

# Propiedades físicas y químicas de sustratos formulados con bagazo de agave y corteza de pino sometidos a explosión con vapor

Physical and chemical properties of substrates formulated with agave bagasse and pine bark subjected to steam explosion

Juan Manuel Ruvalcaba-Barrios<sup>1</sup>✉, Eduardo Salcedo-Pérez<sup>1\*</sup>✉, Laura Liliana Acosta-Sotelo<sup>1</sup>✉, José Anzaldo-Hernández<sup>2</sup>✉, Víctor Manuel Ordaz-Chaparro<sup>3</sup>✉, Diego Raymundo González-Eguiarte<sup>1</sup>✉ y Ramón Rodríguez-Macías<sup>1\*</sup>✉

<sup>1</sup> Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. Universidad de Guadalajara Camino Ramón Padilla Sánchez No. 2100 Nextipac, 44600, Zapopan, Jalisco, México.

<sup>2</sup> Departamento de Madera, Celulosa y Papel. Universidad de Guadalajara Camino Ramón Padilla Sánchez No. 2100 Nextipac, 44600, Zapopan, Jalisco, México.

<sup>3</sup> Posgrado de Edafología. Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. 56230 Montecillo Estado de México.

## ABSTRACT

In Mexico, the tequila and sawmill industries generate large volumes of agave bagasse and pine bark, which can be processed through steam explosion, allowing them to be utilized more quickly and with greater efficiency. The objective was to evaluate the physical and chemical properties of six substrates formulated with agave bagasse and pine bark, subjected to the steam explosion technique. The evaluated substrates contained different proportions of agave bagasse (BA), pine bark (CP), perlite (P), peat (T), and vermiculite (V), resulting in six treatments under a completely randomized experimental design. Physical and chemical properties were evaluated, as well as an image analysis using scanning electron microscopy. The image analysis results demonstrated that modifying the lignocellulosic matrix improves the materials' properties for use as a substrate. Significant statistical differences were found between treatments in all physical and chemical properties. The treatments (substrates) containing less than 75 % agave bagasse or pine bark showed better physical properties, which were reflected in a more favorable water retention curve, similar to the control treatment (70 % peat).

**Keywords:** *Agave tequilana* Weber; moisture retention curve; granulometry; porosity.

## RESUMEN

En México las industrias del tequila y aserrío generan grandes volúmenes de bagazo de agave y corteza de pino; los cuales pueden ser procesados mediante la explosión con vapor, esto permite aprovecharlos en menor tiempo y con mayor utilidad. El objetivo fue evaluar propiedades físicas y químicas de seis sustratos formulados con bagazo de agave y corteza de pino, sometidos a la técnica de explosión con vapor. Los sustratos evaluados presentan diferente proporción de: bagazo de agave (BA), corteza de pino (CP), perlita (P), turba (T) y vermiculita (V), obteniendo seis tratamientos, bajo un diseño experimental completamente al azar. Se evaluaron propiedades físicas y químicas; así como un análisis de imagen con microscopía electrónica de barrido. Los resulta-

dos del análisis de imagen demuestran que la modificación de la matriz lignocelulósica favorece las propiedades de los materiales para emplearlo como sustrato. Se presentaron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos en todas las propiedades físicas y químicas. Los tratamientos (sustratos) que presentaron una proporción menor al 75 % de bagazo de agave o corteza de pino mostraron mejores propiedades físicas que se vieron reflejadas en un mejor comportamiento en la curva de retención de agua, similar al tratamiento control (70 % turba).

**Palabras clave:** *Agave tequilana* Weber; curva de retención de agua; granulometría; porosidad.

## INTRODUCCIÓN

Existe una creciente demanda de sustratos para producción agrícola a nivel mundial, pero a la vez el acceso a los principales materiales empleados como sustratos (turba y fibra de coco) se ha restringido. La sobreexplotación de la turba ha ocasionado el agotamiento de turberas y por lo tanto un incremento importante en su precio al igual que la fibra de coco (Herrera *et al.*, 2008). Por lo anterior, se hace necesario la búsqueda de materias primas, materiales o residuos que puedan sustituir o competir con las propiedades adecuadas de la turba para su uso como sustrato agrícola o forestal que puedan cubrir la creciente demanda de sustratos para la producción de alimentos (Tzortzakis *et al.*, 2020).

En este sentido, los materiales alternativos deben obtenerse de forma sustentable y en cantidades suficientes para cubrir la demanda; además deben presentar propiedades físicas y químicas que permitan el adecuado desarrollo de las plantas (Cruz *et al.*, 2016). Los materiales lignocelulósicos derivados de diferentes agroindustrias pueden ser buenas alternativas a la turba y fibra de coco, siempre y cuando se procesen de manera adecuada. En este sentido en 2023 la industria tequilera requirió de 2. 28 millones de toneladas de agave para producir 598.7 millones de litros de tequila y tequila 100 % (CRT, 2024), del volumen de agave procesado el 40 % corresponde a un residuo conocido como "bagazo de agave".

\*Autor para correspondencia: Ramón Rodríguez-Macías y Eduardo Salcedo-Pérez  
Correo-e: ramonrod@cuba.udg.mx y eduardo.salcedo@academicos.udg.mx

Recibido: 2 de julio de 2024

Aceptado: 5 de noviembre de 2024

Publicado: 6 de diciembre de 2024

En la producción agrícola el bagazo de agave en forma de composta es utilizado como sustrato para la germinación y cultivo de diferentes especies vegetales en contenedor (Raviv y Leith, 2008; Estévez *et al.*, 2009; Crespo *et al.*, 2018) y como mejorador de suelo (Acosta *et al.*, 2023), sin embargo, este aprovechamiento es mínimo. El mayor volumen de bagazo de agave se deposita a cielo abierto (Martínez *et al.*, 2013) o se utiliza como combustible de calderas de biomasa para la misma industria (López y Sainz, 2011), lo que genera contaminación ambiental (Merino, 2012). Por otro parte, Rodríguez (2004) reportó que la composta de bagazo de agave presenta características similares a la turba de *Sphagnum* (*peat moss*) por lo cual este material podría ser un sustrato alternativo y cubrir el déficit actual de estos productos.

Por otro lado, la industria forestal genera grandes volúmenes de corteza de diversas especies de pino (*Pinus* spp.) con potencial para aprovechamiento como sustrato agrícola (Saldaña *et al.*, 2022). Actualmente se emplea para la producción de plántulas de pinos, orquídeas (*Cyrtopodium hatschbachii* Pabst) y *Cedrela odorata* L en contenedor (Mateo *et al.*, 2014; Bernalola *et al.*, 2015; Duarte *et al.*, 2021).

Sin embargo, tanto el bagazo de agave como la corteza de pino sin ningún tratamiento no reúnen características adecuadas para ser empleados como sustratos para el crecimiento vegetal; por lo que es necesario someterlos a un proceso de transformación no solo biológica como es el compostaje; el cual requiere un amplio espacio de terreno, maquinaria de volteo y transporte, y al menos de 160 días de procesamiento.

Por lo tanto, consideramos que la técnica de explosión con vapor puede ser un proceso de transformación de materiales lignocelulósicos de forma efectiva y eficiente en comparación con el compostaje. Este proceso consiste en someter el material a una presión elevada mediante vapor saturado de agua y una despresurización súbita que permite modificar la estructura de la pared celular de los materiales lignocelulósicos (Grous *et al.*, 1986), la lignina es re-localizada sobre la superficie de las fibras de celulosa (Kristensen *et al.*, 2008), lo que genera una mayor área superficial, que incrementa la porosidad y retención de humedad. En este sentido, no existen evidencias de que se haya aplicado con anterioridad para el tratamiento de bagazo de agave o corteza de pino para utilizarlos como sustratos. Con base en lo anterior, el objetivo fue evaluar propiedades físicas y químicas de cinco sustratos formulados con bagazo de agave y corteza de pino, sometidos a la técnica de explosión con vapor, con la finalidad de usarlos como sustrato.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo se llevó a cabo en dos fases; en la primera se determinaron las condiciones de tiempo, temperatura y presión más adecuadas para transformar el bagazo de agave y la corteza de pino mediante el cálculo del factor de severidad requerido para estos materiales sin llegar a su degradación. Para la fase dos, se formularon y caracterizaron física y químicamente cinco distintos tratamientos (sustratos) a

partir de la mezcla de diferentes proporciones de bagazo de agave y corteza de pino procesada por explosión con vapor.

### Fase I transformación de bagazo de agave y corteza de pino con la técnica explosión con vapor

La transformación de bagazo de agave y corteza de pino mediante la técnica de explosión con vapor, para determinar las condiciones adecuadas del proceso para estos materiales, se desarrolló en el Departamento de Madera Celulosa y Papel de la Universidad de Guadalajara en Zapopan, Jalisco, México. Coordenadas Latitud 20°44'41.5"N, Longitud 103°30'48.7"O.

Se aplicó el proceso de transformación de explosión con vapor a tres tipos de bagazo de agave provenientes de distinto proceso de cocción y de obtención de carbohidratos (mampostería, autoclave y difusor); además, dos tipos de corteza de pino de dos diferentes especies (*Pinus oocarpa*, *Pinus leiophylla*).

### Técnica del proceso explosión con vapor

Tanto el bagazo de agave como la corteza de pino se depositaron, en fases separadas, en un reactor vertical de 50 L de capacidad con la humedad de origen; (bagazo de agave 65 – 75 %; corteza de pino 50 %). Posteriormente se tapó el reactor y se abrió la válvula de paso del vapor hasta alcanzar las condiciones establecidas en el cálculo del factor de severidad. Acto seguido se despresurizó el sistema súbitamente, abriendo la válvula tipo bola de la parte inferior del reactor, lo que provocó que el material se expandiera saliendo eyectado hacia un depósito de mayor volumen, lo cual, usualmente, genera una explosión debida a la diferencia de presiones entre el reactor y el ambiente.

El procedimiento continuó luego de 48 h porque el material requiere de un periodo de inmersión en agua corriente, seguido de un triple lavado manual sobre un cedazo con malla de 3 mm, donde se elimina tanto médula, azúcares solubles y compuestos fenólicos. Posteriormente, el material pretratado se secó al sol por 48 horas en capas delgadas (5 cm) sobre un plástico, con volteos manuales de las fibras hasta su deshidratación. El proceso de acondicionamiento del material finalizó al pasarlo por un molino de martillos con aperturas de malla de 0.635 cm; el material resultante se almacenó en bolsas plásticas.

### Cálculo del factor de severidad para el bagazo de agave y la corteza de pino procesados con la técnica de explosión con vapor

El factor de severidad se emplea para interpretar el grado de hidrólisis del bagazo de agave y de la corteza de pino, combinando los efectos de la temperatura y el tiempo de reacción como un único parámetro. El cálculo de la severidad se hizo usando la expresión (1) (Jacquet *et al.*, 2011).

$$S = \text{Log}_{10} \int t_2 t_1 \exp [T(t) - 100/14.75] dt \quad (1)$$

S: factor de severidad; T (t): temperatura del proceso (°C); t: tiempo de residencia

(minutos); (14.75): constante de energía de activación (Ley de Arrhenius).

Una vez determinado el factor de severidad adecuado para transformar el bagazo de agave y la corteza de pino mediante la técnica de explosión con vapor se procesaron tres tipos de bagazo de agave y dos tipos de corteza de pino para la caracterización lignocelulósica antes y después de explosión con vapor.

### Caracterización lignocelulósica

A los cinco materiales procesados se les realizó la caracterización lignocelulósica antes y después del proceso de explosión con vapor mediante las Normas TAPPI (T 203 os 74 y T 222 os 74) para determinar el contenido de celulosa y lignina.

### Microscopia electrónica de barrido

Se empleó un microscópico electrónico de barrido MEB (JEOL-6610LV) para analizar los cambios en la morfología tanto de fibras del bagazo de agave como de la corteza de pino antes y después de la técnica de explosión con vapor.

Una vez determinado el factor de severidad que definió las condiciones de temperatura, presión y tiempo requeridos para procesar los materiales, continuó la caracterización lignocelulósica para elegir los materiales con las mejores propiedades para procesar la cantidad necesaria de estos materiales requeridos para llevar a cabo la fase II.

### Fase II formulación y evaluación de sustratos a base de bagazo de agave y corteza de pino procesados con explosión con vapor

Se consideraron seis tratamientos de los cuáles, cinco de ellos presentaban en su mezcla bagazo de agave o corteza de pino procesados con explosión con vapor; además de un tratamiento considerado como control sin bagazo de agave y sin corteza de pino establecido como adecuado para la producción de plántula en la empresa donde se llevó a cabo el trabajo. Cada tratamiento está representado por un tipo de sustrato diferente y cada sustrato (tratamiento) consistió en una mezcla de materiales bajo una proporción de sólido/sólido (Tabla 1). Los tratamientos (sustratos) se caracterizaron en el laboratorio de física de suelos en el Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo en Texcoco Estado de México.

### Caracterización física de los sustratos

La densidad aparente (DA) y la porosidad fueron evaluadas con la metodología propuesta por Landis *et al.* (1990).

$$\text{Densidad aparente (DA) } Da = \frac{\text{Peso seco del sustrato (g)}}{\text{volumen total del envase (cm}^3\text{)}}$$

Porosidades

$$\text{Porosidad total PT \%} = \frac{\text{Peso sustrato saturado} - \text{Peso sustrato seco}}{\text{volumen envase}} * 100$$

$$\text{Porosidad de aireación PA \%} = \frac{\text{Peso sustrato saturado} - \text{Peso sustrato drenado}}{\text{volumen envase}} * 100$$

$$\text{Porosidad de retención de humedad (PRH \%)} = PT \% - PA \%$$

**Tabla 1.** Proporciones de materiales de las mezclas seleccionadas como sustratos.

**Table 1.** Proportions of materials of the mixtures selected as substrates.

Tratamientos (Mezcla/sustrato)	Bagazo de agave (% v/v)	Corteza de pino (% v/v)	Turba (% v/v)	Perlita (% v/v)	Vermiculita (% v/v)
S0	0	0	70	20	10
S1	25	75	0	0	0
S2	75	25	0	0	0
S3	50	0	0	50	0
S4	100	0	0	0	0
S5	0	100	0	0	0

S0 = 70 % turba; 20 % perlita : 10 % vermiculita; S1 = 25 % bagazo de agave : 75 % corteza de pino; S2 = 75 % bagazo de agave : 25 % corteza de pino; S3 = 50 % bagazo de agave: 50 % perlita; S4 = 100 % bagazo de agave; S5= 100 % corteza de pino.

Se utilizaron envases de 230 mL, los cuales se etiquetaron y pesaron antes de ser llenados; posteriormente cada sustrato se saturó por 24 h, luego se colocó en el envase, tomando el peso. Después se drenó el agua de los envases, obteniendo el peso de sustrato drenado. Cada muestra se colocó dentro de una estufa de secado a 70 °C por 72 h, y por último se obtuvo el peso seco de las muestras de sustratos.

### Curvas de retención de agua

Se determinaron las curvas de retención de agua de los sustratos, usando el método de batería de embudos de succión con placa filtrante desarrollado por De Boodt *et al.*, (1974); esta técnica se basa en someter a distintas tensiones el material colocado (sustrato) en cada embudo y a su vez conectado a una manguera con agua que se desplaza a distinta altura según la medición que corresponda; para cada medición se genera una tensión diferente, la cual permite generar la gráfica con el comportamiento de la disponibilidad de agua para cada tratamiento (sustrato). Con esos valores se determinaron los siguientes parámetros: punto de saturación (tensión 0); agua fácilmente disponible (AFD), por diferencia del agua retenida entre 10 y 50 cm de tensión; agua de reserva (AR), por la diferencia entre 50 y 100 cm de tensión, los cuáles pueden ser graficados. En cada medición se extrae una parte del material para obtener su peso en húmedo y en seco colocándolo en una estufa a 70 °C por 24 h, para determinar los valores de porosidad y graficar las curvas de retención de agua de cada uno de los tratamientos.

**Granulometría.** La distribución del tamaño de partículas de las mezclas de sustratos se determinó en una tamizadora (Rotap RX-29), con seis tamices con apertura de malla de 4.76 a 0.25 mm, colocando 100 g de muestra de cada mezcla de sustrato, durante tres minutos (Burés, 1997).

### Caracterización química

El pH y la conductividad eléctrica (CE) se determinaron por el método de extracto de saturación (Ansorena, 1994), con

un potenciómetro-conductímetro (Conductronic PC 45) en agua destilada, con una relación de 1:2 en volumen (sustrato: agua destilada) para pH; y 1:5 para CE.

Para la determinación de la proporción de materia orgánica (MO), se desecaron 5g de muestra a 105 °C hasta peso constante, para después calcinarse por 3 horas en una mufla a 350 °C, en el segundo caso. Así, MO (%) =  $\frac{\text{Peso } 105^{\circ}\text{C} - \text{Peso } 350^{\circ}\text{C}}{\text{Peso } 105^{\circ}\text{C}} \times 100$  (Aendecker *et al.*, 2000).

Para obtener el porcentaje de carbono orgánico (CO %), se utilizó el método de calcinación en mufla: Muestras de 1.5 g de sustrato, primero se pasaron a estufa a 105 °C por una hora, se toma el peso seco; luego se calcinaron a una temperatura de 350 °C por 3 h; una vez calcinadas se obtuvo el peso de las muestras. Se determinaron las cenizas:

$$\text{Cenizas \%} = \frac{\text{Peso sustrato seco} - \text{peso sustrato calcinado}}{\text{peso sustrato seco}} \times 100$$

Materia orgánica % = (100-cenizas %), la proporción de carbono orgánico se calculó con base en los resultados de materia orgánica mediante el factor 0.58 (Walkley y Black, 1947)

$$\text{CO \%} = \text{MO \%} \times (0.58)$$

Así mismo, se determinó el contenido de nitrógeno total (NT) por el método Kjeldahl (Cottenie, 1994). Finalmente, la relación C: N se obtuvo con base en los resultados de los análisis del carbono orgánico (CO) y Nitrógeno total (NT) (Horneck y Miller, 1998).

### Diseño experimental y análisis estadístico de los tratamientos (sustratos)

Se utilizó un diseño experimental completamente al azar, con seis tratamientos (sustratos) y tres repeticiones para las variables físicas y químicas evaluadas. Los resultados de las propiedades físicas y químicas fueron sometidos a un análisis de normalidad y de varianza, así como una prueba de medias de Tukey ( $P \leq 0.05$ ) utilizando el programa estadístico Mini-tab 14 (2015).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados generados de la fase I en relación al proceso para la transformación de los materiales mediante la explosión con vapor, permitieron determinar las condiciones de tiempo, temperatura y presión requeridas para encontrar el valor del factor de severidad adecuado para estos materiales sin llegar a su degradación (Tabla 2).

El valor del factor de severidad (S) determinado para el bagazo de agave y corteza de pino fue de 3.82, el cual se obtuvo con las siguientes condiciones: tiempo de 5 a 25 minutos de trabajo del reactor, una presión de 5 a 15 Kg cm<sup>-2</sup> y una temperatura de 185 a 195 °C. Esto está de acuerdo a lo expresado por Saddler *et al.*, (1993), quienes afirmaron que las variables importantes en el pretratamiento de explosión con vapor son; el tiempo, la temperatura, el tamaño de las astillas y el contenido de humedad.

**Tabla 2.** Cálculo del factor de severidad para bagazo de agave y corteza de pino.

**Table 2.** Calculation of the severity factor of agave bagasse and pine bark.

Factor de severidad	Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Presión (kg/cm <sup>2</sup> )
2.77	20	150	10
3.65	20	180	10
<b>3.82</b>	<b>15</b>	<b>190</b>	<b>10</b>
3.94	10	200	10
4.12	15	200	10

En la tabla 3 se muestran los resultados de los contenidos de holocelulosa y lignina de los cinco materiales (3 bagazos de agave y 2 cortezas), antes del proceso de explosión con vapor ya presentaban diferencias entre ellos; sobresaliendo valores mayores en holocelulosa en bagazo de difusor (77 %) y *Pinus oocarpa* (74 %), de igual manera estos dos materiales presentaron los menores valores de lignina (23 y 25 %, respectivamente). Una vez que los materiales fueron sometidos al proceso de explosión con vapor, los contenidos de holocelulosa bajaron, excepto en bagazo de autoclave, en el cual se incrementó de 67 a 72 %. Por otro lado, los contenidos de lignina disminuyeron en todos los materiales después del proceso de explosión con vapor excepto en bagazo de mam-postería, el cual incrementó de 34 a 38 % (Tabla 3).

El principal efecto que se logra con el proceso de explosión con vapor para la transformación de materiales lignocelulósicos a través de la descompresión súbita, es el de provocar la reducción del tamaño de la fibra del bagazo de agave y de la lámina de la corteza pino, ya que modifica la estructura de la pared celular del residuo; además, se incrementa el área superficial de las partículas después del proceso, originando un material de color marrón, lo cual es indicativo de la hidrólisis de hemicelulosa fácilmente soluble en agua y una fracción de un material insoluble en agua compuesto principalmente por celulosa, residuos de hemicelulosa y lignina (Pire y Pereira 2003; Bonfiglio *et al.*, 2019).

### Microscopia electrónica de barrido

Las imágenes obtenidas con el microscopio electrónico de barrido (MEB) de las fibras de bagazo de agave de autoclave antes y después del proceso de explosión con vapor, muestran los cambios estructurales. En la Figura 1 (a) corresponde a tres imágenes de bagazo sin procesar donde se aprecian fibras largas, con una superficie rugosa, irregular y de color café claro. Las fibras están compuestas por una matriz de lignina y hemicelulosa, las cuales recubren las microfibras de celulosa y las mantiene aglomeradas formando una fibra entera (Rubín, 2008). La Figura 1 (b) corresponde al bagazo de agave sometido a explosión con vapor, bajo un factor de severidad S= 3.82; se aprecia mayor porosidad del material, fibras más cortas y separadas, de menor diámetro, además de fibras con fractura notable, con un tono café más oscuro (Burés, 1997).



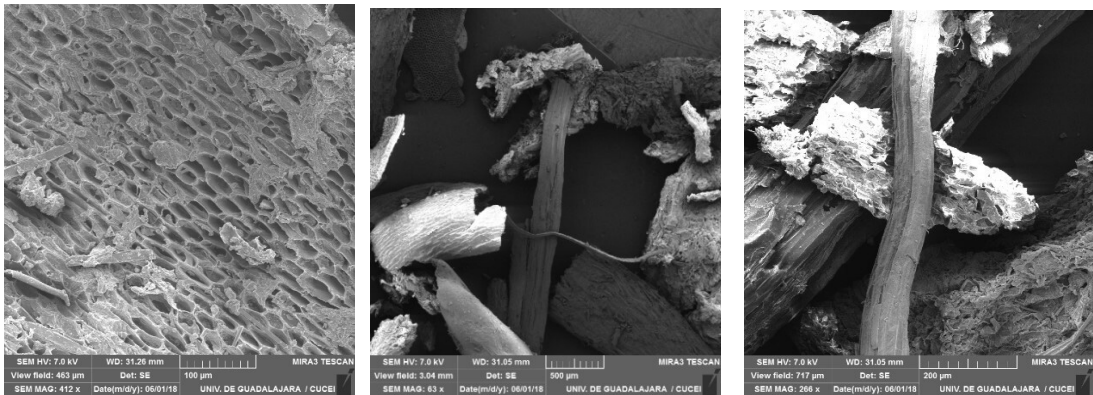
**Tabla 3.** Determinación de holocelulosa y lignina de tres tipos de bagazo de agave y dos tipos de corteza de pino antes y después del proceso de explosión con vapor.

**Table 3.** Holocellulose and lignin determination of three types of agave bagasse and two types of pine bark before and after the steam explosion process.

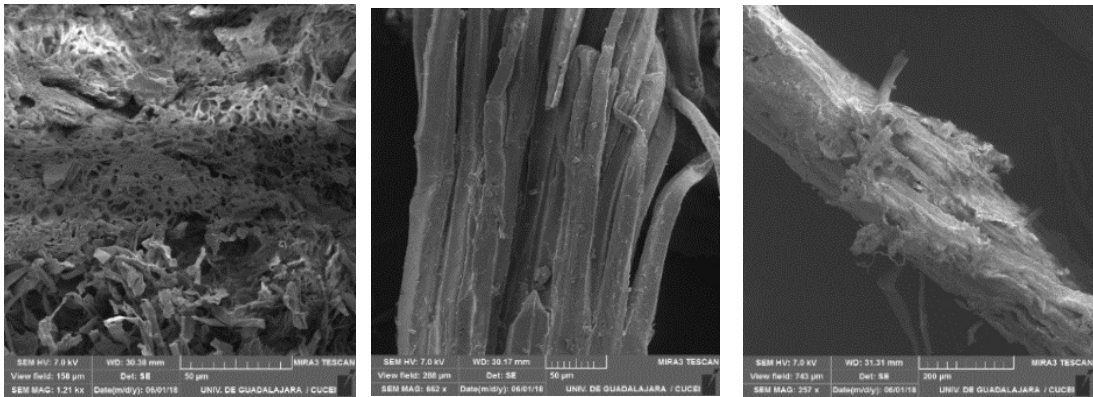
Material	Descripción	Antes de e.v. Holocelulosa (%)	Antes de e.v. Lignina (%)	Después de e.v. Holocelulosa (%)	Después de e.v. Lignina (%)
B1	Bagazo de agave cocción horno	66	34	62	38
B2	Bagazo de agave cocción autoclave	67	33	72	28
B3	Bagazo de agave difusor	77	23	74	26
P1	<i>Pinus oocarpa</i>	74	25	70	22
P2	<i>Pinus leiophylla</i>	69	28	65	25

e. v.= explosión con vapor.

a)



b)



**Figura 1.** Bagazos de agave: sin tratamiento de explosión con vapor (a), con explosión de vapor (b).

**Figure 1.** Agave bagasses: without steam explosion treatment (a), with steam explosion (b).

Los resultados de la fase II permitieron caracterizar física y químicamente los seis tratamientos (sustratos).

A partir de los resultados descritos de la fase I se eligieron solo dos tipos de materiales para llevar a cabo los experimentos de la fase II que consistió en la evaluación de

cinco sustratos considerados como tratamientos. Se eligió el bagazo de autoclave, ya que incrementó el contenido de holocelulosa y disminuyó el de lignina; además se consideró la corteza de *Pinus oocarpa* por presenta mayor valor de holocelulosa y menor de lignina, ambos después del proceso.

### Propiedades físicas de los tratamientos (sustratos)

**Distribución granulométrica.** Se observaron diferencias estadísticas significativas ( $P \leq 0.05$ ) entre tratamientos para la variable de distribución granulométrica (Tabla 4). Se observa que el tratamiento testigo S0 tiene el mayor porcentaje de partículas finas  $< 0.25$  mm (21.3 %); esto concuerda con lo propuesto por Ansorena (1994), el cual establece que el sustrato con tamaño de partícula menor a 1 mm, presentó una disminución de la porosidad y aumento en la retención de agua. Cadahía (2005) y Burés (1997) mencionan que las partículas con efectos dominantes sobre la germinación de plántula son las menores a 0.5 mm. Los tratamientos S1, S5 y S4 presentaron más del 20 % de partículas menores a 1 mm y un porcentaje acumulado de 24.1, 25.7 y 33.9 %, respectivamente. La capacidad de aireación puede verse afectada por la disminución de tamaño de partícula (Prasad y Ni Chualáin, 2004).

**Tabla 4.** Distribución granulométrica (porcentaje con base en el peso) del tamaño de partículas de los seis tratamientos (sustratos).

**Table 4.** Granulometry (percentage based on weight) of the six treatments (substrates).

Trat.	Tamaño de partícula (mm)						
	$< 0.25$	0.25-0.50	0.50-1.0	1.0-2.0	2.0-3.36	3.36-4.7	$> 4.7$
S0	21.3	8.9	22.0	20.4	10.6	7.3	1.1
S1	5.0	3.8	15.3	19.4	17.4	20.4	3.9
S2	3.3	3.6	16.8	18.7	17.3	18.6	6.1
S3	7.5	2.3	13.9	37.7	24.0	9.3	0.23
S4	4.3	3.9	25.7	30.7	15.3	10.1	0.10
S5	6.5	3.7	15.5	25.9	18.8	13.4	3.0
CV	12.4	16.5	11.7	3.79	4.69	5.15	13

Medias con letras distintas en la misma columna, son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ); S: tratamientos (mezclas-sustratos); CV: coeficiente de variación.

Means with different letters in the same column are significantly different, according to Tukey's test ( $P \leq 0.05$ ); S: treatments (mixtures-substrates); CV: coefficient of variation.

El S3 registró el mayor porcentaje de partículas de 1-2 mm (37.7 %); el S4 mostró 30.7 % de peso en el mismo tamaño de partícula, lo que está dentro del rango a lo expresado por Cabrera (1999), quien manifiesta que la distribución granulométrica recomendada para la preparación de sustratos para contenedor está entre 0.5 y 2 mm. Ambas mezclas (S3 y S4) mostraron valores bajos de partículas finas (7.5 % y 4.3 %, respectivamente). Anicua *et al.*, (2009), mencionan que la granulometría favorable para retener el agua fácilmente disponible está en un mayor rango entre 0.5 y 3.36 mm. Este parámetro de granulometría no debe usarse para describir, desde el punto de vista agronómico, sustratos constituidos por mezclas de distintos materiales; esto, debido a que el comportamiento está en función de su composición, masa, densidad, compresibilidad, rugosidad, estructura interna, forma y tamaño. El tamaño es solo un factor más en esta lista (Burés, 1997).

**Densidad aparente (DA).** Se encontraron diferencias estadísticas significativas por efecto de los tratamientos debido a la fracción orgánica (Pire y Pereira, 2003). Se obtuvieron valores de 0.08 a 0.29 g cm<sup>-3</sup> (Tabla 5) los cuales son similares a los reportados por Abad *et al.*, (1998) con valores de 0.3 y 0.8 g cm<sup>-3</sup>, así mismo Handreck y Black (1994) establecen valores de 0.60 g cm<sup>-3</sup> de DA para el uso de sustratos.

La constitución fibrosa de estos materiales los hace ligeros, con baja densidad aparente, factor importante para sustratos en contenedor de fácil transporte y manipulación. La DA, además, define el adecuado anclaje de las plantas; de este modo, mientras más alta es la planta, mayor deberá ser la densidad del sustrato (Abad *et al.*, 2004). La densidad aparente aumenta al disminuir el tamaño de partícula por efecto de la molienda; además, los poros se rompen y las partículas modifican su organización, por lo tanto, se reduce el espacio poroso (Ansorena, 1994).

**Porosidad total (PT).** El valor de las mezclas varió entre 81.9 y 92.4 % (Tabla 5), los resultados se mantuvieron dentro del rango sugerido por Morales y Casanova (2015) superiores a 85 %. Estos niveles de porosidad superiores al 80 % favorecen el crecimiento de la raíz y también el desarrollo de la parte aérea (Peñuelas y Ocaña, 1996). La porosidad total determina el porcentaje de volumen que no está ocupado por la fase sólida (Ansorena, 1994; Burés, 1997).

**Porosidad de aireación (PA).** Se presentaron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos por efecto de la PA. El valor más bajo de porosidad de aireación se registró en S0 con 22.4 % (Tabla 5) debido al mayor volumen de partículas finas; mientras que los demás tratamientos presentaron valores entre 39.2 y 57.2 % de PA. La capacidad de retención de agua y la capacidad de aireación están relacionadas directamente con la porosidad y dependen de la distribución,

**Tabla 5.** Propiedades físicas de los seis tratamientos (sustratos).

**Table 5.** Physical properties of the six treatments (substrates).

Tratamientos	DA (g /cm <sup>3</sup> )	PT (%)	PA (%)	PRH (%)
S0	0.12 ± 0.0 d	88.5 ± 1.35 a	22.4 ± 2.98 d	66.1 ± 4.33 a
S1	0.19 ± 0.0 b	81.9 ± 1.66 b	39.2 ± 2.53 c	42.7 ± 0.96 b
S2	0.16 ± 0.01 c	92 ± 1.15 a	51.1 ± 1.4 b	41.0 ± 1.98 b
S3	0.11 ± 0.0 d	90.4 ± 2.25 a	54.7 ± 3.0 b	35.7 ± 0.78 c
S4	0.08 ± 0.00 e	92.4 ± 0.186 a	57.2 ± 0.53 a	35.2 ± 0.35 c
S5	0.29 ± 0.00 a	92.1 ± 4.47 a	57.1 ± 1.52 a	35.2 ± 2.95 c
CV	0.70	2.36	5.31	4.18

Medias con letras distintas en la misma columna, son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ). DA: densidad aparente; PT: porosidad total; PA: porosidad de aireación; PRH: porosidad de retención de humedad; CV: coeficiente de variación.

Means with different letters in the same column are significantly different, according to Tukey's test ( $p \leq 0.05$ ). AD: bulk density; PT: total porosity; PA: aeration porosity; PRH: moisture retention porosity; CV: coefficient of variation.

composición, estructura interna, forma y tamaño de partícula, que, a la vez, determinan la relación agua-aire en el sustrato (Anicua *et al.*, 2009). Es importante mencionar que no todos los poros deben de estar saturados y de este modo se permite la oxigenación de las raíces y el intercambio de gases entre la atmósfera y el sustrato; en este sentido, los valores de PA % elevados de la mayoría de las mezclas indican que existen muchos macroporos y que las raíces de las plantas tienen mucha aireación y que exista un menor volumen de agua disponible para la planta debido a que los sustratos experimentales tuvieron la menor proporción de partículas finas (4.3 – 7.5 %).

**Porosidad de retención de humedad (PRH).** El tratamiento testigo presentó el mayor porcentaje de PRH % con 66.1 %, esto debido al mayor volumen de partículas finas; los demás tratamientos estuvieron entre 35.2 y 42.7 % (Tabla 5). Gutiérrez *et al.*, (2011), mencionan que la PRH % disminuye cuando en el sustrato se encuentran partículas de 1 a 2 mm de diámetro.

Con estos resultados el tratamiento S0, se posicionó como la mejor mezcla con el mayor volumen de retención de humedad y por lo tanto como uno de los sustratos más empleados por los productores de plántula.

**Curvas de retención de agua.** Las curvas de los sustratos evaluados (Figura 2), están integradas por los puntos de agua no disponible (AND), agua fácilmente disponible (AFD) y agua de reserva (AR), así como el contenido de agua a saturación punto 0 de la Figura 2. De Boodt *et al.* (1974), mencionan que entre las tensiones de 10 y 50 cm se encuentra el agua fácilmente disponible (AFD) y entre las tensiones de 50 y 100 cm de columna de agua, el agua de reserva (AR).

Se aprecia que el mayor valor de agua no disponible (AND) se encontró en S4 (100 % bagazo de agave), al pasar del punto de saturación de agua de 65 a 35 % a 0 y +10 cm de tensión de columna de agua respectivamente. Esto significa una pérdida de agua del 30 % debido, a la constitución a base de fibras del bagazo de agave y al mayor tamaño de partículas, que facilitaron la percolación. El tratamiento testigo (S0) inició con un 65 % de saturación de agua y disminuyó

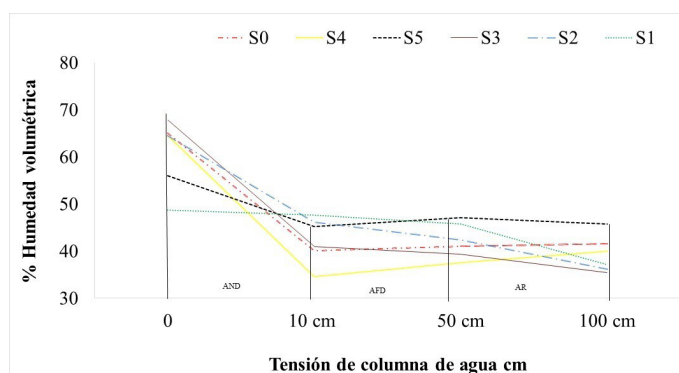
a 40 %, esto es perdió solo el 25 % de agua; esto debido a la predominancia de partículas finas que retienen la humedad. Esto está de acuerdo a lo expresado por Anicua *et al.*, (2009), al disminuir el volumen del tamaño de partícula 1–2 mm, tanto los materiales orgánicos como inorgánicos, reducen su capacidad de retención de agua y humedad volumétrica; ya que su espacio poroso total también disminuye.

El contenido de agua fácilmente disponible (AFD) y de reserva (AR), muestran la cantidad de agua que la planta toma y las curvas generadas para los sustratos presentan un comportamiento similar para S0 y S4; con un 1 % y 3 % respectivamente; valores obtenidos al restar 40 y 41 para S0 y 35 y 38 para S4. La mezcla S1 retiene la mayor cantidad de humedad 67 % y drena a 41 % a 10 cm de tensión. Dicha caída o punto de inflexión es del orden del 26 %, y en la Figura 2 se aprecia por la pendiente entre el punto 0 y 10 cm; esto se debe a la presión de entrada de aire o presión de burbuja de aire y se caracteriza por tener signo negativo; después del punto de tensión 10 cm hasta 100 cm se aprecia una recta casi horizontal; esto está de acuerdo a lo establecido por Gutiérrez *et al.*, (2011) en curvas de retención de agua para materiales puros y mezclas de fibra de coco, piedra pómez y tezontle; y demostraron que la mezcla de material orgánico e inorgánico (75:25), presentan mayor retención incluso que la fibra de coco sola.

Según Burés (1997), la presión mínima que se debe aplicar a un sustrato para que el aire llene los poros es cuando su valor es cercano a cero. Durante la determinación de la curva de retención de agua a distintas tensiones se presentaron condiciones adversas en el manejo de los materiales como, dificultad para volver a hidratar el sustrato S0, ya que los espacios ocupados por aire, no pueden volver a saturarse de agua una vez que la han perdido (fenómeno conocido como histéresis). En este sentido, al momento de realizar los cálculos para los distintos valores de AFD y AR se obtuvieron valores negativos para las mezclas S4 y S0, lo que refleja presencia de aire al momento de la lectura a los 50 y 100 cm de columna de agua, situación que coincide con lo establecido por Burés (1997).

A partir de los resultados obtenidos de las pruebas físicas de los tratamientos (sustratos) podemos concluir que el comportamiento y las propiedades de los materiales empleados como sustratos, dependen de los siguientes aspectos:

Forma y tipo de partícula (esférica, granular, fibrosa, laminar o amorfa). Tamaño de partícula (finos menor a 1 mm, pequeña de 1 a 3 mm, media de 4 a 7 mm y grande mayor a 7 mm), así como la distribución de éstos en la matriz. Finalmente considerar su resistencia a la fragmentación o descomposición por tipo de origen (orgánico, mineral, sintético). Por lo anterior, es importante que dependiendo del propósito con el que se va a utilizar el sustrato, se debe considerar la combinación más adecuada de los anteriores aspectos para dicho objetivo, ya que, la combinación de éstos permite que se complementen las funciones de cada uno de ellos de forma individual o en una mezcla.



**Figura 2.** Curva de retención de agua de los seis sustratos (tratamientos). AND= agua no disponible; AFD= agua fácilmente disponible; AR= agua de reserva.

**Figure 2.** Water retention curves of the analyzed substrates. AND= water not available; AFD= readily available water; AR= reserve water.



### Propiedades químicas de los sustratos

**Materia orgánica (MO).** Los tratamientos presentaron diferencias estadísticas significativas ( $P \leq 0.05$ ) como se muestra en la tabla 6. Los mayores valores se presentaron en S2 y S4 con 94 % en ambos tratamientos. Mientras que los valores más bajos se obtuvieron en S3 y S0 con (48.6 y 74.3 %, respectivamente). Los resultados encontrados en los tratamientos S1, S2, S4 y S5 se encuentran dentro del parámetro deseable para MO en sustratos  $> 80$  % (Ansorena, 1994). Los contenidos de MO encontrados en los tratamientos están dados por su composición química la cual se ve reflejada en una lenta mineralización (Day y Shaw, 2001).

**Nitrógeno total (NT).** La concentración de N en los tratamientos evaluados osciló de 0.46 a 0.81 % como se muestra en la tabla 6. Los mayores valores se encontraron en S0 y S4 con (0.81 y 0.80 %, respectivamente); los resultados encontrados son similares a los reportados por Iñiguez *et al.*, (2005) y Rodríguez *et al.* (2010) en composta de bagazo de agave con valores de 0.81 a 0.83 %, sin embargo, son mayores a los reportados por Borges *et al.*, (2003) con 0.5% de N.

**Relación C: N.** Los tratamientos presentaron diferencias estadísticas significativas (Tabla 6), encontrando que S2 y S5 fueron los que registraron los mayores valores de relación C:N (110.6 y 112.5, respectivamente), los cuales presentan alto contenido de lignina, celulosa y de compuestos de carbono recalcitrantes, lo que genera una alta relación C:N, además son resistentes a la degradación por los microorganismos (Burés, 1997; Quintero *et al.*, 2011). Mientras que los valores más bajos se obtuvieron S3 y S0 con una relación C:N (44 y 53, respectivamente), lo anterior indica que estos materiales presentarán una rápida mineralización al presentar material orgánico poco estable (Sánchez *et al.*, 2007).

Sin embargo, los tratamientos S1, S2, S4, S5 pueden ser utilizados en la producción de planta por presentar un alto contenido de materiales orgánicos, los cuales tendrán una descomposición más lenta (Acosta *et al.*, 2023).

**El pH** de todos los tratamientos fue estadísticamente diferente, presentando valores de 5.3 a 6.2, ya que, este influye en la disponibilidad de nutrientes del sustrato a la planta (Tabla 6). Por lo anterior, Landis *et al.*, (1990) mencionan que al utilizar sustratos para la producción de planta estos deben presentar un pH entre 5.5 y 6.5.

**La CE** todos los tratamientos presentaron diferencias estadísticas significativas con valores de 0.13 a 0.40 d S m<sup>-1</sup> (Tabla 6). Los resultados encontrados concuerdan con lo reportado por Abad *et al.*, (2004) y Quintero *et al.*, (2011), quienes mencionan que los valores no deben superar los 3.5 d S m<sup>-1</sup>.

### CONCLUSIONES

El proceso de explosión con vapor aplicado a bagazo de agave tequilero y corteza de pino, permite una transformación química y estructural de dichos materiales, lo que genera propiedades físicas adecuadas para su uso como sustratos agrícolas alternativos a la turba y fibra de coco. Se determinó que el factor de severidad requerido para la transformación de estos materiales sin llegar a su degradación fue de  $S = 3.82$ .

Los sustratos que tuvieron en su mezcla una proporción de al menos 50 % de bagazo de agave o corteza de pino, presentaron una mejor densidad aparente en comparación cuando se emplean al 100 % independientemente del material. Con respecto a la porosidad total y porosidad de retención de humedad los tratamientos con mejores valores son los que presentaron bagazo de agave o corteza de pino en una proporción menor al 75 %; lo cual se reflejó en la curva de retención de agua.

Se recomienda, al formular un sustrato hacer mezclas de materiales orgánicos o inorgánicos con propiedades físicas que se complementen entre sí, ya que, se demostró que el tipo y la forma de la partícula; así como el tamaño y la distribución granulométrica de las mismas generaron mejores propiedades al mezclar el bagazo de agave (fibras), con la

**Tabla 6.** Propiedades químicas de los sustratos (tratamientos).  
**Table 6.** Chemical properties of substrates (treatments).

Tratamiento	Cenizas	MO	COT	NT	C:N	CE	pH
	-----%-----					(d S/m)	
S0	25.7±4.8b	74.3±4.7c	43.1±2.8c	0.81±0.03a	53±1.8d	0.28±0.01c	5.3±0.04c
S1	7.8±1.5cd	92.2±1.5ba	53.5±0.8ab	0.60±0.01b	111±19a	0.23±0.01d	5.6±0.03b
S2	6.0±0.8d	94±0.8a	54.5±0.4a	0.50±0.09c	89±3.5b	0.40±0.01a	5.6±0.15b
S3	51±1.9a	48.6±1.8d	28.2±1.1d	0.65±0.05b	44±5.2d	0.40±0.01a	5.6±0.02b
S4	5.7±0.7d	94±0.7a	54.7±0.4a	0.80±0.00a	69±0.5c	0.30±0.01b	6.2±0.13a
S5	11±0.5c	89.2±0.5b	51.7±0.2b	0.46±0.00c	113±0.6a	0.13±0.01e	5.5±0.1b
CV	12.4	2.7	2.7	n/d	10.32	4.4	1.69

Medias con letra distinta en la misma columna son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ). MO: materia orgánica; COT: Carbono orgánico total; NT: Nitrógeno total; C: N: relación Carbono Nitrógeno; CE: conductividad eléctrica. CV: coeficiente de variación, n/d: no disponible.

Means with different letters in the same column are significantly different, according to Tukey's test ( $p \leq 0.05$ ). OM: organic matter; COT: Organic carbon; NT: Total nitrogen; C:N: Carbon Nitrogen ratio; EC: electrical conductivity. CV: coefficient of variation.



corteza de pino (láminas) y otros materiales; además para incrementar la retención de agua, se deberá incrementar el porcentaje de partículas finas (menores a 1 mm) entre un 20 y 30 %.

## AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por los recursos económicos para desarrollar esta investigación mediante la beca nacional recibida por el autor principal estudiante del Programa de Doctorado en Ciencias en Biosistemática, Ecología y Manejo de Recursos Naturales y Agrícolas (BEMARENA), Sede CUCBA-UDG.

A la empresa Agro Proyectos y Servicios Estratégicos y Ambientales SPR de RL (AGROASPE) por el financiamiento para el desarrollo de este proyecto, el cual forma parte del registro ante el INPI con número de expediente IT/B/2019/0001390, número de solicitud IT/B/2019/000354 e identificador 6050.

## CONFLICTOS DE INTERES

Los autores no expresan conflicto de interés.

## REFERENCIAS

- Abad, B.M., Noguera, M. y C. Carrión, B. 2004. Los sustratos en el cultivo sin suelo. (Urrestarazu G. M. ed.). Tratado de cultivos sin suelo. Mundi Prensa. Madrid, España.
- Acosta, S.L.L., Zamora, N.J.F., Rodríguez, M.R., Jiménez, P.C., Gallardo, L.J.F. y Salcedo, P.E. 2023. Bagazo y composta de bagazo de agave tequilero en suelos contrastantes: 2. Dinámica de mineralización del carbono y nitrógeno. *Revista Biotecnia*. 25 (2): 5-11.
- Aendekerk, G.L., Cevat, H.N., Dolmans, C., Van Elderen, J.A., Kipp, C., de Kreij, C., Sonneveld, J.B., Verhagen, G.M. y Wever, G. 2000. International substrate manual. Elsevier International. The Netherlands.
- Anicua, S.R., Gutiérrez, C.M.C., Sánchez, G.P., Ortiz, S.C.A., Volke, H.V.H. y Rubiños, P.J.E. 2009. Tamaño de partícula y relación micromorfológica en propiedades físicas de perlita y zeolita. *Agric. Téc. Méx.* 35: 147-156.
- Ansorena M.J. 1994. Sustratos. Propiedades y Caracterización. (ed) Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Bernaola, P.R.M., Zamora, N.J.F., Vargas, R.J.J., Cetina, A.V.M., Rodríguez, M.R. y Salcedo, P.E. 2015. Calidad de planta en etapa de vivero de dos especies de pino en sistema Doble-Trasplante. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. 7 (33): 74-93.
- Bonfiglio, F., Cagno, M., Rey, F., Torres, M., Böthig, S., Menéndez, P. y Mussatto, S. I. 2019. Pretreatment of switchgrass by steam explosion in a semi-continuous pre-pilot reactor. *Biomass and Bioenergy*. 121:41-47.
- Borges, G.L., Soria, F.M. y Ruz, F.N. 2003. Contenido de macronutrientes en sustratos de bagazo de henequén y excretas porcina y su efecto en el desarrollo plántulas de papaya. *Rev. Chapingo Ser. Hortic*. 9: 291-304.
- Burés, S. 1997. Sustratos. (ed). Agrotécnicas S. L. Madrid, España.
- Cabrera, R.I. 1999. Propiedades, uso y manejo de sustratos de cultivo para la producción de plantas en macetas. *Rev. Chapingo Ser. Hortic*. 5: 5-11.
- Cadahia, L.C. 2005. Fertirrigación, cultivos hortícolas, frutales y ornamentales. (ed.) Mundi-Prensa. Madrid, España. 681 pp.
- Crespo, G.M.R., González, E.D.R., Rodríguez, M.R., Ruíz, C.J.A. y Durán, P.N. 2018. Caracterización química y física del bagazo de agave tequilero compostado con biosólidos de vinaza como componente de sustratos para cultivos en contenedor. *Rev. Int. Contam. Ambie*. 34 (3) 373-382.
- Cottenie, A. 1994. Workshop on standarization of analytical methods for manure, soil plant and water. Comission European Communities. FAO Soils Bulletin 38/2. pp: 28-33.
- Consejo Regulador del Tequila. CRT. 2024 (consultado:28 septiembre 2024). Disponible en <http://www.crt.org.mx/EstadísticasCRTweb/>.
- Cruz, C.J.M., Álvarez, S.J.M., Soria, F.M.J. y Martínez, B.C. 2016. Producción de sustratos orgánicos para ornamentales a menor costo que los importados. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*. 25(1): 44-49.
- Day, M. y Shaw, K. 2001. Biological, chemical, and physical process of composting. In: Compost utilization in horticultural cropping systems. P.J. Stoffela y B.A. Kahn (eds.). pp. 17-50. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida, EUA,
- De Boodt, M., Verdonck, O. y Cappaert, I. 1974. Method for measuring the waterrelease curve of organic substrates. *Acta Horticulturae*. 37, 2054-2063.
- Duarte, E.R., Rubenich, R., Thalmayr, P.G., Ortiz, L.M., Rocha, S.P., Niella, F.O. y Küppers, G. 2021. Efecto del tipo de polinización en la formación de frutos y capacidad germinativa de las semillas de *Cyrtopodium hatschbachii* Pabst. *Revista Forestal Yvyrareta*. 29 (12), 43-51.
- Estévez, I., Seoane, S., Núñez, A. y López, M.E. 2009. Characterization and evaluation of compost utilized as ornamental plant substrate. *Compost Sci. Utilization*. 17(4):210-219.
- Grous, W.R., Converse, A.O. y Grethlein, H.E. 1986. Effect of steam explosion pretreatment on pore size and enzymatic hydrolysis of poplar. *Enzyme Microb Technol*. 8:274-280.
- Gutiérrez, C.M.C., Hernández, E.J., Ortiz, S.C.A., Anicua, S.R. y Hernández, L.M.E. 2011. Relación porosidad retención de humedad en mezclas de sustratos y su efecto sobre variables respuesta en plántulas de lechuga. *Rev. Chap. Ser. Hort*. 17(3): 183-196.
- Handreck, K.A. y Black, N.D. 1994. Growing media ornamental plants and turf. Sydney, Australia:University of New South Wales Press. Herrera, F., Castillo J. E., Chica, A. F. y López, B. L. 2008. Use of municipal solid waste compost (MSWC) as a growing medium in the nursery production of tomato plants. *Bioresource Thecnology*. 99: 287-296.
- Horneck, D.A. y Miller, R.O. 1998 Determination of total nitrogen in plant tissue. In Y. P. Kalra (eds.) Handbook of reference methods for plant analysis, soil and plant analysis council, Inc. pp. 75-83. Boca Raton, FL, USA: CRC Press.
- Herrera, F., Castillo, J.E., Chica, A.F. y López, B.L. 2008. Use of municipal solid waste compost (MSWC) as a growing medium in the nursery production of tomato plants. *Bioresource Thecnology*. 99: 287-296.
- Jacquet, N., Quiévy, N., Vanderghem, C., Janas, S., Blecker, C. y Wathelet, B. 2011. Influence of steam explosion on the thermal stability of cellulose fibres. *Polymer Degradation and Stability*, 1582-1588.
- Kristensen, J.B., Thygesen L.G., Felby C., Jorgensen H. y Elder T. 2008. Cell-wall structural changes in wheat straw pretreated for bioethanol production. *Biotechnol Biofuels*(1):5

- Landis, T.D., Tinus, R.W., Mc Donald, S.E. y Barnett, J.P. 1990. The Container tree nursery manual. Vol. II Containers and growing media, Agric. Handbook. 674. Washington, DC, USA: USDA, Forest Service.
- López, M.M.E. y Sainz, O.M.J. (Coords). 2011. Guía de residuos orgánicos de uso agrícola. Santiago de Compostela: Servicio de Publicaciones. Universidad de Santiago de Compostela.
- Martínez, G.G.A., Iñiguez, C.G., Ortiz, H.Y.D., López, J.Y. y Bautista, C.M.A. 2013. Tiempos de apilado del bagazo del maguey mezcalero y su efecto en las propiedades del compost para sustrato de tomate. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 29(3): 209-2016.
- Mateo, S.J.J., Capulín, G.J., Araujo, S.M.R., Suárez, I.A., Mitjans, M.B. 2014. Crecimiento de *Acacia retinodes* Schltdl. en sustratos a base de aserrín de pino y envases tratados con cobre. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*. 2(2): 191-202.
- Merino, A. 2012. El bosque: sumidero de carbono y fuente de energía. Recursos Rurais Serie Cursos. 6: 107-119.
- Minitab 14 2015. Lenguaje Pack- Español. Minitab® Inc.v.14.2.1. EUA.
- Morales, M.E.R. y Casanova, L.F. 2015. Mezclas de sustratos orgánicos e inorgánicos, tamaño de partícula y proporción. *Agron. Mesoam*. 26: 365-372.
- Peñuelas, R.J.L. y Ocaña, B.L. 1996. Cultivo de Plantas Forestales en Contenedor. Mundi-Prensa. (ed). Madrid, España. 190 p.
- 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.
- Prasad, M. y Chualáin D. 2004. Relationship between particle size and air space of growing media. *Acta Hort*. 648: 161-166.
- Quintero C., M.F. González M., C.A. y Guzmán P., J.M. 2011. Sustratos para cultivos hortícolas y flores de corte. In: Flórez R., V. J. (ed.). 79-108 pp. Sustratos, Manejo del Clima, Automatización
- Control en Sistemas de Cultivo sin Suelo. Universidad Nacional de Bogotá. Colombia.
- Raviv, M. y Leith, J.H. 2008. Soilless culture: theory and practice. Elsevier, San Diego, CA, U.S.A.
- Rodríguez, M.R. 2004. Desarrollo y caracterización de sustratos orgánicos a partir de bagazo de agave tequilero. Tesis de Doctorado en Ciencias Agrícolas. Colegio de Postgraduados. Montecillo, E.M.
- Rubin, E.M. 2008. Genomics of cellulose biofuels. *Nature* 4, 841-845.
- Saldaña, P.E., Cruz, S.H., y Cruz, S.J. 2022. Composta a base de aserrín y excretas de bovinos. *Tendencias En energías Renovables Y Sustentabilidad*. 1(1), 368-376. <https://doi.org/10.56845/terys.v1i1.210>
- Sánchez, H.R., Ordaz, Ch.V.M., Benedicto, V.G.S., Palma, L.D.J. y Sánchez, B.J. 2007. Chemical characteristics of several vermicompost in México. *Compost Science & Utilization*. 15(1): 47-52. <https://doi.org/10.1080/10.65657X.2007.10702310>.
- Technical Associaton for the Pulp and Paper Industries. 1978. Acid-insoluble lignin in wood and pulp. TAPPI Test Method T 222 os-74. TAPPI Press. Atlanta.
- Tzortzakis, N., Nicola, S., Savvas, D. y Voogt, W. 2020. Editorial: Soilless cultivation through an intensive crop production scheme. Management Strategies, Challenges and Future Directions. *Frontiers in Plant Science*. (11): 363p. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.0036>
- Walkley, A. y Black, I.A. 1947. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*. 37(1): 29-38. <https://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>.
- Wise, L.E., Marphy M. y de Adieco A. 1946. Clorite holocellulose, its fractiontion and bearing on summative wood analysis and studies on the hemicelluloses. *Paper trade Journal*. 122(2): 35:43.