentración de sulfatos en la medida que avanza el tiempo (testigos). Debido quizás a las fuentes de MO ricas en S, o por la capacidad que tiene el medio de retener sulfatos en contra del lavado.

Las altas concentraciones de sulfatos en los tratamientos contaminados presentadas al inicio y mantenida hasta el final del experimento, provocaron toxicidad en las plantas, al presentar todas ellas coloraciones amarillas en el follaje y falta de crecimiento (plantas pequeñas).

Cuadro 4.19. Análisis final de algunas propiedades químicas de muestras tomadas a los tratamientos después de nueve meses de biorremediación. (Laboratorio de Química de Suelos. Departamento de Suelos UAAAN. 1998).

Sustrato	pH lix.	C.E dS/m	% M.O W-B	% M.O Comb	% Cenizas	% N total	P disp. mg/kg	K disp. mg/kg	CIC meq/100 g	SO ₄ ²⁻ suelo mg/kg ¹	SO ₄ ²⁻ lix. mg/L ¹
T ₁ (PmPSBV ₁)	7.1	1.59	26.3	40.0	60.0	0.872	38.9	184	335.0	1,433.0	237
T ₂ (PmPSBV ₂)	7.05	1.55	25.8	32.5	67.5	0.894	39.5	202.5	219.4	1,226.1	223
T ₃ (GD ₁ V ₁)	7.5	3.99	17.2	15.0	85.0	0.534	46.8	301.5	76	2,378.0	1995.8
T ₄ (GD ₁ V ₂)	7.4	3.75	17.0	17.5	82.5	0.512	51.0	255.5	63	445.0	2024.6
T ₅ (GD ₂ V ₁)	7.78	4.20	15.6	15.0	85.0	0.469	78.5	363	50.4	1,351.4	2106.9
T ₆ (GD ₂ V ₂)	7.65	3.80	15.3	15.0	85.0	0.526	80.8	356.5	54.0	2,667.3	2510.2
T ₇ (ED ₁ V ₁)	7.59	4.50	18.5	20.0	80.0	0.490	58.1	320.5	76.4	962.5	2273.5
T ₈ (ED ₁ V ₂)	7.59	3.85	18.2	20.0	80.0	0.606	59.3	311.5	71.2	1,844.9	2039.7
T ₉ (ED ₂ V ₁)	7.9	4.40	17.2	17.5	82.5	0.562	111.7	440	57.0	1,951.9	2320.9
T ₁₀ (ED ₂ V ₂)	7.6	4.10	19.0	22.5	77.5	0.562	104.8	418	57.0	2,097.3	2319.5
T ₁₁ (BCD ₁ V ₁)	7.5	3.0	18.3	20.0	80.0	0.447	5.9	264	61.0	1,572.0	1794.1
T ₁₂ (BCD ₁ V ₂)	7.41	3.10	18.0	20.0	80.0	0.483	0.50	256.5	46.2	1,901.9	1835.7
T ₁₃ (BCD ₂ V ₁)	7.9	3.99	17.5	22.5	77.5	0.498	0.12	251.5	56.0	1,984.7	1912.4
T ₁₄ (BCD ₂ V ₂)	7.6	3.25	16.5	20.0	80.0	0.461	21.7	238	37.0	2,022.5	1794.1

Pm = Peat moss, P = Perlita, SB = Suelo bosque, V₁ = Var. Letle Rhine, V₂ = Var. Golden Stipe, G = Gallinaza, E = Estiércol
BC = Bagazo de caña, D₁ = Dosis baja de materia orgánica, D₂ = Dosis alta de materia orgánica

¹ Determinado en el Laboratorio de Análisis Químico COMIMSA. Método NMX-AA-74

V. CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos se concluye lo siguiente:

De acuerdo a los resultados obtenidos en planta, ninguno de los tratamientos contaminados con hidrocarburo lograron superar en diámetro de tallo, altura de planta, número de hojas, largo y ancho de la hoja a los tratamientos testigos. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis de que la utilización de sustratos contaminados con hidrocarburos produce igual o mejor calidad de plantas de kalanchoe que el testigo.

Dentro de los tratamientos testigos (T_1 y T_2), se logró obtener mejor calidad de planta para la mayoría de las variables evaluadas, en la variedad Letle Fhine (plantas con flores rojas). La variedad Golden Stipe (plantas con flores amarillas) sólo superó a la Letle Fhine en diámetro de tallo.

Las diferencias presentadas por las variedades de kalanchoe en los sustratos no contaminados (testigos), se atribuyen más al genotipo de la planta que a diferencias en el medio de crecimiento.

No se logró producir mejor calidad de plantas de kalanchoe al incrementar la proporción de materia orgánica en los sustratos contaminados, ya que los resultados obtenidos tanto en las fuentes de materia orgánica (gallinaza, estiércol y bagazo de caña), así como en sus dosis (dosis alta), incrementan la salinidad del medio afectando negativamente al cultivo. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis que los incrementos de materia orgánica en el medio mejoran la calidad del kalanchoe.

Se logró evaluar el crecimiento y desarrollo de las dos variedades de kalanchoe, en sustratos contaminados con hidrocarburos a lo largo de cinco meses de biorremediación. Sin embargo, no se recomienda el uso de sustratos contaminados en el cultivo comercial de kalanchoe, dado que el cultivo no cumple con la calidad mínima aceptable.

Se recomienda en los sustrato contaminados con hidrocarburos el uso de estiércol en su dosis baja utilizando la variedad Letle Fhine, para obtener el mejor desarrollo de kalanchoe.

Se recomienda el uso de estiércol en su dosis alta en cualquiera de las variedades para tratar al hidrocarburo, debido a que fue la combinación de factores que favoreció una mayor eliminación de la contaminación con respecto al tiempo.

Se atribuye que los altos valores de conductividad eléctrica, pH y sulfatos (SO_4^{2-}) en el medio de crecimiento contaminado fueron los principales factores que influyeron en la baja calidad presentada por la planta.

Se logró disminuir la concentración de hidrocarburo para el mejor tratamiento en un 62.3 por ciento en nueve meses de biorremediación. Con esto, se consigue dar seguimiento al proceso de biorremediación, además de reducir la contaminación en los sustratos contaminados con respecto al tiempo.

A lo largo de la biorremediación se encontró lo siguiente: no hubo reducción del contenido de materia orgánica en el medio de crecimiento, se observó acidificación del sustrato y reducción de la salinidad, además de la disminución de fósforo, potasio, sulfatos y de la capacidad de intercambio

catiónico al final del experimento, lo que originó la disminución de la fertilidad. Lo anterior fue debido a la lixiviación originada por el riego continuo.

Se sugiere realizar mayor investigación probando los sustratos contaminados sobre el crecimiento de hortalizas y ornamentales, de manera que no se interrumpa el proceso de biorremediación. Además se recomienda utilizar otras fuentes y dosis de materia orgánica para tratar al hidrocarburo.

VI. RESUMEN

Hoy en día, uno de los principales problemas al que se está enfrentando la humanidad es al grave deterioro del medio ambiente. Por tal motivo, la labor primordial del hombre debe ser la conservación de su hábitat, al recuperar su entorno y evitar su creciente desgaste.

En México, el petróleo es una importante fuente de materia prima para muchos procesos industriales y generadora de divisas, sin embargo también es el principal contaminante de lagos, ríos, mares y suelos agrícolas cercanos a los puntos de extracción, refinación, almacenamiento y conducción del hidrocarburo.

Ante la necesidad de rehabilitar suelos impactados con hidrocarburos utilizando técnicas de biorremediación y, considerando que en la fabricación de sustratos para el crecimiento de plantas de ornato se utilizan como ingredientes diversos materiales incluso residuos industriales orgánicos, se consideró el uso de un hidrocarburo de desecho como componente del medio de crecimiento para la producción de plantas de kalanchoe.

Los objetivos de esta investigación fueron: dar una alternativa de uso a hidrocarburos de desecho al utilizarlos como ingredientes de sustratos, evaluar la biorremediación de los sustratos contaminados y su efecto en el crecimiento y desarrollo de dos variedades de kalanchoe, seleccionar el sustrato que favorezca el mejor desarrollo de planta y disminuir la contaminación en los sustratos con respecto al tiempo.

El estudio se llevó a cabo en el invernadero de alta tecnología de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, que se ubica al sur de Saltillo, Coahuila, México, a 1742 msnm. Se evaluaron 14 tratamientos, los cuales consistieron en la mezcla del hidrocarburo con sulfato de calcio (CaSO_4) en relación de 1:3 en base a peso. A la que se le añadió tres fuentes de materia orgánica (gallinaza, estiércol y bagazo de caña) utilizando dos dosis más un suelo orgánico. Las mezclas de materiales fueron evaluados con dos variedades de kalanchoe: Letle Fhine (flor roja) y Golden Stipe (flor amarilla). La calidad de planta en los tratamiento contaminados fue contrastada al utilizar dos tratamientos testigos compuestos de suelo de bosque, turba y perlita (1/3: 1/3: 1/3 v/v/v). Se utilizó un diseño completamente al azar con arreglo de tratamientos factorial $3 \times 2 \times 2 + 2$ testigos, utilizando cuatro repeticiones. El factor A representó las fuentes de materia orgánica, el factor B fueron las dosis y el factor C fueron las variedades de kalanchoe. Se evaluaron 56 unidades experimentales cada una formada por dos macetas.

Después de nueve meses de biorremediación se evaluó la calidad de la planta a través de las siguientes variables: diámetro de tallo (mm), altura de planta (cm), número de hojas, largo de la hoja (cm) y ancho de la hoja (cm). La biorremediación de los sustratos fue evaluada con datos iniciales y finales de TPH's (hidrocarburos totales del petróleo), además del comportamiento del pH, conductividad eléctrica, materia orgánica y cenizas a través del tiempo. Al término del experimento se tomaron muestras para determinar pH, conductividad eléctrica, materia orgánica y sulfatos en todos los tratamientos.

Los resultados en planta muestran que ninguno de los tratamientos contaminados con hidrocarburo lograron superar en diámetro de tallo, altura de planta, número de hojas, largo y ancho de la hoja a los tratamientos testigos. Por lo tanto, se concluye que el uso de sustratos contaminados en la

producción de kalanchoe no produce igual o mejor calidad de planta que los sustratos que se utilizan en su producción.

En los sustratos testigos (T_1 y T_2) como en los contaminados, la variedad Letle Fhine (flor roja) mostró mejor calidad de planta para la mayoría de las variables evaluadas que la variedad Golden Stipe (flor amarilla). Así las diferencias que mostraron las plantas en los tratamientos testigos se deben al genotipo más que a las condiciones del sustrato.

Estadísticamente se puede utilizar cualquier combinación de factores para cultivar kalanchoe ya que no se encontró diferencias. Sin embargo, se recomienda utilizar en los sustrato contaminados con hidrocarburos estiércol en dosis baja (1:0.5 con respecto al hidrocarburo) con la variedad Letle Fhine (flor roja) para obtener una mejor respuesta.

Las concentraciones iniciales y finales de TPH's en los sustratos contaminados indican una reducción de la contaminación en todos los tratamientos. Se encontró una reducción del 62.3 por ciento para el mejor tratamiento en nueve meses de biorremediación. Por lo tanto, se recomienda el uso de estiércol en la dosis alta con cualquiera de las dos variedades para eliminar la mayor cantidad de hidrocarburo.

Los resultados de la caracterización física y química inicial, muestran problemas de sales (> 6 dS/m), pH mayor de 8.0 y contenido de materia orgánica elevado en todos los tratamientos contaminados, mientras que en los tratamientos testigo la conductividad eléctrica y pH fue más adecuada (2.08 dS/m y pH 6.7) para el crecimiento vegetal.

En cuanto a los tratamientos, los resultados de su caracterización química y física indican una disminución en la concentración de fósforo,

potasio, sulfatos y de la capacidad de intercambio catiónico, además de la acidificación del medio y reducción de la salinidad, en la medida que avanza el proceso de biorremediación.

VII. LITERATURA CITADA

- Abad, M. 1991. Los sustratos hortícolas y las técnicas de cultivo sin suelo. En La Horticultura Española en la C.E. Eds. L. Rallo y F. Nuez. Ediciones de Horticulura S.L., Reus. España.
- Abad, M. 1995. Sustratos para el cultivo sin suelo. En: El Cultivo del Tomate, Coord. F. Nuez. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Abad, M., Noguera, P. y Noguera, V. 1996. Turbas para semilleros. En: II Jornadas sobre Semillas y Semilleros Hortícolas. Congresos y Jornadas, 35/96. Junta de Andalucía. Consejería de Agricultura y Pesca. Sevilla.
- Abad, B. M. y Noguera, M. P. 1998. Sustratos para el Cultivo sin suelo y fertirrigación, En: Fertirrigación Cultivos hortícolas y ornamentales. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Alexander, M. 1994. Introducción a la microbiología del suelo. Segunda reimpresión AGT Editor. México.
- Ansorena, M. J. 1994. Sustratos propiedades y caracterización. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Atlas, R. 1984. Microbiology, fundamentals and applications. Macmillan Publishing Co. Pág. 732-766.
- Bohn, H. L., McNeal, B. L. y O'Connor, G. A. 1993. Química de suelo. Primera Edición. Editorial Limusa Noriega Editores. México.
- Bowman, D. C., Evans, R. Y. and Dodge, L. L. 1994. Growth of chrysanthemum with ground automobile tires used as a container soil amendment. HortScience Vol. 29(7): 774-776.
- Burés, S. 1997. Sustratos. Ediciones Agrotécnicas, S. L. Madrid, España.
- Cadahia, L.C. 1998. Fertirrigación cultivos hortícolas y ornamentales. Ediciones Mundi-Prensa. España.

- Cepeda, D. J. M., Peña, C. E. e Ilizaliturri, V. A. 1997. Optimización del método de degradación para controlar y sanear daños ecológicos generados por Fugas o derrames accidentales. Reporte de Avances de investigación del Proyecto COMIMSA-UAAAN. Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. México.
- Corporación Mexicana de Investigación en Materiales S.A. (COMIMSA), 1998. Método COMIMSA para la degradación de hidrocarburos con el fin de sanear los daños ecológicos generados por fugas o derrames producto de las actividades de perforación. Reporte final del proyecto COMIMSA-UAAAN.
- Ensley, B. D. 1991. Biochemical diversity of trichloroethylene metabolism. *Annu. Rev. Microbiol.* 45:283-299.
- Fassbender, H. W. 1982. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. Primera Edición. IICA. San José, Costa Rica.
- FitzPatrick, E. A. 1984. Suelos su formación, clasificación y distribución. Primera Edición. Editorial CECSA. México.
- Francois, L. E. 1994. Yield and quality response of salt-stressed garlic. *HortScience*, Vol. 29(11): 1314-1317.
- Francois, L. E. 1995. Salinity effects on bud yield and vegetative growth of artichoke (*Cynara scolymus* L.). *HortScience*, Vol. 30(1): 69-71.
- Freedman, B. 1989. Environmental ecology the impacts of pollution and other stresses on ecosystem structure and function. Academic Press, Inc. USA.
- Hanay, A. y Yardiimcii, N. 1992. A study on the effect of municipal compost and manure physical and chemical properties of soil water relations. *Doga, Turk Tarim ve Ormancilik Dergisi.* 16(1) 91-102.
- Hartmann, H. T. y Kester D. E. 1995. Propagación de plantas principios y prácticas. Cuarta Reimpresión. Editorial CECSA. México.
- Hein, M. 1992. Química. Grupo Editorial Iberoamérica. México, D.F.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI), 1994. Estadísticas del medio ambiente. México.
- Jacobs, H. S. 1971. Soils laboratory exercise source book. American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin. USA.

- Jiménez, M. R. y Caballero, R. M. 1990. El cultivo industrial de plantas en maceta. Ediciones de Horticultura, S.L. Reus. España.
- Larson, R. A. 1994. Introducción a la floricultura. Primera reimpresión. AGT Editor, S.A. México.
- Metting, B. Jr. 1993. Soil microbial ecology. Applications in agriculture and enviromental management. Marcel Dekker, Inc.
- Narro, F. E. 1994. Física de suelos con enfoque agrícola. Primera Edición. Editorial Trillas. México.
- Oliver, S. O. 1977. Conservación de recursos naturales. Primera Edición. Editorial Pax-México. México.
- Pertuit, A.J. 1992. Introduction to floriculture. Second Edition. Academic Press, Inc. USA.
- Pritchett, W. L. 1986. Suelos forestales propiedades, conservación y mejoramiento. Editorial Limusa. Primera Edición. México.
- Raviv, M. Chen, Y. and Inbar, Y. 1986. Peat and peat substitutes as growth media for container-grown plants. In: The role of Organic Matter in Modern Agriculture. Eds. Y. Chen and Y. Avnimelech. Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht.
- Resh, H. M. 1992. Cultivos hidropónicos nuevas técnicas de producción. Tercera Edición. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Secretaria de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), 1994. Hortícolas y ornamentales. Datos Básicos. Número 5.
- Saval, S. 1997. Biorremediación de un suelo contaminado con diesel. En: Ingeniería y Ciencias Ambientales. Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales A.C. Año 9, Núm. 33, Julio-Septiembre.
- Strobbe, M. A. 1973. Orígenes y control de la contaminación ambiental. Primera Edición. Editorial Continental. México.
- Thompson, L. M. y Troeh, F. R. 1980. Los suelos y su fertilidad. Cuarta Edición. Editorial Reverte. Barcelona España.
- Turk, A., Turk, J., Wittes, J. T. y Wittes, R. E. 1983. Tratado de ecología. Segunda Edición en Español. Editorial Interamericana.

Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), 1990. Energía y medio ambiente. Memorias del Simposio. Primera Edición. México.

Vidalie, H. 1992. Producción de flores y plantas ornamentales. Segunda Edición. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España.

Winsor, G. W. 1990. Soilless culture for horticultural crop production. FAO plant production and protection.

VIII. APÉNDICE

Cuadro A.1. Análisis de varianza para la variable diámetro de tallo (mm) en plantas de kalanchoe. Incluye tratamientos testigos.

F.V	G.L	S.C	C.M	Fc	F α	
					0.05	0.01
Tratamientos	13	14.302192	1.100168	11.593 **	1.965	
Error	42	3.9858	0.09490		2.597	
Total	55	18.2879				

** = Altamente significativo
C.V. = 5.871%

Cuadro A.2. Prueba de Tukey al uno por ciento de significancia sobre las medias de respuesta para la variable diámetro de tallo.

Trat.	Media (mm)	Tukey al 0.01	Trat.	Media (mm)	Tukey al 0.01
2	6.70	a	12	5.06	c
1	6.10	ab	9	5.05	c
8	5.42	bc	4	4.99	c
7	5.20	c	13	4.97	c
11	5.19	c	3	4.88	c
6	5.13	c	5	4.87	c
10	5.08	c	14	4.79	c

T_{0.01} = 0.9062

Cuadro A.3. Análisis de varianza para la variable altura de planta (cm) en dos cultivares de kalanchoe. Incluye tratamientos testigos.

F.V	G.L	S.C	C.M	Fc	F α	
					0.05	0.01
Tratamientos	13	372.599609	28.661509	85.066 **	1.965	2.597
Error	42	14.151123	0.336931			
Total	55	386.750732				

** = Altamente significativo
C.V. = 9.07%

Cuadro A.4. Prueba de Tukey al uno por ciento de significancia sobre las medias de respuesta para la variable altura de planta en kalanchoe.

Trat.	Media (cm)	Tukey al 0.01	Trat.	Media (cm)	Tukey al 0.01
1	13.5	a	10	5.69	cde
2	11.29	b	12	4.96	cde
9	6.63	c	3	4.83	de
7	6.28	cd	14	4.78	de
13	6.09	cde	5	4.65	de
11	6.05	cde	6	4.49	e
8	6.01	cde	4	4.40	e

$T_{0.01} = 1.7074$

Cuadro A.5. Análisis de varianza para la variable número de hojas en dos cultivares de kalanchoe.

F.V	G.L	S.C	C.M	Fc	F_{α}	
					0.05	0.01
Tratamientos	13	0.058468	0.004498	9.533 **	1.965	2.597
Error	42	0.019813	0.000472			
Total	55	0.078281				

** = Altamente significativo

C.V. = 9.76%

Cuadro A.6. Prueba de Tukey al uno por ciento de significancia sobre las medias de respuesta para la variable número de hojas en kalanchoe.

Trat.	Media N°	Tukey al 0.01	Trat.	Media N°	Tukey al 0.01
1	80.9	a	5	29.4	c
2	62.4	ab	10	28.6	c
9	43.5	bc	4	27.4	c
13	37.8	bc	8	26.5	c
7	37.4	bc	14	24.3	c
11	33.1	bc	6	21.5	c
3	32.5	bc	12	20.6	c

$T_{0.01} = 32.78$

Cuadro A.7. Análisis de varianza para la variable longitud de hoja en dos cultivares de kalanchoe.

F.V	G.L	S.C	C.M	Fc	F α	
					0.05	0.01
Tratamientos	13	26.482391	2.037107	74.311 **	1.965	2.597
Error	42	1.151352	0.027413			
Total	55	27.633743				

** = Altamente significativo
C.V. = 9.18%

Cuadro A.8. Prueba de Tukey al uno por ciento de significancia sobre las medias de respuesta para la variable longitud de hoja en kalanchoe.

Trat.	Media cm	Tukey al 0.01	Trat.	Media cm	Tukey al 0.01
1	3.62	a	4	1.50	bc
2	3.22	a	13	1.49	bc
7	1.82	b	3	1.42	bc
9	1.81	b	14	1.34	bc
8	1.77	bc	6	1.34	bc
10	1.73	bc	12	1.31	c
11	1.61	bc	5	1.29	c

$T_{0.01} = 0.487$

Cuadro A.9. Análisis de varianza para la variable ancho de la hoja en dos cultivares de kalanchoe.

F.V	G.L	S.C	C.M	Fc	F α	
					0.05	0.01
Tratamientos	13	14.673523	1.128733	52.010 **	1.965	2.597
Error	42	0.911484	0.021702			
Total	55	15.585007				

** = Altamente significativo
C.V. = 9.74%

Cuadro A.10. Prueba de Tukey al uno por ciento de significancia sobre las medias de respuesta para la variable ancho de la hoja en kalanchoe.

Trat.	Media cm	Tukey al 0.01	Trat.	Media cm	Tukey al 0.01
1	2.87	a	13	1.34	bc
2	2.53	a	3	1.28	bc
7	1.59	b	4	1.25	bc
9	1.52	bc	12	1.15	c
8	1.45	bc	14	1.14	c
10	1.43	bc	6	1.12	c
11	1.41	bc	5	1.10	c

$T_{0.01} = 0.433$

Cuadro A.11. Análisis de varianza para la variable contenido de materia orgánica en los sustratos a los nueve meses de biorremediación.

F.V	G.L	S.C	C.M	Fc	F α	
					0.05	0.01
Tratamientos	13	429.367188	33.028244	11.119 **	1.965	2.597
Error	42	124.755859	2.970378			
Total	55	554.123047				

** = Altamente significativo

C.V. = 8.72%

Cuadro A.12. Prueba de Tukey al uno por ciento de significancia sobre las medias de respuesta para la variable contenido de materia orgánica en los sustratos a los nueve meses de biorremediación.

Trat.	Media %	Tukey al 0.01	Trat.	Media %	Tukey al 0.01
1	26.3	a	3	18.6	b
2	25.8	a	12	18.3	b
7	20.7	b	6	18.1	b
8	20.1	b	5	17.8	b
11	19.9	b	4	17.6	b
9	19.6	b	13	17.5	b
10	19.5	b	14	17.3	b

$T_{0.01} = 5.0696$

Cuadro A.13. Análisis de varianza para la variable conductividad eléctrica (dS/m) en los sustratos a los nueve meses de biorremediación.

F.V	G.L	S.C	C.M	Fc	F α	
					0.05	0.01
Tratamientos	13	59.522705	4.578670	68.236 **	1.965	2.597
Error	42	2.818237	0.067101			
Total	55	62.340942				

** = Altamente significativo
C.V. = 7.86%

Cuadro A.14. Prueba de Tukey al uno por ciento de significancia sobre las medias de respuesta para la variable conductividad eléctrica en los sustratos a los nueve meses de biorremediación.

Trat.	Media dS/m	Tukey al 0.01	Trat.	Media dS/m	Tukey al 0.01
9	4.42	a	13	3.24	bcd
10	4.28	a	4	3.19	bcd
6	4.23	ab	14	3.12	d
5	4.07	ab	12	3.10	d
8	3.92	abc	11	3.02	d
7	3.90	abc	2	1.11	e
3	3.59	bcd	1	0.97	e

T_{0.01} = 0.7620

Cuadro A.15. Análisis de varianza para la variable pH de los sustratos a los nueve meses de biorremediación.

F.V	G.L	S.C	C.M	Fc	F α	
					0.05	0.01
Tratamientos	13	2.207520	0.169809	59.135 **	1.965	2.597
Error	42	0.120605	0.002872			
Total	55	2.328125				

** = Altamente significativo
C.V. = 0.71%

Cuadro A.16. Prueba de Tukey al uno por ciento de significancia sobre las medias de respuesta para la variable pH de los sustratos a los nueve meses de biorremediación.

Trat.	Media	Tukey al 0.01	Trat.	Media	Tukey al 0.01
9	7.66	a	4	7.595	a
13	7.62	a	6	7.583	a
7	7.61	a	3	7.537	a
10	7.61	a	5	7.523	a
8	7.61	a	11	7.52	a
14	7.61	a	2	7.05	b
12	7.602	a	1	7.013	b

$T_{0.01} = 0.1576$