

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN QUÍMICA APLICADA**



**“METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN,  
CARACTERIZACIÓN Y PROGRAMACIÓN DEL RIEGO  
EN SUSTRATOS”**

**CASO DE ESTUDIO**

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

**ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA APLICADA**

**OPCIÓN: AGROPLASTICULTURA**

**PRESENTA:**

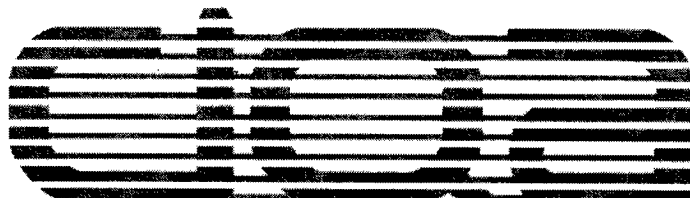
**ROMÁN ANTONIO HERNÁNDEZ HIPÓLITO**



**SALTILLO, COAHUILA**

**DICIEMBRE DEL 2012**

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN QUÍMICA APLICADA**



**“METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN,  
CARACTERIZACIÓN Y PROGRAMACIÓN DEL RIEGO  
EN SUSTRATOS”**

**CASO DE ESTUDIO**

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

**ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA APLICADA**

**OPCIÓN: AGROPLASTICULTURA**

**PRESENTA:**

**ROMÁN ANTONIO HERNÁNDEZ HIPÓLITO**



**CENTRO DE INFORMACIÓN**

**21 ENE 2013**

**ASESOR:**

  
**DR. MARCO ANTONIO ARELLANO GARCÍA**

**RECIBIDO**

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN QUÍMICA APLICADA**



**“METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN,  
CARACTERIZACIÓN Y PROGRAMACIÓN DEL RIEGO  
EN SUSTRATOS”**

**CASO DE ESTUDIO**

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

**ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA APLICADA**

**OPCIÓN: AGROPLASTICULTURA**

**PRESENTA:**

**ROMÁN ANTONIO HERNÁNDEZ HIPÓLITO**

**CENTRO DE INFORMACIÓN**  
21 ENE 2013

**SINODALES:**

  
\_\_\_\_\_  
**DR. ANTONIO CÁRDENAS  
FLORES**

  
\_\_\_\_\_  
**MC. MARÍA ROSARIO  
QUEZADA MARTÍN**

**RECIBIDO**

## DEDICATORIAS

A ti padre Dios, por permitirme un paso más en mi carrera profesional, a ti Madre María por permitirme estar bajo tu regazo y acompañarme siempre.

A mis padres en especial a ti mama, que me has enseñado a vivir, por la educación que me formaron y el empuje que siempre nos has dado, gracias mama, dios te bendiga siempre,

A mis hermanos Tila, Jaqueline, Miguel, Henri, y en especial para ti negrita, siempre estarás en mi corazón.

A mis sobrinos Oscar, Ángel y Emmanuel, a quienes quiero mucho y que con sus gritos y peleas le dan sabor la vida.

A mis amores Alexander y Estefaní, por ser el motor de mi vida.

Para moni (†)

## AGRADECIMIENTOS

Al centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA), por brindarme la oportunidad de realizar esta especialidad.

Al Dr. Marco Antonio Arellano García, por su invaluable apoyo en la asesoría de este trabajo, por sus recomendaciones y paciencia, gracias doctor por atención para la realización de este trabajo.

A mis maestros por compartir sus enseñanzas y experiencia conmigo y con mis compañeros.

A mis compañeros de la especialidad por las aventuras y el recorrido de este año juntos, los mejores deseos.

A mis amigos y compañeros del CIQA, quienes de una u otra forma me apoyaron y me brindaron su amistad haciendo amena mi estancia en este centro de investigación.

<b>CONTENIDO</b>	<b>Página</b>
INDICE GENERAL.....	i
INDICE DE FIGURAS.....	iv
INDICE DE CUADROS.....	v
INTRODUCCION.....	1
OBJETIVOS.....	2
REVICION DE LITERATURA.....	3
SUSTRATO.....	3
Definición de Sustrato.....	3
Sustratos Hortícolas.....	3
Uso de sustratos en México.....	4
Propiedades de los Sustratos.....	4
1.- Propiedades Físicas.....	5
1.1. Densidad Aparente.....	6
1.2. Densidad Real.....	7
1.3. Granulometría.....	7
1.4. Porosidad Total.....	8
1.5. Porosidad de Aire (capacidad de aireación).....	8
1.6 Agua Fácilmente Disponible.....	9
1.7. Agua de Reserva.....	10
1.8. Agua Difícilmente Disponible.....	10
2.- Propiedades Químicas.....	11
2.1. Potencial de Hidrogeno.....	12
2.1.1. Capacidad de amortiguamiento.....	13
2.2. Conductividad Eléctrica.....	13
2.3. Capacidad de intercambio Catiónico.....	14
2.4. Nutrimientos Disponibles en la Solución.....	15
3.- Propiedades Biológicas.....	15
3.1. Compuestos Fitotóxicos.....	16
Criterios de elección de un Sustrato.....	16

Tipos de Sustratos.....	18
1.- Materiales Orgánicos.....	18
1.1. Turba.....	18
1.2. Residuos Urbanos e industriales.....	19
1.3. Orujo de Uva.....	19
1.4. Restos de Cultivos.....	20
1.5. Restos Vegetales sin Composta.....	20
2.- Materiales Inorgánicos (Minerales).....	20
2.1. Lana de Roca.....	21
2.2. Perlita.....	21
2.3. Arena.....	21
2.4. Poliuretano Reciclado.....	22
2.5. Cenizas y Estériles de carbón.....	22
Métodos de Caracterización de Sustratos.....	23
1.- Análisis Físicos de Sustratos.....	23
2.-Densidad Aparente.....	24
3.- Densidad Real.....	25
4.- Porosidad.....	26
5.- Granulometría.....	26
6.- Retención de Humedad.....	27
7.- Materia Orgánica y Cenizas.....	31
Método del Porómetro.....	31
Métodos de programación de riegos en sustratos.....	35
Programación de Riegos.....	35
1.- Asociados al Sustrato.....	37
1.1. Tensiómetros.....	38
1.2. Balanza.....	38
1.3. Bandeja de Demanda.....	39
1.4 Conductividad Eléctrica del sustrato.....	39
2.- Asociado al Cultivo.....	40

2.1. Radiación Solar y nivel de Transpiración.....	40
3.- Asociado al Sistema.....	41
3.1 Tiempos Fijos (Riego por Tiempo).....	41
4.- Asociado a la planta.....	42
4.1. Microvariaciones del Diámetro del tallo.....	42
5.- Integrado.....	43
4.3. Relación sustrato-Planta-clima.....	43
ESTADO DEL ARTE.....	44
1.- Actualización de Métodos de Caracterización de Sustratos.....	44
2.- Actualización de Métodos de Programación de Riegos en Sustratos....	44
CONCLUSIONES.....	47
BIBLIOGRAFIA.....	49



## INDICE DE FIGURAS

<b>Título</b>	<b>Página</b>
Figura 1. Esquema del método utilizado en la determinación de la densidad aparente tomado de Cabot (2012).....	25
Figura 2. Procedimiento para la determinación de la granulometría según Martínez, (1992).....	27
Figura 3. Esquema del equipo utilizado por De Boodt para determinar la curva de liberación de agua de un material, tomado de Cabot (2012).....	28
Figura 4: Esquema de la curva de liberación de agua de un sustrato, Tomado de Calderón y colaboradores (2003).....	30
Figura 5: Esquema del procedimiento de la metodología para determinar propiedades físicas, propuesta por Pire y Pereira (2003).....	34

## INDICE DE CUADROS

<b>Título</b>	<b>Página</b>
Cuadro 1 Características óptimas de liberación de agua de un sustrato según De Boedt y colaboradores (1974).....	11
Cuadro 2: Conductividad Eléctrica $\text{dSm}^{-1}$ , en el extracto de saturación según Bunt (1988).....	14
Cuadro 3: Clasificación básica de los materiales orgánicos e inorgánicos usados como sustratos según Abad y Noguera (2000).....	23

## INTRODUCCIÓN

La agricultura protegida es hoy uno de los componentes esenciales de la actividad agrícola de alta tecnología en todas partes del mundo, esto debido fundamentalmente a su vinculación con la industria agroalimentaria tanto nacional como de exportación y al uso de tecnologías modernas utilizando elementos biotecnológicos, se estima que a nivel mundial existen cerca de 280 mil hectáreas establecidas de frutas y hortalizas en invernadero.

El inicio de la producción de cultivos protegidos a nivel mundial se inicio hace mas de 40 años, en diferentes países como son: Holanda, Francia, Israel, Estados Unidos, Brasil, Italia y Japón entre otros, puesto que han desarrollado avances significativos en este sistema de producción, han obtenido excelentes incrementos en los rendimientos hasta de un 500 por ciento, que los ha llevado a ser altamente competitivos y establecerse en los primeros lugares de exportación de los productos bajo este sistema de producción (Noreña, 2009).

Muñoz (2003) menciona que la Horticultura protegida en México se desarrolla en diferentes regiones y en diversas condiciones agroclimáticas donde se toman en cuenta factores como son el clima, suelo y la calidad del agua, además se tiene estimado que el 80 % de los cultivos bajo condiciones protegidas se establecen en suelo y el resto en algún sustrato (Castellanos, 2004).

Las principales especies cultivadas bajo las técnicas de cultivos protegidos son solanáceas como tomates, pimientos y cucurbitáceas, pepinos, melón, de esta técnica la mayor superficie de cultivo se encuentra en la región occidente del país (Financiera Rural, 2008).

Serrano (2004) comenta que en México la superficie de cultivos de frutos y hojas comestibles de hortalizas bajo sistemas de producción en invernaderos o cultivos protegidos se amplía muy rápido, el sistema de producción más utilizado es el de establecimiento en suelo, y en baja proporción el uso de algún sustrato utilizando soluciones nutritivas circulantes o no circulantes. Para cambiar la exploración de cultivos protegidos en suelos a su establecimiento en algún tipo de sustrato es importante conocer las propiedades físicas, químicas y biológicas, ya que del conocimiento de estas características depende la calidad y cantidad de la producción. Además que es necesario tomar en cuenta la calidad del sustrato a utilizar así como su costo, puesto que un sustrato que no tenga las propiedades tanto físicas, químicas y

biológicas adecuadas para el cultivo, será necesario complementarlo con algún otro material, lo cual podría incrementar la relación costo/ beneficio, generando pérdidas al productor.

En esta revisión se pondrá de manifiesto los conceptos de sustrato, enfatizando la necesidad de caracterizarlos para determinar sus propiedades físicas, químicas y biológicas, las cuales deben de ser adecuadas para el cultivo a establecer en el sustrato, ya que estas características establecerán la relación del contenido de retención de humedad y aireación del mismo así como la forma del contenedor.

Serrano (2004) menciona que para cubrir los requerimientos hídricos de los diferentes cultivos en invernaderos, se requiere de una programación de riegos fijos o riegos a diferentes frecuencias, mediante equipos automatizados, estos riegos son durante todo el día, este requerimiento hídrico se estima utilizando datos de la evapotranspiración, radiación diaria y volumen de lixiviados. Yescas y colaboradores (2011) mencionan que los métodos para determinar el volumen de los riegos en el invernadero, requieren de evaluaciones, datos climatológicos y calibraciones para adecuarlos a las condiciones de operación de cada invernadero.

Por lo anterior la revisión de las metodologías de evaluación, caracterización y de programación del riego en sustratos, permitirá la orientación a la selección de la o las técnicas más apropiadas, con base a su facilidad de manejo y bajo costo de uso y fácil adquisición. Por todo ello es importante hacer un análisis de todas estas metodologías y realizar una selección de las más apropiadas para su utilización y aplicación.

## **OBJETIVOS**

- Hacer una revisión bibliográfica del estado del arte de las metodologías de evaluación, caracterización y programación del riego en sustratos.

- Exponer las tendencias, nuevas tecnologías y soluciones a problemas de caracterización y programación de riegos en sustratos.

## **REVISIÓN DE LITERATURA SUSTRATOS**

### **Definición de sustratos**

Calderón y Cevallos (2001) mencionan que un sustrato es un material sólido cuyas funciones son: anclar la planta, proteger las raíces de la luz, permitir la aireación, contener y retener el agua y los nutrientes requeridos para el desarrollo de la planta. Serrano (2004) comenta que un sustrato es cualquier material sólido que se diferencia del suelo, la naturaleza de este sustrato puede ser natural u obtenido mediante síntesis o de material residual de alguna actividad humana el cual colocado en un contenedor desempeña un papel de soporte similar al suelo, dando las condiciones al sistema radical para su anclaje y obtención de nutrientes mediante soluciones nutritivas. Además Medrano (1995) menciona que el sustrato es un medio que está dividido en tres fases: la fase sólida, la cual está constituida por las partículas del sustrato, la fase líquida, formada por el agua contenida y retenida por el sustrato la cual contiene nutrientes disueltos y la fase gaseosa, constituida por los espacios del sustrato ocupados por el aire. Huacuja (2009) dice para que un material se considere un sustrato debe de cumplir las diferentes funciones como son: dar soporte y protección a las raíces de la planta, retener el agua y contener el aire necesario, así como dejar disponibles los nutrientes para el desarrollo de la planta.

### **Sustratos hortícolas**

Valenzuela y Gallardo (2002) comentan que el uso de los materiales utilizados como sustratos tienen su origen en el cultivo en contenedores, una vez que se introdujo este sistema de producción se desarrolló la necesidad de un cambio del cultivo en suelo al cultivo en contenedores usando diferentes tipos de sustratos, estos sistemas de producción de expandieron a partir del siglo XX en Europa posteriormente en Estados Unidos, pues se observó que se disminuían las pérdidas en los cultivos, provocadas por los patógenos del suelo.

## **Uso de sustratos en México**

Flores (2008) menciona que en México los sustratos usados para la producción de plantas en contenedores lo constituyen la tierra de monte y la turba solos o mezclados con otros materiales como tezontle, piedra pómez o algún material de origen sintético. García y colaboradores (2001) comentan que la tecnología desarrollada en cultivos protegidos incluye el uso de sustratos, programación de riego y una nutrición balanceada. En muchos países como en México el uso de diferentes materiales como sustratos se obtiene de forma tradicional, generalmente por el método de pruebas y error, la cual consiste en probar materiales o mezclas de una manera desproporcionada, para después seleccionar aquellas con las que el cultivo tubo mejor respuesta de desarrollo sin ser la optima para este, con esta metodología no se explotan las propiedades de los materiales y las diferentes mezclas posibles a realizarse, debido al tiempo que se requiere para evaluar los sustratos, los costos así como otros aspectos que muestran la complejidad en las formulaciones de las mezclas de materiales para sustratos (Zamora y colaboradores, 2005), además Martínez y colaboradores (2011) mencionan que los materiales utilizados como sustratos en México en mayor proporción son obtenidos localmente ya sea orgánicos como la fibra de coco o minerales como el tezontle, hasta los materiales comerciales como son la lana de roca y perlita.

### **Propiedades de los sustratos**

Masaguer y colaboradores (2006) mencionan que un material utilizado como sustrato debe de estar constituido por tres fracciones:

La fracción solida: la cual determina el soporte mecánico del sistema radical por lo tanto de la planta.

La fracción liquida: la cual determina la cantidad y disponibilidad del agua a la planta así como la interacción con los nutrientes.

La fracción gaseosa: la que determina el intercambio de oxígeno y el dióxido de carbono en el área radical

Por lo que se hace necesario tener el conocimiento de las propiedades físicas, químicas y biológicas de los materiales a utilizar como sustratos, ya que estos se ven condicionados en cultivos en contenedor.

Abad y Noguera (2000) comentan para elegir un material como sustrato se tienen que considerar aspectos medioambientales, por lo que se tienen que conocer la durabilidad del material y su posibilidad de ser reutilizado en otro sistema de producción, ya que materiales minerales transformados o modificados por un proceso industrial como la lana de roca o la perlita, tienen problemas al ser desechados ya que no son biodegradables. Uno de los materiales utilizados como sustrato por productores de la región del centro de México es el tezontle rojo este es un material de origen volcánico pero de los menos conocidos en sus propiedades físicas y químicas, algunas de sus características fueron reportadas por Martínez en el (2007), las cuales tienen valores menores a las reportadas por Abad y colaboradores en el (2004) ya que tienen valores bajos en espacio poroso total, baja capacidad de aireación, bajo porcentaje de agua fácilmente disponible, además de una alta retención de humedad de humedad. Lo que puede ocasionar anoxia en el área radical de la planta (San Martín 2011), Valenzuela y Gallardo (2002) mencionan que no es posible que un solo sustrato cumpla con todas las propiedades que el cultivo requiere, por lo que es probable que se tenga que mezclar con otro material.

### **1.- Propiedades físicas**

Terés (2001) comenta las propiedades físicas de los materiales usados como sustratos son importantes debido a que una vez que el sustrato se encuentra dentro del contenedor y la planta establecida, es casi nulo poder modificar las propiedades de este, por lo tanto es fundamental estudiar estas características, de ello depende conocer el espacio poroso, el cual condicionara la programación del riego. Además el manejo y transporte del material a utilizar como sustrato se ve condicionado por la relación de peso-volumen, así como su densidad aparente, la cantidad de agua retenida y la pérdida de volumen mediante el uso.

Serrano (2004) menciona las propiedades físicas a caracterizar de un material a usar como sustrato son:

Densidad aparente.

Densidad real.

Granulometría.

Porosidad total.

Porosidad de aire.

Porosidad de agua.

Agua fácilmente disponible.

Agua de reserva.

Agua difícilmente disponible.

Estas características físicas son elementales en un material a utilizar como sustrato, ya que si este no cumple con las propiedades deseables para el cultivo se tiene la opción de cambiarlo o mezclarlo con otro material antes de colocarlo en el contenedor y establecer la planta.

### **1.1. Densidad aparente**

Fernández (2010) menciona que la densidad aparente se refiere a las partículas del sustrato sin tomar en cuenta el espacio poroso o la relación que existe entre el peso de la partícula del sustrato y el volumen ocupado en el contenedor, su valor se expresa en  $\text{g/cm}^3$ .

Esta característica se puede medir dentro del contenedor a utilizar, el contenedor de un volumen ya conocido se pesa vacío, se llena del material a utilizar como sustrato y se pesa nuevamente. Al peso obtenido del contenedor lleno se le resta el peso del contenedor vacío, el dato resultante se divide por el volumen conocido del sustrato, en los cultivos de invernaderos se recomienda utilizar sustratos con densidades aparentes con valores de  $< 0.5 \text{ g/cm}^3$ , principalmente por el costo del transporte y la facilidad del manejo en el invernadero (Serrano 2004).



## **1.2. Densidad real**

Ansorena (1994) menciona que la densidad real se obtiene del peso del material a utilizar como sustrato que ocupa en el contenedor, es decir es el peso total sin tomar en cuenta el volumen de los poros dentro del material y entre las partículas del mismo, esta medición se obtiene mediante picnometría.

Burés (1997) comenta que la densidad real de un material a utilizar como sustrato es la relación entre el peso de las partículas y el volumen real que este ocupa, donde se incluyen los poros cerrados, no considerando los poros intraparticulares ni los poros interparticulares, por lo que el valor que se obtiene es propio del material, por lo que no depende del tamaño de la partícula como ocurre en la densidad aparente.

## **1.3. Granulometría**

Serrano (2004) menciona que la granulometría se determina por la distribución de las partículas del material utilizado como sustrato, ya que las partículas del sustrato no son de formas esféricas y no presentan uniformidad en su tamaño, por lo que la porosidad tiende a aumentar a medida que lo hacen las partículas del sustrato o viceversa, puesto que los espacios interparticulares dependen del tamaño de la partícula del sustrato, la granulometría se caracteriza por medio de un tamizado, recogiendo los fragmentos retenidos en el tamiz y tomando su peso, esta muestra de materia tamizada debe de estar seca al aire o en la estufa, las fracciones obtenidas se expresa en base al porcentaje en relación de peso inicial menos el peso final.

Raviv y colaboradores (1986) mencionan que el crecimiento de la planta se ve afectado por la tamaño de la fracción de las partículas ya que esta determina el tamaño y cantidad de los poros, el ordenamiento del tamaño de las fracciones, del contenido de los poros se determina el contenido de aire y agua del sustrato a diferentes contenidos de humedad y para establecer un balance entre el contenido de humedad y el de aire se recomienda tener fracciones con tamaño de entre 0.5mm y 1mm.

#### **1.4. Porosidad total**

Serrano (2004) menciona que el espacio poroso total es generado por la posición de las partículas del material a utilizar como sustrato y los espacios porosos internos de las partículas, estos espacios pueden estar conectados atravesando la partícula o pueden ser cerrados, esta última característica, no es recomendada para el cultivo pues no son muy efectivos para contener aire y agua, además de que estas estén disponibles para la planta, por lo que recomienda que el material a utilizar como sustrato tenga al menos un 85% de porosidad total.

La porosidad total se puede medir directamente en el contenedor mediante la saturación con agua, este volumen conocido equivale a la porosidad total, otra forma es utilizando la fórmula:  $PT = (1 - D_a/D_r) \times 100$ , donde:

PT: porosidad total.

Da: densidad aparente.

Dr: densidad real.

Fernández (2010) comenta que los poros contenidos en el sustratos se clasifican como poros capilares y poros no capilares, los primeros tienen un diámetro  $<30 \mu\text{m}$  lo que le permite retener agua y los no capilares tienen un diámetro  $>30 \mu\text{m}$  los cuales no tienen la capacidad de retener agua pues se vacían al drenar el agua del sustrato, esta porosidad puede ser intraparticular ubicada dentro de la partícula del sustrato y la interparticular la cual se refiere a los poros contenidos entre las partículas. En el primer caso los poros pueden estar interconectados por lo que existe comunicación entre ellos y la porosidad es abierta, además puede contener poros cerrados los cuales no tienen comunicación entre ellos, estos poros no tienen influencia en el contenido de agua y aire dentro del sustrato.

#### **1.5. Porosidad de aire (capacidad de aireación)**

Serrano (2004) menciona que se refiere al volumen de aire contenido dentro del sustrato después de que este se satura con agua y drenado posteriormente, estos poros

proporciona oxígeno para la respiración de las raíces de las plantas, es equivalente al volumen de agua que se desplaza en un embudo de succión a una columna de agua de 10 cm de altura.

Fernández (2010) comenta que la porosidad de aire es la porción de aire dentro en el sustrato después de haber sido saturado y drenado a una tensión de 10 cm de columna de agua, además Abad y colaboradores (2004) mencionan que los niveles de contenido de capacidad de aireación debe de estar entre el 20 y el 30% del volumen del sustrato.

Fernández (2010) menciona que las plantas para su actividad metabólica y su crecimiento requieren de oxígeno, este entra por las raíces por medio de difusión entre las partículas de agua, como la velocidad de difusión del oxígeno es 104 veces menor que el del aire, es de mucha influencia el espesor de la lamina de agua, por ello la distribución de los poros es fundamental para conocer el contenido de agua y aire en los sustratos.

### **1.6. Agua fácilmente disponible (AFD)**

Serrano (2004) comenta que es el agua contenida en el sustrato a una tensión 10cm y 50cm de columna de agua, esta agua está disponible para las plantas ya que se requiere poca energía por parte de las raíces para extraerla, así mismo Fernández (2010) menciona que es la diferencia del volumen de agua retenida en el sustrato después de ser saturada y drenada a una tensión de 10cm de columna de agua y el volumen de agua contenida en el sustrato después de ser sometida a una tensión de 50cm de columna de agua.

Bunt (1988) comenta cuando el material utilizado como sustrato tiene una capacidad de retención de agua fácilmente disponible muy baja puede deberse a los siguientes factores:

- Un bajo porcentaje de porosidad total.
- Partículas con poros muy grandes, por lo que agua se drena.
- Alto porcentaje de poros muy pequeños por lo que el agua no está disponible para la planta.
- Por una combinación de los factores anteriores.

### **1.7. Agua de reserva (AR)**

Fernández (2010) comenta que es el volumen de agua contenido en el sustrato después de saturado y drenado a una tención de 50cm a 100cm de columna de agua. Los niveles óptimos del volumen del contenido de agua están entre 4 y 9 % Abad y colaboradores (2004) mencionan que estos límites de 100cm de tención fueron establecidos por De Boot y colaboradores en 1974.

Serrano (2004) menciona que es el contenido de agua dentro del sustrato después de ser sometido a una tención de 50cm a 100cm de columna de agua, a esta tención el agua puede ser adsorbida por las raíces de la planta sin embargo la planta requiere de mayor energía para extraerla.

### **1.8. Agua difícilmente disponible (ADD)**

Serrano (2004) menciona que es el agua retenida en los poros del sustrato a una tención de más de 100cm de columna de agua, donde el agua difícilmente puede ser aprovechada por la planta

San Martin (2011) comenta que es el porcentaje de agua contenida en los poros del sustrato a una tención mayor de 100cm de columna de agua. Este tipo de agua no la aprovechan las plantas

Fernández (2010) describe el contenido de humedad y la liberación de agua de un sustrato como:

- Agua totalmente disponible (ATD)
- Agua fácilmente disponible (AFD)
- Agua de reserva (AR)
- Agua difícilmente disponible (ADD)

Cuadro 1: Características óptimas de liberación de agua de un sustrato según De Boodt y colaboradores (1974).

La Capacidad de aireación (CA)	Debe ser superior al 15%, ya que menor presentaría una aireación limitante lo que representaría riesgos de asfixia radical y posible muerte de la planta
El agua fácilmente disponible (AFD)	Debe de estar entre un rango del 20 al 30% para un buen manejo del cultivo. Si el valor es inferior al 15%, se debe regar con más frecuencia.
El agua de reserva (AR)	Debe de ser del 4 al 10% para no tener problemas de manejo.
El agua difícilmente disponible (ADD)	No debe de ser inferior al 10% porque habría un riesgo de déficit hídrico si no se riega a tiempo.
El agua disponible (AD)	Debe de ser de un 25 a 40% para un fácil manejo.

## 2.- Propiedades químicas

Cadahia (2000) comenta que las propiedades químicas de los materiales utilizados como sustratos dependen de la relación entre las propiedades solidas y la fracción líquida del mismo, pues algunos tienden a modificar en mayor o menor medida la composición química de la solución nutritiva que se le aplica, particularmente del contenido de los elementos necesarios para la nutrición de la planta.

Raviv y colaboradores (1986) menciona que las propiedades químicas de los sustratos influyen en la transferencia de materia entre el material utilizado y la solución nutritiva aplicada, la característica química del sustrato puede ser modificada o corregida con el manejo adecuado del riego, no así las características físicas, los materiales orgánicos contenidos en los sustratos contribuyen al intercambio químico, debido a su formación y otras sustancias derivadas de la degradación del mismo.

Serrano (2004) comenta que las propiedades químicas a determinar en los materiales a usar como sustratos son:

- Potencial de hidrogeno (pH).
- Conductividad eléctrica.
- Capacidad de amortiguamiento.
- Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

- Nutrientes disponibles es la solución.
- Elementos pesados y compuestos fitotóxicos.

## **2.1. Potencial de Hidrogeno (pH)**

Cadahia (2000) comenta las plantas se desarrollan en un amplio intervalo de potencial de hidrogeno contenido en el sustrato sin sufrir ningún tipo de alteración fisiología visible, esto cuando se suministran los nutrientes en cantidades requeridas para el desarrollo de la planta, sin embargo en condiciones de alta acides o alcalinidad el crecimiento y el desarrollo de las plantas se ven reducidos considerablemente, el potencial de hidrogeno influye de manera importante en la disponibilidad de los elementos nutritivos, la capacidad de intercambio catiónico y la actividad biológica dentro del sustrato, con un potencial de hidrogeno inferior a 5 se pueden presentar deficiencias de nitrógeno (N), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y con un potencial de hidrogeno superior a 6,5 la disponibilidad de hierro (Fe), fósforo (P), manganeso (Mn), boro (B), zinc (Zn), y cobre (Cu) disminuye.

Baixauli y colaboradores (2002) mencionan que los sustratos orgánicos tienen una mayor capacidad de amortiguación que los materiales inorgánicos para mantener la estabilidad del potencial de hidrogeno, por lo general el nivel aconsejado de potencial de hidrogeno para un cultivo en sustrato se sitúa entre los valores de 5.5 y 6.8 ya que en este rango se encuentran disponible en una forma asimilable la mayor parte de los nutrimentos.

Masaguer y colaboradores (2006) comentan que los requerimientos y la disponibilidad de los nutrientes para las plantas definen el potencial de hidrogeno optimo para el medio del cultivo, generalmente con tendencias a valores ligeramente ácidos, además Escudero (1993) menciona que los niveles recomendados son ligeramente ácidos con valores de 5.5 a 6.8, Serrano (2004) comenta los valores de potencial de hidrogeno requeridos son de un de 5.5 a 6.5.

### **2.1.1. Capacidad de amortiguamiento**

San Martín (2011) menciona que la capacidad de amortiguamiento de un material utilizado como sustrato se caracteriza a través de una curva de neutralización, si el material tiene un potencial de hidrogeno ácido, este se acondiciona agregando volúmenes conocidos de una base hasta conseguir el potencial de hidrogeno deseado, en cambio si el sustrato contiene un potencial de hidrogeno alcalino se le agrega un ácido diluido hasta llegar al rango deseado, con esta curva se determina el corrector y la cantidad necesaria para tener el potencial de hidrogeno óptimo para el cultivo.

### **2.2. Conductividad Eléctrica**

Es la concentración de las sales presentes en la solución nutritiva, un alto contenido de sales en la solución puede provocar riesgos de toxicidad cuando algunas de estas sales en altas cantidades, pueden causar un aumento en el potencial osmótico provocando problemas de adsorción de agua en las raíces, este en el periodo de verano este efecto se ve muy marcado debido al aumento de la tasa de transpiración, la conductividad del sustrato aumenta cuando está en el contenedor debido a la presencia de fertilizantes poco solubles o por que el aporte de sales es superior al absorbido por la planta o por la descomposición del sustrato, este tipo de causas se pueden prevenir o disminuir conociendo los requerimiento nutritivos de la planta y las condiciones óptimas para su desarrollo.

Fernández (2010) menciona que el exceso o aumento del contenido de sales se previene o corrige con lavados con riegos controlados, además de otros métodos como el mantener la humedad constante del sustrato, no aplicar fertilizantes en medio seco, utilizar mallas para disminución del estrés o bajar las temperaturas del medio, aumentando la humedad relativa del ambiente.

Cuadro 2: Conductividad eléctrica  $\text{dSm}^{-1}$  en el extracto de saturación según Bunt (1988).

conductividad eléctrica ( $\text{dSm}^{-1}$ )	Observación
< 0.74	muy bajo
0.75 a 1.99	Apropiado para la germinación de semillas y crecimiento de plántulas.
2,00 a 3.50	Satisfactorio para la mayoría de las plantas.
>3.50	Elevado para la mayoría de las plantas.

### 2.3. Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)

La capacidad de intercambio catiónico el numero de cationes absorbidos por la unidad de peso del material utilizado como sustrato, otra manera de mencionarlo es que es la capacidad del sustrato para retener los cationes e intercambiarlos con la solución nutritiva, la capacidad de intercambio catiónico se expresa en miliequivalentes por unidad de peso o volumen,  $\text{mEq}/100\text{g}$ . O  $\text{mEq}/100\text{cc}$ ; Las nuevas tecnologías en los sistemas de riegos, permite formular diversas soluciones nutritivas las cuales son aplicadas en los cultivos sin suelo (Baixauli y colaboradores 2002).

Serrano (2004) menciona que la capacidad de intercambio catiónico se determina por el método de acetato de amonio con el potencial de hidrogeno deseado en el sustrato para el desarrollo del cultivo, en algunos sistemas de producción los productores utilizan sustratos inertes o poco activos, la capacidad de intercambio catiónico deseada para los cultivos es de  $>20\text{cmol}/\text{kg}^{-1}$ .

Fernández (2010) comenta la capacidad de intercambio catiónico esta relaciona con el potencial de hidrogeno, entre más alto sea el potencial de hidrogeno aumenta la capacidad de intercambio catiónico, por lo tanto esta relación depende del número de riegos así como el volumen aplicado



Abad y colaboradores (1993) mencionan si la aplicación del riego es permanente no existe ningún beneficio en la capacidad de absorción de nutrientes por lo que en este caso deberán utilizar sustratos de material inerte con baja o ninguna capacidad de intercambio catiónico, por el contrario en sistemas con riegos intermitentes se utilizan sustratos con capacidad de intercambio catiónico de moderada a elevada con valores superiores a  $>20\text{mEq}/100\text{ g}$ .

#### **2.4. Nutrimientos disponibles en la solución**

Burés (1997) comenta la mayor parte de los materiales minerales utilizados como sustratos no se descomponen química o biológicamente, por lo que se consideran ausentes de algún tipo de nutriente, al contrario de los materiales orgánicos los cuales se diferencian por contenido de nutrientes, algunos sustratos orgánicos tienen un nivel bajo de nutrientes asimilables al contrario de otros que presentan elevados contenidos de nutrientes asimilables esta propiedad depende del tipo de material y del proceso de compostaje.

Raviv y colaboradores (1986) menciona que para el crecimiento y desarrollo adecuado de la planta, es necesario aplicar una fertilización de base para añadir nutrientes adicionales. La cantidad y la frecuencia de la fertilización va a depender de la capacidad de intercambio catiónico del material utilizado como sustrato y de la frecuencia del riego (Abad, 1995; Abad y Noguera, 1998).

Cadahía y Fernández (1992) comentan que el desarrollo óptimo del cultivo sobre sustratos ya sean orgánicos o inorgánicos se alcanza con una aplicación de fertilizantes de liberación lenta complementada con una fertirrigación.

### **3.- Propiedades biológicas**

Masaguer y colaboradores (2006) mencionan que la estabilidad biológica de un sustrato está basada en el tiempo de velocidad de degradación, este problema se ve marcado cuando se

utilizan materiales orgánicos mal compostados, lo que provoca la falta de estabilidad en el sustrato lo que incide en la disposición de nutrientes para la planta.

Raviv y colaboradores (1986) comenta que los sustratos orgánicos tienden a ser susceptible a la descomposición biológica, este efecto se ve marcado por las condiciones ambientales dentro de los invernaderos, el grado de descomposición del sustrato influye en la disposición de nitrógeno y oxígeno, además de liberar sustancias fitotóxicas y reducción del volumen del sustrato, por lo que se debe tener en consideración el grado de descomposición del sustrato para reducir los efectos en las plantas.

### **3.1 Compuestos fitotóxicos**

Serrano (2004) menciona que los sustratos orgánicos contienen en baja o altas concentraciones sustancias fitotóxicas (compuestos fenólicos) por lo que es necesario conocer la concentración de estos compuestos en el material a utilizar como sustrato, ya que influyen en el desarrollo de la planta, los materiales orgánicos con altas concentraciones de compuestos fenólicos inhiben el crecimiento de las plantas.

#### **Criterios de elección de un sustrato**

Según Terés (2001) las principales funciones de un material utilizado como sustrato son:

- Proporcionar soporte a las raíces de las plantas.
- Tener disponible el agua y los nutrientes necesarios para el desarrollo de las plantas.
- Proporcionar el oxígeno necesario para las raíces.

Abad y Noguera (1998) comentan existen una gran variedad de materiales que se pueden usar como sustratos. Para la elección de uno u otro material se deben tomar en cuenta los siguientes factores:

<p>El suministro y la homogeneidad del sustrato.</p>	<p>Al emplearse dinero y esfuerzo en la optimización de un sistema de producción en sustrato, se requiere de un material homogéneo y de alta disponibilidad, pues los distintos materiales usados como sustratos tienen sus propios requerimientos de riego y fertilización, por lo que un cambio en la calidad del sustrato puede alterar el sistema de producción.</p>
<p>Calidad y finalidad de la producción</p>	<p>Los principales objetivos del sistema de producción en sustrato es tener plantas de buena calidad, crecimiento rápido y vigoroso al traslado, por lo que es importante conocer la finalidad de la producción al momento de elegir un sustrato.</p>
<p>El costo del material</p>	<p>En un sistema de producción en sustratos, el costo de los materiales empleados son elevados, donde se consideran factores como son el traslado, la disponibilidad y el tipo de material a utilizar, por lo que el emplear materiales locales reducen el costo de la producción</p>
<p>Las propiedades del material</p>	<p>Al conocer el objetivo de la producción, los costos así como la disponibilidad del material a utilizar como sustrato, es fundamental conocer las propiedades físicas, químicas y biológicas, con el objetivo de tener una producción óptima.</p>
<p>Experiencia del uso de sustratos en la producción de cultivos</p>	<p>La aplicación y uso de sustratos para la producción agrícola, se inició en diversos países, generalmente lejanos, por lo que hay marcadas diferencias en el desarrollo de técnicas de invernaderos, manejo de las condiciones climáticas, calidad de agua para riego, especies y variedades cultivadas, por lo que el productor se ve obligado a adquirir capacitación mediante la transferencia de tecnología por parte de centros de investigación a nivel regional.</p>

## **Tipos de sustratos**

Según Abad (1992) las funciones del sustrato dentro de un sistema de producción sin suelo es el de asimilar un medio ideal para el desarrollo y crecimiento de la plantas proporcionando un medio de anclaje para las raíces.

Abad y colaboradores (2004) mencionan los materiales a utilizar como sustratos se clasifican en función de diversos criterios, por lo que se requiere seleccionar las propiedades óptimas para su uso en la producción hortícola dependiendo del tipo de cultivo y sistema de producción (Abad y Noguera, 1998).

### **1 Materiales Orgánicos**

Terés (2001) clasifica los materiales orgánicos a utilizar como sustratos de la siguiente manera:

1. De origen natural: Las principal característica de estos materiales es que tienen un periodo de descomposición biológica, de los materiales más empleado como sustrato es la turba.
2. De síntesis: son materiales obtenidos por unión de dos compuestos principalmente polímeros orgánicos no biodegradables, los cuales son unidos por alguna reacción química, como la espuma de poliuretano, Poliestireno expandido, etc.
3. Subproductos y residuos de actividades productivas: los materiales obtenidos de este tipo de procesos se deben procesar con algún tipo de proceso de compostaje, hasta obtener las características deseadas para su uso como sustrato dentro de este grupo de materiales se encuentran principalmente la cascarilla de arroz, estiércoles, cortezas de arboles, virutas, fibra de coco, corcho, lodos de depuración, etc.

#### **1.1 Turba**

Según Strasburger y colaboradores (1986) comentan que las turbas se forman de restos de musgos y plantas superiores, mediante un proceso de carbonización, en ausencia de oxígeno, este proceso le da la propiedad de mantener su estructura por periodos largos de

tiempo. Por formarse en diferentes tipos de ecosistemas el proceso da lugar a materiales con diferentes propiedades, por lo que las turbas se clasifican de la siguiente manera:

Turbas bajas o eutróficas	Material descompuesto con propiedades no deseables para su uso en cultivos en contenedor, las cuales tras un proceso de curado se pueden utilizar.
Turbas altas u oligotróficas	Este material se forma en zonas frías, con una alta humedad y precipitación, en función de proceso de formación se pueden encontrar turbas rubias y turbas negras, las cuales una vez formadas mantienen su estructura y son ideales para utilizar como sustrato.
turbas de transición	El material de este tipo de posee propiedades intermedias a las anteriores, por lo que se puede utilizar en la producción en contenedores.

Por otra parte el uso indiscriminado de los depósitos de turbas causa un fuerte impacto ambiental, ya que sus reservas son no renovables.

### 1.2. Residuos urbanos e industriales

Burés (1997) comenta que estos materiales por su contenido de materia orgánica requieren procesos de deshidratación para ser estabilizados, estos procesos dependen de su estado de procedencia, para su uso como sustrato es fundamental conocer el contenido de metales pesados pues estos pueden causar problemas de fitotoxicidad.

### 1.3. Orujo de uva

Según Burés y Martínez (1983) mencionan que el orujo de uva son desechos de la industria alcoholera, se forma por los desechos de la piel y las semillas de las uvas requiere de un tratamiento previo dependiendo del contenido de cada material y de la variedad de la uva para tener un buen proceso de compostaje, una vez compostados el material presenta

condiciones de buena aireación, alta capacidad de intercambio catiónico y alta cantidad de agua fácilmente disponible.

#### **1.4. Restos de cultivos**

Mazuela y colaboradores (2005) comenta que el uso de compostas de restos de cultivos como sustratos es una alternativa ecológica viable, ya que con un tratamiento previo de lavado se puede usar sin causar pérdidas en la producción, comparándose al uso de sustratos como la lana de roca y fibra de coco.

#### **1.5. Restos vegetales sin Compostar**

Burés (1997) menciona que en diversos estudios se ha comprobado el uso de la cascara de almendra, cascarilla de arroz, corteza de pino, fibra de coco y otros materiales vegetales, como sustratos para la producción de plantas hortícolas así como para plantas ornamentales, aunque son materiales con baja disponibilidad de nutrientes y de media a baja capacidad de intercambio catiónico, con la adición de fertirriego o fertilizantes de liberación lenta es factible su uso como sustratos.

### **2 Materiales Inorgánicos (Minerales)**

Terés (2001) clasifica los materiales inorgánicos a utilizar como sustratos de la siguiente manera:

1. De origen natural: este material se obtiene a partir de rocas de diversos orígenes, los cuales mediante tratamientos físicos sencillos se modifican ligeramente a partículas pequeñas, otra característica es que no son biodegradables como las arenas, gravas, tierra volcánica, etc.
2. Transformados o tratados industrialmente: su origen es de rocas o minerales los cuales mediante tratamientos químicos o físicos modifican sus características iniciales notablemente, como la arcilla expandida, lana de roca, perlita, vermiculita, etc.

3. Residuos y subproductos industriales: materias de desechos procedentes de actividades industriales, como las escorias de alto horno, carbón estéril, ladrillo molido, etc.

### **2.1. Lana de roca**

Burés (1997) menciona que la lana de roca es un material mineral modificado industrialmente, este material cuyo origen de roca basáltica es fundida a 1600°C, la mezcla fundida se coloca sobre unas ruedas giratorias donde se forman las fibras solidificadas, en este proceso se agregan los aditivos que le dan la propiedad de absorber o repeler el agua, obteniéndose como producto final en forma de planchas, bloques o gránulos, este material fue descubierto en 1965 en Dinamarca, donde se aplica en la construcción como aislante térmico, este material una vez desechado causa problemas medioambientales por no ser biodegradable lo cual es una de sus principales desventajas.

### **2.2 Perlita**

Abad y colaboradores (2004) comentan que la perlita es un silicato de aluminio este es un material de origen volcánico, componiéndose principalmente en rocas vítreas que son formadas por un rápido enfriamiento lo que da lugar a un material amorfo con un contenido de 2 a 5 % de agua combinada, para obtener la perlita el material es tratado con altas temperaturas por lo que el agua combinada con las partículas de roca vítrea se evapora provocando una expansión del material dando como resultado un material de baja densidad.

La perlita está compuesta por una superficie rugosa y una estructura celular cerrada, por lo que el agua es retenida solo en la superficie y en los poros interparticulares, lo que le da propiedades físicas de poca capacidad de retención de agua y una alta aireación, químicamente es inerte, no se descompone pero es mecánicamente frágil por lo que se rompe con facilidad, pudiendo provocar condiciones de exceso de humedad en el cultivo.

### **2.3 Arena**

La arena es un material de composición silíceo variable, procede de canteras, ríos o arroyos, los dos primeros son de partículas angulosas y homogéneas, sus características físicas dependen de su granulometría, se consideran inertes esto debido a la ausencia de poros

intraparticulares, para su uso como sustrato debe de estar libre de arcillas y limos con ello se evita que el riego las arrastre y se depositen en el fondo de los contenedores, lo que afectaría las propiedades hidrofísicas del sustrato, no debe contener carbonatos ya que puede aumentar el potencial de hidrogeno provocando desordenes nutricionales a la planta

Abad y colaboradores (2004) mencionan que la disponibilidad de la arena es buena aunque se puede pensar en un futuro que se convierta en un problema de impacto ambiental debido a su extracción inmoderada. Su peso es una desventaja pues si se transporta desde largas distancias se eleva su costo (Burés, 1997).

Tiene un comportamiento hídrico similar a la perlita, aunque sus propiedades químicas son distintas, su capacidad de intercambio catiónico es parecido al de los sustratos orgánicos, puede contener potasio y magnesio el cual es asimilable para las plantas, lo que lo hace químicamente activo, se comprime con facilidad lo que provoca que se disgregue por lo que se colapsa fácilmente, perdiendo su estructura, provocando disminución en sus propiedades físicas.

#### **2.4. Poliuretano reciclado**

Este material se obtiene por una reacción química adicionando un agente espumante el cual homogeniza y cohesiona los recortes de espuma las cuales se tritura y comprimen hasta que se obtiene la densidad requerida, donde se forman planchas que se recortan a la medida deseada utilizándose como sustituto de lana de roca, puede durar hasta 5 años en cultivo activo, se esteriliza con vapor, una vez desechado se puede reciclar, tiene una densidad de 80 kg de materia seca por m<sup>3</sup>, además de una capacidad de aireación alta superior a la de la lana de roca, retiene poco agua requiriéndose riegos frecuentes.

#### **2.5. Cenizas y estériles de carbón**

Menzies y Atkien (1996) comentan que las cenizas esta compuestas de restos procedentes de desechos de la actividad minera, presentan diferentes cualidades dependiendo



del tratamiento de lavado o combustión al que sea sometido, las cenizas procedentes de un proceso de combustión se pueden mezclar con turba o arena con esto aumentan su capacidad de retención de agua disminuyendo la cantidad de cenizas a utilizar como sustrato principal, con este tipo de mezclas se han tenido buenos resultados en la producción de cultivos hortícolas y ornamentales.

Cuadro 3: Clasificación básica de los materiales orgánicos e inorgánicos usados como sustratos según Abad y Noguera (2000).

<b>Materiales Inorgánicos</b>		
De origen natural	Transformados o tratados	Residuos industriales
Arenas, rocas volcánica, grava, etc.	Arcilla expandida, perlita, lana de roca, vermiculita, etc.	Escorias de carbón, ladrillo molido etc.
<b>Materiales orgánicos</b>		
De origen natural	De síntesis	De residuos de actividades productivas
Turbas	Espuma de poliuretano, Poliestireno expandido, etc.	Residuos sólidos urbanos, cascarilla de arroz, fibra de coco, etc.

## **Métodos de caracterización de sustratos**

### **1.-Análisis físico de sustratos**

Masaguer y colaboradores (2006) comentan que al seleccionar un sustrato se deben conocer las propiedades físicas concretas, ya que a lo largo del cultivo suele haber una degradación física del sustrato al desarrollo de las raíces que ocupan el espacio poroso, esto repercute en las propiedades físicas dentro del contenedor, modificando propiedades como la granulometría, densidad, porosidad o distribución del agua y aire en el espacio poroso, es por ello que es importante conocer los requerimientos del cultivo, sistema de manejo así como el riego a utilizar.

## 2.- Densidad aparente

Cabot (2012) menciona que la densidad aparente es la relación entre la masa o el peso de las partículas y el volumen aparente que éstas ocupan es decir, considera el volumen de espacio poroso que existe entre las mismas, se expresa generalmente en  $\text{gcm}^{-3}$  o en  $\text{Kgm}^{-3}$ . La metodología utilizada para las determinaciones obtenidas por Cabot (2012), está basada en la Norma UNE-EN 13041, aunque en este caso ésta se ha fundamentado también en los procedimientos descritos por De Boodt y colaboradores en 1974 y Martínez en 1992.

A continuación se describe brevemente el procedimiento planteado por Cabot (2012):

Se utilizan anillos de acero inoxidable de 3 y 4 cm de altura y 82 mm de diámetro y tela de nylon. Un extremo de la anillo de 4 cm, de volumen conocido ( $V_1$ ), se cubre con tela de nylon y se determina el peso del conjunto (A) con una precisión de 0.1 g. Al otro extremo se acopla la anilla de 3 cm y, en el cilindro formado, se introduce la muestra de sustrato a caracterizar, sin apelmazar ni apretar, hasta 1 mm del borde superior. A continuación, el cilindro se coloca en un recipiente, al que se le añade agua hasta 0.5 mm del borde superior, y se deja saturar por capilaridad durante 48 horas; Transcurrido este tiempo, y con el fin de someter la muestra a una tensión de 10 cm de c.a; el cilindro se coloca en un baño de arena durante 48 h.

Posteriormente, se saca el cilindro del baño de arena y se separan los anillos que lo forman. Se corta, con una espátula, el material sobrante del anillo inferior (4 cm) y se pesa el conjunto anillo + sustrato húmedo (B). Finalmente, y siguiendo la metodología propuesta por Martínez en 1992, se introduce el conjunto en estufa a  $105^\circ\text{C}$  hasta peso constante (C).

Todas las determinaciones se realizan por triplicado.

Con los valores de los pesos A, B y C, se calcula la humedad (X) en porcentaje en peso según la expresión

$$X(\%) = \frac{B - C}{B - A} \cdot 100$$

Con los valores medios de la humedad, se estima la densidad aparente (DA) mediante la ecuación:

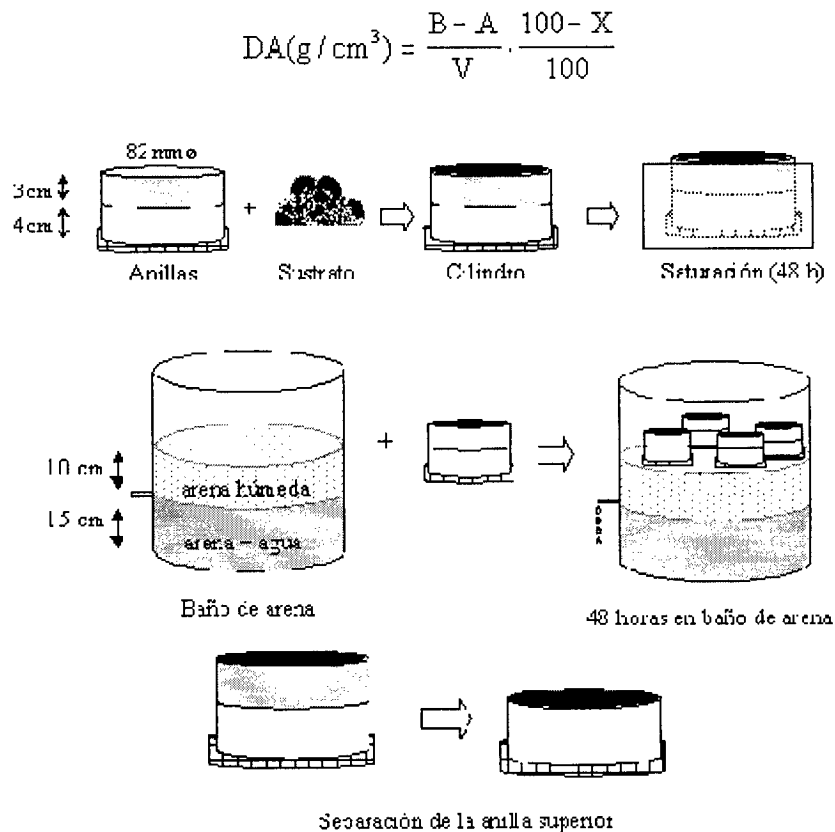


Figura 1. Esquema del método utilizado en la determinación de la densidad aparente tomado de Cabot (2012)

### 3.- Densidad Real

Cabot (2012) describe que la densidad real (DR) es la relación entre la masa o el peso de las partículas y el volumen real que éstas ocupan es decir, excluyendo el volumen poroso entre las mismas, expresada generalmente en  $gcm^{-3}$  o en  $Kgm^{-3}$ .

La densidad real de los materiales inorgánicos o minerales se determina directamente por picnometría propuesto por Martínez en 1992, mientras que, para los materiales orgánicos, la DR se estima indirectamente a partir de los contenidos en materia orgánica (MO) y en materia mineral (MM) del material, determinados por calcinación propuesta por De Boodt y colaboradores en 1974.

Este método se describe detalladamente en la Norma UNE-EN 13041, calculándose la DR según la siguiente ecuación:

$$DR(g / cm^3) = \frac{100}{\frac{\%MO}{1,45} + \frac{\%MM}{2,65}}$$

Dónde: 1,45 gcm<sup>-3</sup> es la densidad media de los sustratos orgánicos y 2,65 gcm<sup>-3</sup> la de los suelos minerales.

#### 4.-Porosidad total

Cabot (2012) menciona que el espacio poroso total (EPT) se calculó según la Norma UNE-EN 13041, a partir de los datos de densidad real (DR) y densidad aparente (DA), aplicando la ecuación:

$$ETP (\% vol.) = \left( 1 - \frac{DA}{DR} \right) \cdot 100$$

#### 5.- Granulometría

Cabot (2012) comenta que el análisis granulométrico se realiza siguiendo la metodología propuesta por Martínez en 1992, utilizando una tamizadora electromagnética digital, con los siguientes tamices: 16, 8, 4, 2, 1, 0.5, 0.25 y 0.125 mm.

Para la tamización se toman aproximadamente 200 g de muestra y se esparcen sobre una hoja de papel. Una vez seca al aire, la muestra se pesa con una precisión de 0.1 g (M<sub>t</sub>), y se tamiza durante 10 minutos a la amplitud 8 (sobre 10) del equipo. A partir del peso retenido en cada uno de los tamices (M<sub>i</sub>), se calcula el porcentaje (en masa) de cada fracción granulométrica (% P<sub>i</sub>), según la ecuación:

$$\%P_i = \frac{M_i}{M_t} \cdot 100$$

Todas las determinaciones se realizan por triplicado, expresando los resultados con una aproximación del 1%. Con los valores obtenidos se representan histogramas de frecuencias, que permiten observar la distribución granulométrica de cada material como se muestra en la figura 2.

El índice de grosor (IG) se obtiene sumando de manera acumulativa a los porcentajes (en peso) de las partículas con  $\varnothing > 1 \text{ mm}$ ; Adaptación del método propuesto por Richards y colaboradores en 1986, según la siguiente fórmula:

$$\%IG = \sum \%P_i ; > 1 \text{ mm}$$

Los valores de los porcentajes (en masa) correspondientes a cada fracción granulométrica permiten calcular también la media geométrica del diámetro de las partículas (dg), utilizando la siguiente ecuación propuesta por Noguera en 1999.

$$dg(\text{mm}) = \exp(a) ; \text{siendo } a = \sum_i m_i \ln d_i$$

Dónde:  $m_i$  es la fracción del peso retenida en el tamiz  $i$  (%), y  $d_i$  el diámetro medio de dos tamices consecutivos (mm).

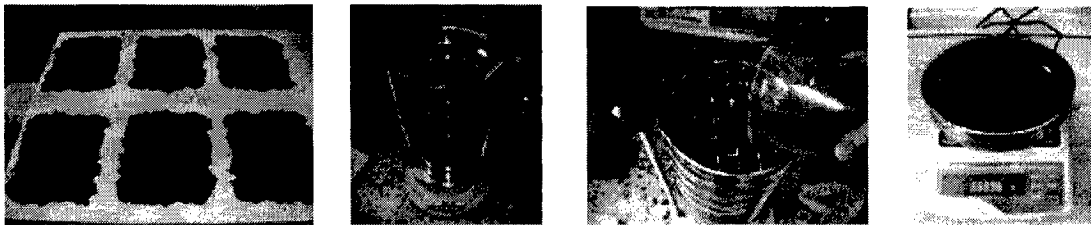


Figura 2.- Procedimiento para la determinación de la granulometría según Martínez (1992).

## 6.- Retención de humedad

Cabot (2012) comenta en su metodología, La curva de liberación de agua de un sustrato representa la variación del contenido de humedad volumétrica en función de la tensión a la que se somete el material (m.c.a. o kPa). Para su obtención se sigue la metodología y nomenclatura desarrollada por De Boodt y colaboradores en 1974.

El procedimiento se basa en un sistema de embudos de filtrado conectados entre sí (Fig. 3), que permite someter la muestra colocada en ellos a tensiones de columna de agua (c.a.) desde 0 hasta 100 cm c.a.

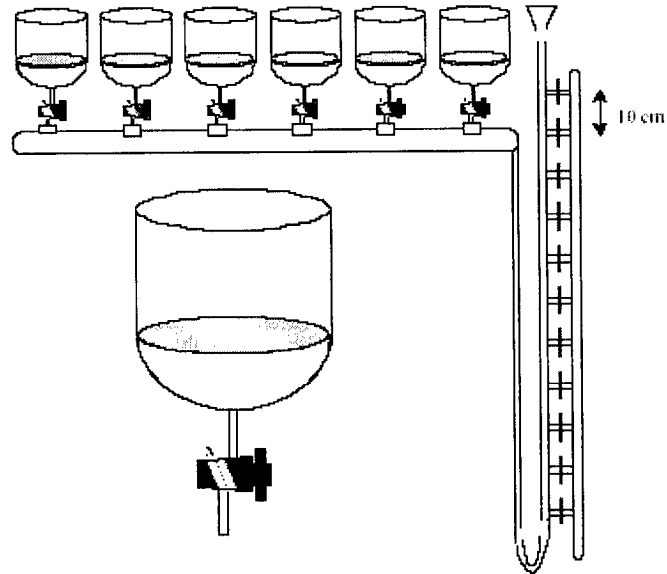


Figura 3. Esquema del equipo utilizado por De Boodt para determinar la curva de liberación de agua de un material, tomado de Cabot (2012).

Cabot (2012) menciona en su metodología, en primer lugar, se humedece la muestra hasta una cierta humedad (X), que se determina posteriormente, para facilitar así la saturación del sustrato en el embudo. Se pesa el embudo vacío con una precisión de 0.1g (A) y se coloca una capa de unos 4-5 cm de sustrato humedecido, pesando a continuación todo el conjunto (B). Por otro lado, el sustrato se satura con agua destilada y se deja reposar durante 24 horas para que todo el aire sea expulsado. A partir de este momento se van aplicando tensiones crecientes, dejando actuar cada una de ellas durante aproximadamente 48 horas (tiempo necesario para la estabilización) y se pesa el embudo con el sustrato tensionado ( $C_i$ ).

Para cada tensión (i) se determina la humedad en volumen del sustrato contenido en el embudo ( $G_i\%$ ), utilizando la siguiente ecuación:

$$G_i(\% \text{ vol.}) = 100 \cdot \left( \frac{C_i - A - D}{D} \right) \cdot DA \quad ; \text{ siendo } D \text{ (g)} = (B - A) \cdot \frac{100 - X}{100}$$

Dónde:  $C_i$  es el peso del embudo con el sustrato a la humedad  $G_i$ , A es el peso del embudo vacío, D es el peso (en gramos) de materia seca de sustrato introducida en el embudo, DA es la

densidad aparente del sustrato, B es el peso del embudo más el sustrato antes de saturar y X es la humedad inicial -% en peso del sustrato.

Cabot (2012) menciona según esta metodología, las tensiones a aplicar de manera obligatoria son 10, 50 y 100 cm c.a., con las cuales se determinan las propiedades características de las relaciones aire: agua, las determinaciones se realizaran por triplicado para cada submuestra (I, II y III), es decir, se llevan a cabo un total de n determinaciones por cada tipo de material. De pendiendo el numero de muestras a analizar.

Representando gráficamente  $100-G_i$ , (% vol.) en función de la tensión aplicada ( $i$ , en kPa) se obtiene la curva de liberación de agua del material.

A partir de esta curva de liberación de agua se obtienen las relaciones aire: agua, cuyas propiedades características mencionadas por De Boodt y colaboradores en 1974, y Martínez en 1992, las cuales se expresadas en % en volumen, son:

- Capacidad de aireación (CA): diferencia entre el espacio poroso total (EPT) y el contenido en humedad a 10 cm c.a.

- Agua fácilmente disponible (AFD): porcentaje de agua liberada al incrementar la tensión de 10 a 50 cm c.a.

- Agua de reserva (AR): porcentaje de agua drenada al aumentar la tensión de 50 a 100 cm c.a.

- Agua total disponible (ATD): porcentaje de agua liberada al incrementar la tensión de 10 a 100 cm c.a., es decir,  $ATD = AFD + AR$ .

- Agua difícilmente disponible (ADD): porcentaje de agua retenida en el sustrato a 100 cm c.a.

Posteriormente se realiza el ajusta el valor de los datos experimentales de las curvas de liberación de agua a la ecuación propuesta por Van Geuchten en 1978 y 1980:

$$\theta = (h) = \theta_r + [(\theta_s - \theta_r) / (1 - (\alpha h)^n)^m]$$

Dónde:  $h$  es la tensión aplicada (cm c.a.),  $\theta(h)$  el % volumétrico de agua retenida a la tensión  $h$ , y  $\theta_s$  la humedad de saturación (=EPT, % vol.).

Los parámetros  $\theta_r$ ,  $\alpha$ ,  $m$  y  $n$  se determinan mediante el ajuste correspondiente, suponiendo que  $m=1-1/n$ .

Cabot (2012) comenta en su metodología que a partir de estos datos se calcula la conductividad hidráulica relativa ( $K_r$ ), que evalúa la movilidad del agua a través del sustrato, y el potencial de entrada de aire ( $\psi_{me}$ ), que representa la mínima tensión a aplicar para que el aire comience a desplazar al agua de los poros, utilizando las ecuaciones:

$$K_r(h) \text{ (adimensional)} = [1 - (\alpha h)^{n-1} (1 + (\alpha h)^n)^{-(m)}]^2 / (1 + (\alpha h)^n)^{m/2}$$

$$\psi_{me} \text{ (cm c.a.)} = -1/\alpha$$

El valor de  $K_r$  a 10 cm c.a. ( $h=10$ ) es la conductividad hidráulica insaturada relativa a dicha tensión, que sirve para comparar la capacidad para transmitir dentro del sustrato el agua entre C1, C2 y T.

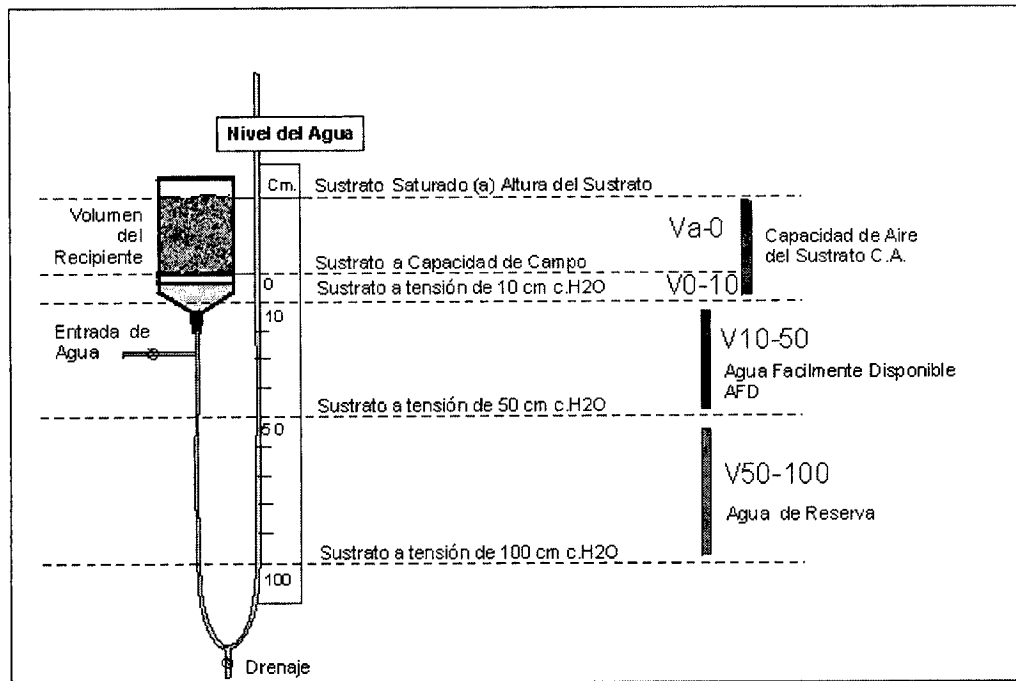


Figura 4: Esquema de la curva de liberación de agua de un sustrato, Tomado de Calderón y colaboradores (2003).



## **7.- Materia Orgánica y Cenizas**

Cabot (2012) menciona en su metodología, la determinación del contenido en cenizas y en materia orgánica se lleva a cabo, utilizando la muestra seca sin moler, en lugar de molida.

Para ello se pesan 5 g de material seco a 105°C en un crisol de porcelana ( $\varnothing = 8$  cm). Tras calcinar a  $550 \pm 25^\circ\text{C}$  en un horno mufla durante 4 horas, se dejan enfriar en desecador y se pesan. La cantidad de materia mineral o cenizas presentes en la muestra (MM) se expresa como porcentaje de residuo seco referido a la masa seca inicial. La materia orgánica total (MO) se calcula como porcentaje de pérdida de masa referida a la masa seca inicial, utilizando la expresión:

$$\text{MO (\%)} = 100 - \text{MM (\%)}$$

### **Método del Porómetro (para determinar propiedades físicas)**

Otro de los métodos revisado es el método del porómetro, propuesto por Pire y Pereira en 2003 en su trabajo denominado “Propiedades Físicas de Componentes de Sustratos de uso común en la Horticultura del Estado de Lara, Venezuela. Donde aplicaron este método para evaluar características de sustratos agrícolas de uso común, construyeron porómetros con especificaciones de la Sociedad Internacional de Ciencias Hortícolas, obteniendo información de sobre la precisión de las características de los sustratos con el porómetro, esta metodología se describe a continuación:

Para la evaluación de los sustratos, se prepara un conjunto de diez porómetros que consisten en cilindros o secciones de tubo de plástico de 7.62 cm de diámetro (3 pulgadas) y 15 cm de longitud, de los utilizados para el agua de drenaje doméstico.

En uno de los extremos se fija con pegamento una tapa plástica en la cual se perforaran cuatro orificios de 5 mm de diámetro en forma equidistante a lo largo de su borde perimetral. En el otro extremo del tubo se coloca un conector o anillo plástico, sin fijar o pegar.

El porómetro se coloca en forma vertical con la tapa perforada hacia el fondo. Posteriormente, se seleccionan los componentes de sustratos hortícolas. Estos materiales se

dejan expuestos al ambiente, pero protegidos de la radiación directa, durante varios días para permitir su secado al aire. Las muestras son colocadas dentro del porómetro hasta su máxima capacidad permitiendo su asentamiento después de dejarlo caer en dos oportunidades desde 7.5 cm de altura sobre una mesa de madera.

En cada golpe se rellena el cilindro con muestra adicional del sustrato hasta su borde superior. Los cilindros con las muestras se colocan en un recipiente con agua cuyo nivel alcanzaba por debajo del borde superior con el propósito de forzar el humedecimiento de la muestra desde los orificios del fondo, lo que permite la salida libre del aire por la cara superior.

Dependiendo del tipo de muestra, la saturación aparente se alcanzaba luego de algunas horas; sin embargo, para uniformizar este proceso todas las muestras son dejadas en el agua hasta el día siguiente. Este humedecimiento produce un asentamiento adicional en el sustrato por lo que al extraer los cilindros del agua se procede a remover cuidadosamente el anillo de la parte superior del porómetro y se eliminaba el exceso de muestra enrasándola con el borde del tubo con una espátula.

Posteriormente, se sujetaba un pedazo de tela porosa (liencillo) con una banda de goma para cubrir el extremo expuesto de la muestra. Cada cilindro es colocado nuevamente en el agua, esta vez sumergiéndolo por completo, se extrae luego de algunos minutos, repitiendo la operación un par de veces para permitir la saturación total de la muestra.

Luego de 30 minutos se colocan tapones en cada uno de los orificios del fondo y la muestra se extrae definitivamente del agua. Posteriormente, son colocados verticalmente sobre un recipiente, se remueven los tapones y se mide el volumen de agua ( $V_a$ ) que se drena en un período de 10 minutos. La muestra húmeda es extraída de los tubos y se toma su peso (PH); luego son colocadas en la estufa a  $105^{\circ}\text{C}$  para obtener el peso seco (PS). El procesamiento de cada muestra es repetido diez veces utilizando simultáneamente los diez porómetros.

Con los resultados obtenidos en la metodología mencionada, se realizan los siguientes cálculos para las determinaciones de las propiedades físicas de la o las muestra, con las siguientes formulas:

$$\text{Porosidad total (\%)} = \frac{V_a + \frac{PH - PS}{Pa}}{V_c} \times 100$$

$$\text{Porosidad de aireación (\%)} = \frac{V_a}{V_c} \times 100$$

$$\text{Capacidad de retención de agua (\%)} = \frac{PH - PS}{V_c} \times 100$$

$$\text{Densidad aparente (Mg/m}^3\text{)} = \frac{PS}{V_c}$$

$$\text{Densidad de partículas (Mg/m}^3\text{)} = \frac{Da}{1 - \frac{PT}{100}}$$

Donde:

$V_a$  = volumen drenado ( $\text{cm}^3$ )

$PH$  = peso húmedo de la muestra (g)

$PS$  = peso seco de la muestra (g)

$P_a$  = peso específico del agua ( $1 \text{ g/cm}^3$ )

$V_c$  = volumen del tubo o cilindro ( $\text{cm}^3$ )

Los resultados de cada variable son analizados mediante estadística descriptiva utilizando el coeficiente de variación (C.V.) para estimar la precisión del método y la variabilidad entre muestras. Adicionalmente, para cada variable se extrajo el rango de variación representado por sus valores extremos.

Varias de las propiedades físicas encontradas en los sustratos hortícolas de uso común evaluado por este método: fibra de coco (incluyendo polvo y fibra), aserrín de coco (el mismo material anterior pero tamizado para eliminar la fibra), cáscara de arroz, bagazo de caña descompuesto, arena fina de río con predominancia de partículas pequeñas (de 50 a 1000 micras) y suelo mineral (tierra negra). Se ajustan a los valores señalados en la literatura (Armstrong y McIntyre, 2000; Schmilewski, 2001; García y colaboradores, 2001).

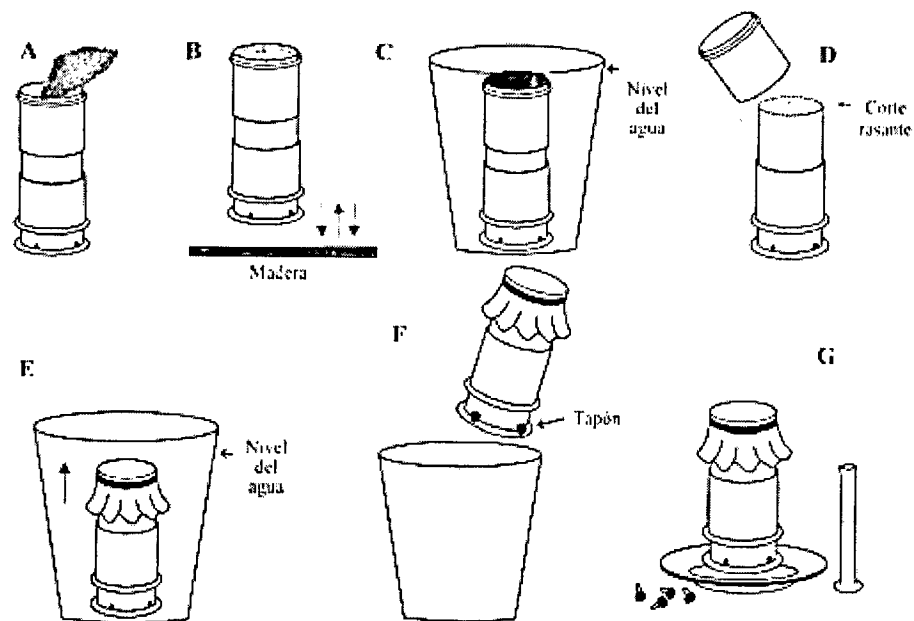


Figura 5: Esquema del procedimiento de la metodología para determinar propiedades físicas, propuesta por Pire y Pereira (2003), A) llenado del porómetro. B) asentamiento de la muestra al golpear el porómetro sobre la base de madera. C) saturación lenta con agua desde los orificios del fondo. D) eliminación y enrase del tercio superior de la muestra.

E) colocación del lienzo e inmersión repetida del porómetro en agua. F) extracción del porómetro del agua previo taponado de los orificios de llenado. G) colecta y medición del volumen de drenado.

### **Métodos de programación de riegos en sustratos**

Gallardo (2005) menciona que los cultivos en sustratos han tenido un notable desarrollo como alternativa a la producción en suelo dentro de los invernaderos, cuya producción principal son los cultivos hortícolas, los invernaderos de mayor nivel tecnológico disponen de programadores de riegos automatizados lo que permite la programación y el aporte de nutrientes y agua de forma automatizada.

Ferreira y colaboradores (2005) comentan que el objetivo del riego es aportar al agua necesaria para el óptimo desarrollo de la planta en el momento y cantidad requerido, el riego se maneja en dos etapas, una etapa corresponde a la calendarización o programación del riego y la otra etapa consiste en el control del flujo requerido.

### **Programación de riegos**

Fernández y colaboradores (2001) comentan que la programación del riego es un conjunto de procedimientos técnicos desarrollados para predecir cuánto y cuándo regar. Salas y Urrestarazu (2001) mencionan que no hay un acuerdo homogéneo referente a la dosis y frecuencia de riegos diarios en la producción de cultivos en contenedores.

Los principales objetivos perseguidos con el manejo del riego para los cultivos sin suelo son:

- 1.- suministro óptimo de los nutrientes requeridos por la planta
- 2.- suministro homogéneo y equilibrado de la solución nutritiva.
- 3.- mantener el contenido de aireación dentro del sustrato y las raíces no tengan problemas de asfixia.

4.- regular la temperatura del sustrato, al mismo tiempo que regula la temperatura radical de la planta

5.- regular el volumen necesario de agua fácilmente disponible

Es necesario tener claros y considerar los métodos de control y manejo de los riegos, así como las mediciones necesarias para corroborar el cumplimiento de los objetivos marcados.

Salas y Urrestarazu (2001) mencionan que los cultivos en sustrato requieren de un manejo de riego con mucho más control que los cultivos en suelo, debido al poco volumen que ocupa el sistema radical y las propiedades físicas del sustrato el cual retiene el agua a muy bajas tenciones. Además que el riego en sustratos es muy complejo debido a la asociación entre el manejo y suministro de nutrientes así como asegurar el volumen adecuado de oxígeno que permita la respiración radical

Además el pequeño volumen que ocupa el sustrato en el contenedor y a la baja capacidad tampón que presenta al contenido de sales en la solución nutritiva, los riegos se deben aplicar con alta frecuencia en volúmenes pequeños, además de aplicar riegos de lavado de sales, teniendo en cuenta que un riego en exceso puede provocar deficiencias de oxígeno lo que restringe la respiración provocando estrés en la planta (Gallardo, 2005)

Salas y Urrestarazu (2001) comentan que el volumen de riego es la cantidad de agua aportado a las plantas cubriendo sus requerimientos necesarios, este volumen está condicionado por las características de retención de agua del sustrato, el tamaño del contenedor y el volumen de drenaje establecido. La cantidad de agua aplicada al sustrato no debe de ser mayor a la capacidad de retención del mismo, ya que agua en exceso se pierde por lixiviación.

Gallardo (2005) menciona que el manejo de las técnicas de control de riego ayuda a determinar la dosis y la frecuencia de los riegos requeridos, combinando la relación clima-cultivo-sustrato, ya que las necesidades hídricas de los cultivos están en función del requerimiento de agua de la planta, del clima y de su estado de desarrollo por lo que en cultivos de sustratos a menudo se aplican dosis de riegos fijos.

Salas y Urrestarazu (2001) comentan que la finalidad del uso de los métodos del riego es la de hacer eficiente el manejo del cultivo, mediante el ahorro de agua y energía, lo que repercute en el aprovechamiento del agua y los elementos nutritivos.

A continuación se describen algunos métodos de riegos en sustratos según Salas y Urrestarazu (2001)

Métodos de riegos utilizados en cultivo sin suelo	
Asociados al sustrato	-Tensiómetros -Balanza -Bandeja de demanda -CE del sustrato
Asociados al clima	-Radiación solar -Nivel de transpiración
Asociados al sistema de riego	-Tiempo fijo
Asociados a la planta	-Microvariaciones del tamaño del tallo y del fruto. -Evapotranspiración
Integrado	-Relación sustrato-planta-clima

### 1. Asociados al sustrato

Salas y Urrestarazu (2001) mencionan que las propiedades de retención de humedad del sustrato determinan el nivel de agua de reserva, lo cual permite determinar la dosis de agua necesaria en función de este nivel. Por lo que es necesario conocer las propiedades del sustrato y el nivel de capacidad de reserva con la cual se conocerá la dosis de riego a utilizar

en el sustrato así como su frecuencia de riego para mantener el contenido hídrico requerido por la planta.

### **1.1. Tensiómetros**

Salas y Urrestarazu (2001) mencionan que como en los cultivos sin suelo se manejan rangos pequeños de potenciales hídricos, el uso de tensiómetros es complejo pues no hay un contacto homogéneo entre el sustrato y el sensor del tensiómetro, los factores que influyen pueden ser: que la humedad del sustrato no sea homogénea, falta de conocimiento en los valores de retención de humedad del sustrato, la forma y el volumen del contenedor donde se coloca el sustrato, además la reducción del potencial hídrico del sustrato se ve relacionada con la pérdida de agua por transpiración.

Teres (2000) comenta que dentro de los tensiómetros mas destacados esta el tensiómetro denominado “Lactómetro” el cual registra y aporta datos precisos del estado hídrico de la planta, asegurando que es capaz de detectar las bajas tenciones, según su diseño corrige problemas de contacto entre el sensor y el sustrato. Por lo que es un método útil para determinar el volumen y frecuencia de riegos en tiempo real (Salas y Urrestarazu, 2001).

Gallardo (2005) menciona que los tensiómetros para sustratos son una adaptación de los tensiómetros para suelos, estos tensiómetros con sensores son capaces de medir potencial de humedad muy estrecho que va de 0 a 10 kPa, estas mediciones son rápidas lo cual permite medir a escalas de sensibilidad de 10 centímetros de columna de agua que es igual a 1kPa, rango recomendado para sustratos como la lana de roca la cual tiene un nivel de agua disponible a un rango de entre 0 a 3 kPa.

### **1.2. Balanza**

Salas y Urrestarazu (2001) comentan que las balanzas se colocan por debajo de la bandeja de cultivo y tienen sensores que miden y detectan el peso completo de una unidad de cultivo, por lo que una vez que se pierde peso del contenedor se inicia el riego para mantener el peso constante, este método de pesada se puede utilizar en cultivos de entutorados pues el peso es soportado por el tutor, donde se ajusta una escala de tal manera que se inicie un ciclo



de riego cuando la bandeja pierda peso y se termine cuando este llegue al valor determinado; en plantas que no usan tutores como las fresas se hacen ajustes de acuerdo al desarrollo de la planta, ya que aparecen fluctuaciones de peso conforme a su desarrollo basándose básicamente en el principio de riegos con tensiómetros, con este método se controla en tiempo real el volumen la frecuencia y el volumen de riego óptimo para el desarrollo de la planta.

### **1.3. Bandeja de demanda**

Salas y Urrestarazu (2001) mencionan que el sistema de riego por demanda está relacionado con la cantidad de agua de utilizada por las plantas, la cual controla las frecuencias de riegos requeríos por día, la bandeja de riego por demanda controla y delimita la cantidad de solución que se aplica a toda la unidad de producción delimitada por el contenedor, estos contenedores con colocados sobre una manta adsorbente, lo que permite que las plantas contenidas en la bandeja tengan agua disponible de una forma continua, dentro de la bandeja se colocan dos electrodos los cuales están sumergidos dentro de la solución, estos hacen activar el riego una vez que las plantas han utilizado cierta cantidad de agua lo que provoca que uno de ellos quede al descubierto lo que activa el inicio del riego.

Gallardo (2005) comenta que este sistema consiste en unidades de sustratos como sacos o tablas, estas se colocan dentro de una bandeja en la cual recorre el volumen de riego longitudinalmente, en donde se colocan un par de electrodos los cuales están en contacto con la solución a medida que el agua es consumida por las plantas y la solución disminuye de nivel, el descenso del agua es detectada por uno de los electrodos el cual emite una señal a otro sensor que emite una carga eléctrica que activa el riego el cual se detiene una vez que la solución a llevado al nivel de los sensores.

### **1.4. Conductividad Eléctrica del sustrato**

Salas y Urrestarazu (2001) mencionan que los métodos de riegos mencionados con anterioridad tienen su función sobre la frecuencia de riego, estos métodos se pueden combinar con las medidas de la conductividad eléctrica y el potencial de hidrogeno, estas medidas son

fijas, permitiendo variaciones dentro de un periodo de tiempo, debido a las condiciones climáticas que influyen en el equilibrio de la solución del riego, en verano donde existen altas temperaturas se incrementa la conductividad eléctrica con mucha facilidad, cuando estas condiciones existe se contrarrestan con riegos de lavado de sales o en su caso reduciendo las cantidad de sales en la solución, lo evita concentraciones altas de sales en el sustrato y facilita la absorción de agua y nutrientes a la planta, al contrario que en las épocas frías el sustrato tiende a disminuir la conductividad eléctrica, por lo que es conveniente aumentar la concentración de la solución del riego.

## **2. Asociado al clima**

### **2.1. Radiación solar y nivel de transpiración**

Salas y Urrestarazu (2001) comentan que los parámetros de clima son utilizados como método para el manejo del riego, este método utiliza las necesidades hídricas de la planta en conjunto con medidas que se registran de forma continua dentro del invernadero como son: temperatura, humedad relativa, déficit de presión de vapor, estas medidas son aportadas por sensores los cuales se aplican directamente en la programación del riego, para ello se tiene que establecer una relación entre los sensores y el nivel de transpiración de la planta, la cual se estima mediante la medición de la radiación global solar, esta relación se ve influenciada por el tipo de cultivo y estado fenológico del mismo.

Con este método es posible programar el número de los riegos asociando la transpiración de la planta con los sensores de radiación para suministrar el agua requerida, por lo que la planta tendrá el agua estimada dependiendo el nivel de radiación que el sensor contabilice en ese momento. Aunque este método es práctico la frecuencia del riego varía según el tipo de cultivo, la cantidad y el sustrato utilizado así como los objetivos de producción.

Gallardo (2005) menciona que para tener una optima producción de cultivos, su contenido de agua tiene que ser suficiente para que las raíces absorban el agua necesaria y la planta pueda mantener su tasa de transpiración en cualquier condición de ambiente manejado dentro del invernadero.

Algunos modelos matemáticos estiman el consumo hídrico de la planta, pudiéndose aplicar para el control de riego en sustratos, en ciertos casos se requieren modelos que estimen la evapotranspiración en tiempo real y con medidas precisas, para lograr esto los modelos matemáticos son integrados en computadoras con software aplicados para programar riegos, donde además se suma la tasa de evapotranspiración con lo que se estima la cantidad de agua requerida por el cultivo.

De los modelos matemáticos mas adecuados para calcular las tasas de evapotranspiración con mayor precisión es la de Penman-Monteith, por ser una formula muy compleja donde se toman consideran medidas de parámetros climáticos como: radiación y déficit de presión de vapor, medidas de parámetros del cultivo como son: área foliar además de valores de conductancia estomática y medidas aerodinámicas.

### **3. Asociados al sistema**

#### **3.1. A tiempos fijos (Riego por tiempo)**

Salas y Urrestarazu (2001) mencionan que en este método se utiliza un programador de reloj, en donde se cuenta el momento de inicio y terminación del riego, por consiguiente el número de veces que se activara el contador el cual programara la frecuencia y el tiempo de riego que transcurre entre el inicio y el termino de la cantidad determinada de agua de riego; con este método de riego se asegura el suministro de la cantidad programada de agua por lo que es importante estimar la cantidad de agua requerida considerando el objetivo del riego y el control que se llevara a cavo en el cultivo, la única limitante es el número máximo de ciclos que se pueden programar.

Gallardo (2005) señala que en este tipo de método de programación de riego se requiere la experiencia del agricultor en la aplicación de riegos a intervalos de tiempo ya fijados, por lo que se corre el riesgo de no aportar el agua requerida para cubrir las necesidades hídricas de las plantas, este método se puede aplicar durante el periodo de post-transplante hasta que el cultivo este ya establecido, en esta etapa se puede combinar con otro método de control de riego para hacerlo más eficiente.

#### **4. Asociados a la planta.**

Salas y Urrestarazu (2001) comentan que los métodos de riegos asociados a las condiciones de las plantas utilizan sensores que cuantifican el nivel de la transpiración, la resistencia estomática y el potencial hídrico de la planta, generalmente este tipo de método de programación de riego se aplica en trabajos de investigación ya que en el campo y a los agricultores les es difícil hacer la interpretación de los datos obtenidos, dentro de los sensores utilizados en la programación de riego es el potómetro el cual mide la resistencia estomática de la hoja a la transpiración y en termómetro termopolar este sensor determina la temperatura de la hoja.

##### **4.1 Microvariaciones del diámetro del tallo**

Salas y Urrestarazu (2001) mencionan que la programación de riegos mediante el uso de sensores que miden las microvariaciones del diámetro del tallo, así como la de los frutos depende principalmente del estado hídrico de la planta, ya que el diámetro de la planta presenta una variación de grosor a lo largo del día, el cual presenta su máximo valor durante la noche cuando tiene una hidratación óptima y tiene un valor mínimo al medio día cuando la planta presenta la pérdida máxima de agua debido a la transpiración por las altas temperaturas.

Estas variaciones pueden verse modificadas por dos factores uno de ellos es el crecimiento y desarrollo de la planta y el otro es la pérdida excesiva del agua durante todo el día, provocado por un desequilibrio entre la transpiración y la capacidad de absorción radical, además de que estos sensores no son fáciles de instalar en la planta, la información que aportan no se puede utilizar directamente para iniciar la activación del momento del riego, por lo que estos datos se ingresan a un programa o software de una computadora que procesa la información.

Para utilizar de forma adecuada la información originada por los sensores en la programación del riego se necesita definir el tipo de cultivo y su fenología, pues el crecimiento del tallo y el valor de la resistencia estomática varían de especie a especie, además de tener cuidado en el manejo de los fertilizantes ya que una alta salinidad puede provocar un desequilibrio entre el desarrollo de las raíces y el área foliar, manifestándose en una contracción del grosor del tallo y movimientos de fluidos dentro del tallo.

## **5. Integrado**

### **5.1 Relación Sustrato – Planta – Clima**

Salas y Urrestarazu (2001) comentan que en para programar riegos utilizando los métodos integrados como la relación sustrato-suelo-planta, el agricultor deberá tener los datos relativos al desarrollo óptimo del cultivo, sus requerimientos hídricos y la estimación del volumen de agua a aplicar, además de saber introducir los datos en la computadora donde los algoritmos del software calculan la tasa de transpiración del cultivo.

Al disponer de invernaderos con las herramientas necesarias como sensores que determinan el estado hídrico de la planta, se tienen los datos necesarios para determinar los requerimientos de agua del cultivo, además los parámetros del clima y el volumen del drenaje permiten calcular en tiempo real la dosis de agua necesaria para cubrir las pérdida provocadas por la transpiración, el consumo y el drenaje; La aplicación y el uso de los sensores requieren que se conozcan o se determinen las condiciones climáticas, la tasa de transpiración, los requerimientos hídricos así como las características físicas del sustrato.

## **ESTADO DEL ARTE**

### **1. Actualización de Métodos de Caracterización de Sustratos**

En la revisión realizada no se encontró algún otro método actualizado para la caracterización de sustratos, lo más reciente fue la descrita por Bracho y colaboradores (2009) en su trabajo Caracterización de Componentes de Sustratos Locales para la Producción de Plántulas de Hortalizas, Y Hernández y colaboradores, (2008) en su trabajo Caracterización física según granulometría de dos vermicompost derivados de estiércol de bovino puro y mezclado con residuos donde se realizaron estudios de evaluación de sustratos. Cada uno de ellos utilizó el método de caracterización de sustratos propuesto por Pire y Pereira en 2003.

### **2. Actualización de Métodos de Caracterización de Programación de Riego en Sustratos**

Pineda (2011) en su trabajo Monitoreo de la retención y absorción de agua en sustratos de diferente granulometría; Evaluó el efecto de tamaño de partícula y frecuencia de riego en cultivos hortícolas en semillero mantenidos en un invernadero tipo túnel. Las mezclas de sustratos evaluadas fueron fibra de coco y tezontle en diferente granulometría y peat moss como testigo y las frecuencias de riegos, de este se evaluó uno y dos riegos diarios respectivamente y un riego cada tercer día. Utilizó charolas de unicel de 200 cavidades por unidad experimental, los resultados de los tratamientos mostraron efectos significativos en el tamaño de partícula de 2-3 mm, también presentó mayor homogenización del tamaño de partícula así como la frecuencia de riegos tuvieron un efecto significativo en la mezcla fibra de coco y tezontle v/v, dado el mejor desarrollo del cultivo. La capacidad que tuvo la mezcla de fibra de coco-tezontle de 2-3 mm de conservar mayor tiempo la humedad se midió con sensores que permitieron monitorear la humedad presente en el sustrato.

Ríos (2010) en su trabajo Automatización del riego en sustratos; evaluó un sistema de riego automatizado para sustratos el cual controla la frecuencia de riego en base a requerimientos del cultivo y el tipo de sustrato usado, donde caracterizó los sustratos, que en este trabajo fueron los siguientes; Agrolita, Fibra de Coco, Arena Peat Moss, Tezontle y

Tepojal. Esta metodología se describa a continuación: para medir la humedad de los sustratos utilizo un sensor de humedad ECHO EC5, por su baja respuesta a la conductividad eléctrica obteniendo así el ajuste de contenido de humedad de los sustratos. El sistema de riego lo integro por un sistema electrónico, un micro controlador, computadora personal, base de datos, sensor de humedad, modulo de potencia para encender/apagar, contactor y el sistema de riego, por goteo. Los sustratos se controlaron a niveles de agua fácilmente disponible. Los resultados que obtuvo demostraron que cada sustrato presenta características propias. Sin embargo el sistema evaluado demostró ser capaz de regular los riegos por lo que puede controlar los niveles de humedad que se deseen usar para diferentes tipos de sustratos y tipo de planta. Además de poder calibrar los sensores con solo registrar el dato de respuesta en el aire y agua con una conductividad eléctrica de menos de  $2.7 \text{ ms.cm}^{-2}$

Rojas (2009) en su trabajo de nominado Determinación del momento de riego mediante la temperatura de la cobertura foliar en el cultivo de jitomate bajo condiciones de invernadero; Evaluó el momento de riego en un cultivo hortícola mediante la generación de modelos lineales, atreves de la temperatura de la cobertura foliar. El cual se describe a continuación: utilizo, un equipo de detector de humedad (TDR), termómetro infrarrojo y una estación meteorología. Para determinar el momento de riego se estableció un experimento en sustratos de diferentes granulometrías las cuales fueron, fina igual o menor a 2 mm, media de 2 a 5 mm y gruesa de >5 mm, con tres niveles de agua 15%, 45% y 75%. Donde el déficit hídrico de cada sustrato se relaciono con la temperatura de la cobertura foliar de la planta. El momento de riego se estableció al asociar los valores de temperatura foliar y temperatura del aire, donde determino el déficit de humedad para consumo permisible entre 30 y 60 % de la humedad aprovechable. Los resultados que obtuvo mostraron que existen diferencias marcadas en las temperaturas entre los tratamientos de diferentes humedades manejadas con diferentes diámetros de granulometría. Además el análisis de la variables mostraron que las altas temperaturas foliares indicaron bajo nivel de humedad, alto déficit hídrico y rendimientos bajos del cultivo, por otro lado, determino que el momento de riego en la hortaliza que se uso para la investigación es cuando el déficit de humedad llegue a los rangos de 24.8 a 24.7% y de 75.2 a 75.3%, de humedad aprovechable con una temperatura foliar de  $24.2^{\circ}\text{C}$  y una diferencia de temperatura del aire y el follaje de  $11.3^{\circ}\text{C}$ .

Con lo que concluyo que la temperatura foliar constituye un indicador práctico del estrés hídrico, el cual presenta una relación directa proporcional con el déficit hídrico y es inversamente proporcional con la producción y rendimiento del cultivo. Ya que el momento del riego depende de la observación de los valores de temperatura foliar y las diferencias entre la temperatura del aire y el follaje, establecidos dentro de los límites que se establezcan de capacidad de campo y punto de marchites permanente.

Gardea (2010) en su trabajo Diseño de un sistema de telemetría para variables climatológicas y humedad del sustrato en invernadero. Evaluó un diseño electrónico de telemetría, basado en microcontroladores PIC como centro de procesamiento y transceptores LINX de comunicación inalámbrica. El cual se describe a continuación: el diseño consto de un sistema central que coordina las mediciones y almacena los datos de cinco unidades remotas que contienen los sensores. Como parte del software se utilizo un protocolo de comunicación que permite el control y flujo de información entre los dispositivos. El funcionamiento del equipo se valido en el invernadero experimental del programa de hidrocencias con un cultivo hortícola. Las variables evaluadas fueron temperatura, humedad relativa y humedad del sustrato. Utilizando como sustrato una mezcla de tezontle rojo y turba negra con una relación de 66% y 33% respectivamente.

Los resultados obtenidos mostraron que es posible implementar sistemas de telemetría los cuales proporcionan información confiable en tiempo real del estado ambiental que se tiene en un invernadero.



## CONCLUSIONES

Las prácticas culturales utilizadas en la producción de cultivos de plantas y hortalizas han evolucionado rápido y notablemente en los últimos años, provocados por la evolución de los sistemas de control de los factores que influyen en la producción

El uso de nuevas estructuras así como de equipos para medir y controlar los factores ambientales en los cultivos protegidos como los invernaderos, el riego tecnificado, la fertirrigación y el uso de sustratos, los cuales en conjunto proporcionan un elevado control de los parámetros que afectan al cultivo

La creciente sustitución del cultivo tradicional en el suelo por el del cultivo en sustratos sigue la misma tendencia de evolución, por lo que la posibilidad de éxito o fracaso de la producción en sustrato necesita de una comprensión del medio ambiente dentro del contenedor, pues las propiedades físicas y químicas del sustrato se ven afectadas una vez dentro del contenedor.

Después de la revisión que se realizó, se encontró que la forma, el tamaño y la distribución de los poros condicionan las propiedades hídricas del sustrato y por lo tanto el manejo del agua de riego. Por lo que el control del riego en un sustrato depende de la caracterización del mismo, ya que conociendo las propiedades hídricas de este, se tiene la información y respuesta a las preguntas, ¿Cuánto regar? Y ¿Cuándo regar?

Además se encontró que las propiedades hídricas de los sustratos ya sea solos o combinados, orgánicos e inorgánicos, tienen la finalidad de conservar el agua y que está este en forma aprovechable para la planta una vez que este dentro del sustrato.

Debido a esto hay una clara necesidad de realizar mayor investigación en la caracterización de las propiedades de los sustratos y como estas características modifican el movimiento del agua y la disponibilidad de los nutrientes.

Para ello se requiere la evaluación de diferentes contenidos de humedad en el sustrato, con la ayuda de sensores climáticos colocados dentro del invernadero, así como de sensores de humedad (tensiómetros) colocados dentro del sustrato, los cuales son capaces de medir el contenido de agua, proporcionando datos de manera continua, automática y precisa, la cual

conllevara a programar en tiempo real los ciclos de riegos y las dosis óptimas para cada tipo de planta y ambiente donde se va a cultivar, haciendo más eficiente el recurso agua y el aprovechamiento de fertilizantes aplicados para la nutrición de la planta, con lo que se disminuirá los costos de producción y se aumentara la ganancia del productor.

## BIBLIOGRAFÍA

- Abad, B. M. 1992. Los sustratos hortícolas: características y manejo. Actas del II Congreso Nacional de Fertirrigación. Almería Pag. 115.
- Abad, B. M.; Martínez, P.F.; Martínez, M.D.; Martínez, J. (1993). Evaluación de agronómica de los sustratos de cultivo. Actas de Horticultura, vol. 11: 141-154.
- Abad, B, M. 1995. Sustratos para el cultivo sin suelo. En Nuez F. (Ed.) El Cultivo del Tomate. Mundi-Prensa. Madrid, España. Pp. 131-265.
- Abad, B. M, y Noguera, P. 1998. Sustratos para el cultivo sin suelo y fertirrigación. En Cadahia C. Fertirrigación de Cultivos Hortícolas y Ornamentales. Ed. Mundi-Prensa. Madrid, España. Pp. 282-342.
- Abad. B. M., P. Noguera M. y C. Carrión B. 2004. Los sustratos en el cultivo sin suelo. En: M. Urrestarazu G. Tratado de cultivo sin suelo. Ed. Mundi-Prensa. Madrid, España. pp. 113-158.
- Abad, B. M. y P. Noguera. 2000. Los sustratos en los cultivos sin suelo. In: M. Urrestarazu G. Manual del cultivo sin suelo. Ed. Mundi-Prensa. Almeria, España. Pp. 137-184
- Abad B. M; P. Noguera M. y Burés S. 2001 National inventory of organic wastes for use as growing media for ornamental potted plant production: case study in Spain. Bioresource Technology 77: 197-200.
- Ansorena, M. J. 1994. Sustratos. Propiedades y caracterización. Ed. Mundi-Prensa. Madrid, España. 172 p.
- Armstrong, H. y McIntyre. 2000. International Substrate Manual. Ed. Elsevier International. Doetinchem, The Netherlands. Pp. 10 - 12
- Baixauli, C. y Aguilar, J. M. 2002. Cultivo sin suelo de Hortalizas. Aspectos Prácticos y experiencias. CAPA, Generalitat, Valencia, España. Pag. 107
- Benoit, F. y Ceustermans, N. 1990. The use of recycled polyurethane as an ecological growing medium. Plasticulture, vol. 88. 41-48.

- Bracho, J. Pire, F. y Quiroz, A. 2009. Caracterización de Componentes de Sustratos Locales para la Producción de Plántulas de Hortalizas en el Estado de Lara, Venezuela. *Bioagro* vol. 21. Pp. 117 – 124.
- Burés, S. 1997. *Sustratos*. Ediciones Agrotécnicas. S. L. Madrid, España. P. 342.
- Burés, S., F. X. Martínez, and M. Llorca. 1988. Preliminary study of the application of parametric linear programming in formulation of substrate mixes. *Act Horticulture*. 221: 141-152.
- Bunt, A. C. 1988. *Media and Mixes for Container-Grown Plants*. 2da ed. Unwind Hyman Ltd, London. Pag.309.
- Cabot, M. O. 2012. Caracterización de compost de residuos hortícolas como sustratos para la producción de planta ornamental en maceta. “valoración de residuos, restos de plantas de hortalizas, compostaje, cultivos en sustrato, sustitutivos de la turba. Consultado el 12 de mayo del 2012. Disponible en <http://www.orene.org/compostaje>.
- Cadahia, C. 2000. *Fertirrigación*. Ed. Mundi-Prensa Libros, SA. España. 475 pp.
- Cadahía, C. y Fernández, M. 1992. Evaluación de los fertilizantes de liberación lenta: ensayos de invernadero. In S. Jiménez. *Fertilizantes de liberación lenta. Tipos. Evaluación y Aplicaciones*. Ed. Mundi-Prensa, Madrid. Pp. 111 – 126.
- Calderón, S.F. y Cevallos, F. 2001. Los sustratos. *Revistas del Dr. Calderón*. Bogotá, Colombia. Consultado el 23 de agosto del 2012. Disponible en. [http://drcalderonlabs.com/Publicaciones/Los\\_Sustratos.htm](http://drcalderonlabs.com/Publicaciones/Los_Sustratos.htm)
- Castellanos, J. Z. 2004. Manejo de la fertirrigación en el suelo. En: *Manual de Producción Hortícola en Invernadero*. J. Z. Castellanos, 2da ed. INTAGRI. Mexico. Pp.: 103 – 123.
- De Boodt, M. Verdonck, O. Capper, I. 1974. Determination and study of the water availability substrates for ornamental plant growing. *Acta horticultura* 35: 51-58.

- Escudero, J. 1993. Cultivo Hidropónico de Tomate. En F. Cánovas y J.R. Díaz. Curso Superior de Especialización sobre Cultivos sin Suelo. I.E.A. /F.I.A.P.A., Almería. pp. 261 – 297.
- Fernández, M. D. 2001. Necesidades hídricas y programación de riegos en los cultivos hortícolas en invernaderos y suelo enarenado de Almería. PhD Tesis, Universidad de Almería, España. Pag.77.
- Fernández, O. M. 2010. Evaluación de sustrato de fibra de madera de pino frente a sustratos convencionales en cultivo hidropónico de tomate. Tesis. Ingeniero Técnico Agrícola. Universidad Pública de Navarra. Pamplona, España. P. 78
- Ferreira E.R., Sellés V.G., Ahumada B.R., Maldonado B.P., Gil M.P. 2005. Manejo del riego localizado y fertirrigación. La Cruz, Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Boletín INIA N° 126. 56 p.
- Financiera rural. 2008. La Producción de Hortalizas en México. Consultado 18 septiembre del 2012. Disponible en internet: <http://ww.financierarural.gob.mx/informacionsectorrural/Documents/Hortalizas.pdf>.
- Flores, A. R., Livera. M. M., Colinas. L. M. T., Gaytán A. E. A. y Muratalla, L. A. 2008. Producción de plántulas de ciclamen (*Cyclamen persicum* Mill.) en sustratos basados en polvo de bonote de coco. Rev. Chapingo Serie. Horticultura. 2008, vol.14, n.3. Consultado el 25 de Junio del 2012, pp. 309-318 Disponible en internet: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1027152X2008000300012&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1027152X2008000300012&lng=es&nrm=iso). ISSN 1027-152X
- Gallardo, C. S. 2006. Bases técnicas para elección de sustratos: Problemas y soluciones más comunes. Seminario Taller. Ciudad de Corrientes, Argentina. pp. 26 - 31.
- García, O., Alcántara, G. R., Cabrera, Gavi, F. y Volke, V. 2001. Evaluación de sustratos para la producción de *Epipremnum aureum* y *Spathiphyllum wallisii* cultivadas en maceta. Terra 19: 249-258.

- Gardea, F.C.A. 2010. Diseño de un sistema de telemetría para variables climatológicas y humedad de sustratos en invernadero. Tesis Maestro en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Estado de México. Pag. 100.
- Goldberg. D. Gornad, B. y Rimon, D. 1976. Drip Irrigación: principios, Desing and Agricultural Practices. Drip Irrigación Scientific publications, Israel. Pag. 126.
- Hernández A. J, Guerrero L. F, Mármol C. L, Bárcenas B. J Ender S. 2008. Caracterización física según granulometría de dos vermicompost derivados de estiércol bovino puro y mezclado con residuos de fruto de la palma aceitera. *Interciencia* 33: 668-671.
- Huacuja, I.V. H, 2009. Evaluación de Sustratos para la Producción de Plántulas de Tomate de Cascara (*Physalis ixocarpa Brot*), bajo Invernadero; en Zamora, Michoacán. Tesis. Ingeniero Agrónomo. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Uruapan. Michoacán. Pag. 70.
- Masaguer, A; López, y M. C; Ruiz, J. 2006. Producción de planta ornamental en contenedor con sustratos alternativos a la turba. Madrid, España, Consejería de Economía e Innovación Tecnológica. 169 p.
- Martínez, F. F. X. 1992. Propuesta de metodología para la determinación de las propiedades físicas de los sustratos. Actas de las I Jornadas de Sustratos, SECH: 55-66.
- Martínez, J., A. Martínez, A. Navarro, C. Rodríguez, G. M. A. y M. Fernández. 2000. Consumo de agua y producción en cultivo de tomate en dos sustratos diferentes en cultivo sin suelo. En: Actas of VIII Simposio Nacional IV Ibérico sobre la nutrición Mineral de las Plantas, eds. Alcaraz, C. F., Carvajal, M., Martínez, V. Murcia pp.175–180.
- Mazuela, P., Salas, M.C. Urrestarazu, M. 2005. Vegetable waste compost as substrate for melon. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 36: 1557-1572.
- Medrano, E. L, y García, M. 1995. Manejo del riego de un cultivo de sustrato bajo abrigo. VI Congreso de la Sociedad Española de Ciencias Hortícolas. Barcelona, España. Pag. 282.

- Menzies, N. W. y Aitken, R. L. 1996. Evaluation of fly ash as a component of potting substrates. *Scientia Horticulture* 67: 87-99.
- Muñoz, R. J. J. 2003. La producción bajo invernadero en México. En; Manual de producción hortícola en invernadero. J. Z. Castellanos, J.J. Muñoz R. INTAGRI. México. Pp.: 14 - 16
- Noguera, P. 1999. Caracterización y evaluación agronómica del residuo de fibra de coco: un nuevo material para el cultivo en sustratos. Tesis Doctoral en Química. Universidad Politécnica de Valencia. España. Pp. 228.
- Noreña, J. J. 2009. CORPOICA. Sobre agricultura protegida con énfasis en tomate. Consultado 5 de noviembre de 2012, disponible en [http://www.freshplaza.es/news\\_detail.asp?id=23138](http://www.freshplaza.es/news_detail.asp?id=23138)
- Pineda, M.L. 2011. Monitoreo de la retención y adsorción de agua en sustratos de diferentes granulometrías. Tesis. Maestro en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Estado de México. Pag. 73.
- Pire, R. y Pereira, A. 2003. Propiedades físicas de componentes de sustratos de uso común en la horticultura del Estado Lara, Venezuela. *Propuesta Metodológica. Bioagro* 15: 55-63.
- Raviv, M.; Chen, Y. Inbar Y. 1986. Peat and peat substitutes as growth media for container grown plants. In *The Role of Organic Matter in Modern Agriculture*. Eds. Chen, Y. Avnimelech, Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht Nederland. pp. 257-287.
- Ríos, G. P., 2010. Automatización del Riego en Sustratos. Tesis. Maestro en Ciencias. Montecillo Texcoco. Estado de México. Pag. 135.
- Rojas, A. M. 2009. Determinación del momento de riego mediante la temperatura de la cobertura foliar en el cultivo de jitomate bajo condiciones de invernadero. Tesis. Doctor en Ciencias. Montecillo, Texcoco, Estado de México. Pag. 147.
- Salas, M. C., M. Urrestarazu. 2001. Técnicas de fertirrigación en cultivo sin suelo. Almería, España: Universidad de Almería. Pp. 38 - 48

- San Martín, H. C. 2011. Producción de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en diferentes granulometrías de “tezontle”. Tesis. Maestro en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Estado de México. Pag. 98.
- Serrano D.F.R. 2004. Selección de sustratos para la producción de hortalizas en invernaderos. Memorias IV Simposio Nacional de Horticultura. Invernaderos: Diseño, Manejo y Producción. Torreón, México. Pp. 44-68.
- Strasburger, E.; Noll, F.; Schenk, H.; Schimper, A.F.W; Von Denffer, D.; Ehrendorfer, F.; Bresinsky, A.; Ziegler, H. (1986). Tratado de Botánica. 7ª ed. Editorial Marín S.A., Barcelona.
- Terés, V; A Beunza & A Artetxe. 1997. Substrate saturation by vacuum application. *Acta Horticulture*. 450: 381-388.
- Terés V, Arrieta V, Sánchez J, Lucas M, Ritter E. 1996. Evaluación de la densidad real de sustratos de cultivo por medio del método de inmersión. *Inv. Agr. Prod. Veg.* 10: 231-244.
- Terés V, Arrieta A., Sainz De La Maza, E., Beunza, A. I., Lezaun, M. 2000. Physical properties of the substrates. *International Symposium on Protected Cultivation in Mild Winter Climates: Act Horticulture*, 559: 663-668.
- Terés, V. 2001. Relaciones aire-agua en sustratos de cultivo como base para el control de riego: metodología de laboratorio y modelización. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco. Departamento de Agricultura y Pesca. pp. 46
- Urrestarazu, M, Martínez, G.A. y Salas, C: .2005 Almond Shell waste: possible local rock wool substitute in Soilless crop culture. *Scientia Horticulture* 103(4). pp. 453 – 460.
- Valenzuela, O. y Gallardo, C. 2002. Sustratos Hortícolas. Un insumo clave en los sistemas de producción de plantines. *Revista hortalizas*. Consultado el 21 de agosto del 2011. Disponible en <http://www.biblioteca.org.ar/libros/210663.pdf>.
- Van Genuchten, M y Nielsen, D.R. 1985. On describing and predicting the hydraulic properties of unsaturated soils. *Annales Geophysicae*, pp. 615-628.



- Verdonck, O. 1983. New developments in the use of graded perlite in horticultural substrates. *Act Horticulture* vol. 150 pp. 575-581.
- Verdonck, O. F.; De Vleeschauwer, D.; De Boodt, M. 1981. The influence of the substrate to plant growth. *Act Horticulture*. vol. 126.pp.: 251-258.
- Verdonck, O., R. Penninck and M. De Boodt. 1984. The physical properties of different horticultural substrates. *Act Horticulture*. Vol. 150. Pp.:155-160.
- Yescas, C. P., Segura, C. M. A., Orozco, V. J. A., Enríquez, S. M., Sánchez, S. J. L., Frías, R. J. E., Montemayor, T. J. A. y Preciado, R. P. 2001. Uso de diferentes sustratos y frecuencias de riego para disminuir lixiviados en la producción de tomate. *Terra Latinoamericana*, 2011, vol. 29. Consultado: 24 de agosto del 2012. Disponible en Internet: <http://www.redalyc.org/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=57322342010>. ISSN 1870-9982.)
- Zamora, M. B. P., P. Sánchez, G. V. H., Volke, H. D., Espinosa, V. y Galvis, S. A. 2005. Formulación de mezclas de sustratos mediante programación lineal. *Interciencia* 30: pp. 69-81.
- Zuang, H., Musard, M. 1984. Cultures legumieres sur Substrats. Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes, Paris. Pag. 244.