

EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUSTRATO PARA LA PRODUCCIÓN DE PLANTINES DE YERBA MATE

Lorena Alejandra Barbaro^{1*}

¹ Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria

RESUMEN

El sustrato es uno de los principales insumos para la producción de plantines de Yerba Mate (YM) (*Ilex paraguariensis* A. St.-Hil.) y sus propiedades deben ser adecuadas según el sistema de cultivo. El objetivo de este trabajo fue analizar los sustratos elaborados con compost de corteza de pino (CCP) y turba de *Sphagnum* (T), y evaluar el efecto de las propiedades físicas sobre la calidad morfológica de los plantines de YM producidos en bandejas alveoladas. El ensayo estuvo conformado por cinco tratamientos: 100% T; 75% T + 25% CCP; 50% T + 50% CCP; 25% T + 75% CCP y 100% CCP. Para cada sustrato se analizó: pH, conductividad eléctrica (CE), densidad aparente (Dap), espacio poroso total (EPT), capacidad de retención de agua (CRA), porosidad de aireación (PA) y granulometría. En 45 plantines por tratamiento se midieron: longitud y diámetro tallo, masa seca aérea (MSA) y radical (MSR) y se calculó el índice de robustez (IR) y de calidad de Dickson (ICD). Los análisis estadísticos utilizados fueron: análisis de componentes principales, análisis de varianza y Test de Tukey ($P < 0,05$). Todos los sustratos tuvieron el pH y la CE dentro del rango adecuado (5,5 a 6,8 y $< 1 \text{ dS m}^{-1}$). A mayor porcentaje de T, la CRA aumentó y la PA disminuyó con diferencias entre los sustratos ($P < 0,0001$). Los plantines desarrollados en los sustratos: 75% T + 25% CCP, 50% T + 50% CCP y 25% T + 75% CCP tuvieron mayor MSA y con 100% T tuvieron menor MSR. Los menores IR fueron para los plantines de los sustratos: 25% T + 75% CCP y 100% CCP. Los plantines de los sustratos 75% T + 25% CCP, 50% T + 50% CCP y 25% T + 75% CCP tuvieron mayor ICD. En conclusión, los plantines de YM más robustos y de calidad se obtuvieron en los sustratos con: $\text{EPT} > 85\%$, $\text{CRA} \leq 55\%$, $\text{PA} \geq 35\%$ y $\text{Dap} \leq 200 \text{ kg m}^{-3}$.

Palabras clave: *Ilex paraguariensis*, corteza de pino, porosidad de aireación, capacidad de retención de agua.

EVALUATION OF THE PHYSICAL PROPERTIES OF THE SUBSTRATE FOR THE PRODUCTION OF YERBA MATE SEEDLINGS

ABSTRACT

The substrate is one of the main inputs for the production of Yerba Mate (YM) seedlings (*Ilex paraguariensis* A. St.-Hil.) and its properties must be adequate according to the cultivation system. The objective of this work was to analyze physical properties of substrates made with pine bark compost (CCP) and *Sphagnum* peat (T) and to evaluate their effects on the morphological quality of YM seedlings produced in alveolar plastic trays. The trial consisted of five treatments: 100% T; 75% T + 25% CCP; 50% T + 50% CCP; 25% T + 75% CCP and 100% CCP. The following variables were analyzed for each substrate: pH, electrical conductivity (EC), bulk density (Dap), total pore space (EPT), water retention capacity (CRA), aeration porosity (PA) and granulometry. Stem length and diameter, aerial dry mass (MSA) and root dry mass (MSR) were measured on 45 seedlings per treatment and the robustness index (IR) and Dickson quality index (ICD) were calculated. The statistical analyses used were principal component analysis, analysis of variance and Tukey's test ($P < 0.05$). All the substrates had pH and EC values within an adequate range (5.5 to 6.8 and $< 1 \text{ dS m}^{-1}$). The CRA increased and the PA decreased in response to increasing amounts of T, with significant

* Autor de contacto:
barbaro.lorena@inta.gob.ar

Recibido:
22-06-23

Recibido con revisiones:
13-09-23

Aceptado:
19-09-23

differences among treatments ($P < 0.0001$). Seedlings grown under 75% T + 25% CCP, 50% T + 50% CCP and 25% T + 75% CCP had higher MSA while those under 100% T had lower MSR. The lowest IR was identified in seedlings under 25% T + 75% CCP and 100% CCP. The seedlings under 75% T + 25% CCP, 50% T + 50% CCP and 25% T + 75% CCP showed higher ICD. In conclusion, YM seedlings with the highest quality and robustness were obtained in substrates with $EPT > 85\%$, $CRA \leq 55\%$, $PA \geq 35\%$ and $Dap \leq 200 \text{ kg m}^{-3}$.

Keywords: *Ilex paraguariensis*, Pine bark, aeration porosity, water holding capacity.

INTRODUCCION

La Yerba Mate (*Ilex paraguariensis* A. St.-Hil.) es una especie nativa que pertenece a la familia Aquifoliácea, cuya área de distribución natural es en Brasil, Argentina y Paraguay (Ceconi et al., 2007). En Argentina, se producen 209.276,90 has de Yerba Mate, de las cuales el 87% corresponde a la provincia de Misiones (Instituto Nacional de Yerba Mate [INYM], 2022). Para su consumo las hojas maduras cosechadas pasan por un proceso industrial donde son desecadas y luego molidas, transformándose en un producto llamado "yerba mate" o simplemente "yerba" (Dellacassa et al., 2007). La yerba se consume principalmente como infusión mediante el mate (infusión con agua caliente), tereré (infusión con agua fría) o té. Además, se emplea en cosmética, gastronomía y para fines medicinales (Cardozo & Morand, 2016; Croge et al., 2021).

En las últimas décadas la extracción de hojas de Yerba Mate de áreas nativas fue reemplazada por el cultivo intensivo (Gabira et al., 2020a). El incremento de este cultivo llevó a un aumento de la demanda de plantines, como también, estudios para mejorar las prácticas de manejo para lograr un óptimo establecimiento de plantas a campo. En este sentido, desde 2016 al 2022 según los reportes del INYM (INYM, 2022; INYM, 2016) hubo un incremento del 21% de la superficie cultivada, que según la distancia de plantación requirieron de 2.220 a 4.000 plantines/ha (Burtnik, 2006), es decir, un total de 97.657.088 a 175.800.340 plantines.

Los plantines de Yerba Mate son producidos en viveros y la etapa inicial es la obtención y adecuación de los propágulos, los cuales pueden ser estacas o semillas (Llera y Medina, 2017). En el último caso, la siembra se realiza en almácigos con sustrato debido a su largo período de germinación que es entre dos a cinco meses (Eibl et al., 2022). Luego, a partir de que la plántula presenta los cotiledones desplegados hasta un máximo de 4 a 6 hojas (Duboc, 2015; Eibl et al., 2022; Prat Kricun, 1993) se replica en macetas, tubetes o bandejas alveoladas con sustrato. En el vivero los plantines son puestos bajo media sombra (50 a 80%) y fertilizados con fertilizante de liberación lenta incorporado al sustrato o mediante un plan nutricional con fertiriego. La última etapa es la rusificación del plantín durante 20 a 45 días, donde están al aire libre y se disminuye gradualmente el porcentaje de sombra hasta conseguir la adaptación del mismo a las condiciones de cultivo (Capellari, 2017; Eibl et al., 2022). El tiempo que transcurre desde la germinación en el almácigo hasta llegar a un plantín en condiciones para llevarlo a campo es de siete a ocho meses (Burtnik, 2006).

En base a lo mencionado el sustrato es uno de los insumos principales en un vivero de plantines de Yerba Mate, éste sirve de anclaje a las raíces del plantín y en cuyo espacio poroso se almacena el agua, los nutrientes y se intercambian gases (Carmona y Abad Berjón, 2008; Valenzuela 2013). Para que estas funciones se cumplan el sustrato debe estar formulado con uno o más componentes que finalmente proporcionen las propiedades químicas y físicas adecuadas. Estas propiedades están condicionadas por el sistema de cultivo, es decir, la altura, volumen y forma del recipiente; tipo de sistema de riego, características del agua de riego, requerimientos de la especie, la época del año y duración del ciclo, entre otros (Abad Berjón et al., 2004; Valenzuela, 2013; Vence, 2008).

Entre las principales propiedades químicas se mencionan el pH y la conductividad eléctrica (CE) (Barbaro et al., 2018; Othman et al., 2019). Es recomendable que el sustrato tenga un pH ligeramente ácido (5,3 a 6,8), para que los nutrientes se encuentren disponibles, y una CE baja, para que no existan problemas de toxicidad por sales (Abad Berjón et al.; 2004, Patil et al., 2020). Con respecto a las propiedades físicas, deben permitir un equilibrio apropiado de aire y agua para que las raíces desarrollen en forma saludable. En este sentido, la distribución del tamaño de las partículas establece la distribución del tamaño de los poros y, como consecuencia, el porcentaje de poros con aire y agua que contendrá el sustrato (Carlile et al., 2015). Una forma de expresar la distribución del tamaño de las partículas es mediante el índice de grosor (IG). Este índice se define como el porcentaje acumulado en peso o volumen de partículas con diámetro $> 1 \text{ mm}$ (Abad Berjón et al., 2004, p.120-121). Por otro lado, la típica curva de liberación de agua de los sustratos está establecida según De Boodt et al. (1972) en un rango de valores de tensión entre 0 a 10 kPa. El punto

cero de tensión es el máximo contenido de humedad (saturación) cuyo valor coincide con el espacio poroso total (EPT). La porosidad de aireación (PA) es el volumen de aire del sustrato y la capacidad de retención de agua (CRA) es el agua retenida en el sustrato sometido a una tensión de 1 kPa; el agua fácilmente disponible es el volumen de agua liberada por el sustrato a una succión entre 1 a 5 kPa y el agua de reserva, es el volumen de agua liberada a tensiones entre 5 a 10 kPa (De Boodt et al., 1972; Martínez Farré, 1992; Vence et al., 2008;). Según Abad Berjón et al. (2001) el sustrato para un contenedor debe poseer un EPT mayor a 85% y el rango aceptable como óptimo de PA debería estar entre 20 a 30% y de CRA entre 55 a 70%. Pero estos valores son orientativos, ya que como se mencionó anteriormente las propiedades adecuadas del sustrato dependerán del sistema de cultivo elegido (Barbaro y Karlanian, 2020). Además, se destaca que las características físicas del sustrato suelen ser más relevantes que las químicas ya que, una vez establecido el cultivo aquellas no podrán modificarse (Abad Berjón et al., 2005, p. 303).

Uno de los sustratos utilizados en viveros de plantines de Yerba Mate es el compost de corteza de pino (CCP) (Capellari, 2017; Eibl et al., 2022), elaborado a partir de materiales provenientes de aserraderos y descortezadoras de madera. La CE en general es baja y los valores de pH son inferiores a 5,8 (Barbaro et al., 2019). Por lo tanto, si se lo utiliza en forma pura, a veces es conveniente realizar un ajuste previo con adición de calcáreos como el carbonato de calcio (CaCO_3) y la dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) (Altland y Jeong, 2016). Con respecto a sus propiedades físicas, varían según la distribución del tamaño de las partículas. Barbaro et al. (2019) analizaron diferentes tipos de CCP, entre los cuales, uno tenía un IG de 62% y otro de 81%, en consecuencia, sus respectivos valores de PA fueron 54% y 64%, y de CRA fueron 35% y 27%. Por lo tanto, es importante realizar un análisis físico previo para poder decidir con criterio si se lo podría utilizar en forma pura o en un determinado porcentaje en una mezcla según el sistema de cultivo empleado.

Por otro lado, para que los plantines logren establecerse, crecer y desarrollarse vigorosamente en el sitio de plantación deben tener una adecuada calidad, la cual está dada por sus propiedades morfológicas y fisiológicas (Rodríguez Trejo, 2008, p. 109-124). Entre las primeras algunas comúnmente medidas son la longitud y el diámetro del tallo, índice de robustez (altura/diámetro del tallo), índice de calidad de Dickson (ICD) entre otros (Sáenz Reyes et al., 2014; Villalón Mendoza et al., 2016).

El objetivo de este trabajo fue analizar las propiedades de sustratos elaborados con diferentes proporciones de CCP y turba de *Sphagnum*, y posteriormente evaluar el efecto de las variables físicas sobre la calidad morfológica de los plantines de Yerba Mate producidos en bandejas alveoladas.

MATERIALES Y METODOS

Ensayo

El ensayo se realizó en las instalaciones de la Estación Experimental Agropecuaria Cerro Azul, Misiones (EEA CA) del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Argentina (27° 39' 23,5" S; 55° 26' 13,8" O). Se instaló el 26/08/2022 y finalizó el 13/04/2023.

Estuvo conformado por cinco tratamientos, correspondientes a sustratos formulados con turba de *Sphagnum* (T) y compost de corteza de pino (CCP) en distintas proporciones para obtener diferentes propiedades físicas: 1) 100% T; 2) 75% T + 25% CCP; 3) 50% T + 50% CCP; 4) 25% T + 75% CCP y 5) 100% CCP. La unidad experimental fue el plantín. Cada tratamiento estaba conformado por tres bandejas alveoladas distribuidas mediante un diseño experimental completamente aleatorizado. De cada bandeja al finalizar el ensayo, se extrajeron 15 plantines al azar, dando un total de 45 repeticiones (plantines) por tratamiento.

Los sustratos se formularon con T de origen europeo (con pH corregido) comercializada por la empresa Kekkilä® y CCP elaborado por la empresa Decoppet ubicada en la localidad de Virasoro (Corrientes, Argentina). A todos los sustratos se incorporó 3 kg m⁻³ de fertilizante de liberación lenta Basacote® Plus 9M (16% N, 8% P₂O₅, 12% K₂O, 2% MgO, 5% S, 0,4% Fe, 0,05% Cu, 0,06% Mn, 0,02% Zn, 0,02% B, 0,015% Mo). Los sustratos del tratamiento 4 y 5 tenían valores de pH inferior a 5, por lo tanto, se corrigió incorporando 3 g de dolomita (MICARGENTINA®) por litro de sustrato. Se mezcló semanalmente para su homogeneización y a los 30 días los valores de pH fueron constantes y se encontraron en el rango adecuado (5,3-6,8) según Abad Berjón et al. (2001).

Las bandejas alveoladas utilizadas contenían 25 celdas (5 x 5) de 9 cm de alto y 100 cm³ cada una (Carluccio®). En cada celda se trasplantó una plántula de Yerba Mate obtenidas en el invernadero de la EEA

CA a partir de semilla (PG 538/90 CA538-90) en cajones de 15 cm de alto rellenos con CCP bajo riego por aspersión. Las plántulas utilizadas tuvieron, en promedio, 0,025 g de masa seca total, con uno a dos pares de hojas verdaderas.

El ensayo se realizó bajo un invernáculo con media sombra al 50%. Las bandejas se colocaron directamente sobre una mesada con un sistema de riego por aspersión instalado a 1,35 m de altura desde la superficie de la mesada. El riego fue automático y se suministró a las 9, 11, 14 y 16 horas. Cada riego duró 5 minutos, y cada microaspersor tuvo un caudal de 35 l h⁻¹. Se colocaron tres microaspersores cada 1 m lineal. A partir de los tres meses, también se regó manualmente debido a que los plantines tenían mayor cantidad de hojas y dificultaban la llegada del agua asperjada al sustrato. Para el agua de riego utilizada se registró un pH de 6,64 y conductividad eléctrica (CE) de 0,11 dS m⁻¹.

Al finalizar el ensayo (230 días) se midió a cada plantín la longitud del tallo (cm), el diámetro basal del tallo (mm), los gramos de masa seca aérea (MSA) y radical (MSR) (secado en estufa a 60 °C hasta peso constante). Además, se calculó el índice de robustez (IR): longitud (cm)/ diámetro (mm) y el índice de calidad de Dickson (ICD): (MSA+MSR (g))/ ((longitud (cm)/ diámetro (mm)) + (MSA (g)/MSR (g))) (Dickson et al., 1960).

Análisis de los sustratos evaluados

Antes de rellenar las bandejas se tomó una muestra de 12 litros de cada sustrato formulado y se trazó dos líneas oblicuas tomando 3 litros de dos cuartos opuestos, conformando una submuestra de 6 litros. En cada submuestra se ajustó el porcentaje de humedad (% peso) a un 50% (± 2) y se analizaron las siguientes variables por triplicado en el Laboratorio de Sustratos de la EEA CA: pH y conductividad eléctrica (CE), densidad aparente (Dap), espacio poroso total (EPT), capacidad de retención de agua (CRA), porosidad de aireación (PA) y granulometría. Para pH y CE, en una relación 1 + 5 v/v: en un frasco de 250 mL se colocaron 150 mL de agua destilada y se llevó a 180 mL con el agregado de sustrato. Se agitó durante 10 minutos y se dejó reposar 15 minutos, luego se realizaron las mediciones en la solución con un medidor de pH (Ion 700, Oakton Instruments, USA) y un conductímetro (Dist 4, Hanna Instruments, Argentina) (Barbaro et al., 2019). La Dap, EPT, CRA y PA se determinaron con el método de De Boodt mediante una mesa de tensión a 1 kPa utilizando el sistema de "lechos de arena" (De Boodt et al., 1973). La granulometría se determinó mediante una tamizadora vibratoria con una serie de tamices de 4,76; 3,35; 2,0; 1,0 y 0,59 mm, durante 10 minutos en forma intermitente, los resultados se expresaron en porcentaje y se agruparon según el tamaño de partículas > 3,35 mm, entre 3,35 a 1 mm y < 1 mm (Ansorena Miner, 1994, p. 107-108). Además, se calculó el índice de grosor (IG), sumando el porcentaje acumulado de partículas con diámetro > 1 mm.

Análisis estadísticos

Los resultados de las variables evaluadas en los sustratos y en los plantines se sometieron a análisis de varianza y Test de Tukey para comparación de medias ($P < 0,05$). Para analizar la interdependencia de las variables medidas e identificar los sustratos con propiedades físicas adecuadas, se utilizó el análisis de componentes principales, del cual se obtuvo un Biplot conformado por dos componentes generadas por la combinación lineal de las variables: IG, densidad aparente, EPT, PA, CRA de los sustratos e ICD, IR, longitud y diámetro del tallo de los plantines. El software estadístico utilizado fue el programa InfoStat versión 2009 (Di Rienzo et al., 2009).

RESULTADOS Y DISCUSION

Propiedades químicas de los sustratos evaluados

La corrección del pH realizada a los sustratos con 25% T + 75% CCP y 100% CCP fue eficiente, todos los sustratos se encontraron dentro del rango adecuado: 5,5 a 6,8 (Abad Berjón et al., 2001), aunque hubo diferencias significativas ($P < 0,0001$) (Tabla 1). Por debajo de este rango, pueden presentarse deficiencias de N, K, Ca y Mg; mientras que por encima, puede disminuir la solubilidad del Fe, P, Mn, Zn y Cu (Barbaro et al., 2018, p. 4-6; Altland & Jeong, 2016). Gabira et al. (2020b) evaluaron sustratos formulados con corteza de pino y 25%, 50% o 75% de residuo de carbón o lodos de depuradora para la producción de plantines de Yerba Mate y observaron que a mayor porcentaje de estos componentes el pH se incrementó entre 8 a 9,2 y 9,5 a 10,1 respectivamente. En consecuencia, los plantines tuvieron menor longitud y diámetro del tallo con respecto al sustrato con corteza de pino puro (pH: 6,7).

Tabla 1. pH y conductividad eléctrica (CE) de los sustratos evaluados.

Table 1. pH and electrical conductivity (EC) of the evaluated substrates.

| Sustratos | pH | | CE (dS m ⁻¹) | |
|-------------|------|--------|--------------------------|-------------|
| | Mean | SD | Significance | Mean |
| 100%T | 6,09 | ± 0,01 | a | 0,57 ± 0,02 |
| 75%T+25%CCP | 5,99 | ± 0,01 | ab | 0,56 ± 0,05 |
| 50%T+50%CCP | 5,78 | ± 0,02 | c | 0,57 ± 0,02 |
| 25%T+75%CCP | 5,86 | ± 0,05 | bc | 0,60 ± 0,02 |
| 100%CCP | 5,78 | ± 0,10 | c | 0,51 ± 0,01 |

Letras distintas entre filas de una misma columna indican diferencias significativas ($P < 0,05$) para el test de Tukey. T: Turba de *Sphagnum*. CCP: compost de corteza de pino. * Se indican valores de las variables \pm desvío estándar.

Different letters between rows of the same column indicate significant differences ($P < 0.05$) for the Tukey test. T: *Sphagnum* peat. CCP: pine bark compost. * Values of the variables \pm standard deviation are indicated.

Los valores de CE fueron $< 1 \text{ dS m}^{-1}$ (1+5 v/v), límite establecido para la metodología empleada (Barbaro et al., 2021), pero hubo diferencias significativas entre los sustratos ($P < 0,0001$) (Tabla 1). Sustratos con elevada CE podrían disminuir el desarrollo de las plantas debido a desbalances nutricionales y/o efectos fitotóxicos. En este sentido, Gabira et al. (2020b) también observaron que en los sustratos con corteza de pino y diferentes proporciones de lodo de depuradora había un incremento de la CE ($> 2,0 \text{ dS m}^{-1}$) obteniendo en general menor longitud y diámetro del tallo que en los sustratos formulados con corteza de pino y residuo de carbón en la misma proporción.

Todos los sustratos evaluados tuvieron valores de pH y CE dentro de los rangos de referencia. Siqueira Walter et al., (2022) evaluaron plantines de Yerba Mate en diferentes contenedores con un sustrato formulado con T, vermiculita y residuos orgánicos con un valor de pH: 5,5 y CE: $0,7 \text{ dS m}^{-1}$ y concluyeron que todos los plantines presentaron un crecimiento apropiado. Asimismo, Zavistanovicz et al. (2017) obtuvieron plantines de Yerba Mate con los promedios más altos de altura, diámetro del tallo, área foliar, MSR y MSA en un sustrato compuesto por suelo del subsuelo, estiércol de ganado y cascarilla de arroz carbonizada con un pH: 6,4 y una CE: $0,6 \text{ dS m}^{-1}$. En ambos casos los valores de pH y CE coinciden con el rango mencionado. En base a los resultados obtenidos el efecto de los sustratos sobre la calidad morfológica de los plantines de Yerba Mate podría atribuirse principalmente a las propiedades físicas.

Propiedades físicas de los sustratos evaluados

La densidad aparente de todos los sustratos fue baja (Tabla 2), se recomienda una densidad aparente inferior a 400 kg m^{-3} (Abad Berjón et al., 2001). Una densidad baja permite que las labores de mezclado del sustrato, cargado en los recipientes y traslado sean menos dificultosas.

Tabla 2. Densidad aparente (Dap.), porcentaje de partículas > 3,35 mm, entre 3,35 a 1 mm y < 1 mm e índice de grosor (IG) de los sustratos evaluados.

Table 2. Bulk density (Dap.), percentage of particles > 3.35 mm, between 3.35 and 1 mm and < 1 mm and thickness index (IG) of the evaluated substrates.

| Sustratos | Dap. (kg m ⁻³) | Tamaño de partículas | | | | | | IG (%) | | |
|-------------|----------------------------|----------------------|--------------|--------------|--------------|----------|--------------|--------|--------------|---|
| | | > 3,35 (%) | | 3,35-1mm (%) | | <1mm (%) | | | | |
| 100%T | 115 ± *4,36 | c | 8,02 ± 0,32 | d | 24,85 ± 0,24 | e | 67,13 ± 0,56 | a | 32,87 ± 0,56 | e |
| 75%T+25%CCP | 195 ± 7,57 | a | 14,73 ± 0,13 | c | 33,64 ± 0,87 | d | 51,63 ± 0,90 | b | 48,37 ± 0,08 | d |
| 50%T+50%CCP | 131 ± 7,64 | c | 18,12 ± 0,25 | b | 41,25 ± 0,17 | c | 40,63 ± 0,08 | c | 59,37 ± 0,31 | c |
| 25%T+75%CCP | 162 ± 1,53 | b | 19,68 ± 0,14 | a | 44,17 ± 0,19 | b | 36,16 ± 0,31 | d | 63,84 ± 0,19 | b |
| 100%CCP | 184 ± 7,23 | a | 20,13 ± 0,08 | a | 49,02 ± 0,16 | a | 30,85 ± 0,19 | e | 69,15 ± 0,90 | a |

Letras distintas entre filas de una misma columna indican diferencias significativas ($P < 0,05$) para el test de Tukey. T: Turba de *Sphagnum*. CCP: compost de corteza de pino. *Se indican valores de las variables \pm desvío estándar.

Different letters between rows of the same column indicate significant differences ($P < 0.05$) for the Tukey test. T: *Sphagnum* peat. CCP: pine bark compost. *Values of the variables \pm standard deviation are indicated.

Con respecto al porcentaje de tamaño de partículas (Tabla 2), los sustratos con 100% CCP y 25% T + 75% CCP tuvieron mayor porcentaje de partículas > 3,35 mm y el sustrato con 100% CCP obtuvo mayor porcentaje de partículas entre 3,35 a 1 mm, en ambos casos se diferenciaron de los restantes sustratos ($P < 0,0001$). Por lo tanto, a mayor porcentaje de CCP incluido en la formulación del sustrato mayor fue el IG. En cambio, el sustrato con 100% T tuvo mayor porcentaje de partículas < 1 mm con diferencias significativas ($P < 0,0001$), y se observó que a mayor porcentaje de T el IG disminuyó. La distribución, composición, estructura interna, forma y tamaño de partícula están directamente relacionados con la CRA y PA, en este sentido, tamaños de partículas < 1 mm aumentan la CRA (Anicua Sánchez et al., 2009; Gayosso Rodríguez et al., 2021;).

Los valores de EPT de los sustratos evaluados superaron al de referencia, >85% (Abad Berjón et al., 2004, p. 118), con diferencias significativas ($P < 0,0001$) (Figura 1). El sustrato con 100% T y 75% T + 25% CCP tuvieron los valores más altos y el sustrato con 100% CCP y 25% T + 75% CCP más bajos. El EPT es un dato básico para la descripción del sustrato o componente, pero no da información con respecto al tamaño de dichos poros y como está repartido entre aquel espacio ocupado por agua y aire (Barbaro et al., 2019, Vence, 2008). Por lo dicho, en la figura 1 se observa que la CRA y la PA tuvieron diferencias significativas entre los sustratos (ambos $P < 0,0001$). A mayor porcentaje de T en el sustrato la CRA aumentó y la PA disminuyó, el sustrato con 100% T tuvo el mayor valor de CRA y el sustrato con 100% CCP el mayor valor de PA. La T es un componente muy empleado como sustrato por su alta CRA, la cual varía según su grado de descomposición y textura (Martínez y Roca, 2011). Pérez Cabrera et al. (2021) evaluaron el uso de biochar de cáscara de arroz en mezcla con diferentes proporciones de T (Sunshine mix), con un valor de CRA: 71,85% y en base al análisis de tamaño de partículas mostrado, el IG era de 39%, ambos valores cercanos a la T empleada en el presente trabajo. Por otro lado, el CCP también es un componente de sustrato muy utilizado debido, entre otros factores, a la contribución de poros con aire (Kaderabek, 2017). En este sentido, Barbaro et al. (2017) formularon sustratos con T y 30, 40, 50 o 60% de CCP con un valor de IG: 56% (calculado en base al análisis de tamaño de partículas mostrado) y resultó que a mayor proporción de CCP, la PA de las mezclas aumentó de 33% a 50% aproximadamente.

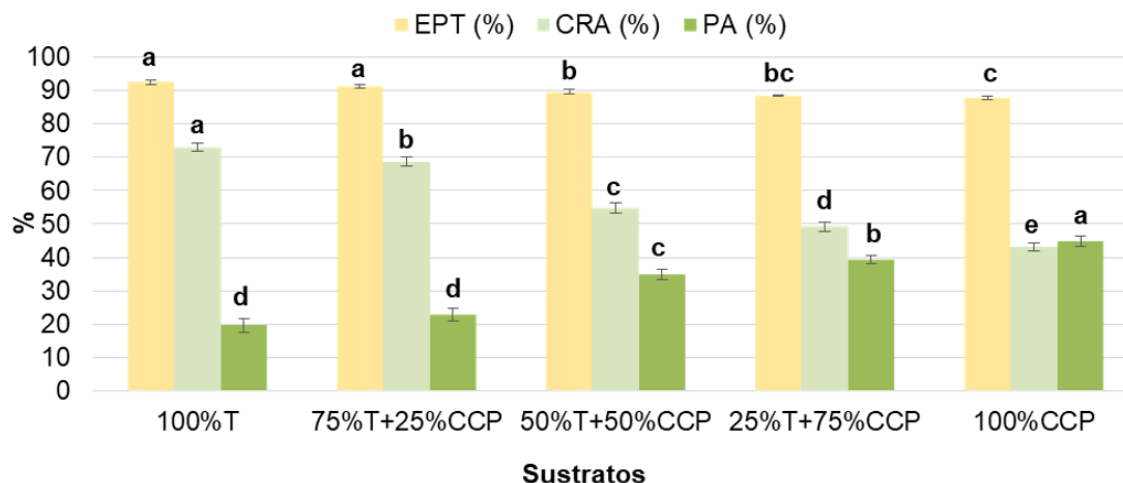


Figura 1. Espacio poroso total (EPT), capacidad de retención de agua (CRA) y porosidad de aireación (PA) de los sustratos evaluados. Letras distintas entre columnas de un mismo color indican diferencias significativas ($P < 0,05$) para el test de Tukey. T: Turba de Sphagnum. CCP: compost de corteza de pino. Barras verticales en cada punto indican intervalo de confianza de 95%.

Figure 1. Total pore space (EPT), water retention capacity (CRA) and aeration porosity (PA) of the evaluated substrates. Different letters between columns of the same color indicate significant differences ($P < 0.05$) for the Tukey test. T: Sphagnum peat. CCP: pine bark compost. Vertical bars at each point indicate a 95% confidence interval.

Los resultados demuestran que los materiales utilizados para formular los sustratos se complementaron eficientemente y se lograron sustratos con propiedades químicas similares, pero con propiedades físicas diferentes, lo cual permitió poder evaluar el efecto de estas propiedades sobre el desarrollo de los plantines de Yerba Mate en bandejas alveoladas.

Cabe destacar que en este caso se utilizó T y CCP para formular los sustratos, pero ambos pueden ser reemplazados por otros componentes obteniendo sustratos con propiedades similares. Está comprobado que la selección de los sustratos debe efectuarse sobre la base de un análisis de laboratorio más que sobre los materiales que los componen, tipo o denominación de los mismos (Valenzuela, 2013). En este sentido, la fibra de coco posee propiedades similares a la T (Both et al., 2022; Ilahi & Ahmad, 2017.) e incrementa la CRA en sustratos con corteza de pino (Basiri Jahromi et al., 2020), y la cascarilla de arroz incrementa la PA, por ejemplo, al mezclar con lombricompost (Cruz Crespo et. al, 2019) o fibra de coco (Bartz et al., 2017).

Calidad morfológica de los plantines de Yerba Mate

Los plantines desarrollados en el sustrato con 75% T + 25% CCP, 50% T + 50% CCP y 25% T + 75% CCP tuvieron mayor MSA y se diferenciaron de los desarrollados en los sustratos con 100% T y 100% CCP ($P < 0,0001$) (Tabla 3). La MSR de los plantines desarrollados en el sustrato con 100% T tuvo menor valor y se diferenció de los plantines desarrollados en el sustrato con 75% T + 25% CCP, 50% T + 50% CCP y 25% T + 75% CCP ($P: 0,0002$) (Figura 2). A mayor cantidad de masa seca, la probabilidad de sobrevivencia del plantín al trasplante es mayor (Morales Pérez, 2018), pero tanto la parte aérea como la radical deben estar equilibradas e influyen sobre el ICD.

Tabla 3. Masa seca aérea (MSA) y radical (MSR) de los plantines de Yerba Mate desarrollados en los sustratos evaluados.

Table 3. Aerial (MSA) and root (MSR) dry mass of Yerba Mate seedlings grown in the evaluated substrates.

| Sustratos | MSA (g) | | MSR (g) | |
|-------------|--------------|---|-------------|----|
| 100%T | 2,88 ± *0,12 | b | 0,42 ± 0,05 | b |
| 75%T+25%CCP | 4,38 ± 0,20 | a | 0,68 ± 0,10 | a |
| 50%T+50%CCP | 4,24 ± 0,25 | a | 0,64 ± 0,03 | a |
| 25%T+75%CCP | 3,81 ± 0,27 | a | 0,66 ± 0,03 | a |
| 100%CCP | 2,78 ± 0,18 | b | 0,55 ± 0,04 | ab |

Letras distintas entre filas de una misma columna indican diferencias significativas (P < 0,05) para el test de Tukey. T: Turba de *Sphagnum*. CCP: compost de corteza de pino. *Se indican valores de las variables ± desvío estándar.

Different letters between rows of the same column indicate significant differences (P < 0.05) for the Tukey test. T: Sphagnum peat. CCP: pine bark compost. *Values of the variables ± standard deviation are indicated.

Los plantines con mayor longitud del tallo (Tabla 4) fueron los desarrollados en los sustratos con 75% T + 25% CCP y 50% T + 50% CCP con diferencias significativas con los restantes tratamientos (P < 0,0001). Según Eibl et al. (2022) la longitud del tallo adecuada de un plantín de Yerba Mate debería ser entre 25 a 30 cm, según Capellari (2017, p. 111) entre 15 a 20 y según Marques et al. (2013) entre 15 a 25 cm. Por lo tanto, estableciendo un rango entre 15 a 30 cm los plantines con mayor longitud mencionados superaron el límite conveniente. En estos casos, se recomienda realizar una poda de formación cortando el ápice del plantín un mes antes de llevarlo al campo (Marques et al., 2013).

Tabla 4. Longitud y diámetro del tallo, Índice de robustez (IR) e Índice de calidad de Dickson (ICD) de los plantines de Yerba Mate desarrollados en los sustratos evaluados.

Table 4. Stem length and diameter, robustness Index (IR) and Dickson Quality Index (ICD) of Yerba Mate seedlings grown in the evaluated substrates.

| Sustratos | Longitud (cm) | | Diámetro (mm) | | IR | | ICD | |
|-------------------------|---------------|----|---------------|---|-------------|----|-------------|----|
| 100%T | 26,83 ± *1,53 | c | 3,75 ± 0,14 | b | 7,26 ± 0,23 | bc | 0,23 ± 0,03 | b |
| 75%T+25%CCP | 37,23 ± 1,37 | a | 4,30 ± 0,14 | a | 8,75 ± 0,42 | a | 0,33 ± 0,03 | a |
| 50%T+50%CCP | 35,37 ± 0,71 | ab | 4,46 ± 0,09 | a | 7,96 ± 0,30 | ab | 0,33 ± 0,01 | a |
| 25%T+75%CCP | 31,70 ± 1,85 | b | 4,46 ± 0,09 | a | 7,19 ± 0,55 | bc | 0,34 ± 0,03 | a |
| 100%CCP | 28,43 ± 0,92 | bc | 4,16 ± 0,21 | a | 6,87 ± 0,36 | c | 0,28 ± 0,01 | ab |
| Valores de referencia** | 15 a 30 | | 3 a 5 | | < 8 | | > 0,2 | |

Letras distintas entre filas de una misma columna indican diferencias significativas (P < 0,05) para el test de Tukey. T: Turba de *Sphagnum*. CCP: compost de corteza de pino. *Se indican valores de las variables ± desvío estándar. **Fuente: Eibl et al. (2022); Gabira et al. (2020a), Capellari (2017, p. 111) y Llera y Medina (2017, p. 159).

Different letters between rows of the same column indicate significant differences (P < 0.05) for the Tukey test. T: Sphagnum peat. CCP: pine bark compost. *Values of the variables ± standard deviation are indicated. **Source: Eibl et al. (2022); Gabira et al. (2020a), Capellari (2017, p. 111) and Llera and Medina (2017, p. 159).

En cuanto al diámetro del tallo (Tabla 4), los plantines desarrollados en el sustrato con 100% T tuvieron el menor valor y se diferenciaron con los restantes tratamientos ($P < 0,0001$). Eibl et al. (2022) mencionan que un plantín de Yerba Mate debería tener un diámetro entre 3 a 5 mm. Pero Llera y Medina (2017) y Capellari (2017) recomiendan un valor de 4 mm, estos autores aclaran que si el diámetro es menor, el plantín queda expuesto a la acción del viento y el movimiento del tallo podría provocar una lesión a la altura del cuello cuya consecuencia podría ser la muerte. Todos los plantines se encontraron dentro del rango de diámetro del tallo adecuado según Eibl et al. (2022). Sin embargo, los plantines del tratamiento con 100% T tuvieron menos de 4 mm de diámetro.

Pero estas variables poseen más relevancia si se las relaciona mediante el IR, cuyo valor debería ser menor o igual a 8 para que el plantín esté equilibrado (Eibl et al., 2022). Valores inferiores indican plantines más robustos, bajos y gruesos. En cambio, valores superiores sugieren una desproporción entre la longitud y el diámetro del tallo. Los plantines desarrollados en el sustrato con 75% T + 25% CCP tuvieron mayor valor y se diferenciaron de los plantines desarrollados en los sustratos con 100% T, 25% T + 75% CCP y 100% CCP ($P < 0,0001$) (Tabla 4). Los plantines de los sustratos con 25% T + 75% CCP y 100% CCP presentaron los menores valores, por lo tanto, fueron los de mejor proporción entre la longitud y el diámetro del tallo.

Por otro lado, el ICD reúne varios atributos morfológicos en un solo valor y se usa como índice de calidad, valores mayores a 0,2 resultará una mejor calidad del plantín (Castro et al., 2016; Ricardi et al., 2020). En este sentido, los plantines desarrollados en los sustratos con 75% T + 25% CCP, 50% T + 50% CCP y 25% T + 75% CCP tuvieron los valores más altos (Tabla 4) y se diferenciaron de los plantines desarrollados en el sustrato con 100% T ($P: 0,0008$). Por lo tanto, estos sustratos lograron plantines con mayor desarrollo y formación balanceada.

Selección de los sustratos con las propiedades físicas adecuadas

Teniendo en cuenta las variables físicas mediadas a los sustratos y las variables morfológicas medidas a los plantines desarrollados en cada sustrato, en la figura 2 se presenta un gráfico biplot conformado por dos componentes principales (CP) que explican el 98% de la variabilidad de los datos (la CP1 explicó el 65% y la CP2 el 34%).

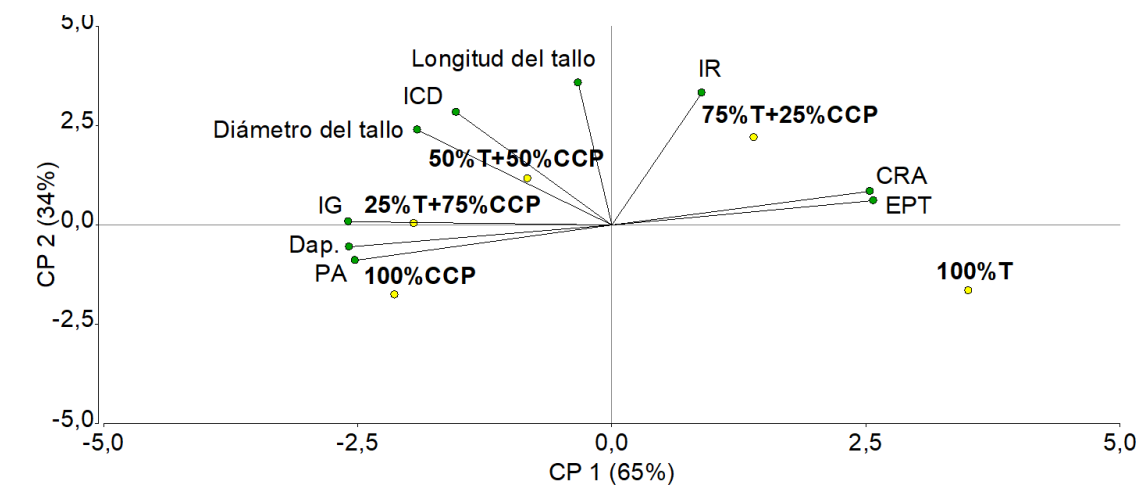


Figura 2. Biplot conformado por dos componentes (CP1 y CP2) generados por la combinación lineal de las variables físicas de los sustratos evaluados: densidad aparente (Dap), espacio poroso total (EPT), porosidad de aireación (PA), capacidad de retención de agua (CRA), índice de grosor (IG). Además, las variables morfológicas de los plantines desarrollados en cada sustrato: longitud y diámetro del tallo, índice de robustez (IR) e índice de calidad de Dickson (ICD).

Figure 2. Biplot of two components (CP1 and CP2) generated by the linear combination of the physical variables of the evaluated substrates: bulk density (Dap), total pore space (EPT), aeration porosity (PA), retention capacity of water (CRA) and thickness index (IG). Besides, the morphological variables of the seedlings in each substrate: stem length and diameter, robustness index (IR) and Dickson quality index (ICD).

La CP1 separó dos grupos, por un lado, los sustratos que tenían mayor IG, PA y densidad aparente, donde se desarrollaron plantines que tuvieron mayor ICD, longitud y diámetro del tallo, por el otro, sustratos que tenían mayor CRA y EPT con plantines que tuvieron mayor IR. La CP2 separó por un lado los sustratos con mayor PA y densidad aparente y, por el otro, los sustratos con mayor CRA, EPT cuyos plantines tuvieron mayor longitud y diámetro del tallo, IR e ICD.

Las variables que se destacaron en la CP1, la cual explicó la mayor variabilidad, fueron, por un lado, la densidad aparente, el IG, la PA, y el diámetro del tallo, por otro, el EPT y la CRA (Tabla 5). Se deduce entonces que los sustratos con 75% T + 25% CCP y 100% T presentaron mayor CRA y EPT, y menor densidad aparente, PA, IG y diámetro del tallo que los sustratos con 50% T + 50% CCP, con 25% T + 75% CCP y con 100% CCP. Los sustratos con 50% T + 50% CCP y con 25% T + 75% CCP estuvieron más asociados a las variables morfológicas de los plantines.

Tabla 5. Autovectores de las variables analizadas para las componentes principales 1 y 2 (CP1 y CP2).

Table 5. Eigenvectors of the variables analyzed for principal components 1 and 2 (CP1 and CP2).

| Variables | CP1 | CP2 |
|--------------------|------------|------------|
| Longitud del tallo | -0,05 | 0,57 |
| Diámetro del tallo | -0,30 | 0,38 |
| IR | 0,14 | 0,53 |
| ICD | -0,24 | 0,45 |
| EPT | 0,41 | 0,10 |
| CRA | 0,40 | 0,13 |
| PA | -0,40 | -0,14 |
| Dap. | -0,41 | -0,09 |
| IG | -0,41 | 0,01 |

IR: índice de robustez, ICD: índice de calidad de Dickson, EPT: espacio poroso total CRA: capacidad de retención de agua, PA: porosidad de aireación, Dap.: densidad aparente, IG: índice de grosor.

IR: robustness index, ICD: Dickson quality index, EPT: total pore space, CRA: water retention capacity, PA: aeration porosity, Dap.: bulk density, IG: thickness index.

Considerando que la capacidad de contendedor (CC) es el máximo volumen de agua que es retenida por el sustrato en un contenedor de altura h una vez saturado y dejando drenar libremente (Vence et al., 2013), un mismo sustrato en un contendedor de mayor altura tendrá una PA más alta y una CC más baja que uno de menor altura y viceversa (Owen & Altland, 2008; Milks, et al., 1989). Por tal motivo, para los contenedores de poca altura como tubetes o bandejas alveoladas son convenientes sustratos más aireados. Por lo tanto, los sustratos con 50% T + 50% CCP y con 25% T + 75% CCP tuvieron una proporción de poros con aire y agua más adecuada para el sistema de cultivo empleado que aquellos con mayor proporción de T. Un sustrato con baja PA puede ocasionar una deficiencia de oxígeno en la zona cercana a la raíz y aumentar la susceptibilidad a los patógenos (Othman et al., 2019). Los sustratos mencionados coinciden con los rangos de las variables físicas recomendadas por Abad Berjón et al. (2001) en cuanto al EPT (> 85%) y densidad aparente (<400 kg m⁻³), pero los valores de CRA fueron inferiores (55%-70%) y los de PA superiores al rango adecuado (20-30%), cuya relación (CRA/PA) fue entre 1 a 1,6. Asimismo, Siqueira Walter et al. (2022) utilizaron en sus ensayos con tubetes plásticos y biodegradables de 110 cm³, un sustrato formulado con T, vermiculita y cascarilla de arroz carbonizada cuya densidad aparente era: 200 kg m⁻³, la CRA: 49,5% y la PA: 30,4%, es decir, una relación CRA/PA: 1,6, y resultó que los plantines de Yerba Mate tuvieron un IR < 8 e ICD > 0,2. También Gabira et al. (2020a) evaluaron el desarrollo de plantines de Yerba Mate en tubetes de 110 cm³ y observaron que los plantines producidos en los sustratos comerciales (Agrinobre® y Carolina Soil®) tuvieron características biométricas más altas que los producidos en los sustratos formulados con residuos de la industria de Yerba Mate y fibra de coco, por un lado debido a que el pH se correlacionó negativamente con todos los parámetros morfológicos y por el otro, al bajo EPT. Igualmente, Quiroz et al. (2014)

utilizaron un sustrato con bajo EPT (49,3%), para evaluar el desarrollo de *Acacia dealbata* Link en bandejas alveoladas con volúmenes de celdas entre 24 a 100 cm³ y resultó que los plantines tuvieron un IR entre 11,4 a 13,5 y un ICD < 0,2, es decir, plantines de baja calidad. Lo cual confirma la necesidad de emplear sustratos con alto EPT y una relación de poros con aire y agua adecuada.

En conclusión, considerando un sistema de cultivo para la producción de plantines de Yerba Mate que consistió en el uso de bandejas alveoladas (9 cm de alto y 100 cm³) se requirieron sustratos con las siguientes propiedades físicas: un EPT > 85%, una CRA ≤ 55%, una PA ≥ 35%, relación CRA/PA entre 1 a 1,6, un IG ≥ 60% y una densidad aparente ≤ 200 kg m⁻³, con el pH y la CE dentro del rango de referencia (5,5 a 6,8 y < 1 dS m⁻¹ respectivamente (1+5v/v)). Estas propiedades permitieron el desarrollo de plantines de Yerba Mate más robustos y de calidad, evidenciados por el IR y el ICD.

Si bien en este caso se obtuvieron las propiedades mencionadas con sustratos formulados con T y CCP, es posible utilizar otros materiales que lo reemplacen basado en un previo análisis físico y químico, por lo tanto, en próximos ensayos se evaluarán componentes alternativos.

AGRADECIMIENTOS

A M. Kryvenki por el acompañamiento técnico durante el ensayo y a los proyectos del INTA: PD-E2-I518-002: "Estudio del impacto ambiental, gestión y tratamiento de residuos y efluentes sobre sistemas agropecuarios y agroindustriales para su valorización agronómica" y PE-L01-I041: "Generación y validación de innovaciones tecnológicas en los cultivos de Yerba Mate y té" por los subsidios que permitieron la realización de la investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abad Berjón, M., Noguera Murray, P. y Carrión Benedito, C. (2005). Sustratos en los cultivos sin suelo y fertirrigación. En: C. Cadahía (Ed.), *Fertirrigación: Cultivos Hortícolas y Ornamentales* (pp. 299-352). Mundi Prensa. Madrid, España.
- Abad Berjón, M., Noguera Murray, P. y Carrion Benedito, C. (2004). Los sustratos en los cultivos sin suelo. En M. Urrestarazu Gavilan (Ed.), *Tratado de cultivo sin suelo* (pp. 113-158). Mundi Prensa, Madrid, España.
- Abad Berjón, M.; P. Noguera Murray & 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(2), 197-200. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(00\)00152-8](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(00)00152-8)
- Altland, J. E. & Jeong, K.Y. (2016). Dolomitic lime amendment affects pine bark substrate pH, nutrient availability, and plant growth: A review. *HortTechnology*, 26(5), 565-573. <https://doi.org/10.21273/HORTECH03465-16>
- Anicua Sánchez, R., Gutiérrez Castorena, M., Sánchez García, P., Ortiz Solorio, C., Volke Halle, V. H., y Rubiños Panta, J. E. (2009). Tamaño de partícula y relación micromorfológica en propiedades físicas de perlita y zeolita. *Agricultura técnica en México*, 35(2), 147-156. <https://www.redalyc.org/pdf/608/60812688002.pdf>
- Ansorena Miner, J. (1994). *Sustratos propiedades y caracterización*. (1ª ed.) Mundi Prensa, Madrid, España.
- Barbaro, L. A., Sisaro, D., Stancanelli, S., Soto, M. S. (2021). Polvo de ladrillo como sustrato para techos verdes extensivos. *Chilean Journal of Agricultural and Animal Sciences*, 37(1), 81-91. <http://dx.doi.org/10.29393/chjaas37-9p11b40009>
- Barbaro, L. A. y Karlanian, M. A. (2020). Efecto de las propiedades físicas del sustrato sobre el desarrollo de plantines florales en maceta. *Ciencia del Suelo*, 38 (1), 1-11. <http://www.scielo.org.ar/pdf/cds/v38n1/v38n1a01.pdf>
- Barbaro, L. A.; Karlanian, M. A., Rizzo, P. y Riera, N. (2019). Caracterización de diferentes compost para su uso como componente de sustratos. *Chilean journal of agricultural and animal sciences*, 35(2), 126-136. <http://dx.doi.org/10.4067/S0719-38902019005000309>.
- Barbaro, L. A., Karlanian, M. A. y Mata, D. A. (2018). *Importancia del pH y la Conductividad Eléctrica (CE) en los sustratos para plantas*. (1ª ed.) Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina. <http://reciclario.com.ar/wp-content/uploads/INTA-Importancia-del-pH-y-la-Conductividad-Eléctrica-CE-en-los-sustratos-para-plantas.pdf>
- Barbaro, L. A., Karlanian, M. A. y Papone, M. E. (2017). Sustratos: relación de poros con aire y agua adecuada para producir plantas florales en contenedor N°10. *Ciencia del suelo*, 35(2), 205-213. <http://www.scielo.org.ar/pdf/cds/v35n2/v35n2a02.pdf>
- Bartz, W. C., Pill, W. G. & Evans, T. A. (2017). Yield of greenhouse-grown tomato in substrates containing coir and parboiled rice or burnt rice hulls. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 92(3), 231-239. <https://doi.org/10.1080/14620316.2016.1271289>
- Burtnik, O. J. (2006). *Yerba Mate: Manual de producción*. (3ª Ed.). INTA, AER Santo Tomé, Corrientes, Argentina.
- Basiri Jahromi, N., Fulcher, A., Walker, F. & Altland, J. (2020). Optimizing substrate available water and coir amendment rate in pine bark substrates. *Water*, 12(2), 362. <https://doi.org/10.3390/w12020362>
- Both, A. K., Linderman, J. A., Madireddy, G., Helle, M. A. & Cheung, C. L. (2022). Valorization of coco coir into biocomposite materials through water-based chemistry. *Industrial Crops and Products*, 178, 114563. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.114563>

- Capellari, P. L. (2017). Propagación sexual a escala comercial: vivero tradicional y tecnificado donde comienza todo. En P. L. Capellari (Ed.), *YERBA MATE. Reseña Histórica y Estadística. Producción e Industrialización en el siglo XXI* (pp. 107-112). Consejo Federal de Inversiones. Ministerio de Producción. Corrientes, Argentina. <https://repositorio.unne.edu.ar/handle/123456789/27897>
- Cardozo, E. L. & Morand, C. (2016). Interest of mate (*Ilex paraguariensis* A. St.-Hil.) as a new natural functional food to preserve human cardiovascular health - A review. *Journal of Functional Foods*, 21(1), 440-454. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2015.12.010>
- Carmona, C. E. y Abad Berjón, B. M. (2008). Aplicación del compost en viveros y semilleros. En J. Moreno Casco y R. Moral Herrero (Eds.), *Compostaje* (pp. 399-424). Mundi Prensa, Madrid, España.
- Carlile, W. R., Cattivello, C. & Zaccheo, P. (2015). Organic growing media: Constituents and properties. *Vadose Zone Journal*, 14(6). <https://doi.org/10.2136/vzj2014.09.0125>
- Castro, E. B., Santos, L. D. T., Fernandes, L. A. y Tajima, C. Y. (2016). Silicato de Alumínio em Substrato para Produção de Mudanças de *Corymbia citriodora*. *Floresta e Ambiente*, 23(2), 229-236. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.106814>
- Ceconci, D. E., Poletto, I., Lovato, T. y Muniz, M. F. B. (2007). Exigência nutricional de mudas de erva-mate (*Ilex paraguariensis* A. St.-Hil.) à adubação fosfatada. *Ciência Florestal*, 17(1), 25-32. <https://pdfs.semanticscholar.org/f244/aca96a3cf4a0fa7ee7e2f1acadb30c12603b.pdf>
- Croge, C. P., Cuquel, F. L. & Pintro, P.T.M. (2021). Yerba Mate: cultivation systems, processing and chemical composition. A review. *Scientia Agricola*, 78(5), 1-11. <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2019-0259>
- Cruz Crespo, E., Can Chulim, A., Pineda Pineda, J., Moreno Velazquez, D., Aguilar Benitez, G. & Garcia Paredes, J. D. (2019). Relationship between the physical properties of the lombricompost mixtures with tuff, pumice, and rice husk. *Agrociencia (Montecillo)*, 53(1), 1-12. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20203303233>
- De Boodt, M., Verdonck, O. & Cappaert, J. (1973). Methods for measuring the water release curve of organic substrates. *Acta Horticulturae*, 37, 2054-2063. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1974.37.20>
- De Boodt, M., Verdonck, O. & Cappaert, I. (1972). Determination and study of the water availability of substrates for ornamental plant growing. *Acta Horticulturae*, 35, 51-58. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1974.35.7>
- Dellacassa, E., Cesio, V., Vázquez, A., Echeverry, S., Soule, S., Ferreira, F. y Heinzen, H. (2007). Yerba Mate. Historia, uso y propiedades. *Revista de la Asociación de Química y Farmacia del Uruguay*, 51, 16-20. https://www.researchgate.net/profile/Eduardo-Dellacassa/publication/284125789_Yerba_mate_Historia_uso_y_propiedades/links/57765f3e08ae1b18a7e1a53b/Yerba-mate-Historia-uso-y-propiedades.pdf
- Dickson, A., Leaf, A. L. & Hosner, J. F. (1960). Quality appraisal of white spruce and white pine seedling stock in nurseries. *Forestry Chronicle*, 36(1), 10-13. <https://doi.org/10.5558/fc36010-1>
- Di Rienzo, J. A.; Casanoves, F.; Balzarini M. G.; Gonzalez, L.; Tablada, M. y Robledo, C. W. (2009). InfoStat versión 2009. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. <http://www.infostat.com.ar>
- Duboc, E. (2015). *Erva-mate: parâmetros para seleção de planta matriz e área de coleta de sementes*. Mato Grosso do Sul, Brasil. <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/1040583/1/DOC2015132ERVAMATE.pdf>
- Eibl, B., González, C., Cortes, J., De la Vega, M., Erbetta, D., Krausemann, H., Ortiz, G., Ortega, M., Kornuta, J., Gnass, F., Ramos R., Hessler H., Stej P., Lorenzon G., Kiefl J., Ebert R., Lecanda A., Sackser, A., Angermeier, K. y Gasser, N. (2022). Producción de Plantines de Yerba Mate (*Ilex paraguariensis* A. ST.- HIL.) a partir de semillas. Documento Técnico. <https://inym.org.ar/descargar/publicaciones/material-de-consulta/guiasmanuales-y-folletos/3039-documento-tecnico-produccion-de-plantines-de-yerba-mate-ilex-paraguariensis-a-st-hil-a-partir-de-semillas.html>
- Gabira, M. M., Gomes, J. F. P., Kratz, D., Wendling, I. & Stuepp, C. A. (2020a). Industrial residues as substrate components for the production of *Ilex paraguariensis* seedlings. *Comunicata Scientiae*, 11, 3215-3215. <https://doi.org/10.14295/cs.v11i.3215>
- Gabira, M. M., Walter, L. S., Brito, G. S., Schneider, C. R., Wendling, I. & Kratz, D. (2020b). Alternative substrates and containers for *Ilex paraguariensis* seedlings. *Acta Iguazu*, 9(4), 78-87. <https://pdfs.semanticscholar.org/adff/6df06e3cb8acc1f82003cdf13db7d-d3c4d3.pdf>
- Gayosso Rodríguez, S., Gutiérrez Castorena, M. C., Estrada Botello, M. A., Sánchez Hernández, R. (2021). Características micromorfológicas de sustratos orgánicos y su relación con retención de agua y crecimiento radical. *Agrociencia*, 55(3), 195-208. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v55i3.2413>
- INYM. (2016, 17 de junio). Cantidad de hectáreas cultivadas en Misiones y Corrientes. *Superficie cultivada por Departamentos*. <http://www.inym.org.ar/publicaciones/superficie-cultivada-por-departamento/>
- INYM. (2022, 14 de marzo). Cantidad de hectáreas cultivadas en Misiones y Corrientes. *Superficie cultivada por Departamentos*. <http://www.inym.org.ar/publicaciones/superficie-cultivada-por-departamento/>
- Kaderabek, L. E. B. (2017). *Effects of Aging on the Physical, Chemical, and Hydrological Properties of Pine Bark Substrates* (Master of Science Horticultural Science, Faculty of North Carolina State University). <https://repository.lib.ncsu.edu/bitstream/handle/1840.20/34463/etd.pdf?sequence=1>
- Ilahi, W. F. F. & Ahmad, D. (2017). A study on the physical and hydraulic characteristics of cocopeat perlite mixture as a growing media in containerized plant production. *Sains Malaysiana*, 46(6), 975-980. <http://dx.doi.org/10.17576/jsm-2017-4606-17>

- Llera, V. y Medina, R. D. (2017). Hacia el logro del establecimiento exitoso de las plantas para garantizar una producción sustentable y duradera. En P. L. Capellari (Ed.), *YERBA MATE. Reseña Histórica y Estadística. Producción e Industrialización en el siglo XXI* (pp. 153-168). Consejo Federal de Inversiones. Ministerio de Producción. Corrientes, Argentina. <https://repositorio.unne.edu.ar/handle/123456789/27900>
- Marques, J. J., Burille, C., Schuster, C., Brandoli, M. A. A., Rocha, D., Bresolin, B., Rodrigues, P., Dióvane Cardoso, D., Brock, M., Mallmann, A. y Silveira, J. D. (2013). *Erva-mate: guia para aplicação das boas práticas agrícolas*. Emater/RS-ASCAR, Lajeado. <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/camaras-setoriais-tematicas/documentos/camaras-setoriais/erva-mate/anos-anteriores/boas-praticas-agricolas-sebrae.pdf>
- Martínez, P.F. y Roca, D. (2011). Sustratos para el cultivo sin suelo. Materiales, propiedades y manejo. En V. J., Flórez (Ed.), *Sustratos, manejo del clima, automatización y control en sistemas de cultivo sin suelo* (pp. 37-78). Universidad Nacional de Colombia-Facultad de Agronomía. Bogotá, Colombia. <https://redivia.gva.es/handle/20.500.11939/3894>
- Martínez Farré, F. X. 1992. Propuesta de metodología para la determinación de las propiedades físicas de los sustratos. *Actas de las I Jornadas de Sustratos* (pp.55-66), SECH.
- Milks, R. R., Fonteno, W. C. & Larson, R. A. (1989). Hydrology of horticultural substrates: II. Predicting physical properties of media in containers. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 114(1), 53-56. <https://doi.org/10.21273/JASHS.114.1.53>
- Morales Pérez, E. (2018). *Indicadores de calidad de planta en viveros forestales del estado de Tamaulipas* (Tesis de Maestría en Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León). <http://eprints.uanl.mx/15965/1/1080290166.pdf>
- Othman, Y., Bataineh, K., Al-Ajlouni, M., Alsmairat, N., Ayad, J., Shiyab, S., Al-Qarallah, B. & St Hilaire, R. (2019). Soilless culture: Management of growing substrate, water, nutrient, salinity, microorganism and product quality. *Fresenius Environmental Bulletin*, 28(4), 3249-3260. https://www.researchgate.net/profile/Yahia-Othman/publication/332233166_SOILLESS_CULTURE_MANAGEMENT_OF_GROWING_SUBSTRATE_WATER_NUTRIENT_SALINITY_MICROORGANISM_AND_PRODUCT_QUALITY/links/5ca7a7064585157bd32531cf/SOILLESS-CULTURE-MANAGEMENT-OF-GROWING-SUBSTRATE-WATER-NUTRIENT-SALINITY-MICROORGANISM-AND-PRODUCT-QUALITY.pdf
- Owen, J. S. & Altland, J. E. (2008). Container height and douglas fir bark texture affect substrate physical properties. *HortScience*, 43(2), 505-508. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.43.2.505>
- Prat Kricun, S. D. (1993). *Yerba Mate, técnicas actualizadas de cultivo*. INTA Cerro Azul, Misiones, Argentina. Miscelánea N° 27.
- Patil, S. T., Kadam, U. S., Mane, M. S., Mahale, D. M. & Dhekale, J. S. (2020). Hydroponic growth media (substrate): a review. *International Journal of Science and Research*, 21, 106-113. <https://doi.org/10.9734/IJRJPAC/2020/v21i2330307>
- Pérez Cabrera, C. A.; Juárez López, P.; Anzaldo Hernández, J.; Alía Tejacal, I., Gayosso Rodríguez, S., Salcedo Pérez, E., Guillén Sánchez, D., Balois Morales, R., Cabrera & Chavarría, L. G. (2021). Rice husk biochar as a substrate for growth of cucumber seedlings. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 27(3), 171-183. <http://dx.doi.org/10.5154/r.rchsh.2021.01.002>
- Quiroz, I., Pincheira, M. P., Hernández, J. A., González, M., García, E. y Soto, H. (2014). Efecto del volumen radicular sobre el crecimiento de *Acacia dealbata* Link. en vivero y en terreno en el secano de la región del Biobío, Chile. *Revista Árvore*, 38(1), 155-164. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622014000100015>
- Ricardi, A. C., Koszalka, V., Lopes, C., Watzlawick, L. F., Ben, T. J., Umburanas, R. C. y Muller, M. M. L. (2020). O alumínio melhora o crescimento e a qualidade de mudas clonais de erva-mate (*Ilex paraguariensis*, Aquifoliaceae). *Research, Society and Development*, 9(10), 1-29. <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i10.8064>
- Rodríguez Trejo, D. A. (2008). *Indicadores de calidad de planta forestal*. MundiPrensa. México.
- Sáenz Reyes, J., Muñoz Flores T., Jesús, H., Pérez D., Miguel Ángel C., Rueda Sánchez, A., Hernández Ramos, J. (2014). Calidad de planta de tres especies de pino en el vivero "Morelia", estado de Michoacán. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 5(26), 98-111. <https://pdfs.semanticscholar.org/14a2/1e42bb531e9d9f034f331d7e96a019438cb7.pdf>
- Siqueira Walter, L., Melo Moura, M., Moreno Gabira, M., Saudade de Aguiar, N., Stuepp, C. A. & Kratz, D. (2022). How Shading and Container Type Influence *Ilex paraguariensis* A. St.-Hil. Seedling Production. *Forest Science*, 68(5-6), 533-539. <https://doi.org/10.1093/forsci/xfac036>
- Valenzuela, O. R. (2013). *Las 5 llaves del mundo de los sustratos para plantas*. Informe técnico. Ediciones INTA. <https://repositorio.inta.gov.ar/handle/20.500.12123/4522>
- Vence, L. B., Valenzuela, O. R., Svartz, H. A. y Conti, M. E. (2013). Elección del sustrato y manejo del riego utilizando como herramienta las curvas de retención de agua. *Ciencia del suelo*, 31(2), 153-164. <http://www.scielo.org.ar/pdf/cds/v31n2/v31n2a02.pdf>
- Vence, L. B. (2008). Disponibilidad de agua-aire en sustratos para plantas. *Ciencia del Suelo*, 26(2), 105-114. <http://www.scielo.org.ar/pdf/cds/v26n2/v26n2a01.pdf>
- Villalón Mendoza, H., Ramos Reyes, J. C., Vega López J. A., Marino, B., MuñozPalomino, M. A. y Garza Ocañas, F. (2016). Indicadores de calidad de la planta de *Quercus canby* Trel. (Encino) en vivero forestal. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 12(1), 46-52. <https://revista.itson.edu.mx/index.php/rlrn/article/view/250/185>
- Zavistanovicz, T. C., Araujo, M. M., Aimi, S. C., Flores, R., Berghetti, Á. L. & Deponti, G. (2017). Morphophysiological responses of *Ilex paraguariensis* seedlings to different substrates and fertilizations. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 21(2), 111-115. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v21n2p111-115>