

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA**  
**FACULTAD DE ENOLOGÍA Y GASTRONOMÍA**



**Especialidad en Viticultura y Enología**

**“Comparación del desarrollo radicular de sarmientos de *Vitis vinifera* cv. Syrah en sustratos de boscicultura y mezcla tradicional”**

**TRABAJO TERMINAL PARA OBTENER EL DIPLOMA DE:  
ESPECIALIDAD EN VITICULTURA Y ENOLOGÍA PRESENTA:**

**Josué Ricardo Hernández Flores**

**Director:**

**Dr. Guillermo Raúl Castillo Sánchez**

**CoDirector:**

**M. en C. Vidal Antonio Pérez Muñoz**

**Ensenada, Baja California a 20 de marzo de 2025.**

## Votos aprobatorios



"2025, año del Turismo Sostenible como impulsor del Bienestar Social y Progreso"  
**Facultad de Enología y Gastronomía**



**"Comparación del desarrollo radicular de sarmientos de *Vitis vinifera* cv. Syrah en sustratos de bosicultura y mezcla tradicional"**

TRABAJO TERMINAL

Para cubrir los requisitos necesarios para obtener el título de la

**ESPECIALIDAD EN VITICULTURA Y ENOLOGÍA**

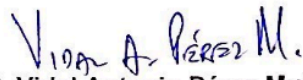
Presentada

**Josué Ricardo Hernández Flores**


No. Matrícula 379060

A quien el Comité de Trabajo Terminal autoriza el trabajo terminal, después de haber efectuado una revisión minuciosa del mismo y de acuerdo con el Art. 19 del R.G.E.P.E.P. las y los señores profesores emiten los siguientes votos aprobatorios mediante rubrica:

  
**Dr. Guillermo Raúl Castillo Sánchez**  
DIRECTOR

  
**M. en C. Vidal Antonio Pérez Muñoz**  
CODIRECTOR

  
**Dra. Cristina Domínguez Castro**  
SINODAL

  
**Dr. José Irving Monjarás Barrera**  
SINODAL

Ensenada, Baja California, 14 de marzo de 2025  
**"POR LA REALIZACIÓN PLENA DEL SER"**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA  
DE BAJA CALIFORNIA



FACULTAD DE ENOLOGÍA  
Y GASTRONOMÍA

C.c.p.- Archivo

## **Agradecimientos**

A mis queridos padres, Begonia Flores Chávez y Enoel Hernández Tafolla; A mi inspirador hermano, Hari Noé Hernández Flores; a mis amados abuelos, Leonardo Flores Vargas, Margarita Chávez Torres, Delia Tafolla Sandoval y José Guadalupe Hernández Jacinto. Por su cariño, apoyo incondicional y fe en mi persona, para alcanzar mis metas.

También a mis profesores y mentores del Centro Educativo José Vasconcelos, Universidad Autónoma Metropolitana, de la Universidad Autónoma de Baja California, Comité Estatal de Baja California, Rombauer, Viñedos de la Reina y Casa Madero. Por haberme ayudado y enseñado los valores del esfuerzo, perseverancia, confianza y humildad, para nutrirme de conocimientos y transmitirlos a los dignos agricultores y no agricultores de México.

Por último, pero no menos importante, a mis amigos y personas muy importantes de Baja California, Ciudad de México, Puebla, Estado de México, Morelos y Aguascalientes. Por su aliento en momentos importantes de mi estancia en la Especialidad de Viticultura y Enología.

Gracias.

## Índice

Resumen.....	1
Abstract.....	2
Introducción.....	3
Justificación.....	6
Hipótesis.....	6
Objetivo general.....	7
Objetivos específicos.....	7
Metodología.....	8
Resultados.....	15
Discusión.....	28
Conclusión.....	31
Referencias.....	31
Anexo 1.....	37

## Resumen

El desarrollo del sistema radicular es un factor clave en la propagación y crecimiento de *Vitis vinifera* L., ya que influye directamente en la adquisición de agua y nutrientes, el crecimiento vegetativo y el vigor de la planta. En este estudio se evaluó el efecto de tres sustratos (arena de río, mezcla porosa a base de tezontle y mezcla porosa a base de perlita) sobre la arquitectura radicular, los atributos de crecimiento de raíces y los parámetros vegetativos aéreos de sarmientos de *V. vinifera* cultivar Syrah. Se plantaron 180 sarmientos bajo un diseño completamente al azar y se realizaron evaluaciones en cinco periodos de muestreo. Los resultados indicaron efectos significativos del sustrato en la arquitectura radicular. El tezontle favoreció una mayor solidez y un incremento en los espacios entre raíces, mientras que la arena promovió una orientación más profunda del sistema radicular. El índice de clorofila fue significativamente mayor en plantas cultivadas en tezontle, lo que sugiere una mayor eficiencia fotosintética. Sin embargo, el crecimiento de los pámpanos no presentó diferencias significativas entre los sustratos. Además, se observaron relaciones positivas entre el área de raíces inferiores, el perímetro radicular y el crecimiento de los pámpanos. Por el contrario, el tamaño promedio de los huecos entre raíces mostró una correlación negativa con ambos parámetros de crecimiento, evidenciando las interacciones funcionales entre los sistemas radicular y aéreo. Estos hallazgos subrayan la relevancia de seleccionar sustratos adecuados para optimizar el desarrollo inicial del sistema radicular y mejorar el desempeño fenotípico de los sarmientos durante la propagación.

**Palabras clave:** *Vitis vinifera*, Syrah, sustratos, sistema radicular, atributos de raíz.

## **Abstract**

Root system development is a key factor in the propagation and growth of *Vitis vinifera*, as it directly influences water and nutrient acquisition, vegetative growth, and plant vigor. This study evaluated the effect of three substrates, river sand, tezontle-based porous mixture and perlite-based porous mixture, on root architecture, root growth attributes and aerial vegetative parameters of shoots of *V. vinifera* L. cv. Syrah. A total of 180 shoots were planted under a completely randomized design and evaluations were carried out in five sampling periods. The results indicated a significant effect of substrate on root architecture. Tezontle favored greater solidity and increased root spacing, while sand promoted a deeper orientation of the root system. Chlorophyll index was significantly higher in plants grown on tezontle, suggesting higher photosynthetic efficiency. However, shoot growth showed no significant differences between substrates. In addition, positive relationships were observed between lower root area, root perimeter and shoot growth. On the other hand, the average size of the gaps between roots showed a negative correlation with both growth parameters, evidencing the functional interactions between the root and aerial systems. These findings underline the relevance of selecting suitable substrates to optimize the initial development of the root system and improve the phenotypic performance of the shoots during propagation.

**Key words:** *Vitis vinifera*, Syrah, substrates, root system, root attributes.

## Introducción

Las raíces de las plantas han sido objeto de estudio durante décadas, ya que un sistema radicular robusto es fundamental para proporcionar agua, minerales, fitohormonas y almacenar carbohidratos (Palta & Yang, 2014). Además de estas funciones, las raíces también sirven para anclar la planta al suelo y pueden formar asociaciones con otras plantas y microorganismos del suelo. El sistema radicular de las plantas es responsable de absorber la cantidad de agua necesaria para permitir el crecimiento y desarrollo vegetativo, mediante el transporte de agua desde las raíces hasta las hojas mediante el proceso de evapotranspiración, suministrando agua y nutrientes a todos los órganos de la planta (Tajima, 2021). Así, el sistema radicular desempeña un papel clave en la aclimatación de la planta a diferentes ambientes (Roig-Puscaña *et al.*, 2021).

El estudio de las raíces puede abordarse mediante diversas aproximaciones. Tradicionalmente, se ha enfocado en evaluar parámetros de crecimiento como la longitud, diámetro y volumen de la raíz. Recientemente, ha cobrado relevancia el análisis de la Arquitectura del Sistema Radicular (ASR), que se refiere a la disposición espacial de las raíces en el suelo, incluyendo aspectos como su forma, profundidad, distribución y capacidad de ramificación (Mohtasebi, 2023).

La plasticidad fenotípica puede definirse como la capacidad de un genotipo para producir diferentes fenotipos en distintos ambientes (Núñez-Farfán *et al.*, 2003). Este fenómeno es de vital importancia para las plantas, ya que les permite optimizar su crecimiento y desarrollo en respuesta a diversos retos ambientales (Palmer *et al.*, 2012). Los atributos de raíz asociados tanto con el crecimiento como con la adquisición de recursos son componentes esenciales de la plasticidad fenotípica en las plantas y pueden ser afectados significativamente por las características del sustrato en el que crecen (Saleem *et al.*, 2018). Por ejemplo, propiedades como la textura, la estructura y la compactación del suelo juegan un rol fundamental en la disponibilidad de agua y nutrientes (Topp *et al.*, 1997; Raviteja *et al.*, 2021). Las propiedades físicas del sustrato, como el tamaño de las partículas, la agregación y la porosidad del suelo, determinan la capacidad de retención de agua, la aireación y la disponibilidad de nutrientes. Además, el grado de compactación del suelo puede

restringir el crecimiento radicular al limitar la penetración de raíces, lo que a su vez afecta la capacidad de las plantas para acceder a agua y nutrientes (Beckett *et al.*, 2017). De manera similar, se ha observado que, bajo condiciones de estrés hídrico, las raíces de *Cenchrus americanus* reducen su ángulo de ramificación. Por otro lado, diversos atributos aéreos de las plantas, como la altura, el área foliar y la biomasa producida, también responden a cambios en el ambiente subterráneo. Esto se debe a que, a medida que el sistema de raíces explora el sustrato y adquiere recursos, estos se destinan al desarrollo de estructuras vegetativas y reproductivas aéreas (Freschet *et al.*, 2018; Gratani, 2014). Por ejemplo, en cultivos como la rosa, se ha documentado que el crecimiento radicular depende de un sustrato con una porosidad mínima del 12% (Evans *et al.*, 2009). De manera similar, en otros cultivos ornamentales como el olivo (*Olea europaea*), se ha reportado que la producción de raíces no ocurre en suelos o sustratos con una porosidad aproximada del 3% (Pia *et al.*, 2015).

El desarrollo del sistema radicular de *Vitis vinifera* L. se ve afectado de manera importante por las características edáficas. En las plantas de vid, la biomasa de la raíz se ve influenciada por las condiciones de fertilidad química del suelo (Tandonnet *et al.*, 2010). Este efecto se ha documentado en diferentes estudios para la variedad Syrah (Heller-Fuenzalida *et al.*, 2023). De manera similar, se ha encontrado que en la variedad Tempranillo el tipo de suelo tiene relación con el intercambio de gases de la planta, la disponibilidad hídrica y el vigor de la planta (Buesa *et al.*, 2023). En el mismo estudio, se evaluó la respuesta ecofisiológica de portainjertos de la variedad Tempranillo y encontrando que factores como las condiciones climáticas estacionales y el tipo de suelo influyen en el intercambio de gases de la planta, la disponibilidad hídrica y el vigor vegetal. De manera similar, se ha encontrado que el riego y la textura del suelo condicionan gran parte de la actividad fisiológica relacionada con la producción de la baya en la variedad Syrah (Sebastian *et al.*, 2014). También se ha evaluado el efecto de la textura del suelo sobre la morfología de raíces en la vid encontrando que los suelos de grano grueso permiten raíces más profundas y uniformemente distribuidas, mientras que suelos finos favorecen la producción de una mayor densidad de raíces, pero a sistemas radiculares menos profundos (Jones, 1983). Por otro lado, Herrera *et al.* (2024) concluyó que las plantas de vid sufren cambios morfológicos, anatómicos y fisiológicos en las hojas

cuando hay un escaso acceso a agua para las viñas cultivadas en macetas de 20 litros. Esto provoca alteraciones de tamaño y estructura en las nuevas hojas en desarrollo, reduciendo la evapotranspiración y fotosíntesis por el control de estomas y producción de cloroplastos.

El sustrato es un factor determinante en el cultivo de bonsái, donde se requiere una mayor especialización para alcanzar objetivos específicos en cada etapa fisiológica del árbol. Por ejemplo, se emplean diferentes tipos de sustratos para promover el desarrollo de raíces, reducir su velocidad de crecimiento, optimizar la disponibilidad de nutrientes o someter al bonsái a estrés hídrico (Empire, 2021). En la boscicultura, se utilizan sustratos porosos como tezontle (roca volcánica), gravas (arenas), akadama, pómicé y mezclas de compost con arena, perlita y musgos (Empire, 2021). El tezontle es comúnmente empleado en la boscicultura en México debido a sus propiedades químicas, como un pH cercano a 7; baja capacidad de intercambio catiónico (CIC), que mide la habilidad del suelo para retener y liberar cationes esenciales como potasio ( $K^+$ ), magnesio ( $Mg^{2+}$ ) y calcio ( $Ca^{2+}$ ); y baja conductividad eléctrica (CE), que refleja la concentración de sales en el sustrato (Rodolfo *et al.*, 2011). Trejo Téllez *et al.* (2013) reportaron estos beneficios en cultivos de nochebuena (*Euphorbia pulcherrima*) y tomate (*Solanum lycopersicum*). En su estudio, observaron una mayor concentración de micro y macronutrientes en plantas cultivadas en tezontle con granulometría de 3 mm y en un sustrato compuesto por turba, perlita y vermiculita (PoMix), en comparación con el tezontle de 5 mm. Además, las plantas cultivadas en PoMix y tezontle de 3 mm mostraron floración más temprana (16 días) que las del tezontle de 5 mm (21 días). Estos resultados sugieren la posibilidad de explorar el uso de sustratos comúnmente empleados en horticultura para el cultivo de la vid. Por ello, el objetivo de este trabajo fue analizar la expresión de los atributos radiculares y el crecimiento vegetativo aéreo en sarmientos de vid cultivados en un sustrato típico de horticultura compuesto por 60% tezontle, 15% tierra preparada y 25% tierra de hoja, en comparación con un sustrato tradicionalmente utilizado en la propagación de vid, compuesto por 80% arena de río y 20% tierra de hoja.

## **Justificación**

Estudiar el efecto de las características del sustrato en *V. vinifera* es relevante bajo el contexto de la plasticidad fenotípica, ya que esta le permite ajustar sus atributos radiculares y aéreos a condiciones de suelo cambiante (Tomasi, 2016; Hunter *et al.*, 2024). Estudios previos han documentado una correlación positiva entre el desarrollo aéreo y subterráneo en la vid (Vrsic *et al.*, 2016). Esto es particularmente importante durante el primer año de vida sarmientos de vid, debido a que deben desarrollar un sistema radicular que sostenga el crecimiento de la planta en años posteriores. El crecimiento radicular deficiente puede aumentar el tiempo requerido para entrenar correctamente las vides afectando el tiempo requerido para alcanzar completamente el potencial productivo de un viñedo (Bettiga, 2015). Del mismo modo, entender cómo las características del sustrato influyen la plasticidad fenotípica de la vid en sustratos no convencionales es útil para investigadores y productores para desarrollar prácticas de manejo; por ejemplo: preparación del suelo, y prácticas de cultivo dirigidas para asegurar el mejor desempeño de la vid en diferentes condiciones de sustrato.

## **Hipótesis**

Hipótesis 1: Existen diferencias significativas en los parámetros de crecimiento vegetativo aéreo, el crecimiento radicular y la arquitectura de la raíz entre plántulas cultivadas en distintos tipos de sustratos: boscicultura con tezontle, boscicultura con perlita y producción de plántulas de vid con arena de río.

Hipótesis 2: Los parámetros de crecimiento vegetativo aéreo están significativamente relacionados con las características de crecimiento y arquitectura de la raíz en plántulas de vid.

## **Objetivo general**

i) Evaluar el efecto de diferentes tipos de sustrato sobre atributos de crecimiento y de arquitectura de raíz y el crecimiento vegetativo aéreo en sarmientos de *V. vinifera* L. cv. Syrah.

ii) Identificar posibles relaciones funcionales entre los diferentes tipos de atributos y describir cómo las interacciones entre el crecimiento aéreo y radicular pueden estar influenciadas por el sustrato.

## **Objetivos específicos**

1. Analizar el efecto de diferentes tipos de sustrato en los parámetros de crecimiento radicular.
2. Evaluar el impacto de diferentes tipos de sustrato en los parámetros de arquitectura radicular.
3. Determinar el efecto de distintos tipos de sustrato en los parámetros de crecimiento vegetativo aéreo.
4. Describir el comportamiento de los parámetros de crecimiento vegetativo aéreo a lo largo de un ciclo anual de crecimiento en los diferentes tipos de sustrato.
5. Identificar patrones de correlación entre los atributos de crecimiento vegetativo aéreo.
6. Identificar patrones de correlación entre los atributos de raíz.
7. Analizar los patrones de correlación entre los atributos de crecimiento vegetativo aéreo y radicular afectados por el tipo de sustrato.

## Metodología

El material biológico fue donado en febrero de 2024 por un productor de uva y vino del Valle de Guadalupe. Se colectaron 180 sarmientos de *V. vinifera* cv. Syrah, y se seleccionaron con una longitud entre 35-40 cm, con 3 yemas latentes cada una. También se buscaron plantas en un estado fitosanitario bueno. Se recolectaron sarmientos sanos completamente agotados (maduros), de un grosor medio entre 0.7-1.2 centímetros y con 3 yemas latentes.

Posterior a la selección de los sarmientos, se resguardaron en un refrigerador a 4°C por dos meses. El 17 de abril fueron termotratados con agua caliente (50 °C por 30 minutos) e inoculados con *Trichoderma* como agente de control biológico, para la profilaxis de enfermedades fúngicas de la madera como es recomendado por Lade *et al.* (2022) y Fraga *et al.* (2022) en el laboratorio de la Facultad de Enología y Gastronomía ubicada Unidad El Porvenir, Baja California.

El proceso de encañado duró 45 días, desde el 17 de abril al 31 de mayo. Los sarmientos permanecieron en un cuarto oscuro para estimular el encañado y desarrollo de las raíces. Después se elaboró un sustrato control, mezclado con arena de río y materia orgánica; y dos sustratos elaborados con 60% tezontle o perlita, tierra de hoja para aportar humedad y tierra preparada (arcilla) para la disponibilidad de nutrientes y reservorio de agua. Así, los sustratos empleados fueron: 80% arena de río y 20% tierra de hoja (Control); 60% tezontle, 15% tierra preparada y 25% tierra de hoja (Sustrato bonsái poroso); y 60% perlita, 15% tierra preparada y 25% tierra de hoja (Sustrato bonsái poroso ligero). Posteriormente, se plantaron 180 barbados en macetas de dos litros de volumen en un experimento tipo invernadero con un diseño completamente al azar por 89 días a partir del 31 de mayo al 28 de agosto. Las plántulas dispuestas se distribuyeron en: 60 barbados en el sustrato de arena de río y tierra de hoja; 60 en el sustrato de tezontle rojo, tierra preparada y tierra de hoja; y 60 en el sustrato de perlita, tierra preparada y tierra de hoja.

Como parte de la metodología se midieron el largo de pámpanos, ancho del sarmiento y clorofila en 5 muestreos a lo largo del periodo de crecimiento vegetativo de los barbados. Finalmente el 28 de agosto, los 180 individuos se retiraron de la maceta y el sustrato fue cuidadosamente retirado para capturar una fotografía de la raíz en un fondo blanco con el programa RhizoVision Explorer v2.0.3 (Seethe Palli and York, 2020) diseñado para analizar imágenes de raíces y medir diversos atributos de crecimiento (Tabla 1). Se utilizó una cámara de 12 megapíxeles para obtener las imágenes de las raíces en un formato de blanco y negro. Después se importaron las imágenes al software, donde se organizaron para su análisis, utilizando algoritmos de procesamiento de imágenes para identificar y segmentar las raíces dentro de las fotografías. Se configuró el programa para medir únicamente segmentos continuos para descartar partículas de suelo u otro ente extraño a la raíz en la imagen. La imagen segmentada con filtrado de ruido se configuró para determinar la calibración 18 megapíxeles = 1 centímetro (Figura 1).



**Figura 1.** Ejemplo de imágenes de raíces de *V. vinifera* cv. Syrah obtenidas a partir de sarmientos en tres sustratos diferentes: a) perlita, b) tezontle y c) arena.

El siguiente paso fue la medición de los atributos de interés y una vez que las raíces estuvieron segmentadas, el software midió los atributos que se describen en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Método de medición y descripción de los atributos de crecimiento de raíz, arquitectura de raíz y crecimiento aéreo evaluados.

Atributos	Método de medición	Descripción
<b>Crecimiento de raíz</b>		
Longitud total de la raíz	Se calcula contando el número total de píxeles en la imagen esqueletizada. Los píxeles diagonales se cuentan como $\sqrt{2}$ .	Relacionada con la capacidad de la planta para explorar mayores volúmenes de suelo, importante para la captación de agua y nutrientes.
Área inferior de la raíz	Para una imagen de corona de raíz, se ubica el píxel esquelético que tiene el radio máximo. El área de red del sistema raíz que está debajo del píxel del esqueleto ubicado arriba se indica como área de raíz inferior.	Relacionada con la captación de agua en suelos profundos.
Número de puntas de raíces	Se calcula contando el número total de píxeles	Refleja el crecimiento activo y la eficiencia en la

	de punta en la imagen esqueletizada utilizando topología.	absorción de agua y nutrientes.
Profundidad, ancho máximo y relación ancho-profundidad	Los valores de la característica para la profundidad y el ancho máximo de la raíz en la imagen segmentada. La relación del ancho máximo con la profundidad de la imagen se registra como la relación ancho-profundidad.	Indica la estrategia de la planta para acceder a recursos en capas superficiales o profundas del suelo.
<b>Arquitectura de raíz</b>		
Espacios entre raíces	Son componentes de fondo entre las raíces en una imagen de segmento. Estos espacios se cuentan y se determina su tamaño promedio.	Indicativo de la ramificación y complejidad del sistema radicular.
Frecuencia de ángulo profundo Frecuencia de ángulo medio Frecuencia de ángulo pronunciado Promedio de la orientación de raíz	Dentro de una localidad de 40x40 píxeles para cada píxel esquelético en el centro, obtenemos las coordenadas de todos los píxeles esqueléticos en esa localidad y calculamos la orientación angular de la localidad.	Las frecuencias de ángulo proporcionan información sobre los patrones de ramificación de la raíz, ayudando a la planta a adaptarse a diferentes tipos de suelo y niveles de humedad.

	<p>Agrupamos estas orientaciones en intervalos de 0-30°, 30-60° y 60-90° y anotamos las frecuencias como frecuencias de ángulos pronunciados, medios y poco profundos. El promedio de estas orientaciones se anota como orientación de raíz promedio.</p>	<p>El promedio de la orientación de la raíz refleja cómo la planta distribuye su sistema radicular en el suelo.</p>
<p>Área convexa</p>	<p>El número total de píxeles que encierran las raíces en una imagen segmentada se denomina área de red. El área de la cáscara convexa en la que puede caber una raíz se define como área convexa.</p> <p>La relación entre el área de la red y el área convexa se define como solidez.</p>	<p>Mide la distribución y compactación del sistema radicular, relacionado con la estabilidad y resistencia mecánica de la planta.</p>
<p>Mediana y número máximo de raíces</p>	<p>Mediana y número máximo de raíces</p> <p>El número de raíces se cuenta realizando escaneos de líneas horizontales de izquierda</p>	<p>Capacidad de la planta para explorar el suelo y adaptarse a condiciones de estrés hídrico o suelos con poca disponibilidad de nutrientes.</p>

	<p>a derecha en cada fila de la imagen segmentada.</p> <p>En cada escaneo de línea, se verifica si hay una transición de valor de píxel desde el valor anterior al valor actual en su lado derecho. Si el valor actual del píxel cambia de 0 a 1, se registra que hay una raíz presente. El número de raíces se registra de cada fila de la imagen segmentada, y la mediana y el número máximo de raíces se determinan a partir de estos valores.</p>	
Perímetro	El perímetro es el conteo del número total de píxeles en la imagen del perímetro.	Indicativo de la extensión superficial de las raíces, crucial en suelos poco profundos o ambientes con nutrientes cerca de la superficie.
Diámetro promedio, mediano y máximo	Para cada píxel en la imagen esqueletizada, se calcula la distancia al píxel más cercano que no es raíz y se utiliza esta distancia como radio para ajustar un círculo. El	Refleja la robustez de la raíz y su capacidad para almacenar y transportar nutrientes y agua.

	<p>diámetro del círculo en cada píxel se registra como el diámetro en ese píxel. Se obtiene la lista de diámetros de todos los píxeles del eje medial y se determina el diámetro promedio, mediano y máximo.</p>	
<p>Volumen y área de superficie</p>	<p>Utilizando los radios determinados anteriormente, la suma de todas las áreas transversales a través de los píxeles del eje medial se registra como volumen y la suma del perímetro en todos los píxeles del eje medial se registra como área de superficie.</p>	<p>Indicadores clave de la interacción entre la raíz y el suelo, así como de la eficiencia en la absorción de nutrientes y agua.</p>
<p>Área de red</p>	<p>El área de la red es el número total de píxeles en la imagen segmentada.</p>	<p>Mide la extensión y complejidad del sistema radicular, relacionado con la capacidad de captar recursos limitados.</p>
<p><b>Atributos aéreos</b></p>		
<p>Clorofila</p>	<p>Con clorofilómetro se toman 4 medidas en hojas diferentes a cada planta para obtener el</p>	<p>Indica la capacidad de la planta en producir cloroplastos</p>

	promedio de cantidad de clorofila.	
Diámetro basal	Se registra el diámetro basal del sarmiento con un vernier después del encallado.	
Largo de pámpanos	Con flexómetro se registra el largo del pámpano desbornado.	

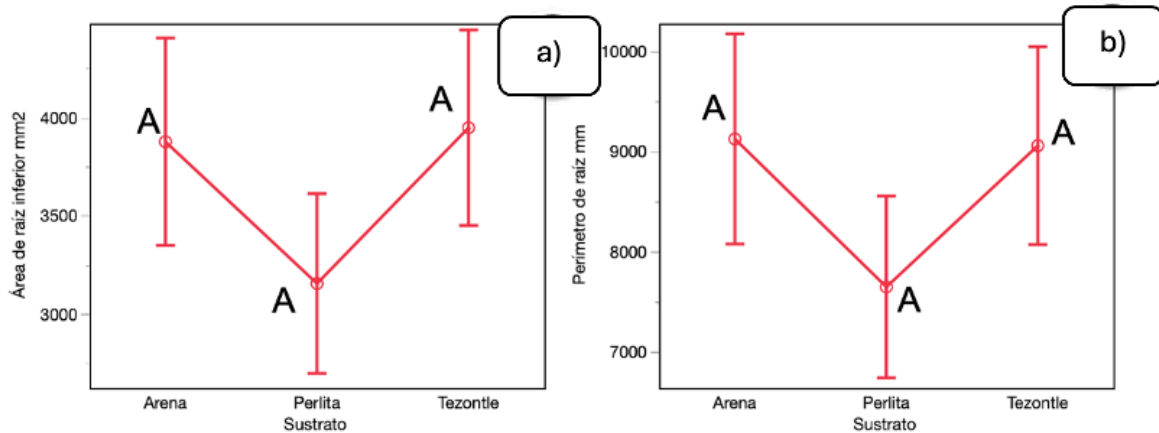
Para el análisis de las variables, se agruparon en tres categorías: atributos de crecimiento aéreo, atributos de crecimiento radicular y atributos de arquitectura radicular. Para evaluar el efecto del sustrato en cada atributo, se utilizaron modelos de ANCOVA, considerando el término "sustrato" como fuente de variación y el "diámetro basal inicial" como covariable, dado que los análisis preliminares (ver Anexo 1) mostraron que esta variable tiene un efecto significativo sobre los atributos medidos. Se determinó la significación a un valor de  $p$ -value o alfa de 0.05 mediante la prueba de Tukey entre sustratos. Además, se realizó una prueba de correlación de Pearson para determinar su asociación entre los atributos aéreos y radiculares; así como entre ambos grupos, particularmente en los casos donde el sustrato tuvo un efecto significativo en los atributos, los cuales pueden estar influenciadas por el sustrato. Los análisis estadísticos se realizaron empleando JMP ver. 16 (SAS Institute, 2023).

## Resultados

### Efecto del sustrato en parámetros de crecimiento radicular.

El diámetro basal tuvo un efecto significativo en el largo total de la raíz, diámetro máximo de raíces, área de raíces inferiores, diámetro promedio de raíces, volumen y área de la superficie. Por otro lado, el sustrato solo tuvo un efecto significativo en

el área de raíces inferiores y marginalmente en el perímetro de raíz (Tabla 1). Sin embargo, aunque puede observarse una tendencia visual, la prueba de Tukey no detectó diferencias significativas en el área o perímetro de las raíces entre los sustratos (Figura 2a y 2b).



**Figura 2.** Análisis y comparación de varianzas y prueba Tukey para atributos radiculares del (a) área de raíz inferior y (b) perímetro de raíz entre los distintos sustratos.

**Tabla 2.** Análisis de covarianza para evaluar el efecto del tipo de sustrato y del diámetro basal inicial sobre atributos de crecimiento de raíz en sarmientos de *V. vinifera* cv. Syrah.

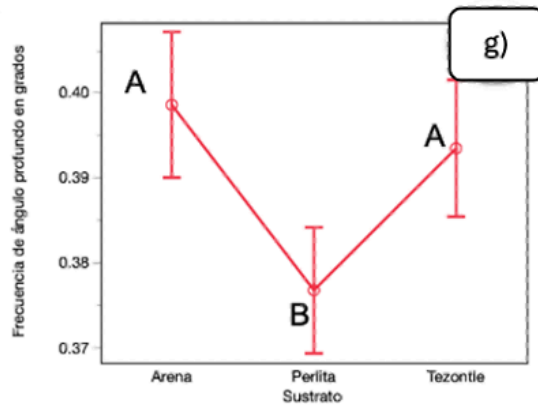
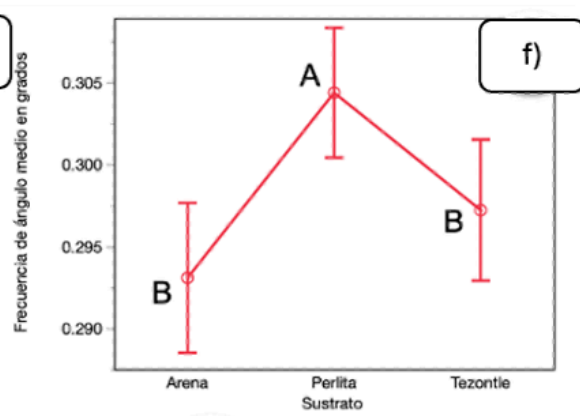
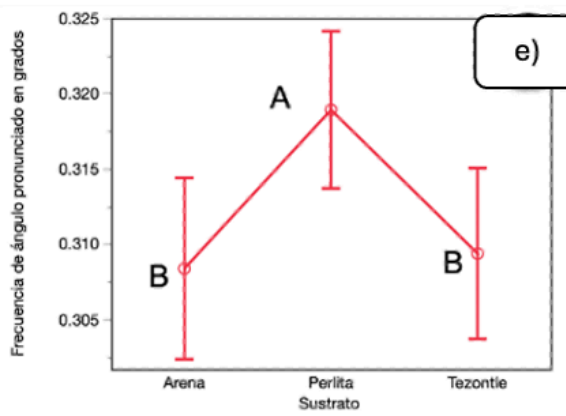
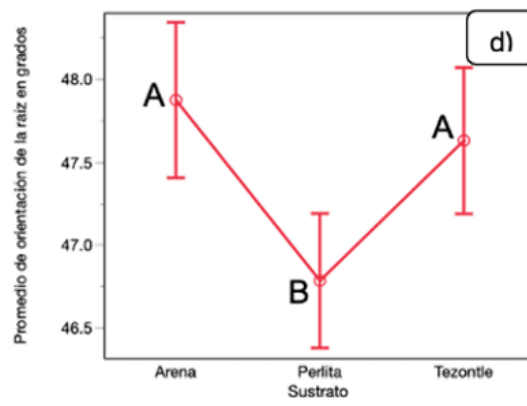
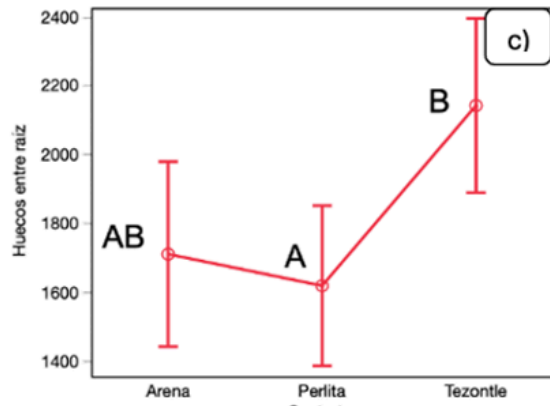
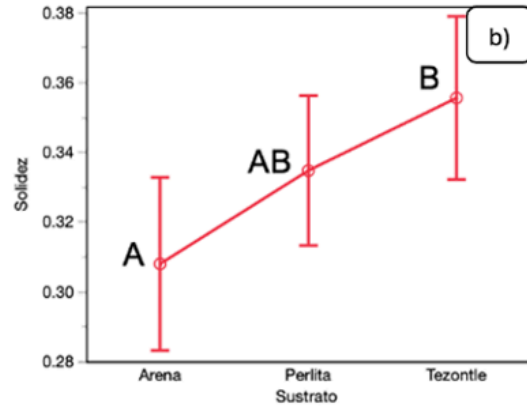
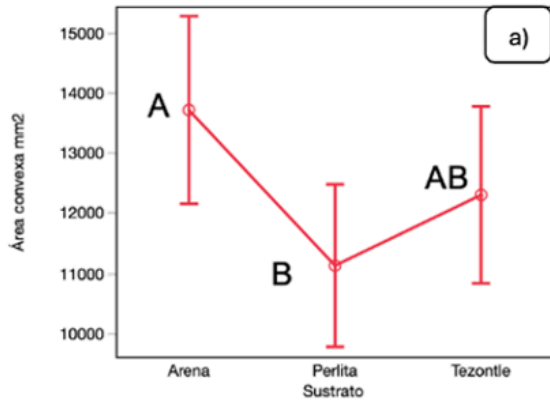
Respuesta	Factor	G.L.	S.C.	C.M.	F	P	R <sup>2</sup>
Mediana de número de raíces	Sustrato	2	189.1	94.55	2.41	0.0934	0.09
	Diámetro basal	1	130.35	130.35	3.35	0.0704	
	Diámetro basal*Sustrato	2	111.49	55.74	1.42	0.2445	
Número máximo de raíces	Sustrato	2	234.46	117.23	1.07	0.3444	0.06
	Diámetro basal	1	140.86	140.81	1.29	0.2579	
	Diámetro basal*Sustrato	2	335.2	167.6	1.53	0.219	
Número de puntas de raíz	Sustrato	2	2322204.37	1161102.18	1.96	0.1449	0.07

	Diámetro basal	1	61864.65	61864.65	0.1	0.747	
	Diámetro basal*Sustrato	2	2984657.28	1492328.64	2.52	0.0844	
<hr/>							
Largo total de raíz	Sustrato	2	54312253.69	27156126.85	2.68	0.0718	0.12
	Diámetro basal	1	55361183.89	55361183.89	5.48	<b>0.0208</b>	
	Diámetro basal*Sustrato	2	33765517.79	16882758.9	1.67	0.192	
<hr/>							
Ancho máximo de raíz	Sustrato	2	3986.33	1993.16	2	0.1386	0.05
	Diámetro basal	1	17.23	17.23	0.01	0.8954	
	Diámetro basal*Sustrato	2	1500.74	750.37	0.75	0.4718	
<hr/>							
Diámetro máximo de raíz	Sustrato	2	0.37633	0.18	0.048	0.9532	0.18
	Diámetro basal	1	77.84	77.84	19.84	<b>&lt;.0001</b>	
	Diámetro basal*Sustrato	2	8.01	4.009	1.02	0.3627	
<hr/>							
Área inferiores de raíces	Sustrato	2	18131534.22	9065767.112	3.342	<b>0.0385</b>	0.15
	Diámetro basal	1	18636765.16	18636765.16	6.8703	<b>0.0098</b>	
	Diámetro basal*Sustrato	2	11243729.25	5621864.624	2.0725	0.1301	
<hr/>							
Diámetro promedio	Sustrato	2	0.026	0.013	0.677	0.51	0.11
	Diámetro basal	1	0.15	0.151	7.6	<b>0.0064</b>	
	Diámetro basal*Sustrato	2	0.06	0.034	1.743	0.1791	
<hr/>							
Mediana de diámetro	Sustrato	2	0.00024	0.0001	0.014	0.9859	0.06
	Diámetro basal	1	0.022	0.022	2.68	0.1036	
	Diámetro basal*Sustrato	2	0.03	0.015	1.76	0.1747	
<hr/>							
Volumen	Sustrato	2	64270261.95	32135130.97	0.5742	0.5646	0.19
	Diámetro basal	1	923800042.3	923800042	16.5065	<b>&lt;.0001</b>	
	Diámetro basal*Sustrato	2	233262654.2	116631327	2.084	0.1287	
<hr/>							
Área de la superficie	Sustrato	2	391858035.7	195929017.9	1.57	0.2106	0.14
	Diámetro basal	1	1169282450	1169282450	9.41	<b>0.0026</b>	
	Diámetro basal*Sustrato	2	421923577.3	210961788.7	1.69	0.1872	

Profundidad	Sustrato	2	1488.02	744.01	1.43	0.2416	0.04
	Diámetro basal	1	247.49	247.49	0.47	0.4906	
	Diámetro basal*Sustrato	2	989.82	494.91	0.95	0.3873	
<hr/>							
Perímetro	Sustrato	2	64894427.78	32447213.89	3.04	0.0513	0.10
	Diámetro basal	1	32365082.38	32365082.38	3.03	<b>0.084</b>	
	Diámetro basal*Sustrato	2	28922466.45	14461233.22	1.35	0.2616	

### Efecto de diferentes tipos de sustrato en parámetros de arquitectura radicular

El tipo de sustrato tuvo un efecto significativo sobre los espacios entre raíces, orientación de raíz promedio, frecuencia de raíces superficiales, frecuencia de raíces intermedias, frecuencia de raíces anguladas, área convexa y solidez. En cuanto al área convexa (Fig. 3a), se observó que Arena presentó el mayor valor, Perlita el más bajo y Tezontle se ubicó en un nivel intermedio, sin diferir estadísticamente de los otros dos sustratos. Respecto a la solidez (Fig. 3b), Tezontle (B) registró el valor más alto, significativamente superior a Arena, mientras que Perlita se mantuvo en un nivel intermedio sin diferir de manera estadísticamente significativa de los demás tratamientos. En la variable de huecos entre raíz (Fig. 3c), Tezontle presentó el mayor número de huecos, superando a Perlita, en tanto que Arena se ubicó en un valor intermedio. Finalmente, en el promedio de orientación de la raíz (Fig. 3d), Arena y Tezontle mostraron ángulos estadísticamente similares y mayores que los observados en Perlita. En la frecuencia de ángulo pronunciado (Fig. 3e), Perlita mostró el valor más alto, significativamente mayor que Arena y Tezontle, los cuales no difirieron entre sí. Respecto a la frecuencia de ángulo medio (Fig. 3f), Perlita registró nuevamente el valor más elevado, diferenciándose estadísticamente de Arena y Tezontle, que presentaron valores similares. Finalmente, en la frecuencia de ángulo profundo (Fig. 3g), Arena y Tezontle alcanzaron valores significativamente mayores que Perlita, sin diferencias estadísticas entre ellos.



**Figura 3.** Comparación de varianzas y prueba Tukey en los atributos de (a) área convexa de la raíz (mm<sup>2</sup>), (b) solidez, (c) número de huecos entre raíces, (d) promedio de orientación de la raíz, (e) frecuencia de ángulo pronunciado, (f) f. de ángulo medio y (g) f. de ángulo profundo. (en grados) en sarmientos de *V. vinifera* cv. Syrah plantadas en tres sustratos: Arena, Perlita y Tezontle. Los círculos representan los valores promedio, las barras de error corresponden al error estándar, y las letras sobre cada punto indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos ( $p < 0.05$ ).

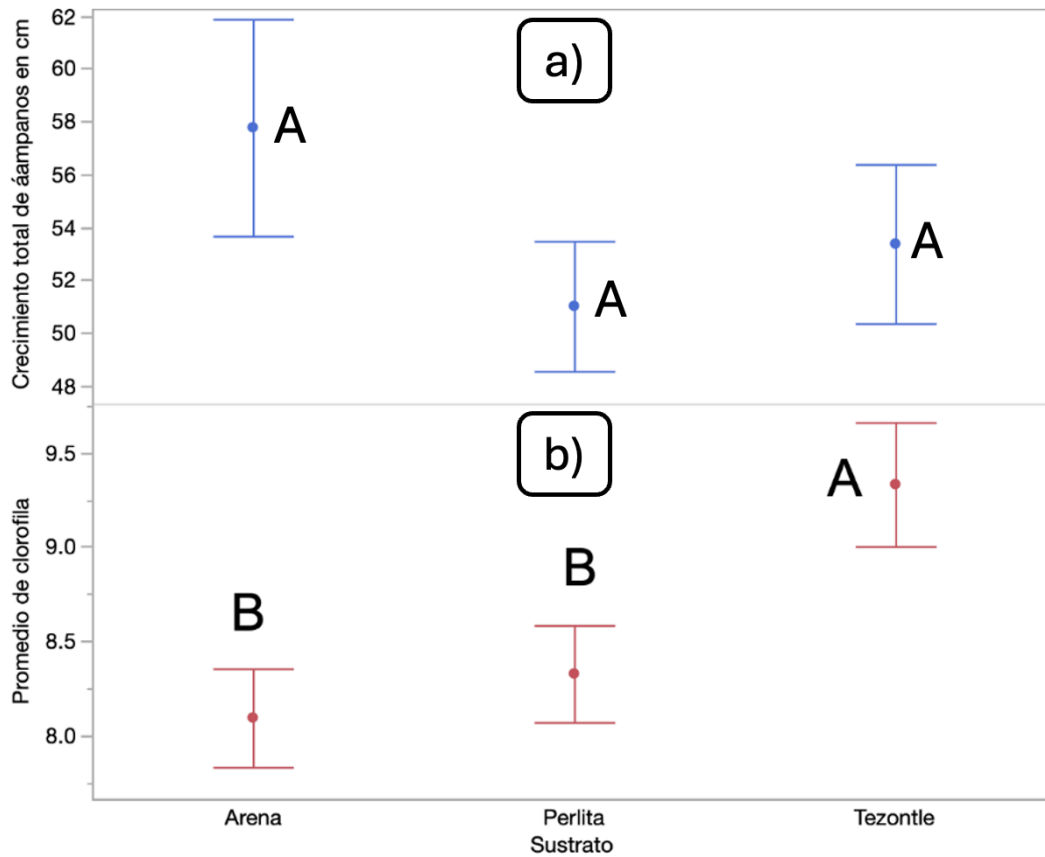
**Tabla 3.** Análisis de covarianza para evaluar el efecto del tipo de sustrato y del diámetro basal inicial sobre atributos de arquitectura de raíz en sarmientos de *V. vinifera* cv. Syrah.

Respuesta	Factor	G.L.	S.C.	C.M.	F	P	R <sup>2</sup>
Espacios entre raíces	Sustrato	2	6961835.64	3480917.82	4.95	<b>0.0085</b>	0.18
	Diámetro basal	1	6217640.35	6217640.35	8.85	<b>0.0035</b>	
	Diámetro basal*Sustrato	2	2365705.42	1182852.71	1.6839	0.1898	
<hr/>							
Orientación de raíz promedio	Sustrato	2	30.049	15.02	7.02	<b>0.0013</b>	0.15
	Diámetro basal	1	3.363	3.36	1.57	0.2123	
	Diámetro basal*Sustrato	2	12.69	6.34	2.96	0.0552	
<hr/>							
Frecuencia de raíces superficiales	Sustrato	2	0.003	0.0016	4.45	<b>0.0135</b>	0.15
	Diámetro basal	1	0.001	0.0011	3.09	0.0812	
	Diámetro basal*Sustrato	2	0.002	0.0013	3.81	<b>0.0247</b>	
<hr/>							
Frecuencia de raíces intermedias	Sustrato	2	0.0029	0.0015	7.2	<b>0.0011</b>	0.10
	Diámetro basal	1	0.00005	0	0.23	0.632	
	Diámetro basal*Sustrato	2	0.00003	0	0.079	0.924	
<hr/>							
Frecuencia de raíces anguladas	Sustrato	2	0.011	0.006	8.36	<b>0.0004</b>	0.14

	Diámetro basal	1	0.00069	0.0007	0.96	0.3286	
	Diámetro basal*Sustrato	2	0.0033	0.0017	2.31	0.1027	
<hr/>							
Proporción ancho- profundidad	Sustrato	2	0.093	0.047	1.34	0.2644	0.03
	Diámetro basal	1	0.002	0.002	0.06	0.7941	
	Diámetro basal*Sustrato	2	0.038	0.01	0.55	0.5765	
<hr/>							
Área de la red	Sustrato	2	12339626.44	6169813.22	1.94	0.1473	0.12
	Diámetro basal	1	21812816.09	21812816.09	6.87	<b>0.0098</b>	
	Diámetro basal*Sustrato	2	9914368.59	4957184.29	1.56	0.2137	
<hr/>							
Área convexa	Sustrato	2	146825793.2	73412896.52	3.07	<b>0.0495</b>	0.07
	Diámetro basal	1	6947924.83	6947924.83	0.29	0.5903	
	Diámetro basal*Sustrato	2	63321108.51	31660554.26	1.32	0.2687	
<hr/>							
Solidez	Sustrato	2	0.04	0.02	3.82	<b>0.0244</b>	0.16
	Diámetro basal	1	0.06	0.06	11.06	<b>0.0012</b>	
	Diámetro basal*Sustrato	2	0.004	0.0022	0.36	0.692	

### Efecto de diferentes tipos de sustrato en parámetros de crecimiento vegetativo aéreo

Tanto el sustrato como el diámetro basal mostraron efecto significativo sobre el índice de clorofila promedio, mientras que, para el crecimiento total de pámpanos, ninguno de los factores resulta significativo, aunque el diámetro basal está cercano al nivel de significancia (Tabla 3). En la Figura 4a se representa el crecimiento total de pámpanos para plantas cultivadas en Arena, Perlita y Tezontle. Si bien Arena exhibe la media más elevada, seguida de Tezontle y, finalmente, Perlita, no se aprecian diferencias estadísticas claras entre los tres tratamientos. Por otro lado, en la Figura 4b, se muestran los valores promedio de clorofila, donde Tezontle (A) alcanzó un nivel significativamente mayor que (B) Arena y Perlita, mientras que entre estos dos últimos sustratos no se evidenció diferencia estadística.



**Figura 4.** Comparación del crecimiento total de pámpanos (a) y del promedio de clorofila (b) en sarmientos de *V. vinifera* cv. Syrah plantadas en tres sustratos: Arena, Perlita y Tezontle.

**Tabla 4.** Análisis de covarianza para evaluar el efecto del tipo de sustrato y del diámetro basal inicial sobre atributos de crecimiento vegetativo aéreo en sarmientos de *V. vinifera* cv. Syrah.

Respuesta	Factor	G.L.	S.C.	C.M.	F	P	R <sup>2</sup>
Índice de clorofila promedio	Sustrato	2	35.57	17.78	5.27	<b>0.0063</b>	0.15
	Diámetro basal	1	23.47	23.47	6.96	<b>0.0093</b>	
	Diámetro basal*Sustrato	2	5.63	2.81	0.83	0.4356	
Crecimiento total de pámpanos	Sustrato	2	1196.53	598.26	1.4429	0.2401	0.08
	Diámetro basal	1	1554.91	1554.91	3.7501	0.055	

Diámetro						
basal*Sustrato	2	1289.46	644.73	1.5549	0.2152	

### Comportamiento de parámetros de crecimiento aéreo a lo largo de un ciclo anual de crecimiento en diferentes tipos de sustrato

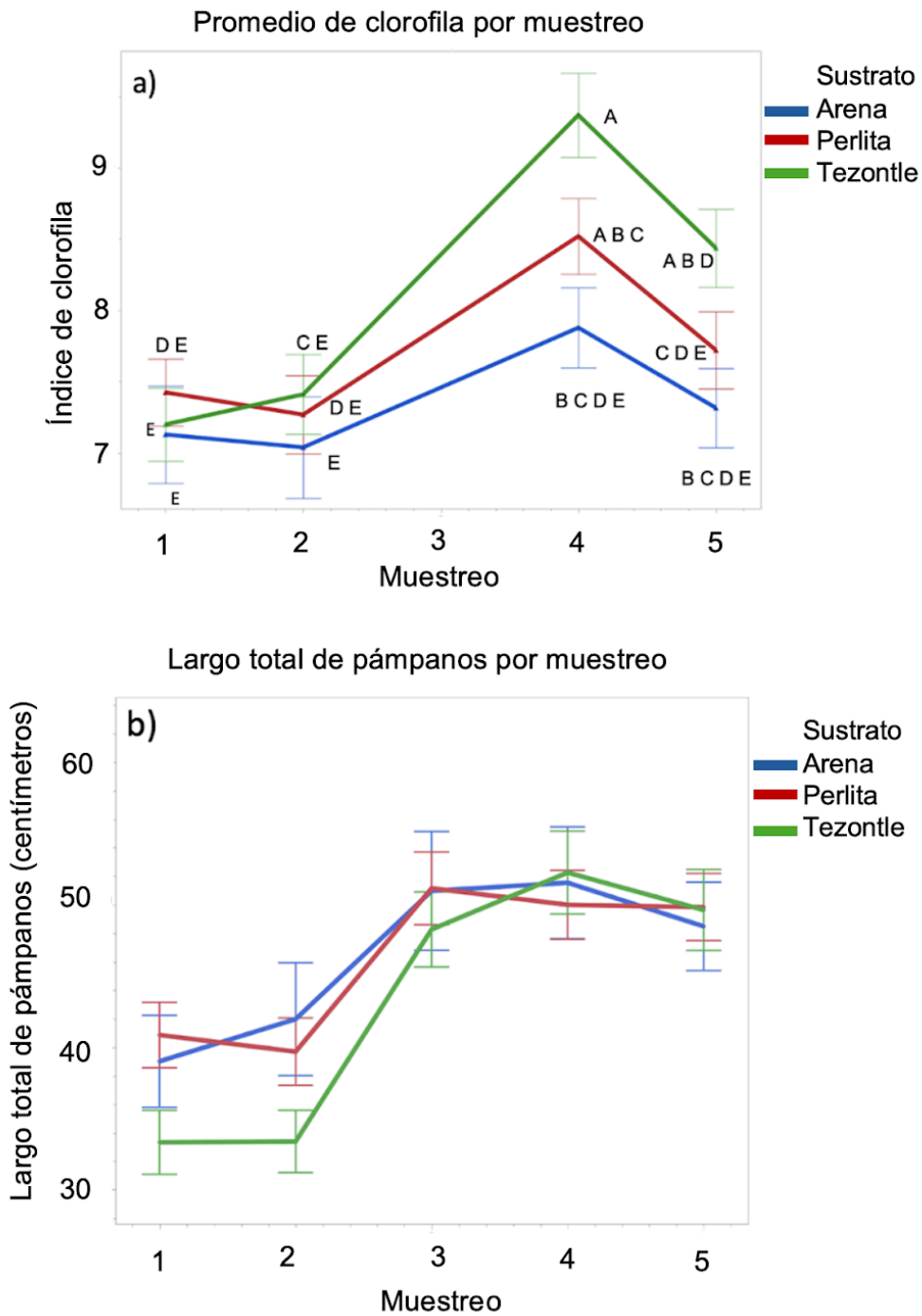
El sustrato y el muestreo tienen efectos significativos sobre el índice de clorofila promedio, indicando que tanto el tipo de sustrato como el momento del muestreo afectan el índice de clorofila. También se detectó una interacción significativa entre el sustrato y el tiempo de muestreo (Tabla 4). Se encontró que el tezontle presentó los valores más altos, especialmente desde el tercer muestreo, con diferencias estadísticamente significativas. La perlita se ubicó en un nivel intermedio; en ocasiones se acercó al tezontle y en otras coincidió con valores similares a los de la arena. Por su parte, la arena mantiene en general los valores más bajos de clorofila, sobre todo al final de los muestreos (Figura 5a).

Por otro lado, para el crecimiento total de pámpanos, el sustrato no tiene un efecto significativo por sí solo, pero el muestreo y la interacción entre sustrato y muestreo sí son significativos, sugiriendo que el crecimiento de los pámpanos está afectado por el momento de medición y por la combinación del sustrato y el tiempo (Tabla 4). Aunque visualmente, se aprecia que las curvas presentan ciertas oscilaciones entre muestreos (Figura 5b), el ANOVA no encontró un efecto significativo del sustrato en la longitud de los pámpanos. Esto indica que estadísticamente no hubo diferencias claras atribuibles al uso de arena, perlita o tezontle a lo largo de los muestreos.

**Tabla 5.** Análisis de covarianza para evaluar el efecto del tipo de sustrato y del muestreo sobre atributos de crecimiento vegetativo aéreo en sarmientos de *V. vinifera* cv. Syrah.

Respuesta	Factor	G. L.	G.L. den	F	p	R2
Índice de clorofila promedio	Sustrato	2	150	4.04	<b>0.0194</b>	0.57

	Muestreo	3	422.6	28.73	< 0.0001	
	Sustrato*Muestreo	6	422.3	2.38	0.0279	
<hr/>						
Crecimiento total de						
pámpanos	Sustrato	2	154.2	0.128.6	0.8332	0.81
	Muestreo	4	585.8	165.2	< 0.0001	
	Sustrato*Muestreo	8	585.1	4.1	< 0.0001	



**Figura 5.** Índice de clorofila y crecimiento total de pámpanos promedio en sarmientos de *V. vinifera* cv. Syrah plantados en tres diferentes sustratos de arena, perlita y tezontle durante cinco muestreos de un ciclo anual.

### **Patrón de correlaciones entre atributos de crecimiento vegetativo aéreo**

Las correlaciones encontradas entre atributos aéreos fueron positivas, lo que indica una relación directa entre las variables, es decir, a medida que una variable aumenta, la otra también lo hace (Tabla 5). Sin embargo, el valor de sus coeficientes de correlación en todos los casos fue moderadas ( $r= 0.20-0.26$ ).

**Tabla 6.** Correlación entre atributos aéreos evaluados y el diámetro basal en sarmientos de *V. vinifera* cv. Syrah.

<b>Variable 1</b>	<b>Variable 2</b>	<b>Correlación (r)</b>	<b>P</b>
Crecimiento total de pámpanos	Índice de clorofila promedio	0.20	<b>0.0185</b>
Diámetro basal	Índice de clorofila promedio	0.26	<b>0.0018</b>
Diámetro basal	Crecimiento total de pámpanos	0.20	<b>0.0181</b>

### **Patrón de correlaciones atributos de raíz.**

Las variables de raíz evaluadas mostraron valores de correlación altas. Los atributos asociados al crecimiento mostraron exclusivamente correlaciones positivas. Por ejemplo, se encontró una asociación entre el área de la raíz y la longitud total de las raíces ( $r =0.95$ ). Del mismo modo, atributos de crecimiento de raíz estuvieron correlacionados positivamente con atributos de estructura de raíz, por ejemplo, el largo total de las raíces estuvo correlacionado positivamente con la cantidad de huecos entre raíces ( $r = 0.95$ ). Por otro lado, atributos asociados con atributos de

arquitectura de raíz estuvieron correlacionados negativamente entre ellos. Por ejemplo, las raíces con una alta frecuencia de ángulos superficiales mostraron tener una baja frecuencia de ángulos pronunciados, así como la frecuencia de ángulos medios también está inversamente asociada con la frecuencia de ángulos superficiales (Figura 6).

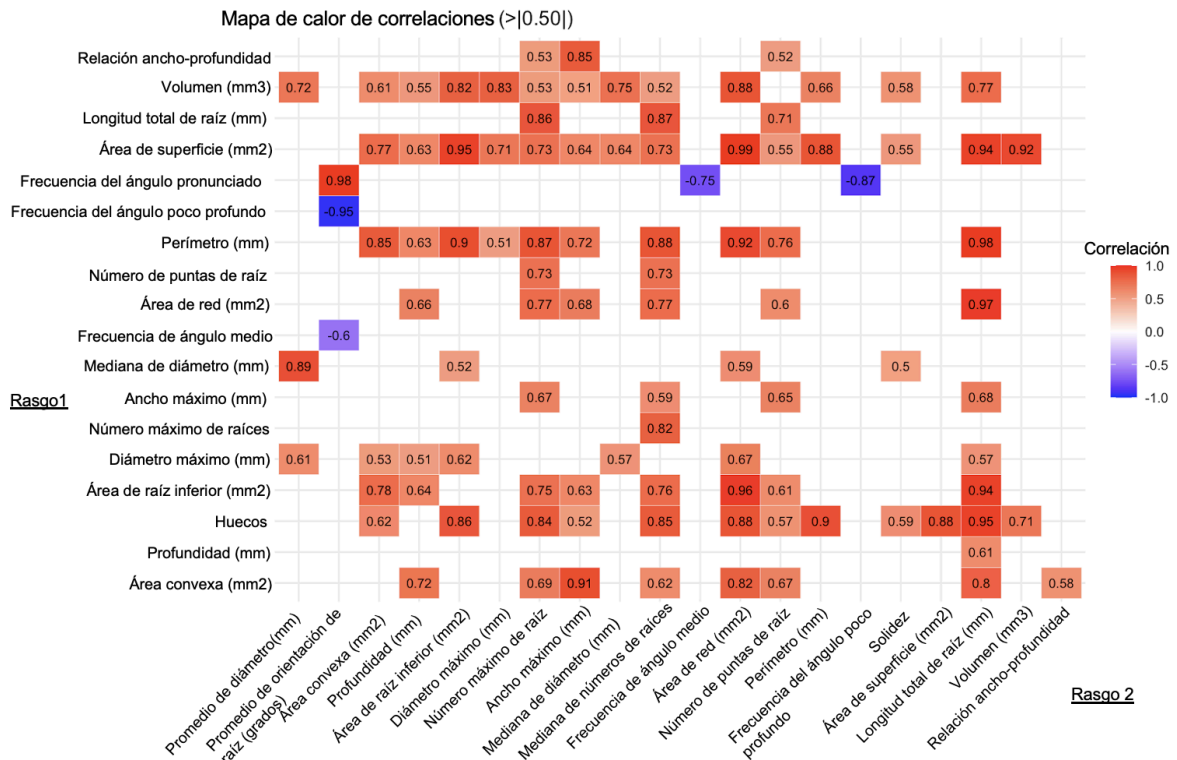
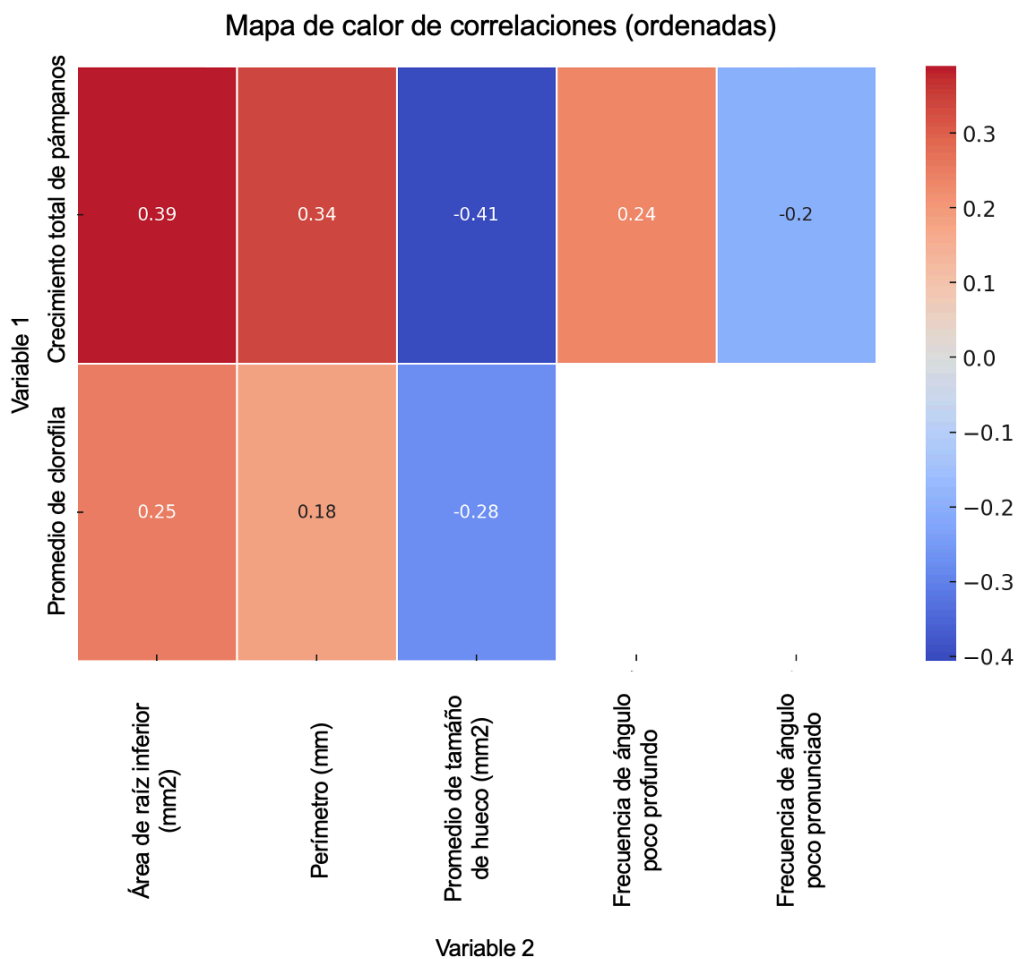


Figura 6. Mapa de calor de correlaciones entre atributos de raíz evaluados en sarmientos de *V. vinifera* cv. Syrah.

### Patrón de correlaciones atributos entre crecimiento vegetativo aéreo y radicular afectados por el sustrato

El crecimiento total pámpanos presentó correlaciones positivas moderadas con el Área de raíz inferior de raíz ( $r = 0.39$ ) y el Perímetro de raíz ( $r = 0.34$ ). Esto sugiere que un mayor desarrollo radicular y una mayor dimensión perimetral están asociados con un incremento en el crecimiento de los pámpanos. Por el contrario, se identificó una correlación negativa significativa entre el crecimiento total de los pámpanos y el tamaño promedio de huecos ( $r = -0.41$ ), lo que indica que un

aumento en el tamaño promedio de los huecos podría limitar este crecimiento. Por otra parte, el promedio del índice de clorofila mostró correlaciones positivas bajas con el área de raíz inferior ( $r = 0.25$ ) y el perímetro de raíz ( $r = 0.18$ ), así como una correlación negativa leve con el tamaño promedio de huecos ( $r = -0.28$ ). Adicionalmente, las frecuencias angulares, representadas por las variables frecuencia de raíces superficiales y frecuencia de raíces profundas, presentaron correlaciones moderadas tanto con el crecimiento de los pámpanos como con el contenido de clorofila (Figura 7).



**Figura 7.** Mapa de calor de correlaciones entre atributos de raíz afectados significativamente por el sustrato y atributos aéreos (Promedio de clorofila y longitud de pámpanos) evaluados en sarmientos de *V. vinifera* cv. Syrah.

## Discusión

Los resultados indicaron que el sustrato tiene un impacto limitado en los atributos asociados al crecimiento radicular. El diámetro basal es un factor clave en la expresión de los atributos de las plantas, debido a que está directamente relacionado con una mejor arquitectura vascular y mayor almacén de reservas energéticas para la brotación de nuevas raíces y pámpanos (Munoz *et. al.*, 2023). Esto sugiere que si bien el sustrato también tuvo un efecto significativo en la arquitectura de la raíz, el diámetro basal sigue siendo el factor principal que influye en estos aspectos. En general, las plantas con mayores diámetros basales también mostraron niveles más altos de estos atributos. Por otro lado, se observó un efecto significativo del sustrato en los atributos de arquitectura de raíz, mientras que el diámetro basal también desempeña un papel importante, aunque en menor medida. Estos resultados concuerdan con evidencia previa en el sentido de que, atributos asociados al crecimiento de la raíz como el número máximo de raíces, el largo total de raíces, ancho de raíces, área de la red de raíces, diámetro promedio, mediana del diámetro, perímetro y área de superficie son atributos que se encuentran bajo fuerte control genético (Thapa, 2022); mientras que atributos asociados a la arquitectura de raíz, como la proporción de espacios entre raíces, la solidez de la raíz y la frecuencia de ángulos superficiales, medios y profundos, son atributos que muestran plasticidad fenotípica en respuesta a factores ambientales (Smart, *et. al.*, 2006). La interacción entre ambos factores mostró un efecto significativo únicamente en el caso de la frecuencia de raíces superficiales. Esto sugiere que el tezontle promovió una mayor solidez radicular y más espacios entre raíces, características que pueden estar asociadas con una mayor estabilidad mecánica y una exploración más eficiente del sustrato (Feng, *et. al.*, 2020; Koren, *et. al.*, 2024). Por otro lado, la arena y el tezontle favorecieron una mayor profundidad de raíces, lo que podría estar relacionado con una estrategia adaptativa para maximizar la captación de agua en suelos de textura gruesa; como se ha documentado para otras especies del género *Vitis* (Jones, 1983).

Los resultados muestran que la frecuencia de ángulos pronunciados y medios es significativamente mayor en la perlita en comparación con la arena y el tezontle, los cuales presentan valores similares y no difieren estadísticamente. Esto indica que la

perlita podría promover la formación de estructuras con estos tipos de ángulos. Por otro lado, en cuanto a los ángulos profundos, la frecuencia más alta se observa en la arena y el tezontle, que no difieren significativamente entre sí, mientras que la perlita presenta la frecuencia más baja, siendo estadísticamente diferente. Estos hallazgos sugieren que la elección del sustrato influye de manera diferenciada en la formación de ángulos en las estructuras, posiblemente afectando el desarrollo o la funcionalidad de éstas en contextos específicos de crecimiento como se ha documentado previamente para otros sistemas (Lynch, 2021) y para otras variedades de *V. vinifera* (Herrera et.al., 2024).

Los resultados para los atributos vegetativos aéreos indican que el sustrato tuvo un efecto significativo en el índice de clorofila promedio, siendo el tezontle el que presentó los valores más altos, seguido por la perlita y la arena. Esto sugiere que las propiedades del tezontle, como su capacidad de aireación y retención de agua, pueden haber favorecido una mayor eficiencia fotosintética. Estos resultados concuerdan con lo encontrado para la variedad Tempranillo, en la que se ha encontrado que el tipo de suelo tiene relación con el intercambio de gases de la planta, la disponibilidad hídrica y el vigor de la planta (Buesa *et al.*, 2023). En contraste, no se encontraron diferencias significativas en el crecimiento total de los pámpanos entre los sustratos, aunque el diámetro basal mostró una tendencia cercana a la significancia.

El análisis temporal reveló que el sustrato y el momento de muestreo tuvieron efectos significativos sobre el índice de clorofila, destacando la interacción dinámica entre las características del sustrato y el desarrollo de las plantas a lo largo del ciclo de crecimiento. Este patrón sugiere que las propiedades físicas y químicas del sustrato pueden influir de manera más notable en etapas específicas del desarrollo vegetativo. Mientras que el índice de clorofila está influenciado por el sustrato y el momento de muestreo, el crecimiento de los pámpanos parece depender más del momento de muestreo y la interacción con el sustrato que del sustrato por sí solo. Los cambios observados en los niveles del índice de clorofila pueden ser un reflejo de los cambios morfológicos y fisiológicos de la vid en su ciclo anual. En una planta en condiciones normales de crecimiento se espera que haya un desarrollo conjunto de atributos de crecimiento aéreo y de raíz, hasta el final del ciclo anual en donde el

sistema radicular de la planta puede ser mayor que el crecimiento aéreo (Robbins, *et. al.*, 1957).

El índice de clorofila promedio está relacionado de manera significativa tanto con el diámetro basal como con el crecimiento de los pámpanos. Esto refleja la importancia de los niveles de clorofila para una planta, ya que están asociados profundamente con el mantenimiento de la fotosíntesis y por lo tanto con el crecimiento de la vid (Vrignon-Brenas, *et. al.*, 2022), como se ha descrito previamente para la variedad Sagraone (Rafique *et. al.*, 2023). De manera similar, el diámetro basal también se relaciona con el crecimiento de los pámpanos. Sin embargo, al ser estas correlaciones débiles a moderadas, es probable que otros factores también influyen en estas variables.

Por otro lado, se detectaron correlaciones positivas altas entre atributos de crecimiento de raíz, como el diámetro y el perímetro de la raíz, o el área superficial y el volumen. Mientras que se detectaron correlaciones negativas altas en la arquitectura de la raíz, como la relación entre los ángulos poco profundos y los ángulos medios, así como la frecuencia de ángulos poco profundos y la solidez de la raíz, sugieren posibles compensaciones estructurales. Este resultado puede reflejar el grado de control genético tanto de atributos de crecimiento de raíz como de arquitectura propios de la variedad (Smart, *et. al.*, 2006; Thapa, 2022), como se ha documentado previamente para *Vitis riparia* y *Vitis rupestris* (Mohatsebi, 2023)

Las correlaciones entre atributos aéreos y radicales afectados por el sustrato resaltan la interacción funcional entre ambos sistemas. El área de raíces inferiores y el perímetro radicular mostraron correlaciones positivas moderadas con el crecimiento de los pámpanos, indicando que un sistema radicular bien desarrollado contribuye directamente al soporte de estructuras vegetativas. Por el contrario, el tamaño promedio de los huecos entre raíces presentó una correlación negativa con el crecimiento aéreo, lo que sugiere que una distribución menos compacta del sistema radicular puede limitar la eficiencia en la captación de agua y nutrientes (Jones, 1983). Estos hallazgos sugieren que estos atributos de arquitectura de raíz pueden ser manipulados para optimizar el crecimiento de *V. vinifera* cv. Syrah como ha sido propuesto para otros sistemas (Lynch, 2021).

Aunque este estudio proporciona evidencia significativa sobre el efecto del sustrato en el desarrollo de *V. vinifera*, algunas limitaciones incluyen el tamaño de muestra reducido y la variabilidad intragrupal, lo que podría haber limitado la detección de diferencias estadísticas en ciertas variables. Investigaciones futuras podrían enfocarse en evaluar una mayor diversidad de sustratos, incorporar análisis en campo abierto y explorar las interacciones entre sustrato, riego y fertilización. Este estudio se realizó bajo condiciones limitantes como el tiempo, ubicación y disponibilidad de recursos materiales. Para su próxima replicación, se sugiere extender la duración del experimento, así como continuarlo para poder estudiar más ciclos anuales, para obtener resultados más confiables. Para futuras réplicas de este experimento, se recomienda, tomando en cuenta lo anterior descrito, instalar el experimento en condiciones más controladas.

## **Conclusión**

Este estudio demuestra que los sustratos influyen significativamente en la arquitectura radicular y en atributos de vegetativos aéreos de sarmientos de vid cv. Syrah. Estos resultados refuerzan la importancia de seleccionar sustratos adecuados para maximizar el desarrollo radicular y el desempeño fenotípico en etapas iniciales de propagación. Los resultados de este estudio permitirán ofrecer nuevas opciones para estudios académicos, y utilizar los principios del bonsái para el estudio del cultivo de uva en maceta. Para los productores de uva, ofrece una alternativa para la etapa de la producción y crecimiento de raíces en el primer año, para mejorar la arquitectura radicular de los barbados antes de plantar en suelo.

## **Referencias**

Aleandri, M. P., Chilosi, G., Muganu, M., Vettraino, A., Marinari, S., Paolucci, M., Luccioli, E., & Vannini, A. (2015). On farm production of compost from nursery green residues and its use to reduce peat for the production of olive pot plants. *Scientia Horticulturae*, 193, 301-307. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.06.048>.

Beckett, C., Glenn, D., Bradley, K., Guzzomi, A., Merritt, D., & Fourie, A. (2017). Compaction conditions greatly affect growth during early plant establishment. *Ecological Engineering*, 106, 471-481. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.04.053>

Bettiga, L. (2015). Growth and productivity of green-growing and dormant 'Chardonnay' benchgrafts during vineyard establishment. *HorTechnology*, 5(6), 752-756. <https://doi.org/10.21273/horttech.25.6.752>

Buesa, I., Torres, N., Tortosa, I., Marín, D., Villa-Llop, A., Douthe, C., Escalona, J. (2023). Conventional and newly bred rootstock effects on the ecophysiological response of *Vitis vinifera* L. cv. Tempranillo. *Agricultural Water Management*, 289. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108560>

Empire, B. (2021). *Substrato para el Bonsái*. Empire Bonsai. <https://www.bonsaiempire.es/fundamentos/cuidados/tierra>

Evans, R. Y., Hansen, J., & Dodge, L. L. (2009). Growth of rose roots and shoots is highly sensitive to anaerobic or hypoxic regions of container substrates. *Scientia horticulturae*, 119(3), 286-291. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2008.07.033>

Fraga-Meizoso, M., Aguín Casal, O., Salinero C. C., Piñón E. P., López B. M. & Mansilla-Vázquez J. P. (2022). Evaluación de cepas de *Trichoderma* sp. Aisladas de viña frente al patógeno *Neofusicoccum parvum*.

Feng, S., Liu, H., & Ng, C. (2020). Analytical analysis of the mechanical and hydrological effects of vegetation on shallow slope stability. *Computers and Geotechnics*, 118, 103335. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.103335>

Heller-Fuenzalida, F., Cuneo, I. F., Kuhn, N., Peña-Neira, Á., & Cáceres-Mella, A. (2023). Rootstock Effect Influences the Phenolic and Sensory Characteristics of Syrah Grapes and Wines in a Mediterranean Climate. *Agronomy*, 13(10), 2530. <https://doi.org/10.3390/agronomy13102530>

Freschet, G. T., Violle, C., Bourget, M., Scherer-Lorenzen, M., & Fort, F. (2018). Allocation, morphology, physiology, architecture: the multiple facets of plant above- and below-ground responses to resource stress [Article • *Bronze Open Access*]. *New phytologist*, 2019(4), 1338-1352. <https://doi.org/10.1111/nph.15225>

Herrera, J., Savoi, S., Dostal, J., Elezovic, K., Chatzisavva, M., Forneck, A., & Savi, T. (2024). The legacy of past droughts induces water-sparingly behaviour in Grüner Veltliner grapevines. *Plant Biology*. 1-9. <https://doi.org/10.1111/plb.13620>

Hunter, J., & Volschenk, C. (2024). Vine spacing of *Vitis vinifera* cv. Shiraz/101-14 Mgt II. Establishment, and vegetative and reproductive growth. *Oeno One*, 58(3), 1-20. <https://doi.org/10.20870/OENO-ONE.2024.58.3.7828>

Jones, C. A. (1983). Effect of soil texture on critical bulk densities for root growth. *Soil Science Society of America Journal*, 47(6), 1208-1211.

Koren, Y., Perilli, A., Tchaicheeyan, O., Lesman, A., & Meroz, Y. (2024). Analysis of root-environment interactions reveals mechanical advantages of growth-driven penetration of roots. *Plant, cell & environment*. 47(12), 5076-5088 <https://doi.org/10.1111/pce.15089>.

Lade, S. B., Štraus, D., Buñol, A., & Oliva, J. (2022b). Hot Water Treatment Causes Lasting Alteration to the Grapevine (*Vitis vinifera* L.) Mycobiome and Reduces Pathogenic Species Causing Grapevine Trunk Diseases. *Journal Of Fungi*, 8(5), 485. <https://doi.org/10.3390/jof8050485>

Lynch, J. (2021). Harnessing root architecture to address global challenges. *The Plant Journal*, 109, 415 - 431. <https://doi.org/10.1111/tpj.15560>.

Matus, M. S., & Rodríguez, J. (1997). Variedades de vid cultivadas en Mendoza (Argentina). *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 29(2), 39-43.

Munoz, J. R., Jr., Stauch, S. J., Wootten, J., Kitchen, M., Abreu, M., Rodriguez, C. J., Casassa, L. F., Wolpert, J. A., & Dodson Peterson, J. C. (2023). Effect of Rootstock

on Vineyard Establishment Using Green-Growing Benchgrafts. *Agronomy*, 13(6), 1586. <https://doi.org/10.3390/agronomy13061586>

Mohtasebi, P. (2023). *Morphological and Genetic Analysis of the Root System in Two American Grapevines (Vitis Species)* [Tesis de maestría, Missouri state university]. <https://bearworks.missouristate.edu/theses/3897/>

Núñez-Farfán, J., Careaga, S. A., Fornoni, J., Ruiz-Montoya, L., & Valverde, P. (2003). La evolución de la plasticidad fenotípica. *Revista especializada en ciencias químico-biológicas*, 6(1), 16-24.

Palmer, C. M., Bush, S. M., & Maloof, J. N. (2012). Phenotypic and developmental plasticity in plants. *Encyclopedia of life sciences*. Wiley & Sons, Ltd. Chichester, UK. <https://doi.org/10.1002/9780470015902.a0002092.pub2>

Palta, J. A., & Yang, J. C. (2014). Crop root system behaviour and yield. *Field Crops Res*, 165:1-4. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.06.024>

Rafique, R., Ahmad, T., Ahmed, M., & AzamKhan, M. (2023). Exploring key physiological attributes of grapevine cultivars under the influence of seasonal environmental variability. *OENO One*, 57(2), 381-397. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2023.57.2.7091>

Raviteja, D. H., Kumar, T., Sharma, S., Kumar, A., Singh, M. P., & Pandey, R. (2021). Impact of elevated CO<sub>2</sub> and phosphorus nutrition on mineral composition and cooking quality of rice. *Plant Physiology Reports*, 26(4), 687-698. <https://doi.org/10.1007/s40502-021-00623-y>

Robbins, W. W., Weier, T. E., & Stocking, C. R. (1964). *Botany, an Introduction to Plant Science*. Wiley. [https://books.google.com.mx/books?id=\\_\\_UiCjgjFBr4C](https://books.google.com.mx/books?id=__UiCjgjFBr4C)

Rodolfo, B.-T., Javier, J. n. F., & Rodny, M. n.-C. (2011). El arte del bonsái *Revistas UNAM*, 101, 26-33.

Roig-Puscama, F., Berli, F., Roig, F. A., Tomazello-Filho, M., Mastrantonio, L., & Piccoli, P. (2021). Wood hydrosystem of three cultivars of *Vitis vinifera* L. is modified in response to contrasting soils. *Plant and Soil*, 463, 573-588. <https://doi.org/10.1007/s11104-021-04907-y>

Saleem, M., Law, A., Sahid, M., Pervaiz, Z., & Zhand, Q. (2018). Impact of root system architecture on rhizosphere and root microbiome. *Rhizosphere*, 6, 47-51. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2018.02.003>

Sebastian, B., Baeza, P., Santesteban, L. G., De Miguel, P. S., De la Fuente, M., & Lissarrague, J. R. (2014). Response of grapevine cv. Syrah to irrigation frequency and water distribution pattern in a clay soil. *Agricultural Water Management*, 148, 269-279. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.10.017>

Smart, D. R., Schwass, E., Lakso, A., & Morano, L. (2006). Grapevine Rooting Patterns: A Comprehensive Analysis and a Review. *American Journal Of Enology And Viticulture*, 57(1), 89-104. <https://doi.org/10.5344/ajev.2006.57.1.89>

Tajima, R. (2021). Importance of individual root traits to understand crop root system in agronomic and environmental contexts. *Breeding Science*, 71(1), 13-19. <https://doi.org/10.1270/jsbbs.20095>

Tandonnet, J., Cookson, S., Vivin, P., & Ollat, N. (2010). Scion genotype controls biomass allocation and root development in grafted grapevines. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 16(2), 290-300. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2009.00090.x>

Thapa S. (2022). Analysis of root system architecture and QTL identification in grapevines [Tesis de maestría, Missouri State University]. <https://bearworks.missouristate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=4818&context=theses>

s

Trejo Tellez, L., Ramírez Martínez, M., Gómez Merino, F. C., Garcia Albarado, J. C., Baca Castillo, G. A., & Tejada Sartorius, O. (2013). Evaluación física y química de tezontle y su uso en la producción de tulipán. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 4.

Tomasi, D. (2016). Grape Quality stars at the root. *Horticulturae*, 119, 286-291. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scienta.2008.07.033>

Topp, G., Reynolds, W., Cook, F., Kirby, J., Carter, M., & Gregorio, E. (1997). Chapter 2 Physical attributes of soil quality. En M. Carter & E. Gregorich (Eds.), *Developments in Soil Science* (Vol. 25, pp. 21-58). [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(97\)80029-3](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(97)80029-3)

Vrignon-Brenas, S., Fontez, B., Bisson, A., Rolland, G., Chopard, J., Fumey, D., Metay, A. & Pellegrino, A. (2022). Quantification of the pluriannual dynamics of grapevine growth responses to nitrogen supply using a Bayesian approach. *Journal of Experimental Botany*, 73(5), 1385-1401. <https://doi.org/10.1093/jxb/erab469>.

Vršič, S. K., L Pulko, B. (2016). Influence of substrate pH on root growth, biomass and leaf mineral contents of grapevine rootstocks grown in pots. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 18(2), 483 - 490.

## Anexos

### Anexo 1. Efecto del diámetro basal de los pámpanos sobre atributos evaluados.

Respuesta	Estimado	Error		<i>t</i>	<i>p</i>
		Estándar			
Diámetro máximo de raíz	0.56949052	0.11042687		5.16	<b>0.0001</b>
Volumen	2093.31261	421.830556		4.96	<b>0.0001</b>
Solidez	0.01713448	0.00440263		3.89	<b>0.0002</b>
Área de la superficie	2403.09091	631.87641		3.8	<b>0.0002</b>
Espacios entre raíces	177.20233	48.6559053		3.64	<b>0.0004</b>
Área de la red	329.55088	101.240347		3.26	<b>0.0014</b>
Área inferiores de raíces	308.574546	94.9468679		3.25	<b>0.0015</b>
Diámetro promedio	0.02565746	0.00791007		3.24	<b>0.0015</b>
Promedio clorofila	0.33725179	0.10611442		3.18	<b>0.0018</b>
Largo total de raíz	536.626427	181.779056		2.95	<b>0.0037</b>
Crecimiento total de pámpanos	2.76164488	1.153466		2.39	<b>0.0181</b>
Frecuencia de raíces superficiales	0.00259729	0.00110153		2.36	<b>0.0199</b>
Mediana de número de raíces	0.79919538	0.35689652		2.24	<b>0.0268</b>
Perímetro	411.871623	187.104005		2.2	<b>0.0295</b>
Mediana de diámetro	0.01127826	0.00517382		2.18	<b>0.0311</b>
Orientación de raíz promedio	-0.1588821	0.08666165		-1.83	0.069
Número máximo de raíces	0.99396355	0.5897294		1.69	0.0943
Frecuencia de raíces anguladas	-0.0024694	0.00159079		-1.55	0.123
Profundidad	1.32566107	1.28142212		1.03	0.3028
Área convexa	246.835324	279.762123		0.88	0.3792
Ancho máximo de raíz	0.66615365	1.78298816		0.37	0.7093
Frecuencia de raíces intermedias	-0.0001279	0.00083283		-0.15	0.8782
Número de puntas de raíz	6.4273345	44.1883174		0.15	0.8846
Proporción ancho- profundidad	-0.0013166	0.01050579		-0.13	0.9005