

INSTITUTO NACIONAL DE LA YERBA MATE

**PROGRAMA REGIONAL DE ASISTENCIA AL SECTOR
YERBATERO**

INFORME DE AVANCE ETAPAS 1 y 2

“Respuesta fisiológica de la yerba mate en el cultivo bajo dosel”

Titular

Facultad de Ciencias Forestales - UNaM

Director

Fermin Gortari

Co-directora

Corina Graciano

Fecha de inicio del proyecto

Diciembre de 2019

Fecha de finalización del proyecto

Diciembre de 2022

Etapas propuestas: 3

Posadas, Misiones. Argentina.

4 de Abril de 2022

Introducción:

La yerba mate es una planta nativa de Misiones que crece bajo dosel en condiciones naturales (Eibl et al. 2000), donde las condiciones de luz y el estado hídrico están regulados por la presencia del canopeo. Bajo las condiciones de producción actuales, monocultivo de yerba mate, las plantas están expuestas a condiciones estresantes como lo son la radiación directa del sol y mayores demandas evapotranspirativas; ya que no cuentan con esa regulación que ejerce en condiciones naturales el dosel superior (Al-Namazi et al. 2017). El exceso de luz, al no poder ser disipado, causa foto-inhibición del fotosistema II y la consiguiente pérdida de crecimiento y rendimiento (Nishiyama and Murata 2014). Por otro lado, cuando las plantas se encuentran bajo situaciones de estrés por sequía, rápidamente se produce una disminución de la actividad fotosintética y la conductancia estomática, dando como resultado una menor biomasa total, disminución del área foliar, pérdida de hojas o incluso defoliación total (Tschaplinski et al. 1998; Marron et al. 2003; Yin et al. 2005; Monclus et al. 2006). Estos dos factores de estrés están estrechamente relacionados, pudiéndose dar ambos en simultáneo e incluso, el estrés hídrico puede exacerbar el daño sobre el sistema fotosintético causado por el exceso de luz (Tambussi et al. 2002). El mayor desarrollo de hojas en plantas de yerba mate se da cuando la radiación es de un 50%, siendo menor bajo radiación directa (Sansberro et al. 2002). El crecimiento en peso seco también es mayor cuando las plantas crecen en una condición de radiación del 50% en relación a plantas que crecen bajo radiación directa del sol; y este crecimiento puede aumentar en ambas situaciones si se evita el estrés por falta de agua (Sansberro et al. 2004).

Por lo que es de esperar que la yerba mate se desarrolle mejor en sistemas agroforestales, aunque los resultados de varias experiencias no son concluyentes o son contradictorios. En un ensayo en Brasil, se demostró en un cultivo de yerba mate bajo una plantación natural de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze, que a medida que la radiación disponible para la yerba disminuía también lo hacía la producción de hojas (Rachwal Gluck et al. 2002). En este ensayo, la mayor producción de hojas verdes se registró con una radiación disponible de 77%; sin embargo, no se comparó con un monocultivo de yerba mate. En la localidad de Frederico Westphalen (Brasil), la producción de hoja verde por planta de yerba mate que crece debajo de una plantación de pinos (156 árboles por ha, 35 años) fue menor al de plantas de yerba mate en monocultivo, posiblemente porque la disponibilidad de radiación para la yerba mate debajo del canopeo fue inferior al 20% (Caron et al. 2014). Sin embargo, las plantas de yerba mate bajo cobertura espontánea de *A. angustifolia* y *Luehea divaricata* Mart, en Taquari (Brasil), desarrollan un mayor área foliar que plantas en monocultivo (de Avila et al. 2016). Mientras que en el departamento de Eldorado (Argentina), en un ensayo de yerba mate asociado a *Enterolobium*

contortisiliquum (Vell.) Morong o *Balfourodendron riedelianum* (Engl.) Engl. (500 árboles por ha, 6 años) no hubo diferencias en producción de hojas por planta con el monocultivo; sin embargo, al haber menos plantas de yerba mate por hectárea el redimiendo fue menor (Eibl et al. 2000). En otro trabajo, la producción de yerba mate asociada con *A. angustifolia* fue mayor que en el monocultivo de yerba mate para mantener los niveles de nutrientes en el suelo a lo largo del tiempo y podría ser considerado por los productores como una forma de mejorar la protección del suelo (Ilany et al. 2010).

La producción de yerba mate bajo dosel permitirá recrear en cierta forma la estructura, dinámica y función de un bosque. La producción mixta de yerba mate con árboles forestales maderables repercute positivamente sobre la erosión del suelo y el uso del agua. Además, al formarse una estructura más compleja, con un dosel superior arbóreo y un estrato bajo de yerba mate, aumenta la diversidad de microambiente y aumenta la conectividad de parches remanentes de bosque nativo.

La producción combinada de yerba mate con especies forestales maderables tiene la ventaja de diversificar la producción. La diversificación productiva minimiza los riesgos económicos y ecológicos. Al mismo tiempo, los sistemas agroforestales pueden ofrecer varios servicios ecosistémicos, como captura de carbono, mitigación del calentamiento global, conservación de biodiversidad, control biológico, control de erosión, mejorar la calidad del agua y ciclado de nutrientes (Jose 2009).

Los resultados del proyecto beneficiarán principalmente a los productores de yerba mate, al contar con información para la toma de decisión sobre que especies forestales a utilizar y a que densidades para optimizar la producción de yerba mate.

Objetivo del PRASY:

El objetivo general es evaluar los mecanismos fisiológicos que explican la mayor productividad de la yerba mate bajo dosel de árboles con respecto al monocultivo de yerba mate con el propósito de poder definir las asociaciones yerba mate-especie forestal más convenientes.

Objetivos particulares de las etapas 1 y 2:

- Determinar si las plantas de yerba mate sufren estrés hídrico o lumínico.
- Analizar la partición de materia seca en plantas bajo dosel en comparación con plantas a sol pleno
- Analizar la arquitectura de ramas y hojas en plantas en monocultivo en comparación con plantas bajo dosel.

- Estimar la capacidad fotosintética de plantas bajo dosel y en monocultivo.
- Cuantificar la dinámica del mantillo y la disponibilidad de nutrientes en el suelo de monocultivo de yerba mate y de yerbales bajo dosel.

Actividades propuestas para la/s etapa/s rendidas y metodología:

Etapas 1: Plantación comercial. Respuesta fisiológica de las plantas de yerba mate en función de la especie forestal utilizada.

Se trabaja sobre un ensayo instalado en mayo de 2010, en el establecimiento El Rocío S.A., Lote Nº12, en la localidad de Santo Pipo (27°08'32.85'' latitud sur y 55° 23'42.61'' longitud oeste), departamento San Ignacio, Provincia de Misiones, Argentina. La plantación de yerba es de alta densidad (1.5m x 1.5m) con material genético policlonal (INTA).

Cada parcela experimental (repetición) posee 2835 m² (90m de largo x 31.5m de ancho) conteniendo 15 hileras de árboles de yerba mate distanciados a 1.5 metros y cada 5 hileras se encuentra un camino de cosecha. Las especies forestales fueron plantadas en la hilera de yerba 3, 8 y 11 respectivamente conformando una densidad de plantación inicial de 740 plantas/ha (9m x1.5m). El diseño del ensayo instalado es completamente aleatorizado con diez tratamientos y cuatro repeticiones, siendo los tratamientos los siguientes:

T0: cultivo de yerba mate

T1: Lapacho (*Handroanthus heptaphyllus* (Vell.) Mattos) + cultivo de yerba mate

T2: Loro negro (*Cordia trichotoma* (Vell.) Arráb. ex Steud.) + cultivo de yerba mate

T3: Guatambu (*Balfourodendron riedelianum* (Engl.) Engl.) + cultivo de yerba mate

T4: Caña fístula (*Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub.) + cultivo de yerba mate

T5: Anchico (*Parapiptadenia rígida* (Benth.) Brenan.) + cultivo de yerba mate

T6: Araucaria (*Araucaria angustifolia*) + cultivo de yerba mate

T7: Cedro Australiano (*Toona ciliata* M. Roem.) + cultivo de yerba mate

T8: Grevillea (*Grevillea robusta* A. Cunn. ex R. Br) + cultivo de yerba mate

T9: Kiri (*Paulownia tormentosa* (Thunb.) Steud.) + cultivo de yerba mate

En las plantas de yerba mate se han medido durante el año 2021 y principios de 2022 la conductancia estomática (gs) con porómetro (Decagon). Se midió la tasa de transportes de electrones (ETR), en los mismos horarios definidos previamente, y el rendimiento máximo potencial del fotosistema II (Fv/Fm) con fluorímetro; y la concentración de clorofilas (Spad

Minolta). Estas mediciones se realizaron sobre la primera hoja completamente expandida desde el ápice, en al menos 5 hojas de diferentes plantas por parcela. Se midió la radiación fotosintéticamente activa (PAR) con ceptómetro de barra integradora (Cavadevices) inmediatamente por sobre las plantas de yerba mate. Se evaluó la calidad de esa radiación con espectrorradiómetro. Se tomaron 20 hojas al azar por tratamiento para determinar área foliar (AF) y área foliar específica (AFE). Las mediciones se realizaron en días completamente despejados. Hasta la fecha se realizaron 5 momentos de medición: 1 en otoño, 1 en invierno, 2 en primavera y 1 en verano. Y esta previsto realizar 6 momentos de medición más en el transcurso de este año. Esta previsto para este año la medición del potencial hídrico de las hojas con cámara tipo Scholander a lo largo del día (entre las 8 y las 10 hs, entre las 12 y las 14 hs y entre las 17 y 19 hs). Y también tomar fotos hemisféricas para calcular el nivel de cobertura y la radiación incidente total. Como así también registrar de la humedad relativa, temperatura del aire y humedad del suelo en cada tratamiento.

Se realizaron las cosechas de yerba mate en los años 2020 y 2021 (y se realizará la cosecha 2022). En cada cosecha se pesaron las hojas cosechadas por planta y se tomaron tres muestras compuestas por parcela para determinar peso seco (en estufa a 65°C hasta peso constante).

Se medio en 2020 y 2021 de las especies forestales el diámetro a la altura del pecho (DAP). Con el DAP y la densidad de árboles por parcela se calculó el área basal (AB) para cada uno de los tratamientos. También se ajustaron ecuaciones para cada especie de la relación DAP-Altura con datos tomados en esos dos mismos años para estimar las alturas de todos los árboles.

Se esta analizando la dinámica de caída de hojas mediante la colocación de trampas para caída de hoja, que se colectan mensualmente (hasta el momento hay recolectados 8 meses). Se colocaron 2 trampas por parcelas de 75cmx 75cm (80 en total) que se recolectan mensualmente. Lo recolectado se seca a estufa hasta peso constante y se discrimina en materia seca de hojas de yerba mate y materia seca aportada por la especie forestal.

Luego de la caída otoñal de las hojas (especies forestales caducas) se instalarán bolsas de descomposición del mantillo para determinar la tasa de descomposición para cada uno de los tratamientos.

Se analizó la disponibilidad de nitrógeno, fósforo y materia orgánica en el suelo. Para esto se realizó una muestra compuesta por parcela y se mandaron a determinar al Laboratorio de suelos de INTA Cerro Azul.

El análisis estadístico se realizó mediante ANOVA y las comparaciones de medias se realizaron mediante el test de Tukey con un nivel de significancia del 95%.

Etapa 2: Ensayo en macetas. Respuesta fisiológica de las plantas de yerba mate en función de la especie forestal utilizada.

Esta etapa se desarrolló durante una temporada de crecimiento. Se colocaron macetas con plantines de yerba mate entre las filas de yerba mate del ensayo descrito en la etapa 1. Se evaluó la acumulación de materia seca y partición de materia seca.

Se trabajó con 33 plantas de 6 meses de edad (material genético policlonal, INTA) por tratamiento. Los tratamientos fueron los siguientes: monocultivo de yerba mate y 5 tratamientos con especies forestales (Anchico, Cedro australiano, Grevilea, Cañafístula y Loro negro), donde cada planta es una repetición en este caso. Cada planta se colocó en una maceta de 10 litros rellena con tierra colorada. Las macetas se cubrieron exteriormente con aislante térmico para reducir el estrés térmico de las raíces. El ensayo se instaló en mayo de 2021 y se evaluó hasta el 21 de diciembre de 2021. Las plantas no recibieron riego suplementario, por lo que el estado hídrico del suelo y de la planta dependió de las condiciones climáticas y de los tratamientos impuestos. Al finalizar el ensayo se midió altura y diámetro al cuello. Se cosecharon las hojas verdes para determinar el peso seco de hojas (luego de estufa a 65° hasta peso constante). También se determinó el peso seco de tallos y raíces.

Al comenzar el ensayo se tomaron 10 plantas al azar para determinar los pesos seco por compartimentos iniciales. Con esos valores y los obtenidos al finalizar el ensayo se calcularán índices de crecimiento (LAR, NAR).

El análisis estadístico se realizará mediante ANOVA y las comparaciones de medias se realizarán mediante el test de Tukey con un nivel de significancia del 95%.

Resultados parciales Etapa 1:

En los resultados de las cosecha de yerba del año 2020 obtuvimos que no existieron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos tanto para el freso fresco (Figura 1A) como para el peso seco (Figura 1B) de las hojas de yerba mate por planta. Mientras que para la cosecha 2021 si hubo diferencias estadísticamente significativas en el peso fresco (Figura 2A) y en el peso seco (Figura 2B) de hojas de yerba mate por planta. Los valores más bajos de peso fresco de hojas se observaron en el monocultivo y en las asociaciones con araucaria y cañafístula, pero sin diferenciarse del monocultivo; la asociación con Kiri mostro el valor más alto, diferenciándose del monocultivo. En cuanto al peso seco, la tendencia es similar, la asociación con Kiri fue el único tratamiento que se diferenció del monocultivo.

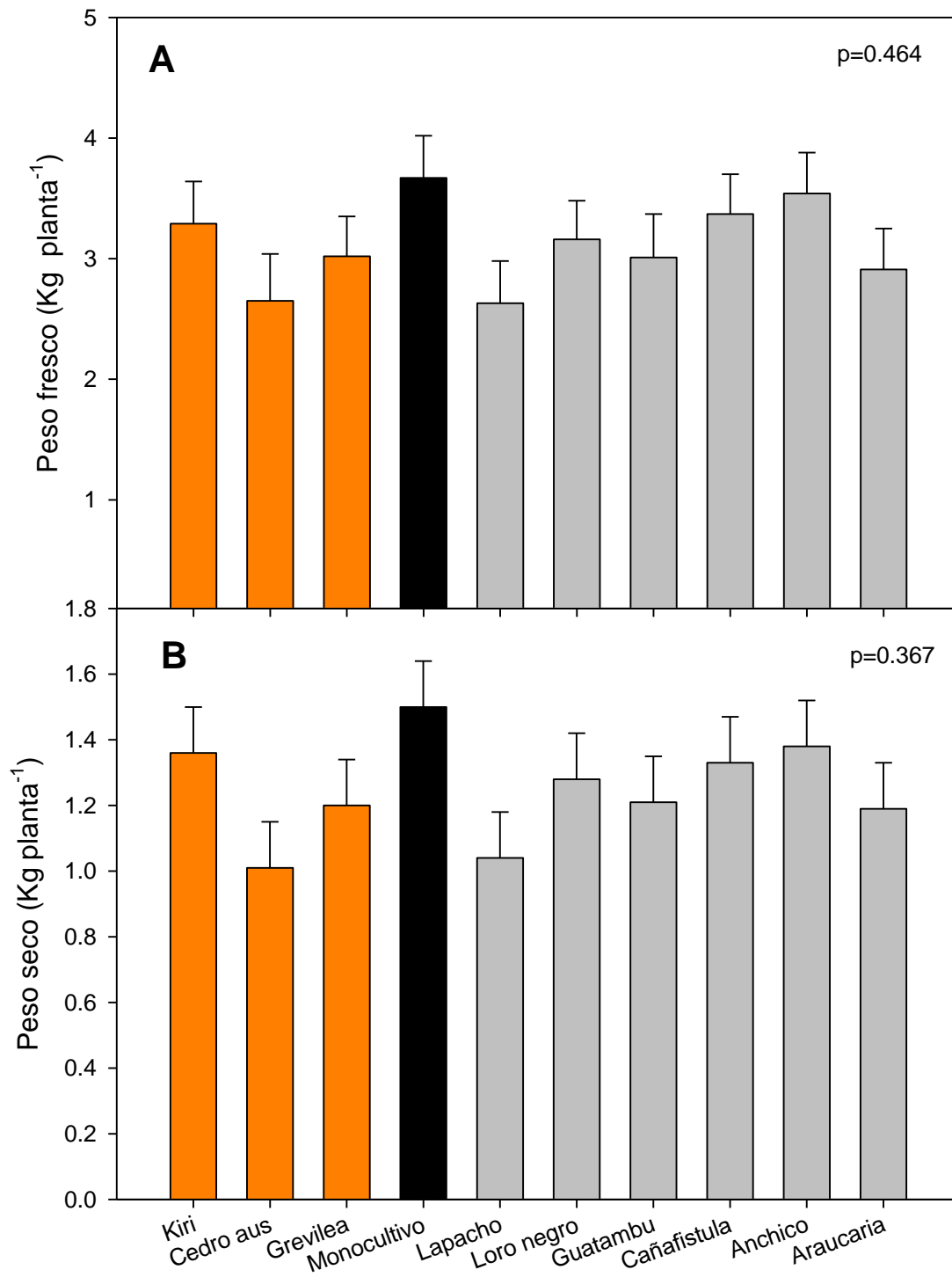


Figura 1: Peso fresco (A) y peso seco (B) de hojas por planta para los diferentes tratamientos en la cosecha del año 2020. En el margen superior derecho se encuentra el valor del ANOVA.

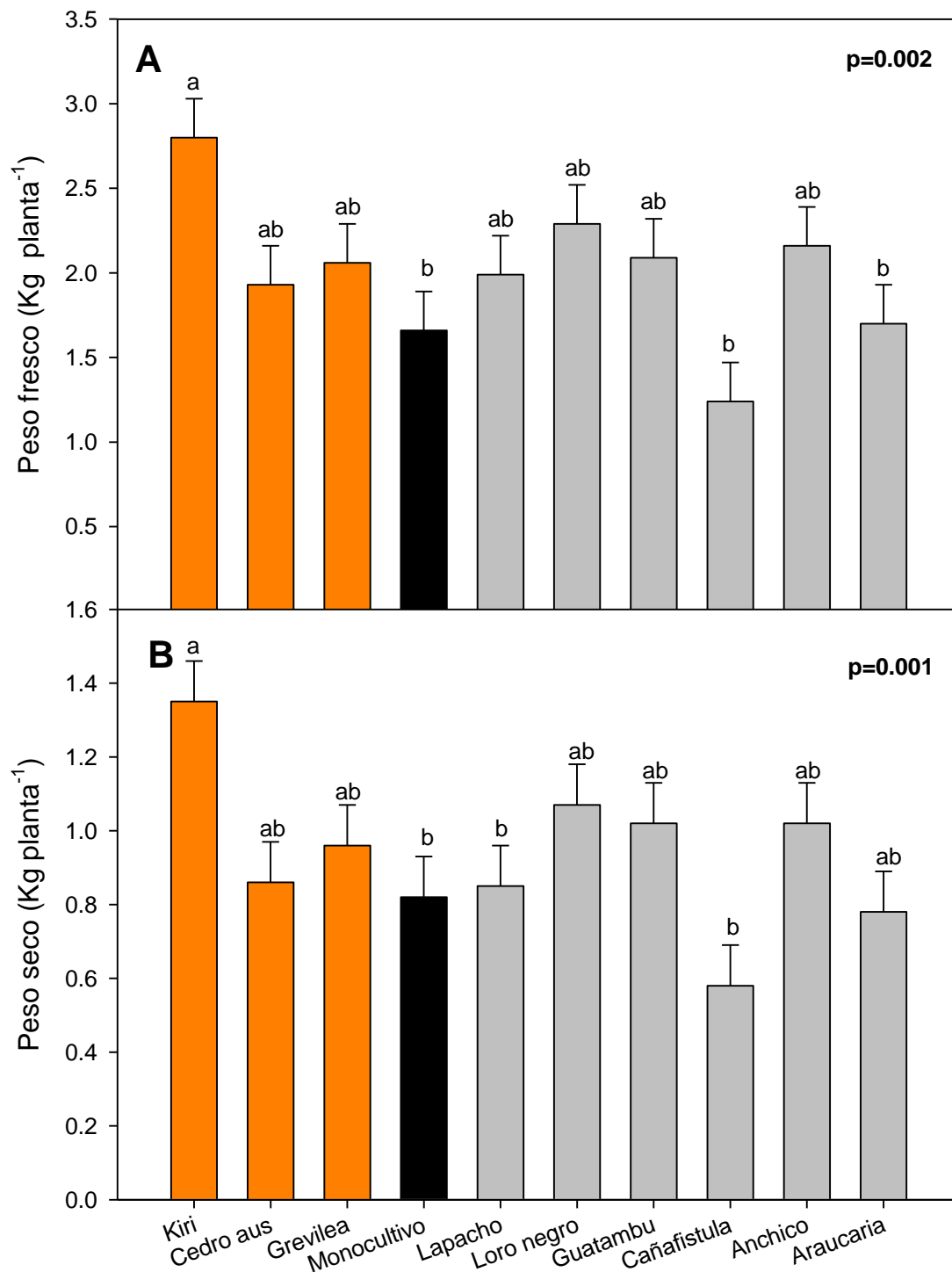


Figura 2: Peso fresco (A) y peso seco (B) de hojas por planta para los diferentes tratamientos en la cosecha del año 2021. En el margen superior derecho se encuentra el valor del ANOVA. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas mediante test de Tukey ($p \leq 0.05$).

Existieron diferencias estadísticamente significativas entre los DAP de las especies forestales para los años 2020 (Figura 3A) y 2021 (Figura 3B), observándose la misma tendencia los dos años. Los valores más grandes de DAP se obtuvieron para las especies exóticas (Kiri, Cedro

australiano y Grevilea), mientras que las especies nativas (Lapacho, Loro negro, Guatambú, Cañafístula, Anchico y Araucaria) presentaron valores sensiblemente más bajos.

En cuanto al área basal, valor que integra la densidad de árboles y sus DAP, existieron diferencias estadísticamente significativas entre los diferentes tratamientos para los años 2020 (Figura 4A) y 2021 (Figura 4B). Los tratamientos con especies exóticas tienen los valores más altos de área basal. El Cedro australiano es la especie con el valor más alto de AB diferenciándose estadísticamente de Lapacho, Guatambú y Araucaria para el año 2020; y también del Anchico en el año 2021.

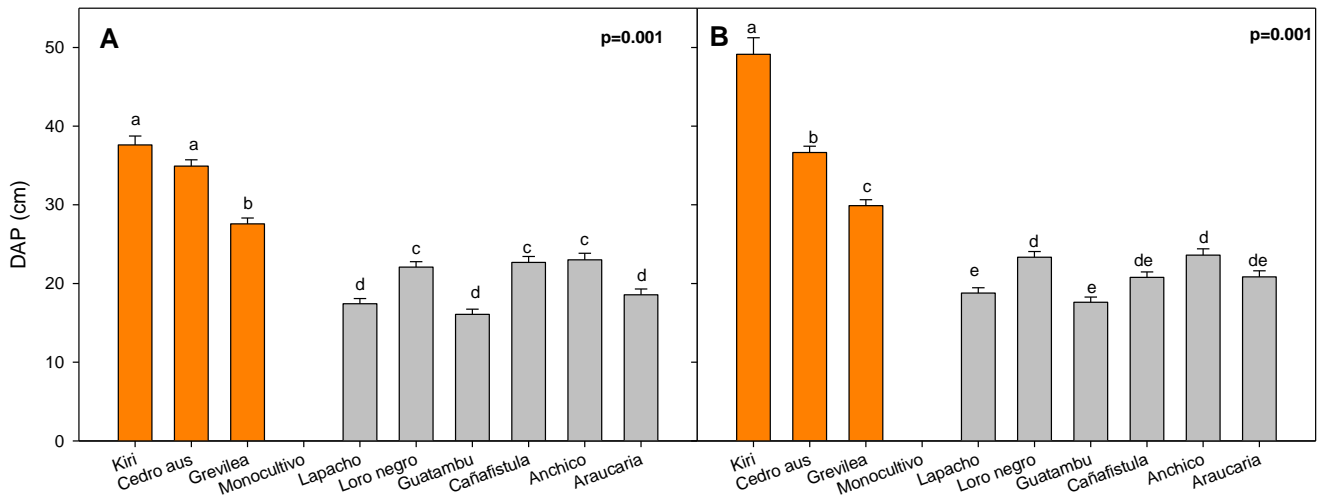


Figura 3: Diámetro a la altura del pecho (DAP) para los tratamientos en el año 2020 (A) y 2021 (B). En el margen superior derecho de cada gráfico se encuentra el valor del ANOVA. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas mediante test de Tukey ($p \leq 0.05$).

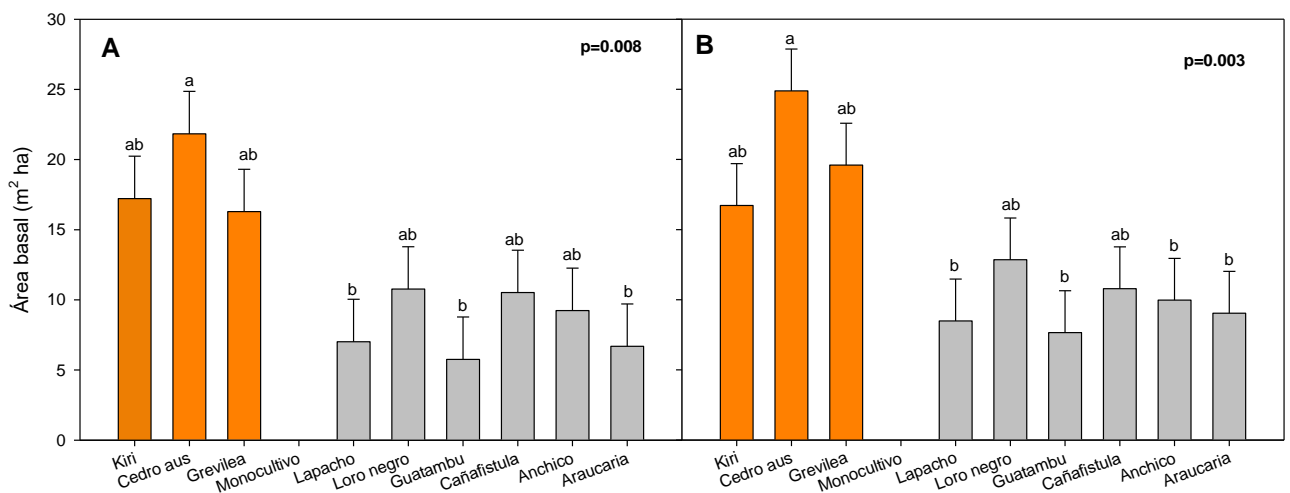


Figura 4: Área basal para los tratamientos en el año 2020 (A) y 2021 (B). En el margen superior derecho de cada gráfico se encuentra el valor del ANOVA. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas mediante test de Tukey ($p \leq 0.05$).

Para cada una de las especies forestales de ajusto una ecuación DAP-Altura con las mediciones realizadas de DAP y altura en el año 2020 y 2021. La correlación entre DAP y altura fue estadísticamente significativa para todas la especies: Araucaria (Figura 5), Anchico (Figura 6), Cañafístula (Figura 7), Grevilea (Figura 8), Guatambú (Figura 9), Kiri (Figura 10), Lapacho (Figura 11), Loro negro (Figura 12) y Cedro australiano (Figura 13).

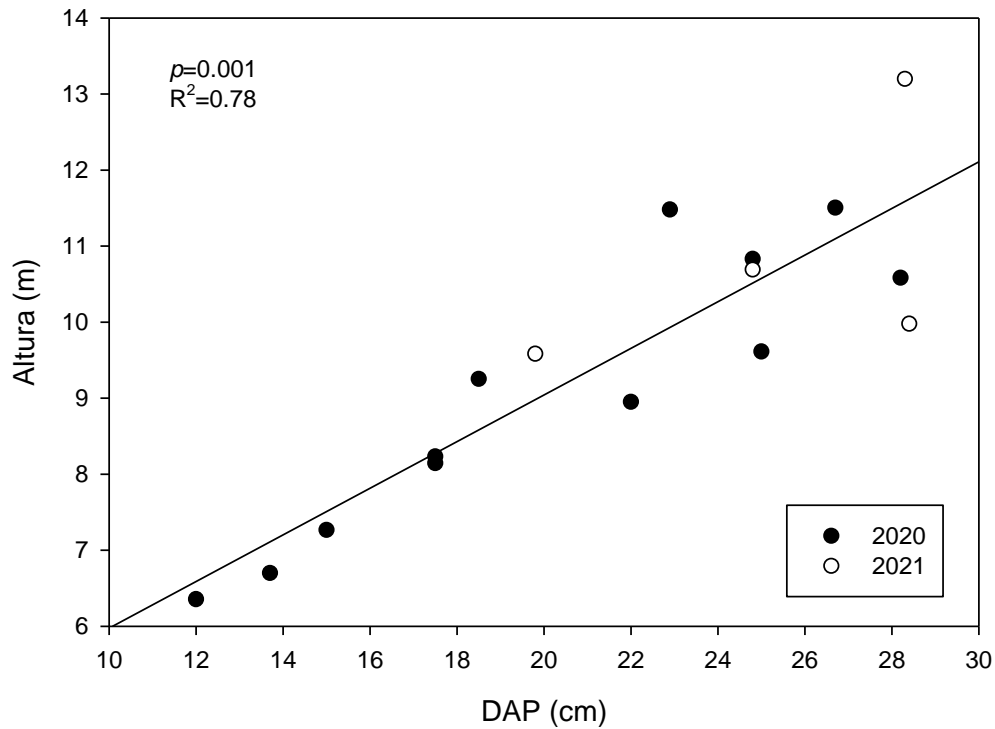


Figura 5: Relación DAP-Altura para la especie Araucaria. Punto negros corresponden a las mediciones realizadas en 2020 y puntos blancos a la realizadas en 2021. En el margen superior izquierdo se encuentran los valores de p y R^2 .

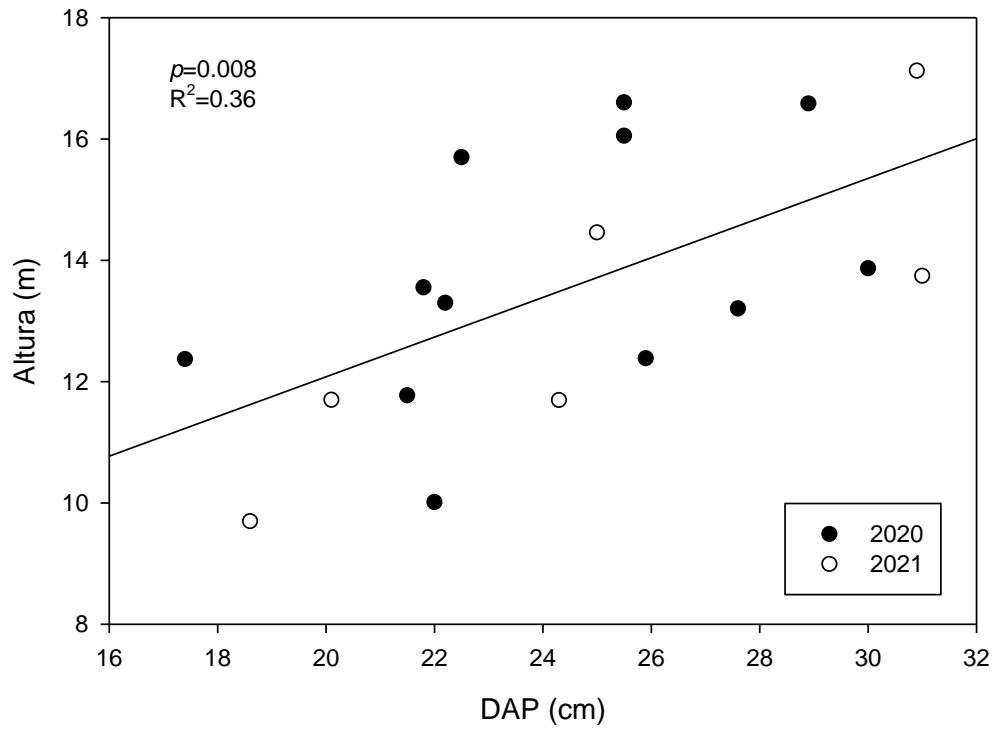


Figura 6: Relación DAP-Altura para la especie Anchico. Punto negros corresponden a las mediciones realizadas en 2020 y puntos blancos a la realizadas en 2021. En el margen superior izquierdo se encuentran los valores de p y R^2 .

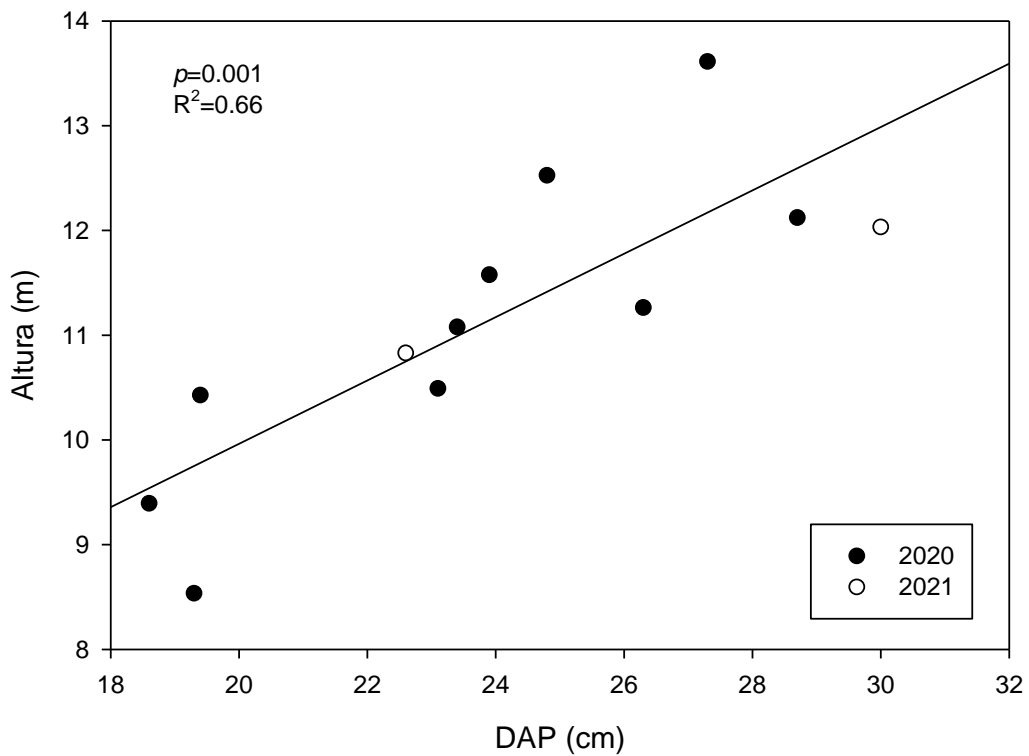


Figura 7: Relación DAP-Altura para la especie Cañafístula. Punto negros corresponden a las mediciones realizadas en 2020 y puntos blancos a la realizadas en 2021. En el margen superior izquierdo se encuentran los valores de p y R^2 .

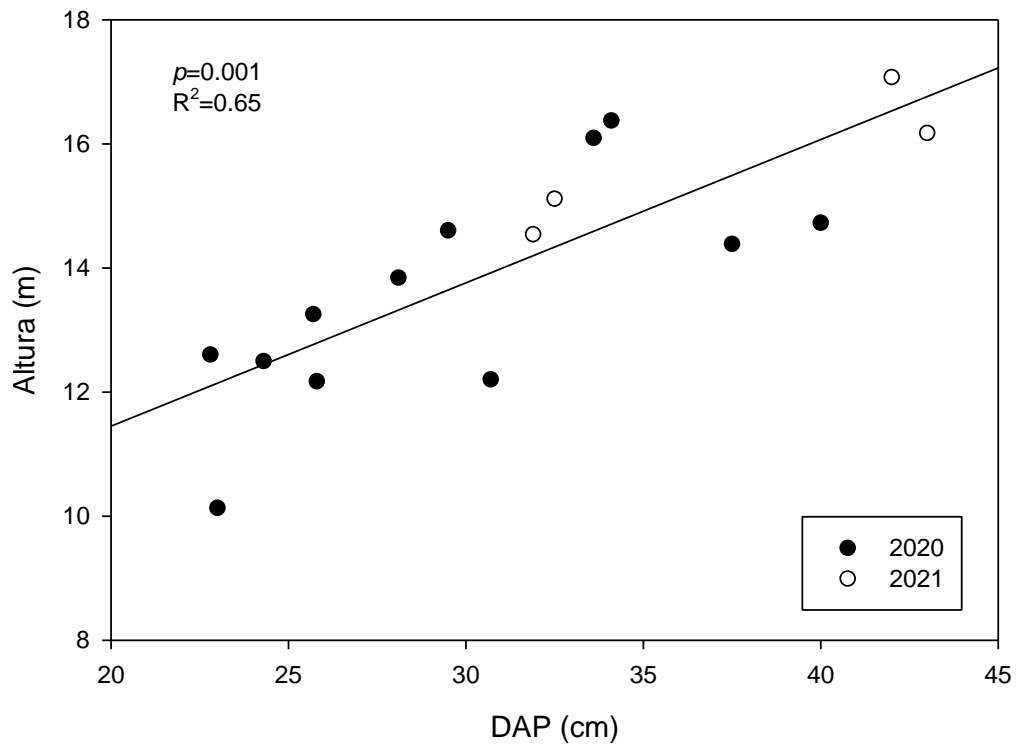


Figura 8: Relación DAP-Altura para la especie Grevilea. Punto negros corresponden a las mediciones realizadas en 2020 y puntos blancos a la realizadas en 2021. En el margen superior izquierdo se encuentran los valores de p y R^2 .

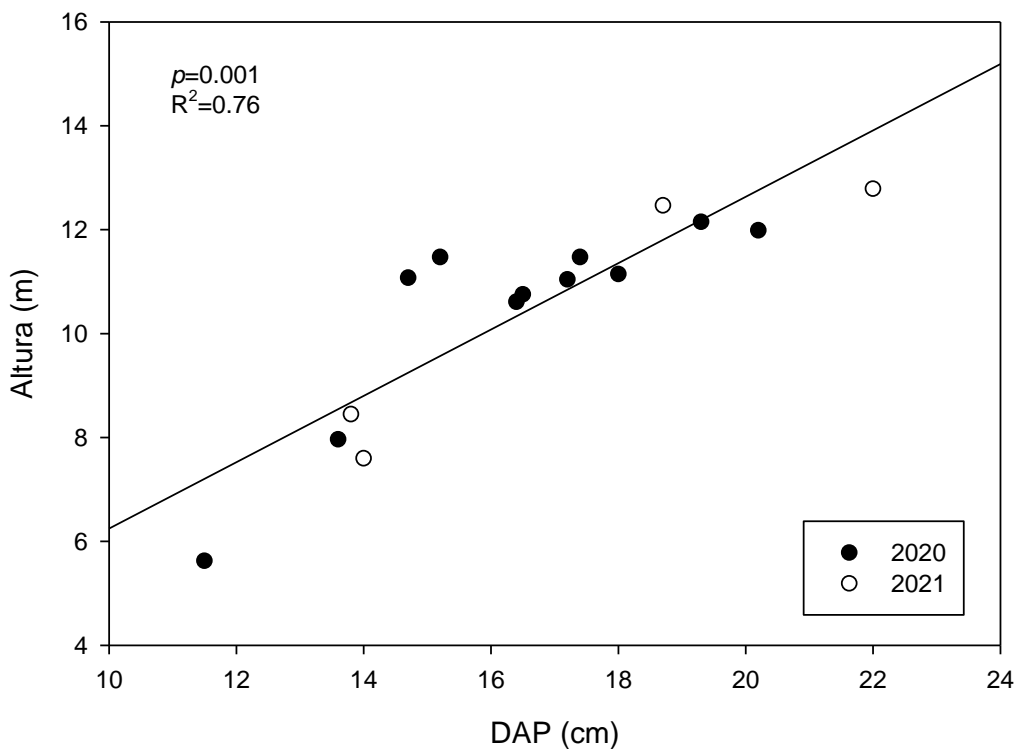


Figura 9: Relación DAP-Altura para la especie Guatambú. Punto negros corresponden a las mediciones realizadas en 2020 y puntos blancos a la realizadas en 2021. En el margen superior izquierdo se encuentran los valores de p y R^2 .

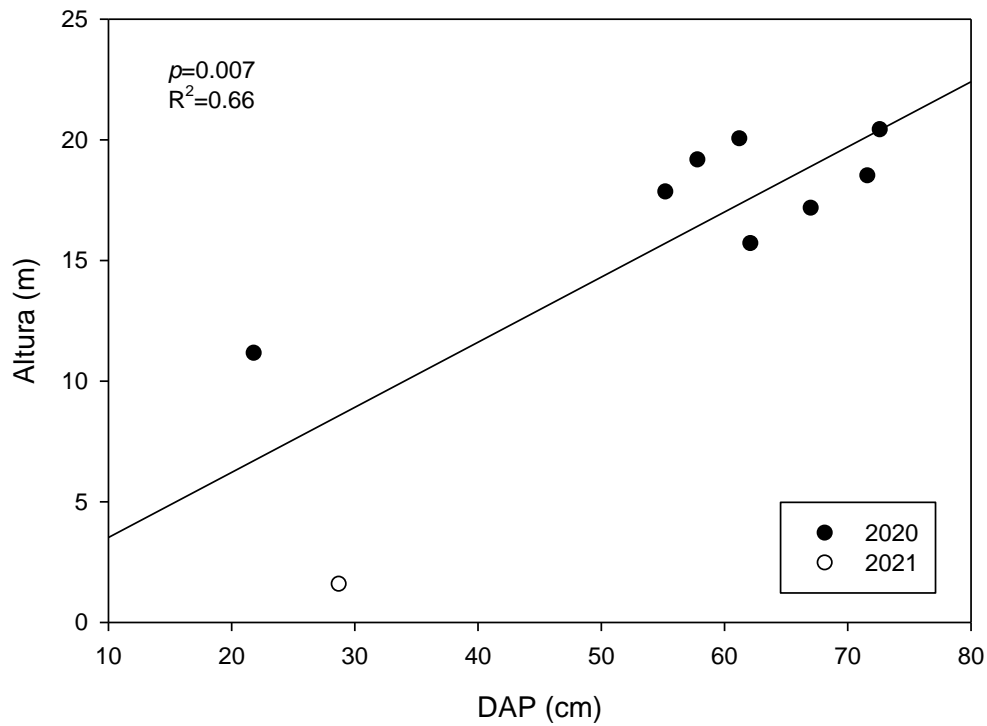


Figura 10: Relación DAP-Altura para la especie Kiri. Punto negros corresponden a las mediciones realizadas en 2020 y puntos blancos a la realizadas en 2021. En el margen superior izquierdo se encuentran los valores de p y R^2 .

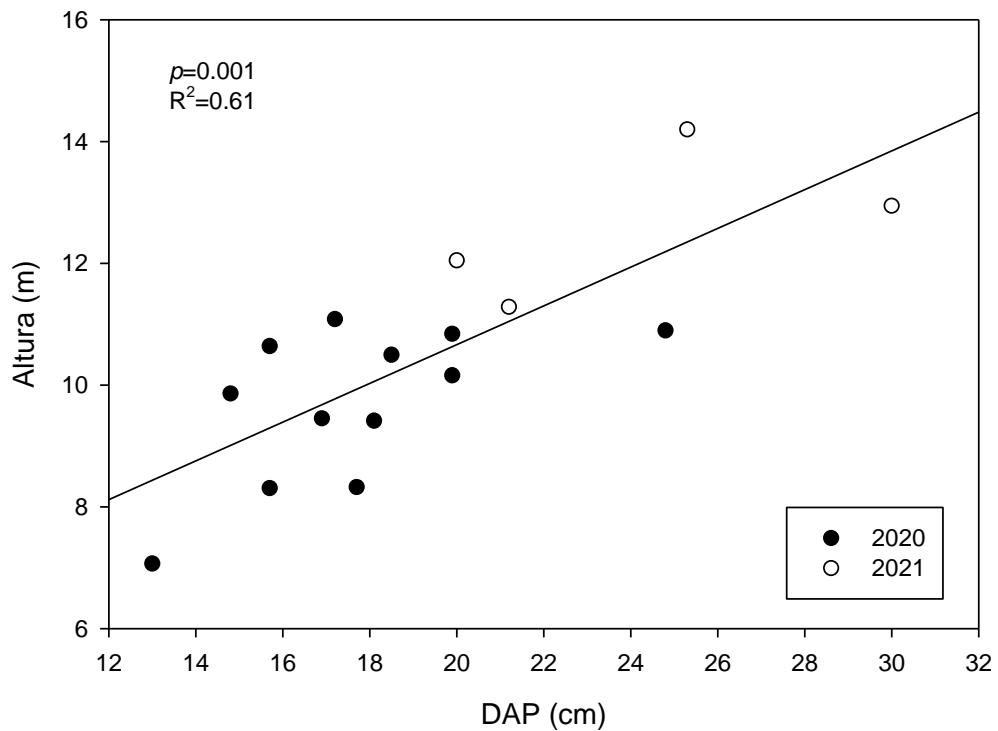


Figura 11: Relación DAP-Altura para la especie Lapacho. Punto negros corresponden a las mediciones realizadas en 2020 y puntos blancos a la realizadas en 2021. En el margen superior izquierdo se encuentran los valores de p y R^2 .

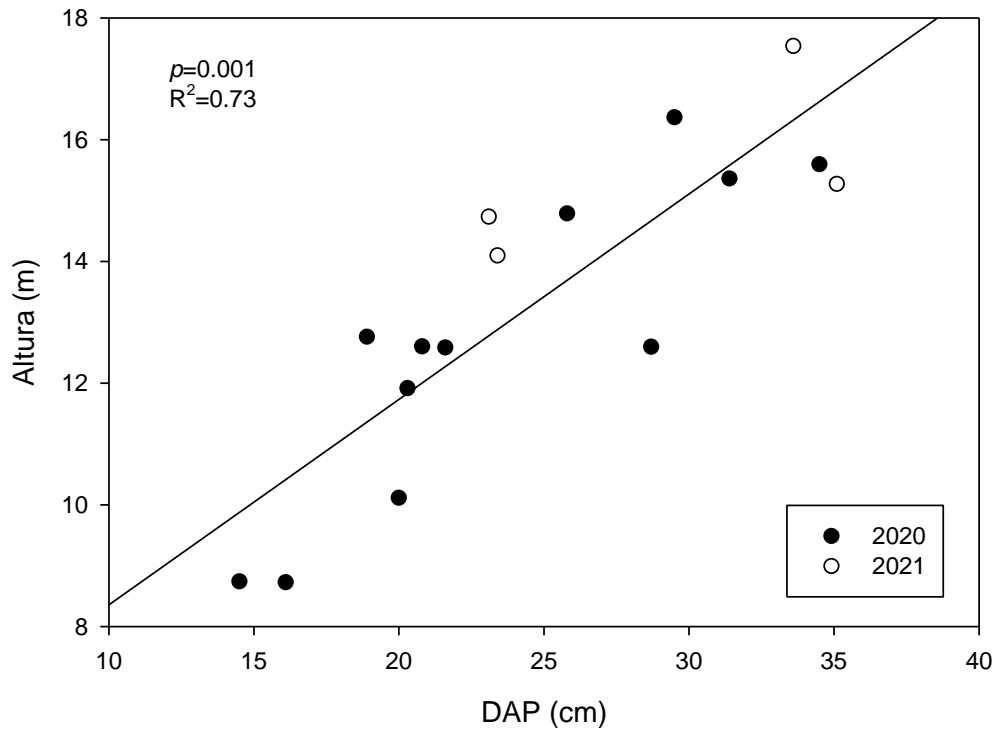


Figura 12: Relación DAP-Altura para la especie Loro negro. Punto negros corresponden a las mediciones realizadas en 2020 y puntos blancos a la realizadas en 2021. En el margen superior izquierdo se encuentran los valores de p y R^2 .

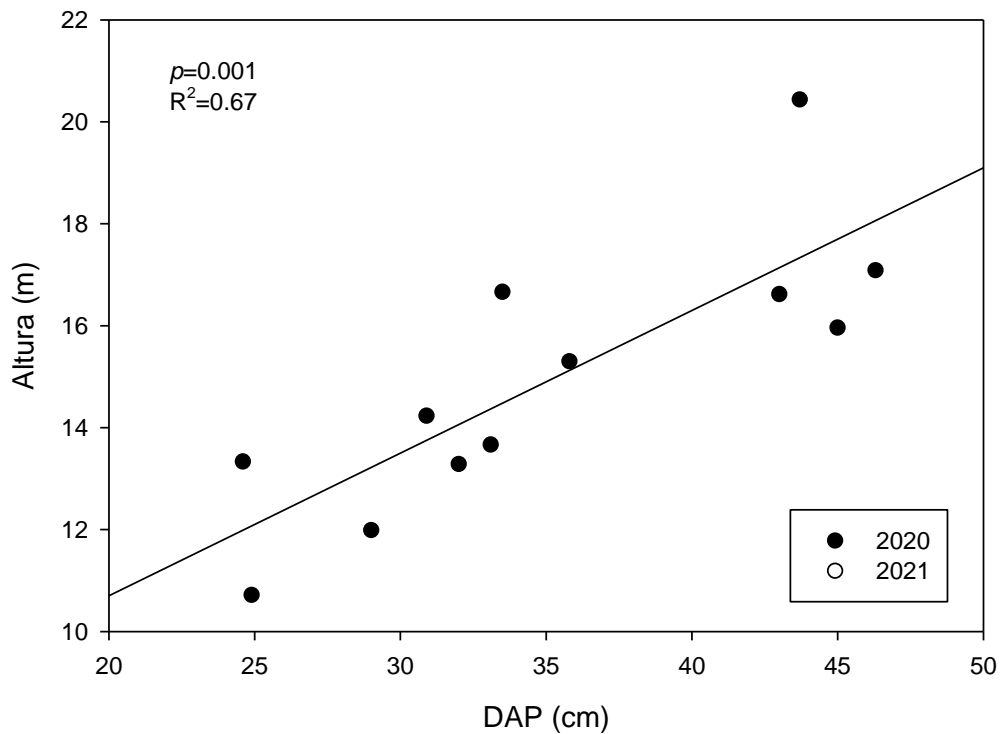


Figura 13: Relación DAP-Altura para la especie **Cedro australiano**. Punto negros corresponden a las mediciones realizadas en 2020 y puntos blancos a la realizadas en 2021. En el margen superior izquierdo se encuentran los valores de p y R^2 .

Con las ecuaciones de DAP-altura se estimó la altura para cada uno de los arboles medidos y se obtuvieron las altura para cada uno de los tratamientos. Existen diferencias estadísticamente significativas para las altura en los años 2020 (Figura 14A) y 2021 (Figura 14B). Las mayores alturas en el año 2020 son para Kiri y Cedro australiano mientras que la menor altura fue para Araucaria. En el año 2021 el Cedro australiano presento nuevamente la mayor altura y Araucaria la menor.

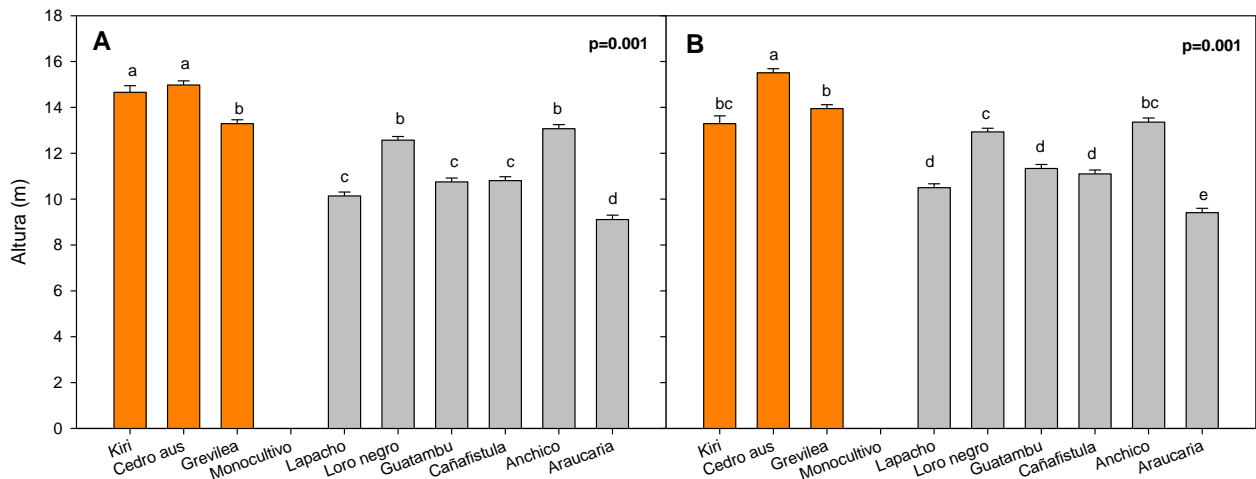


Figura 14: Altura para los tratamientos en el año 2020 (A) y 2021 (B). En el margen superior derecho de cada gráfico se encuentra el valor del ANOVA. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas mediante test de Tukey ($p \leq 0.05$).

En el año 2021 se pudo comenzar con las mediciones fisiológicas sobre las plantas de yerba mate. Se realizaron mediciones en otoño, invierno, dos veces en primavera y una última en verano. Se trabajó sobre 6 de los 10 tratamientos por cuestiones operacionales (poder medir todos los tratamientos en una ventana de tiempo de una hora y media) para las mediciones de conductancia estomática, temperatura sobre la lámina foliar, radiación PAR, ETR y Fv/Fm. Si bien se hicieron las mediciones de ETR y Fv/Fm no se van a presentar en este informe parcial.

Para las mediciones realizadas en otoño del año 2021 puede observarse que no hubo diferencias estadísticamente significativas para el contenido de clorofilas de las hojas medido en unidades de Spad (Figura 15).

Para el área foliar se observaron diferencias estadísticamente significativas (Figura 16), donde las hojas de yerba mate en el monocultivo tienen un valor significativamente más bajo que el resto de los tratamientos.

La radiación PAR por sobre las plantas de yerba mate muestra que en la medición de la mañana no hay diferencias estadísticamente significativa entre los tratamientos (Figura 17A). Mientras que al mediodía si existen diferencias estadísticamente significativa (figura 17B), donde la

radiación PAR es mucho más alta sobre las plantas del monocultivo. En la medición de la tarde, si bien hay diferencias estadísticamente significativa (Figura 17C), la radiación PAR del monocultivo no se diferenció estadísticamente de los otros tratamientos.

Para la conductancia estomática solo se observaron diferencias estadísticamente significativa en la mediciones de la mañana (Figura 18A, 18B y 18C). En esas mediciones gs es más alta en el monocultivo diferenciándose de los tratamientos con Cedro australiano y Anchico.

En la temperatura sobre la lámina de las hojas solo se observaron diferencias estadísticamente significativa para las mediciones del mediodía (Figura 19B) pero no para las mediciones de la mañana (Figura 19A) ni de la tarde (Figura 19C). En las mediciones del mediodía, la temperatura más alta se observó en el monocultivo.

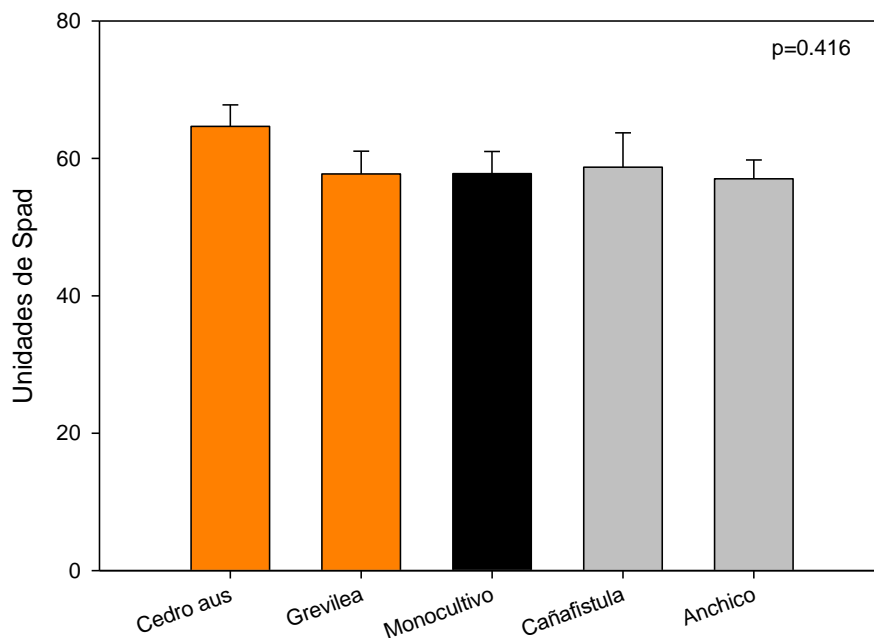


Figura 15: Contenido de clorofilas (Unidades de Spad) para los tratamientos en otoño de 2021. En el margen superior derecho se encuentra el valor del ANOVA.

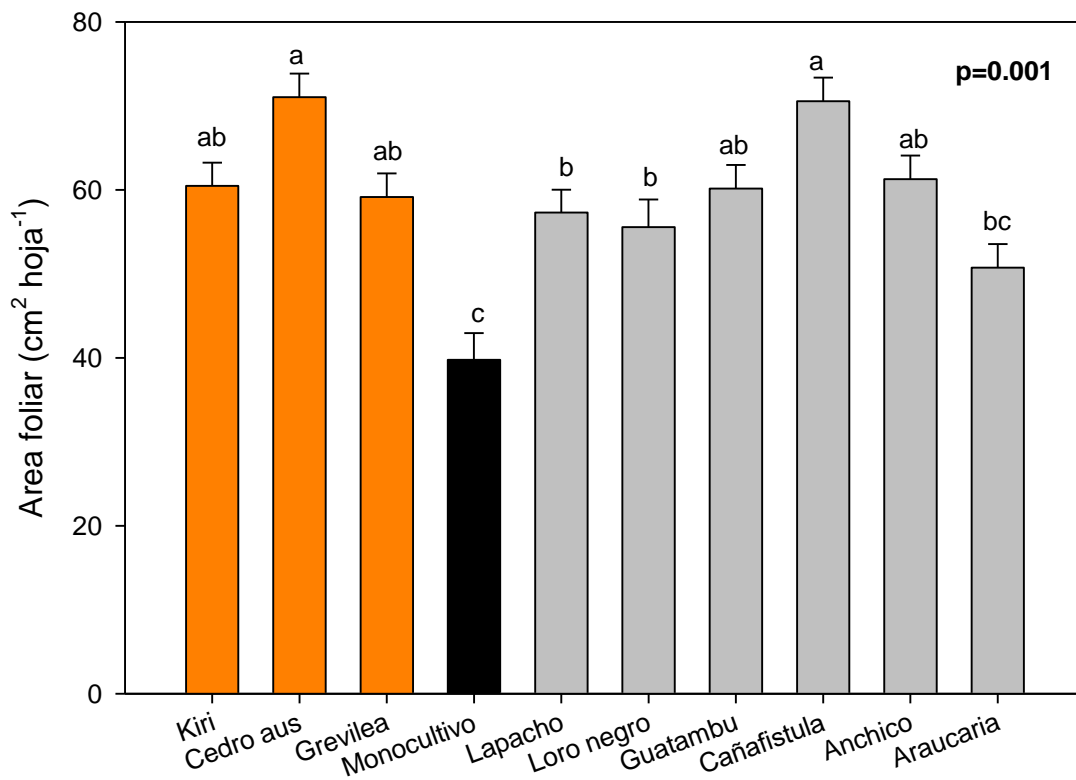


Figura 16: Área foliar para los tratamientos en otoño de 2021. En el margen superior derecho se encuentra el valor del ANOVA. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas mediante test de Tukey ($p \leq 0.05$).

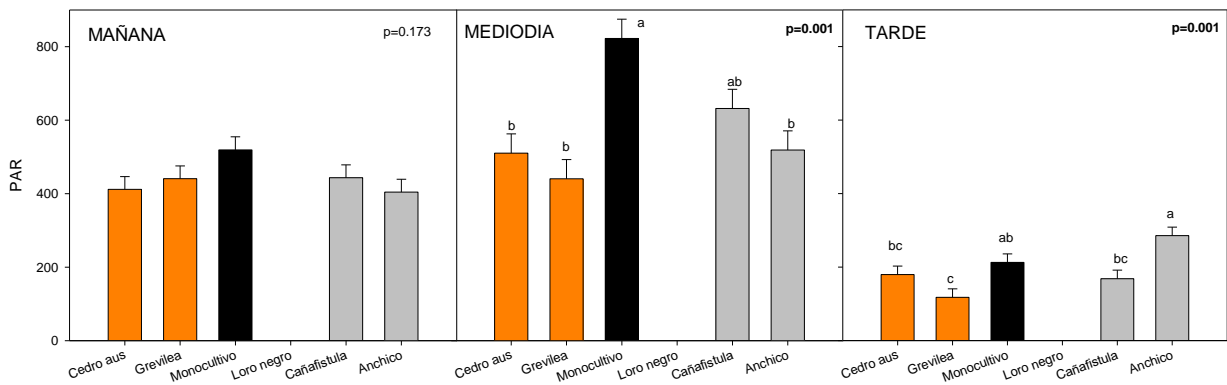


Figura 17: Radiación fotosintéticamente activa (PAR) para los tratamientos en otoño de 2021. En el margen superior derecho de cada gráfico se encuentra el valor del ANOVA. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas mediante test de Tukey ($p \leq 0.05$).

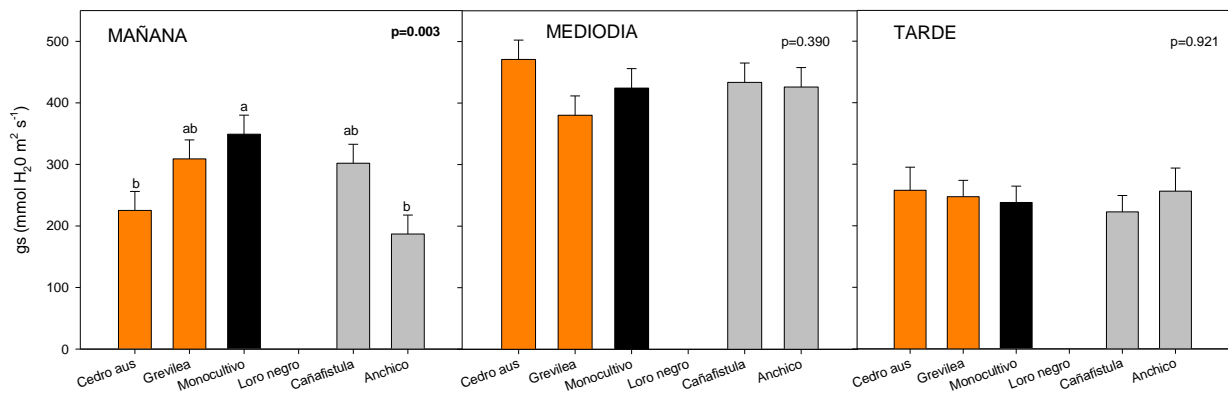


Figura 18: Conductancia estomática (gs) para los tratamientos en otoño de 2021. En el margen superior derecho de cada gráfico se encuentra el valor del ANOVA. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas mediante test de Tukey ($p \leq 0.05$).

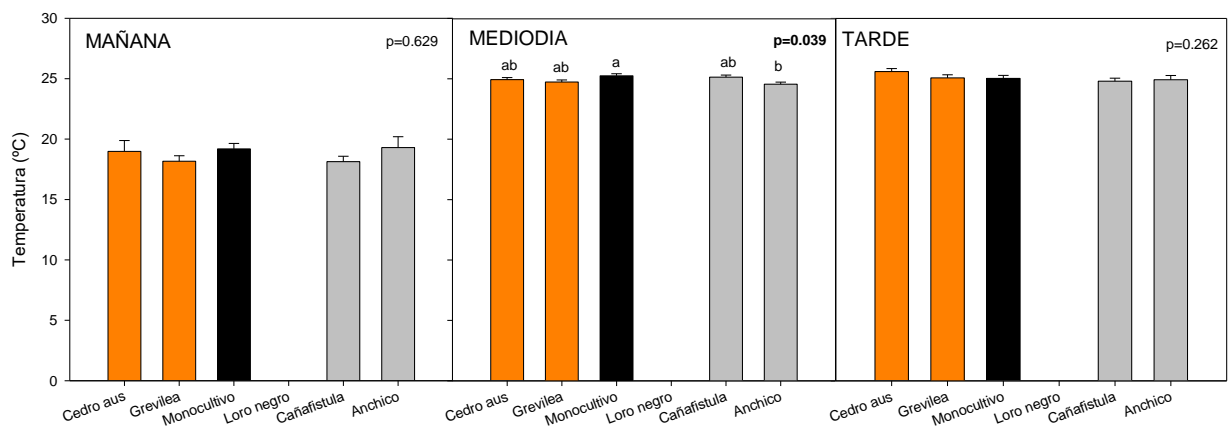


Figura 19: Temperatura de la lámina foliar para los tratamientos en otoño de 2021. En el margen superior derecho de cada gráfico se encuentra el valor del ANOVA. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas mediante test de Tukey ($p \leq 0.05$).

Para las mediciones realizadas en invierno del año 2021 puede observarse que no hubo diferencias estadísticamente significativas para el contenido de clorofilas de las hojas medido en unidades de Spad (Figura 20).

Para la conductancia estomática no se observaron diferencias estadísticamente significativa en la mediciones de la mañana, mediodía y tarde (Figura 21A, 21B y 21C).

En la temperatura sobre la lámina de las hojas solo se observaron diferencias estadísticamente significativa para las mediciones del mediodía (Figura 22B) pero no para las mediciones de la mañana (Figura 22A) ni de la tarde (Figura 22C). En las mediciones del mediodía, la temperatura más alta se observó en el monocultivo y el tratamiento con Cedro australiano, diferenciándose de los tratamiento con Cañafístula y Anchico.

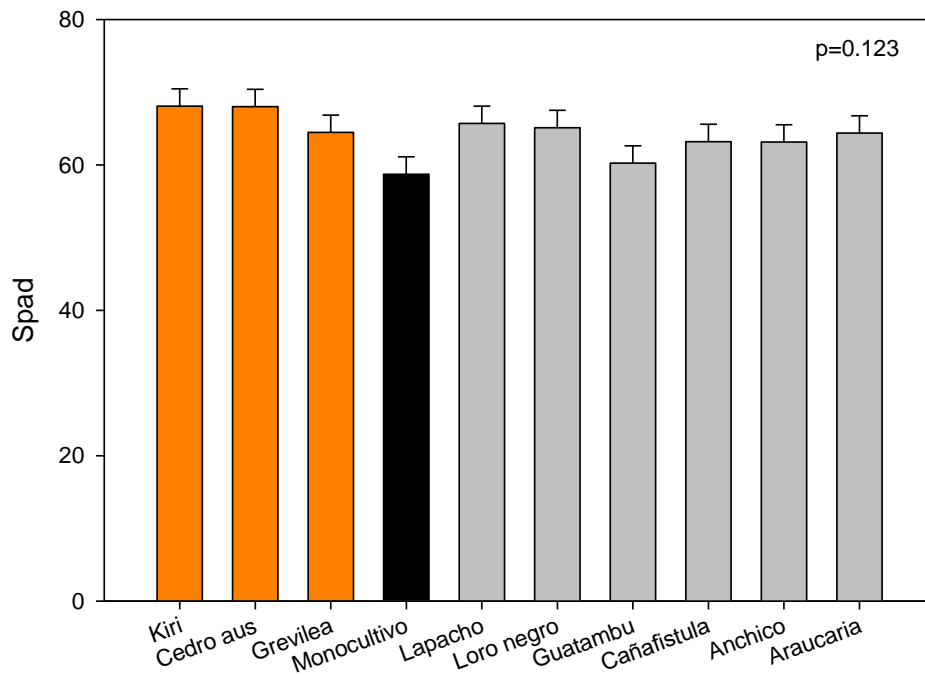


Figura 20: Contenido de clorofilas (Unidades de Spad) para los tratamientos en invierno de 2021. En el margen superior derecho se encuentra el valor del ANOVA.

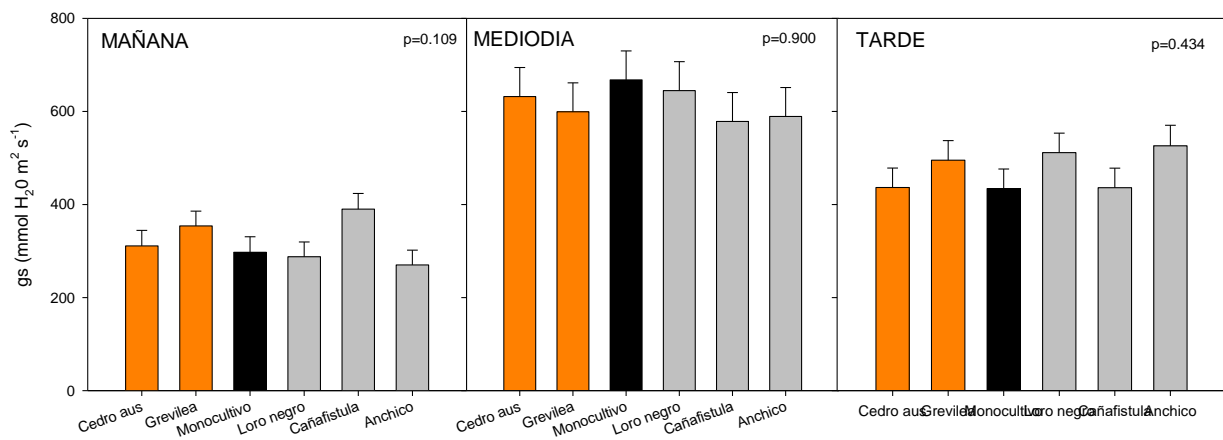


Figura 21: Conductancia estomática (gs) para los tratamientos en invierno de 2021. En el margen superior derecho de cada gráfico se encuentra el valor del ANOVA. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas mediante test de Tukey ($p \leq 0.05$).

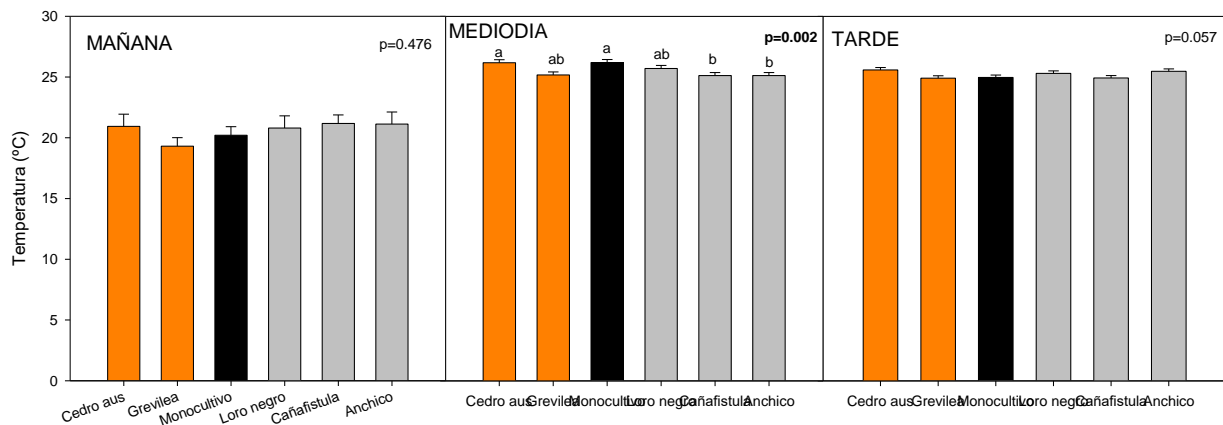


Figura 22: Temperatura de la lámina foliar para los tratamientos en invierno de 2021. En el margen superior derecho de cada gráfico se encuentra el valor del ANOVA. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas mediante test de Tukey ($p \leq 0.05$).

Para la primera medición de primavera del año 2021 puede observarse que hubo diferencias estadísticamente significativas para el contenido de clorofilas de las hojas medido en unidades de Spad (Figura 23). El tratamiento con Kiri tubo el mayor valor diferenciándose de los tratamientos de Loro negro, Guatambú y Cañafístula; pero el monocultivo no se diferencio de ninguna de los otros tratamientos.

Para el área foliar se observaron diferencias estadísticamente significativas (Figura 24), donde las hojas de yerba mate en el monocultivo tienen un valor significativamente más bajo que el resto de los tratamientos.

La radiación PAR por sobre las plantas de yerba mate muestra diferencias estadísticamente significativa entre los tratamientos para las mediciones de la mañana, mediodía y tarde (Figura 25A, 25B y 25C). En los tres momentos de medición la radiación PAR es más alta en el monocultivo, diferenciándose del resto de los tratamientos.

Para la conductancia estomática se observaron diferencias estadísticamente significativa en la mediciones de la mañana y del mediodía (Figura 26A y 26B) pero no para la medición de la tarde (Figura 26C). En las mediciones de la mañana el monocultivo no se diferencia del resto de los tratamientos, mientras que en las mediciones del mediodía el monocultivo tiene un valor de gs estadísticamente más alto que el resto de los tratamientos.

En la temperatura sobre la lámina de las hojas se observaron diferencias estadísticamente significativa para las mediciones del mediodía y de la tarde (Figura 27B y 27C) pero no para las mediciones de la mañana (Figura 27A). Las temperaturas más altas de observaron en las hojas del monocultivo, diferenciándose de los tratamientos con Cedro australiano y Anchico al mediodía; y diferenciándose de Cedro australiano, Anchico y Loro negro en la tarde.

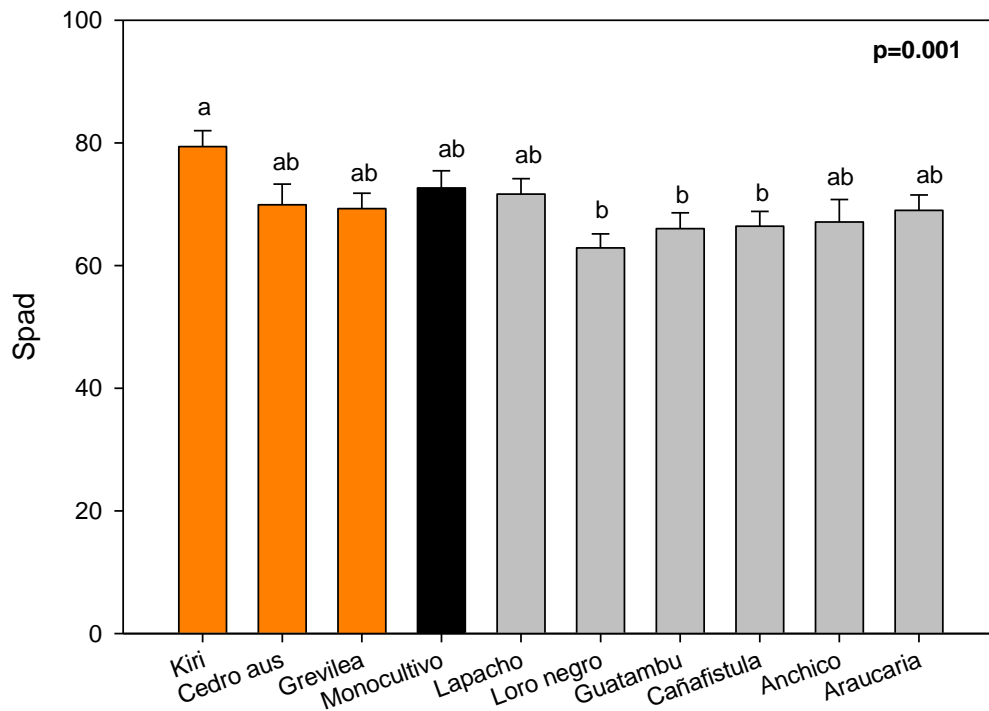


Figura 23: Contenido de clorofilas (Unidades de Spad) para los tratamientos en la primera medición de primavera de 2021. En el margen superior derecho de cada grafico se encuentra el valor del ANOVA. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas mediante test de Tukey ($p \leq 0.05$).

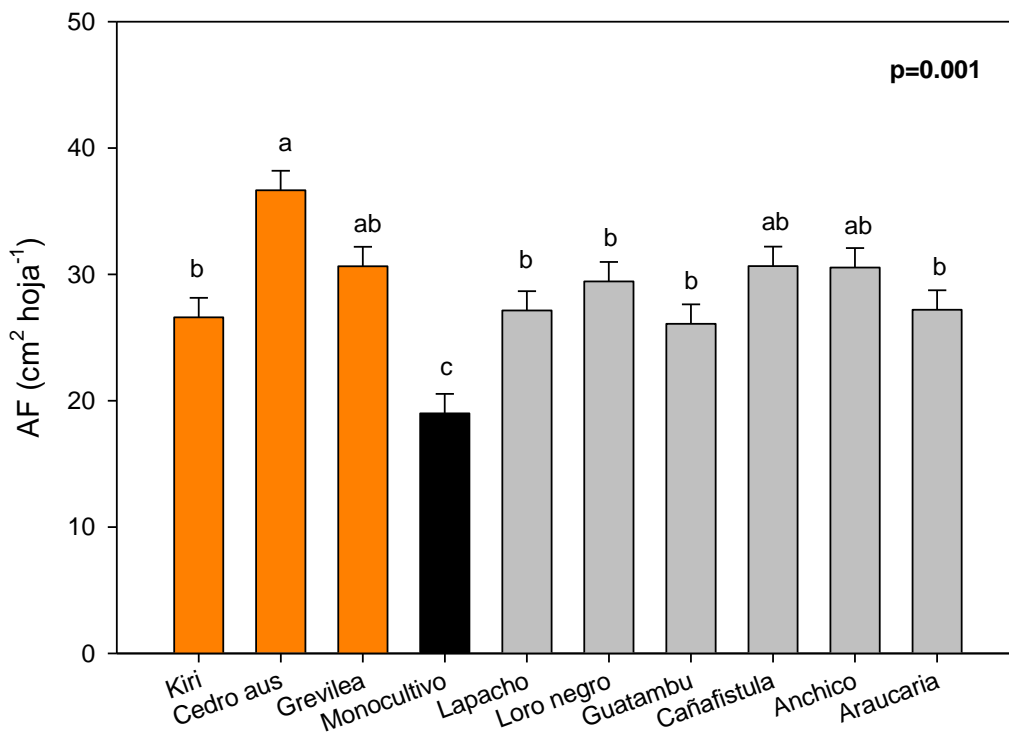


Figura 24: Área foliar para los tratamientos en la primera medición de primavera de 2021. En el margen superior derecho de cada grafico se encuentra el valor del ANOVA. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas mediante test de Tukey ($p \leq 0.05$).

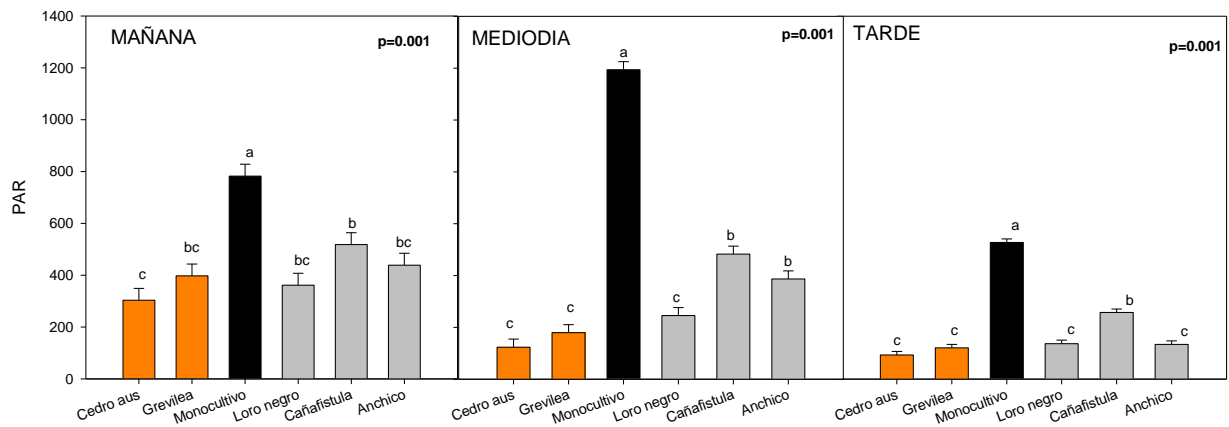


Figura 25: Radiación fotosintéticamente activa (PAR) para los tratamientos en la primera medición de primavera de 2021. En el margen superior derecho de cada gráfico se encuentra el valor del ANOVA. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas mediante test de Tukey ($p \leq 0.05$).

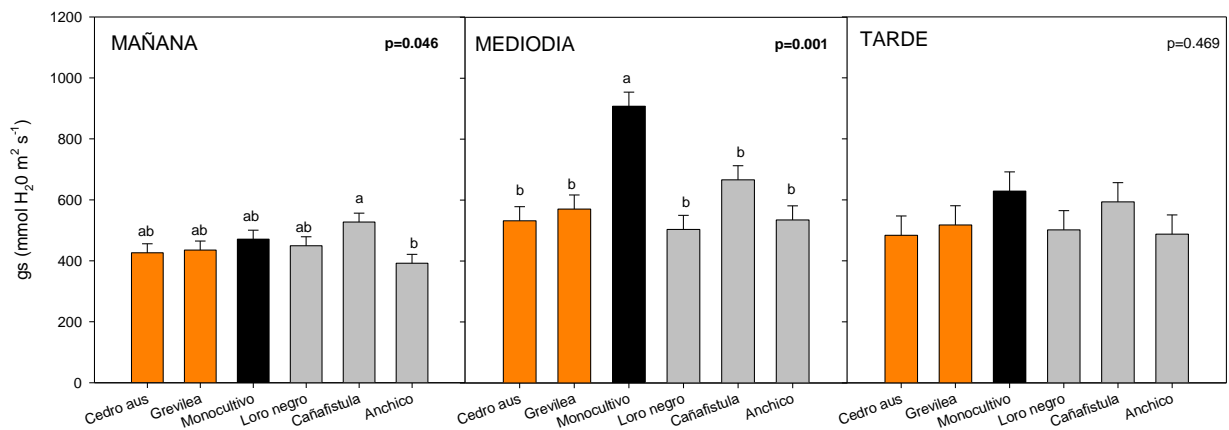


Figura 26: Conductancia estomática (gs) para los tratamientos en la primera medición de primavera de 2021. En el margen superior derecho de cada gráfico se encuentra el valor del ANOVA. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas mediante test de Tukey ($p \leq 0.05$).

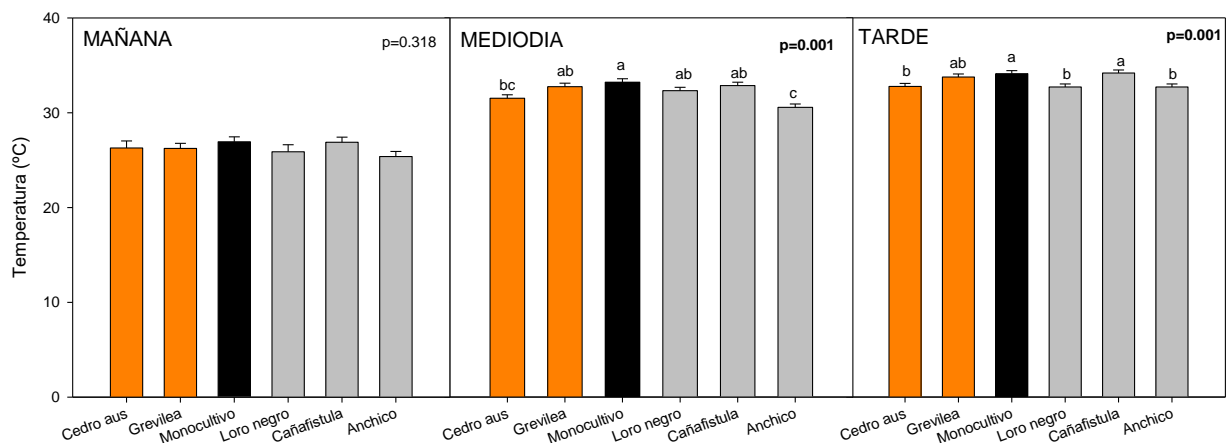


Figura 27: Temperatura de la lámina foliar para los tratamientos en la primera medición de primavera de 2021. En el margen superior derecho de cada gráfico se encuentra el valor del ANOVA. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas mediante test de Tukey ($p \leq 0.05$).

Para la segunda medición de primavera del año 2021 puede observarse que no hubo diferencias estadísticamente significativas para el contenido de clorofilas de las hojas medido en unidades de Spad (Figura 28). Y tampoco se observaron diferencias estadísticamente significativas para el área foliar (Figura 29).

La radiación PAR por sobre las plantas de yerba mate muestra diferencias estadísticamente significativa entre los tratamientos para las mediciones de la mañana, mediodía y tarde (Figura 30A, 30B y 30C). En los tres momentos de medición la radiación PAR es más alta en el monocultivo, diferenciándose del resto de los tratamientos.

Para la conductancia estomática se observaron diferencias estadísticamente significativa en la mediciones la mañana y de la tarde (Figura 31A y 31C) pero no para la medición del mediodía (Figura 31B). En las mediciones de la mañana el monocultivo se diferencia del resto de los tratamientos con el valor más alto de gs, mientras que en las mediciones de la tarde el monocultivo tiene el valor más alto de gs pero se diferencia de los tratamientos con Grevilea, Loro negro y Cañafístula.

En la temperatura sobre la lámina de las hojas se observaron diferencias estadísticamente significativa para las mediciones de la mañana, mediodía y tarde (Figura 32A, 32B y 32C). En las tres mediciones la temperatura más alta siempre fue en el monocultivo.

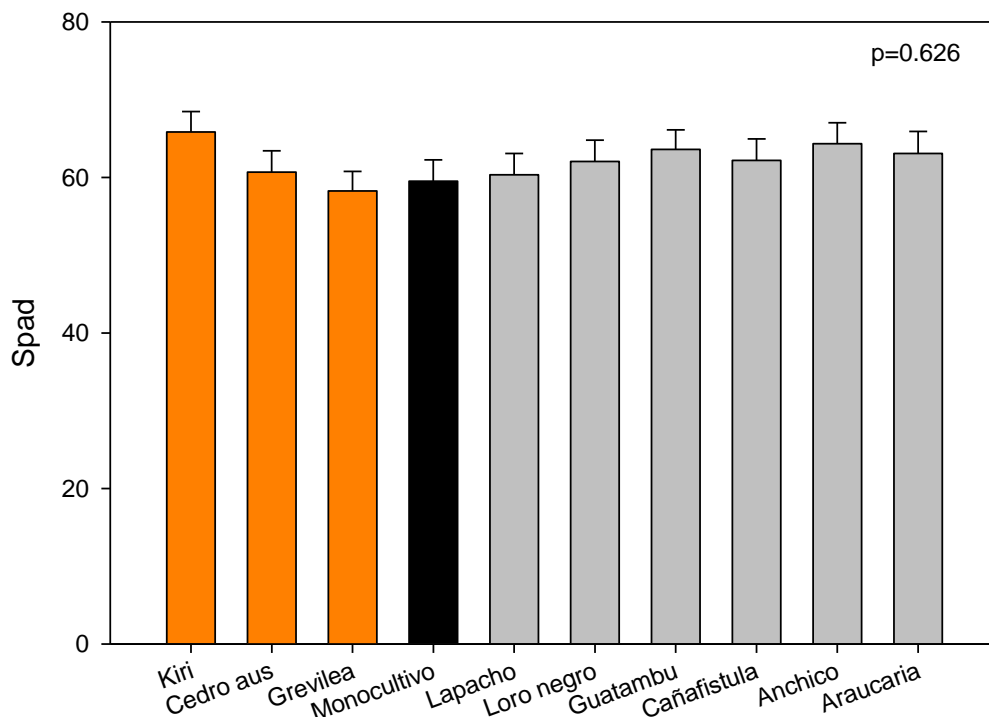


Figura 28: Contenido de clorofilas (Unidades de Spad) para los tratamientos en la segunda medición de primavera de 2021. En el margen superior derecho de cada gráfico se encuentra el valor del ANOVA.

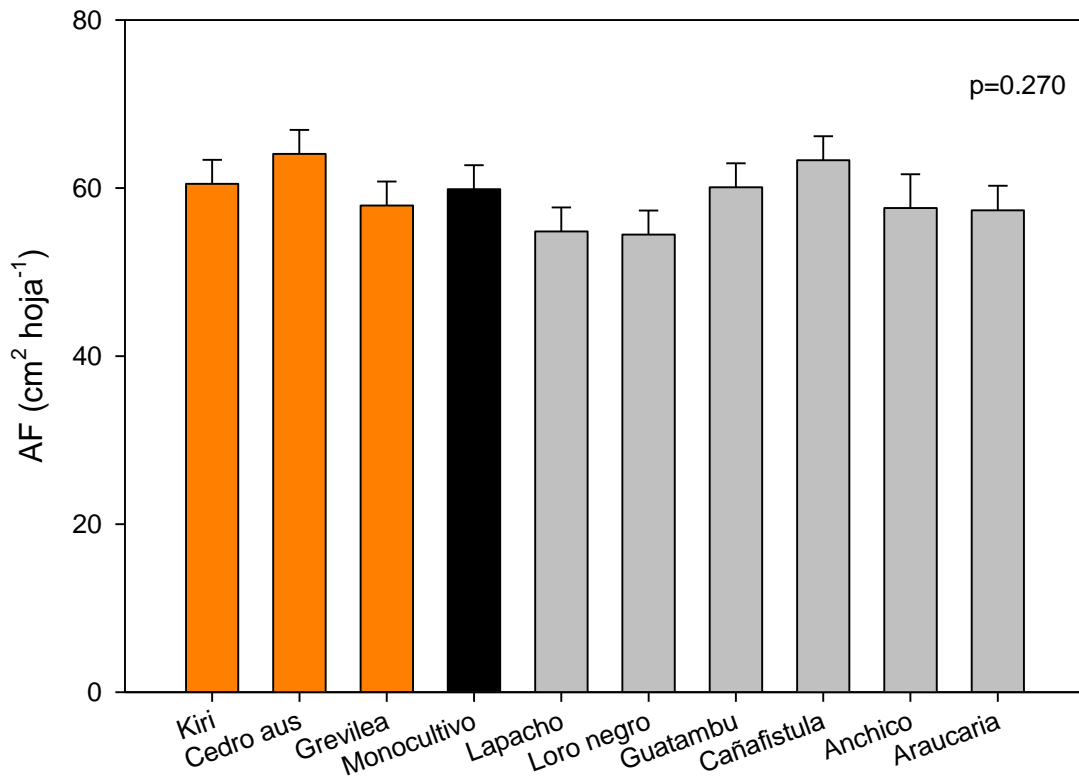


Figura 29: Área foliar para los tratamientos en la segunda medición de primavera de 2021. En el margen superior derecho se encuentra el valor del ANOVA.

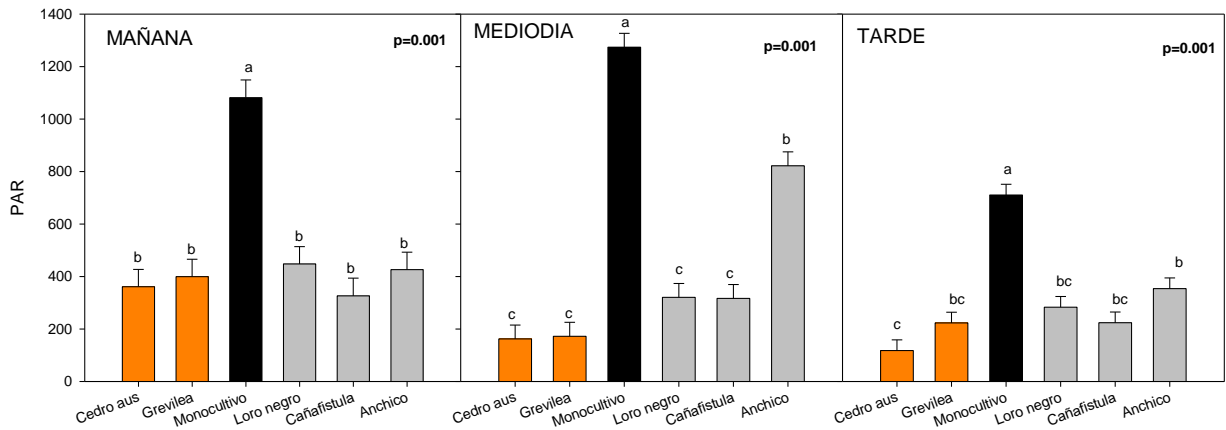


Figura 30: Radiación fotosintéticamente activa (PAR) para los tratamientos en la segunda medición de primavera de 2021. En el margen superior derecho de cada gráfico se encuentra el valor del ANOVA. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas mediante test de Tukey ($p \leq 0.05$).

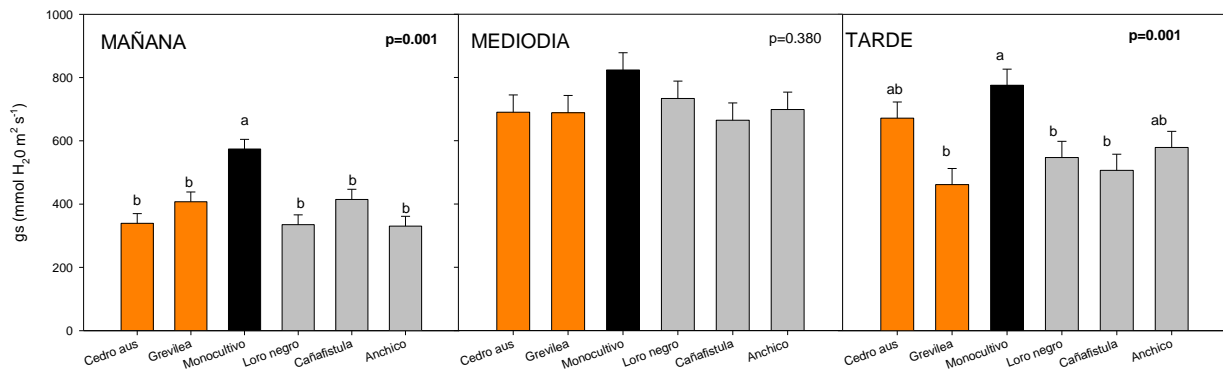


Figura 31: Conductancia estomática (gs) para los tratamientos en la segunda medición de primavera de 2021. En el margen superior derecho de cada gráfico se encuentra el valor del ANOVA. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas mediante test de Tukey ($p \leq 0.05$).

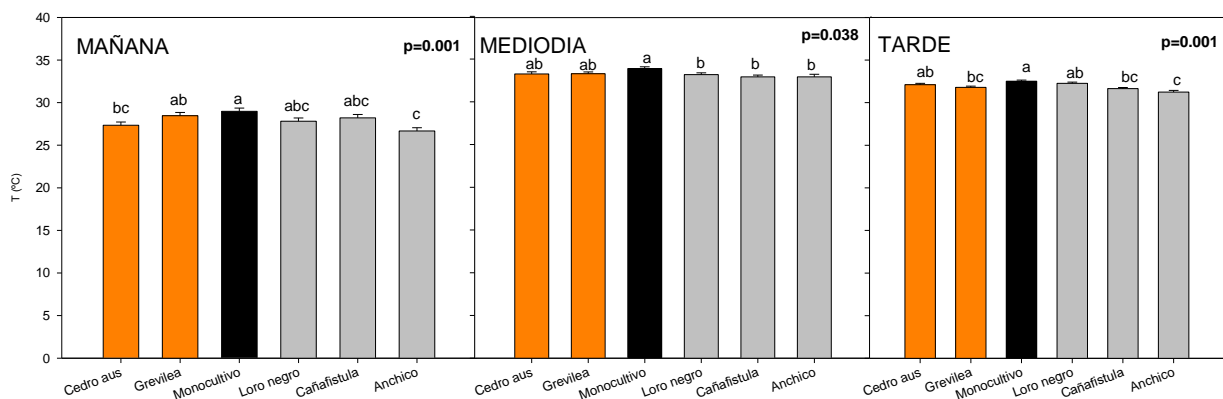


Figura 32: Temperatura de la lámina foliar para los tratamientos en la segunda medición de primavera de 2021. En el margen superior derecho de cada gráfico se encuentra el valor del ANOVA. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas mediante test de Tukey ($p \leq 0.05$).

Para medición de verano del año 2022 puede observarse que no hubo diferencias estadísticamente significativas para el contenido de clorofilas de las hojas medido en unidades de Spad (Figura 33).

Para el área foliar se observaron diferencias estadísticamente significativas (Figura 34), donde las hojas de yerba mate en el monocultivo tienen un valor significativamente más bajo que el resto de los tratamientos (excepto los tratamientos con Lapacho y Anchico).

La radiación PAR por sobre las plantas de yerba mate muestra diferencias estadísticamente significativa entre los tratamientos para las mediciones de la mañana, mediodía y tarde (Figura 35A, 35B y 35C). En los tres momentos de medición la radiación PAR es más alta en el monocultivo, diferenciándose del resto de los tratamientos.

Para la conductancia estomática se observaron diferencias estadísticamente significativa en la mediciones de la mañana (Figura 36A) pero no para la medición del mediodía ni de la tarde

(Figura 36B y 36C). En las mediciones de la mañana el monocultivo tiene el valor más alto de gs, pero solo de diferencia significativamente del tratamiento de Anchico.

En la temperatura sobre la lámina de las hojas se observaron diferencias estadísticamente significativa para las mediciones de la mañana, mediodía y tarde (Figura 37A, 37B y 37C). En las tres mediciones la temperatura más alta siempre fue en el monocultivo.

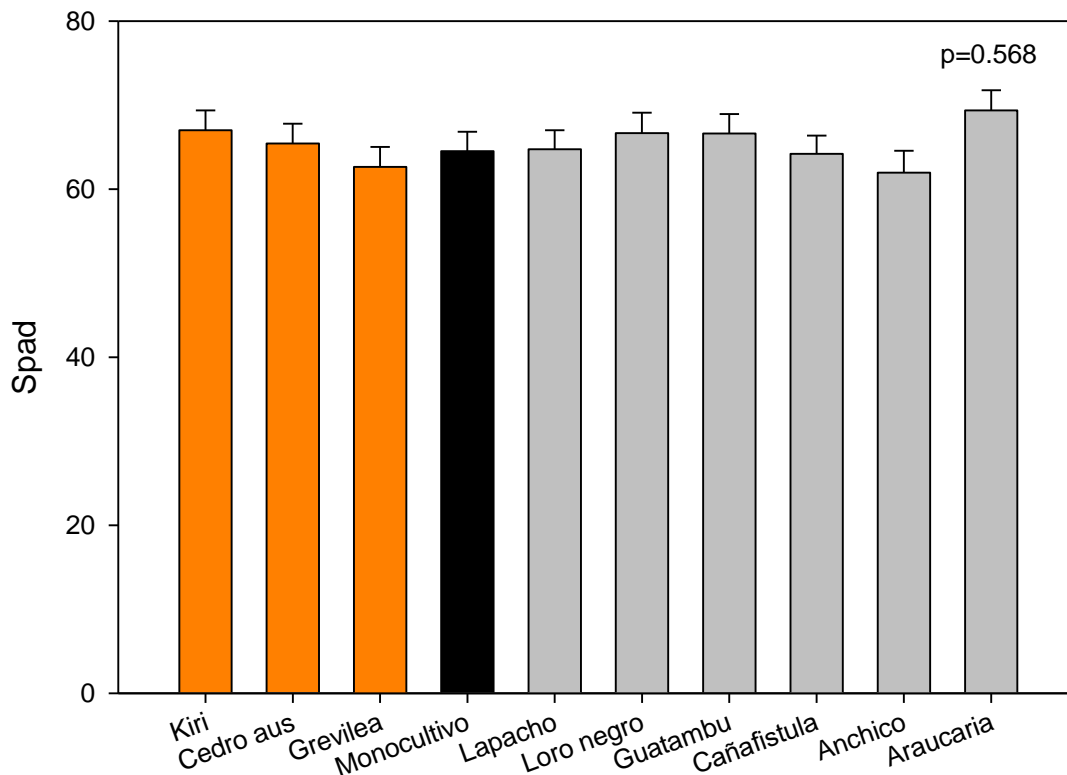


Figura 33: Contenido de clorofilas (Unidades de Spad) para los tratamientos en verano de 2022. En el margen superior se encuentra el valor del ANOVA.

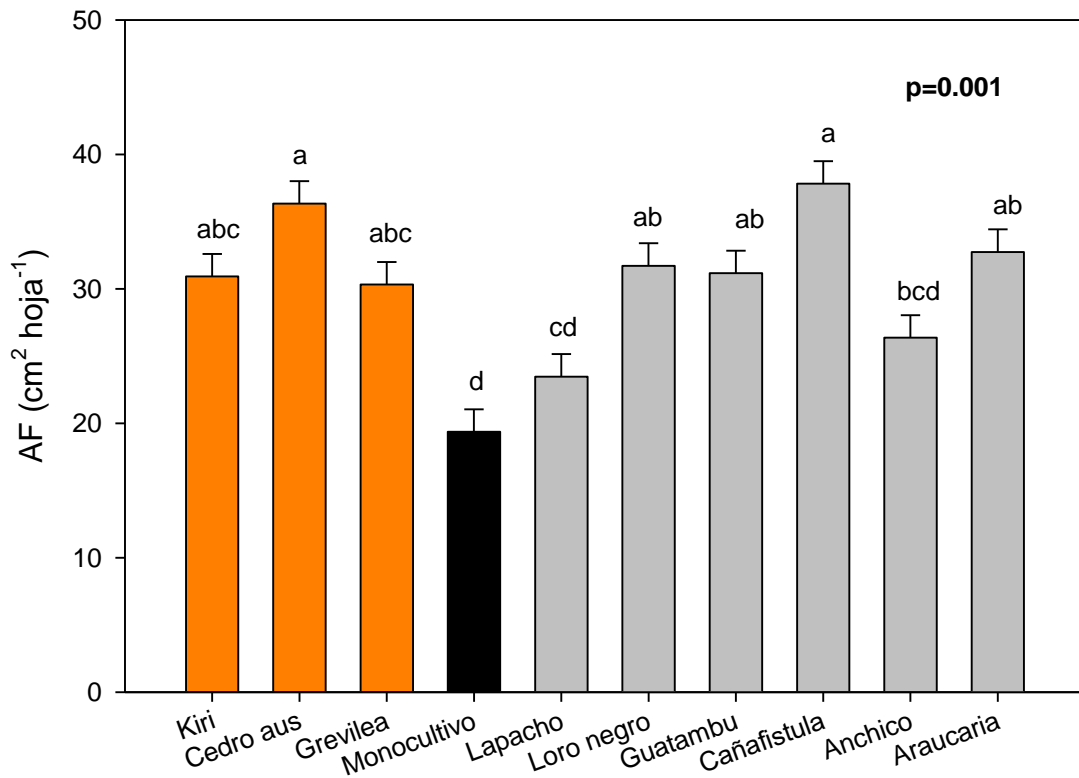


Figura 34: Área foliar para los tratamientos en verano de 2022. En el margen superior se encuentra el valor del ANOVA. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas mediante test de Tukey ($p \leq 0.05$).

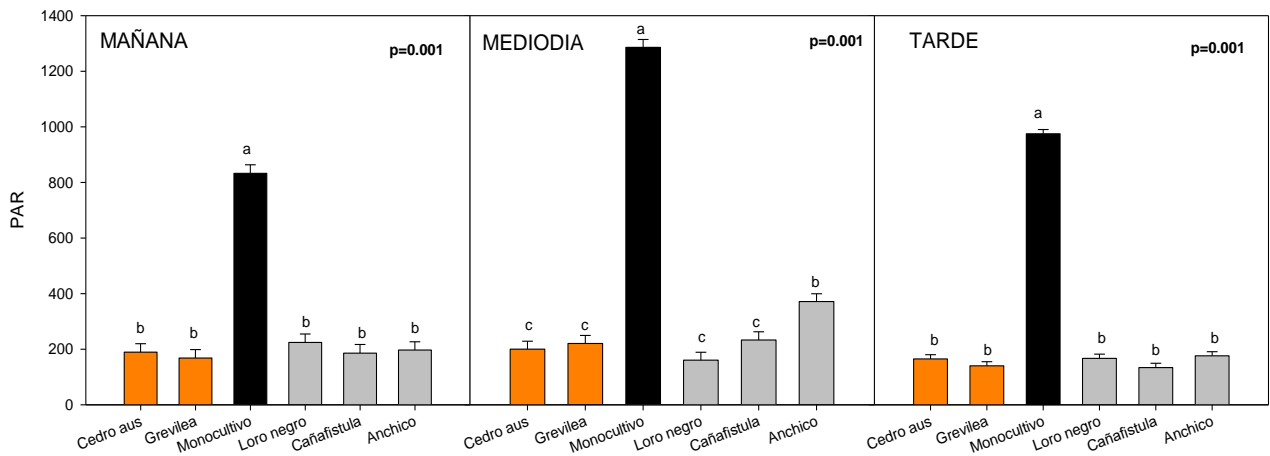


Figura 35: Radiación fotosintéticamente activa (PAR) para los tratamientos en verano de 2022. En el margen superior derecho de cada gráfico se encuentra el valor del ANOVA. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas mediante test de Tukey ($p \leq 0.05$).

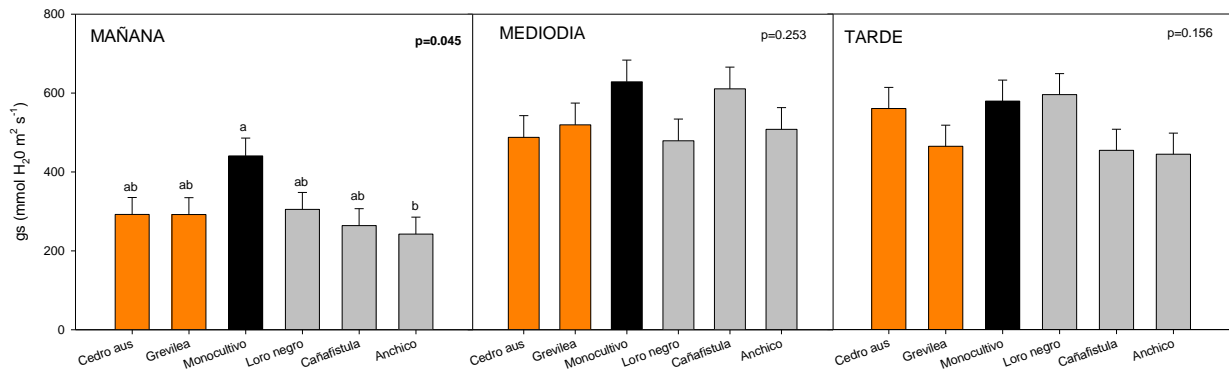


Figura 36: Conductancia estomática (gs) para los tratamientos en verano de 2022. En el margen superior derecho de cada gráfico se encuentra el valor del ANOVA. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas mediante test de Tukey ($p \leq 0.05$).

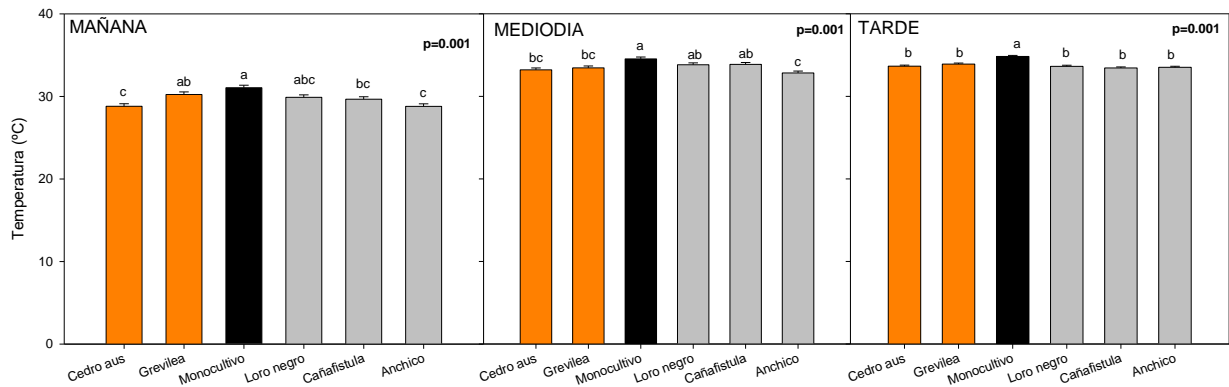


Figura 37: Temperatura de la lámina foliar para los tratamientos en verano de 2022. En el margen superior derecho de cada gráfico se encuentra el valor del ANOVA. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas mediante test de Tukey ($p \leq 0.05$).

En cuanto a la acumulación de materia seca en las trampas de hojas en relación con el aporte que realizan las diferentes especies puede observarse en el acumulado de 8 meses (8 recolecciones de las trampas de hojas) que analizando solo el aporte de la yerba mate existen diferencias estadísticamente significativas (Figura 38). El mayor aporte de materia seca (hojas de yerba mate caídas) se produce en el monocultivo, diferenciándose de los tratamientos con Cedro australiano, Guatambú y Anchico. Para el aporte de materia seca de las especies forestales, si bien se observan diferencias en las cantidades de materia seca recolectada de las trampas de hojas entre los diferentes tratamientos, no hubo diferencias estadísticamente significativas (Figura 39). Pero cuando se analiza el aporte total de materia seca para cada tratamiento (lo que aporta la yerba y la especie forestal) existen diferencias estadísticamente significativas (Figura 40). En el monocultivo se produce la menor acumulación de materia seca, diferenciándose significativamente de los tratamientos con Kiri, Cedro australiano, Grevilea, Lapacho, Guatambú, Loro negro y Araucaria.

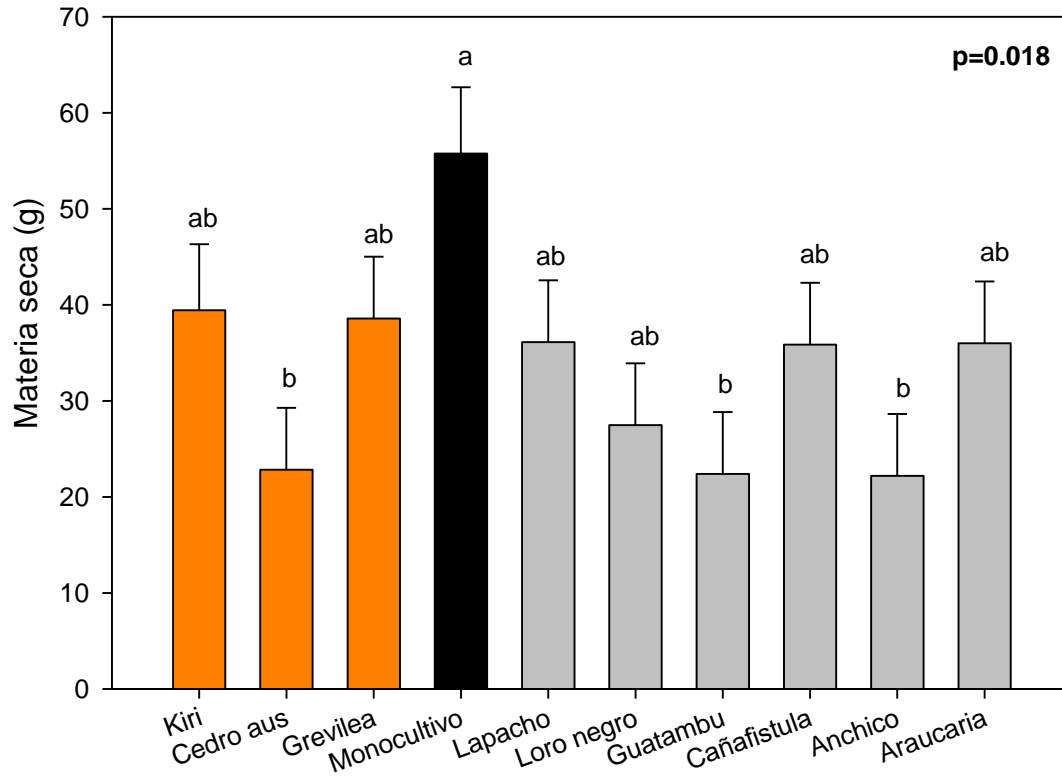


Figura 38: Materia seca de hojas de yerba mate acumulada en las trampas de hojas para los diferentes tratamientos. En el margen superior derecho se encuentra el valor del ANOVA. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas mediante test de Tukey ($p \leq 0.05$).

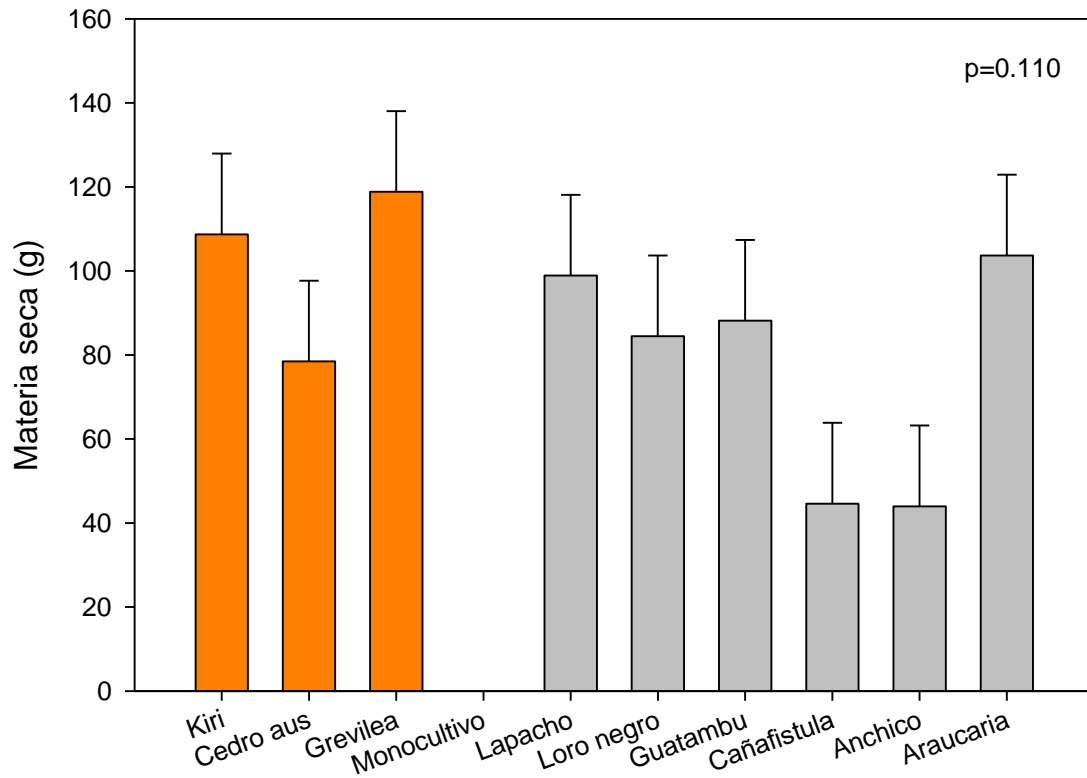


Figura 39: Materia seca de las especies forestales acumulada en las trampas de hojas para los diferentes tratamientos. En el margen superior derecho se encuentra el valor del ANOVA.

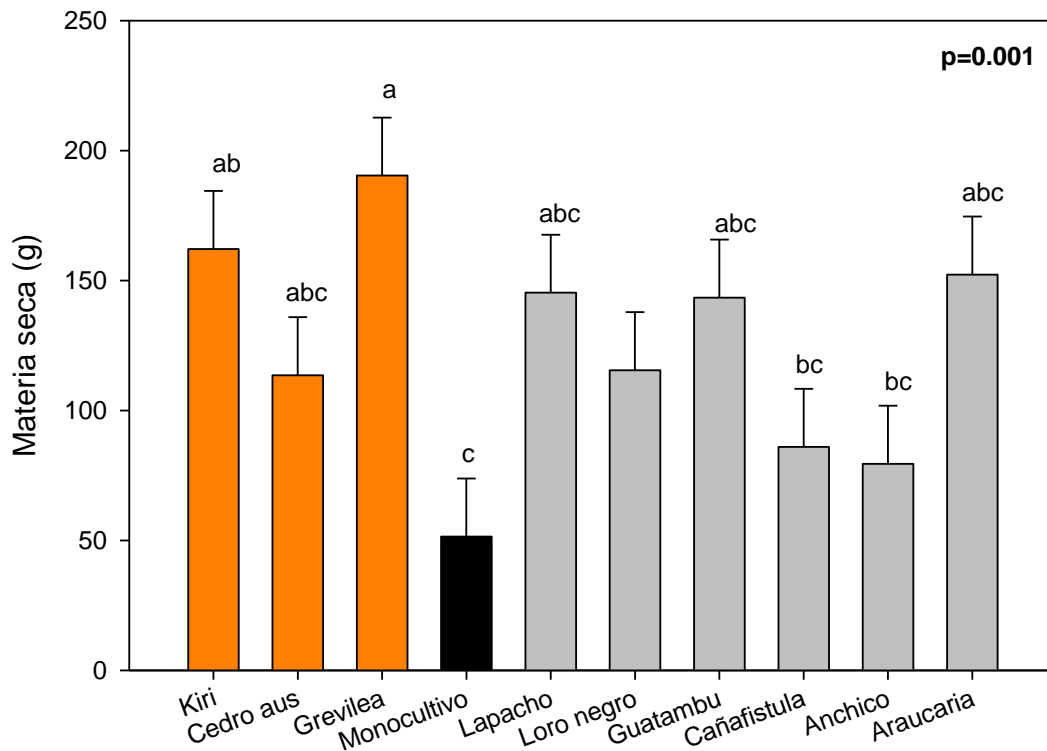


Figura 40: Materia seca total acumulada en las trampas de hojas para los diferentes tratamientos. En el margen superior derecho se encuentra el valor del ANOVA. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas mediante test de Tukey ($p \leq 0.05$).

En cuanto a los análisis de suelo. Existen diferencias estadísticamente significativas para el contenido de materia orgánica en el suelo (Figura 41). El tratamiento con Guatambú presentó los mayores valores de materia orgánica, diferenciándose significativamente del tratamiento con Araucaria. El monocultivo no se diferenció del resto de los tratamientos.

La disponibilidad de nitrógeno (Figura 42) y la disponibilidad de fósforo (figura 43) no mostraron diferencias estadísticamente significativas.

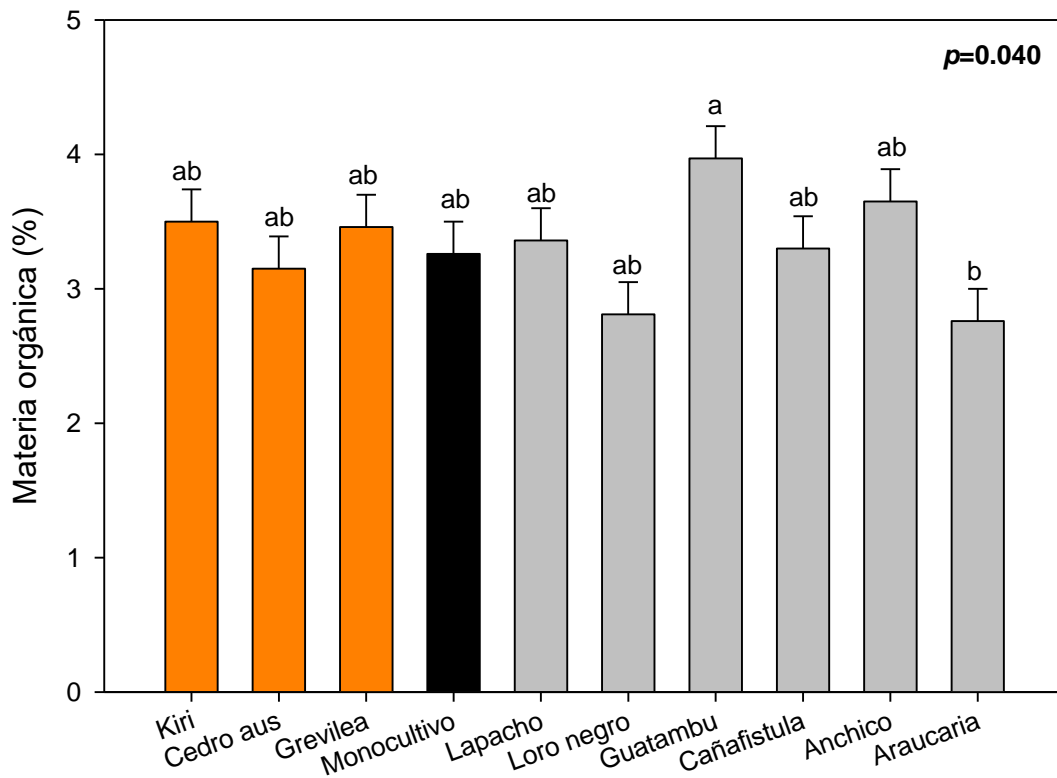


Figura 41: Disponibilidad de materia orgánica para los diferentes tratamientos. En el margen superior derecho se encuentra el valor del ANOVA. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas mediante test de Tukey ($p \leq 0.05$).

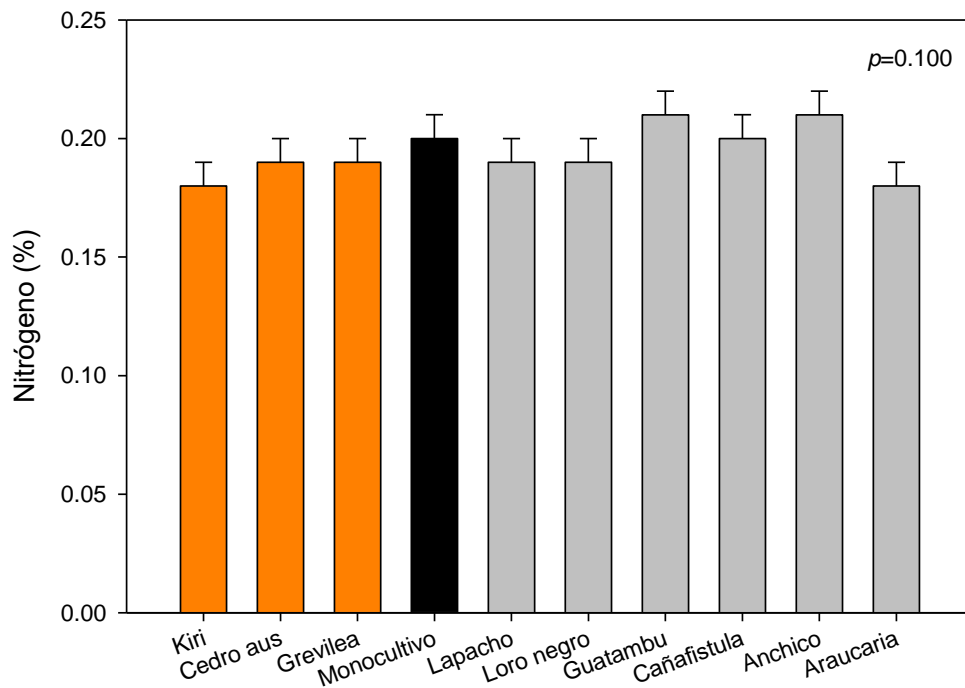


Figura 42: Disponibilidad de nitrógeno para los diferentes tratamientos. En el margen superior derecho se encuentra el valor del ANOVA.

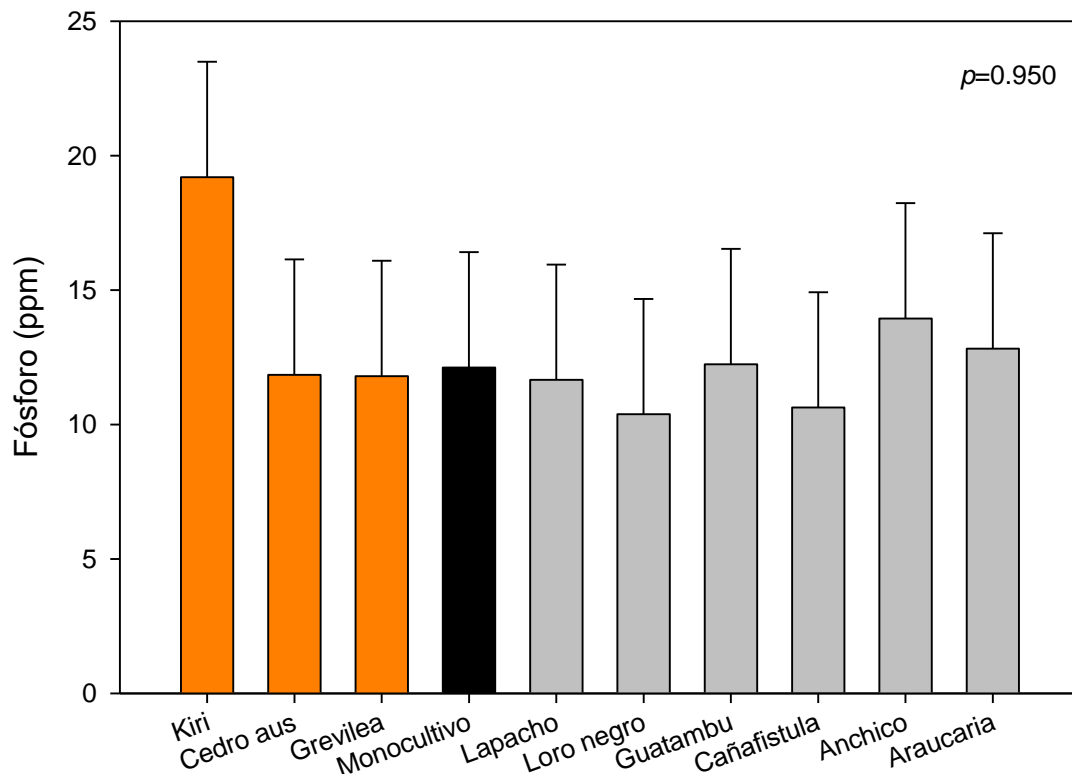


Figura 43: Disponibilidad de fósforo para los diferentes tratamientos. En el margen superior derecho se encuentra el valor del ANOVA.

Resultados parciales Etapa 2:

Los resultados del ensayo con plantines muestran que existieron diferencias estadísticamente significativas para la altura de los plantines (Figura 44). Los plantines bajo la cobertura de Cañafistula presentaron la mayor altura, diferenciándose significativamente de los plantines bajo Anchico o en el monocultivo. Tendencia similar se observa para el diámetro al cuello de los plantines existiendo diferencias estadísticamente significativas (Figura 45). Los plantines bajo la cobertura de Cañafistula presentaron mayor DAC, diferenciándose significativamente de los plantines bajo Anchico. Los plantines en el monocultivo no se diferenciaron del resto de los tratamientos.

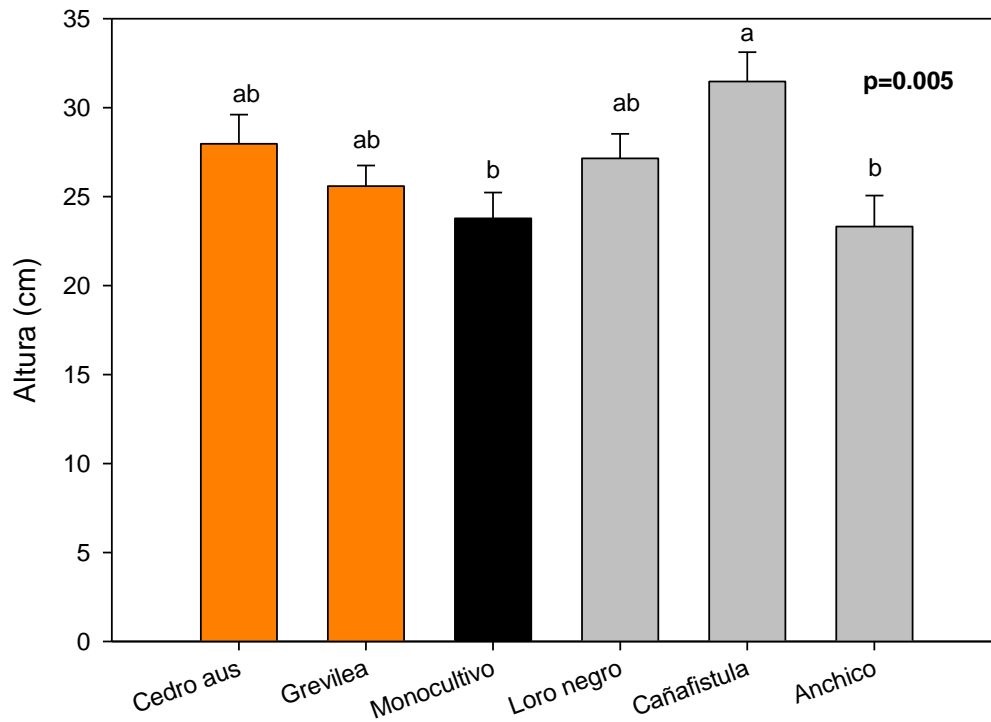


Figura 44: Altura de los plantines para los diferentes tratamientos. En el margen superior derecho se encuentra el valor del ANOVA. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas mediante test de Tukey ($p \leq 0.05$).

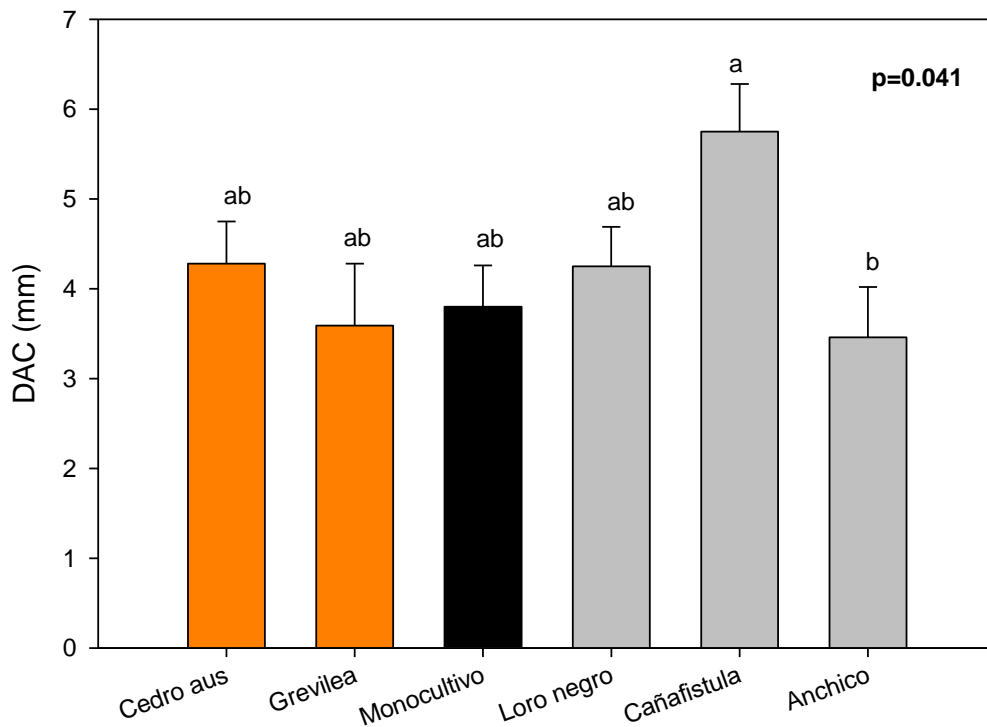


Figura 45: Diámetro al cuello (DAC) de los plantines para los diferentes tratamientos. En el margen superior derecho se encuentra el valor del ANOVA. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas mediante test de Tukey ($p \leq 0.05$).

Analizando el peso seco total por plantin hay diferencias estadísticamente significativas (Figura 46). El valor más bajo de acumulación de materia seca es para los plantines en el monocultivo, diferenciándose significativamente de los plantines bajo la cobertura de Loro negro y Cañafístula.

Analizando la acumulación de materia seca en hojas observamos que hay diferencias estadísticamente significativas (Figura 47A). Los valores más bajos de materia seca en hojas son en el monocultivo mientras que los valores más altos son para los tratamientos con Grevilea y Loro negro.

En la acumulación de materia seca en raíces hay diferencias estadísticamente significativas (Figura 47B). Los plantines bajo la cobertura de Cañafístula presentaron el valor más alto diferenciándose significativamente de los tratamientos con Anchico, Loro negro, Grevilea y monocultivo.

En la acumulación de materia seca en tallos también hay diferencias estadísticamente significativas (Figura 47C). Los plantines bajo la cobertura de Cañafístula presentaron el valor más alto diferenciándose significativamente del tratamientos con Anchico.

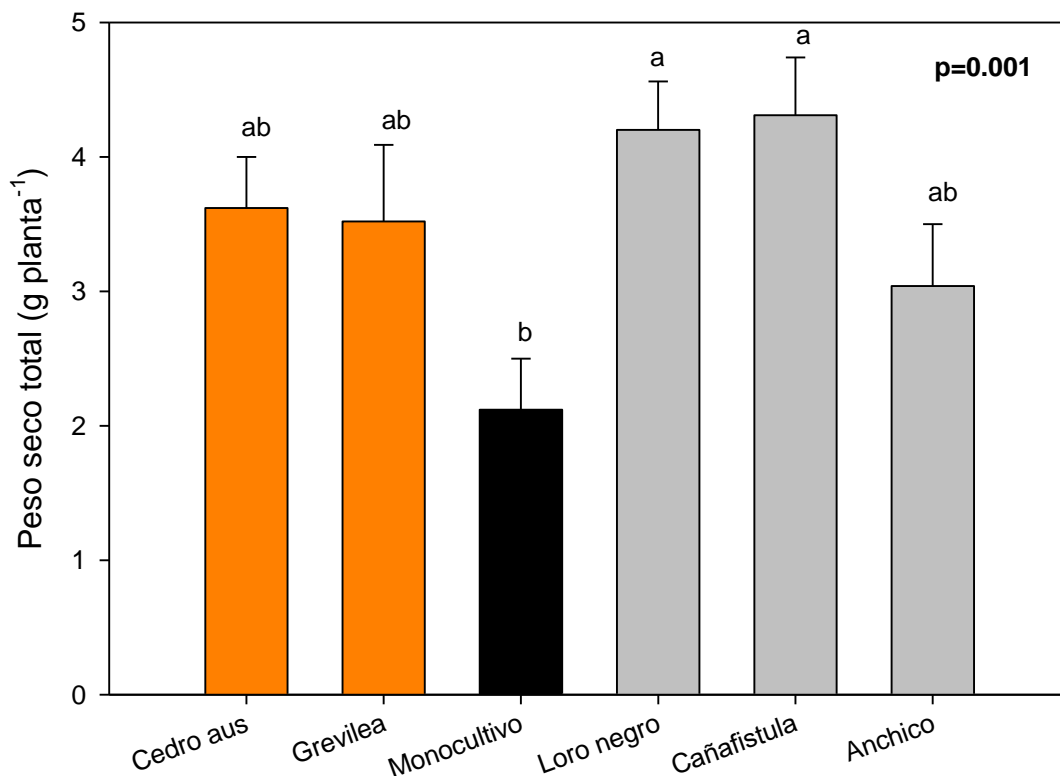


Figura 46: Peso seco total por planta para los diferentes tratamientos. En el margen superior derecho se encuentra el valor del ANOVA. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas mediante test de Tukey ($p \leq 0.05$).

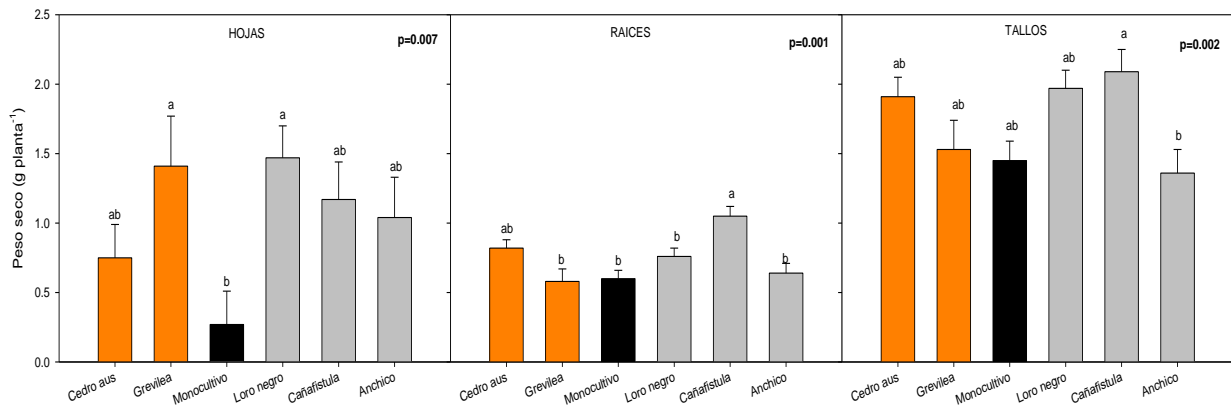


Figura 47: Peso seco por compartimentos (hojas, raíces y tallos) por planta para los diferentes tratamientos. En el margen superior derecho de cada gráfico se encuentra el valor del ANOVA. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas mediante test de Tukey ($p \leq 0.05$).

Al analizar la relación entre la parte aérea (tallo y hojas) en relación con la parte subterránea (raíces) existen diferencias estadísticamente significativas (Figura 48). La relación parte aérea-parte subterránea más baja se da para los plantines en el monocultivo, diferenciándose significativamente de los tratamientos de Grevilea y Loro negro.

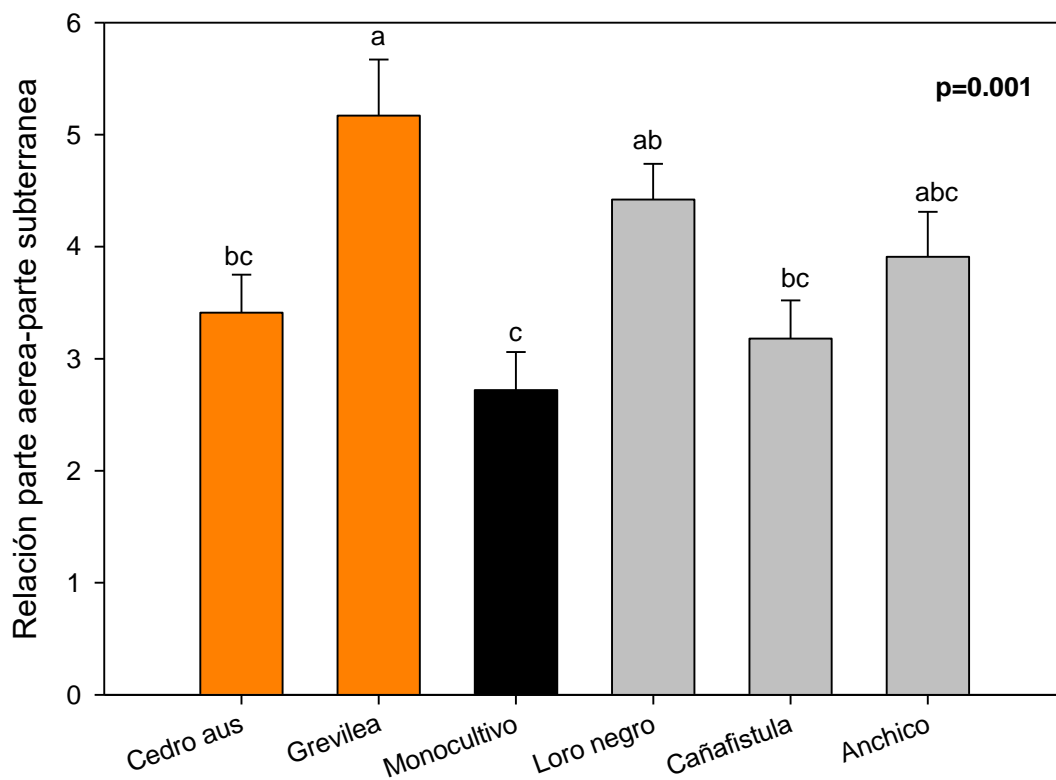


Figura 48: Relación parte aérea-parte subterránea para los diferentes tratamientos. En el margen superior derecho se encuentra el valor del ANOVA. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas mediante test de Tukey ($p \leq 0.05$).

Referencias bibliográficas.

- Al-Namazi AA, El-Bana MI, Bonser SP (2017) Competition and facilitation structure plant communities under nurse tree canopies in extremely stressful environments. *Ecol Evol* 7:2747–2755. <https://doi.org/10.1002/ece3.2690>
- Caron BO, dos Santos DR, Schmidt D, et al (2014) Biomassa e acúmulo de nutrientes em *Ilex paraguariensis* A. St. Hil. *Cienc Florest* 24:267–276. <https://doi.org/10.5902/1980509814565>
- de Avila RS, Dalazen DF, Lorentz LH, et al (2016) Effects of different cultivation systems in leaf traits and herbivory damage in *Ilex paraguariensis* (Aquifoliaceae). *Brazilian J Bot* 39:219–223. <https://doi.org/10.1007/s40415-015-0222-2>
- Eibl B, Fernandez RA, Kozarik JC, et al (2000) Agroforestry systems with *Ilex paraguariensis* (American holly or yerba mate) and native timber trees on small farms in Misiones, Argentina. *Agrofor Syst* 48:1–8. <https://doi.org/10.1023/A:1006299920574>
- Ilany T, Ashton MS, Montagnini F, Martinez C (2010) Using agroforestry to improve soil fertility: effects of intercropping on *Ilex paraguariensis* (yerba mate) plantations with *Araucaria angustifolia*. *Agrofor Syst* 80:399–409. <https://doi.org/10.1007/s10457-010-9317-8>
- Jose S (2009) Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: an overview. *Agrofor Syst* 76:1–10. <https://doi.org/10.1007/s10457-009-9229-7>
- Marron N, Dreyer E, Boudouresque E, et al (2003) Impact of successive drought and re-watering cycles on growth and specific leaf area of two *Populus x canadensis* (Moench) clones, ‘Dorskamp’ and ‘Luisa_Avanzo.’ *Tree Physiol* 23:1225–1235
- Monclus R, Dreyer E, Villar M, et al (2006) Impact of drought on productivity and water use efficiency in 29 genotypes of *Populus deltoides* × *Populus nigra*. *New Phytol* 169:765–777
- Nishiyama Y, Murata N (2014) Revised scheme for the mechanism of photoinhibition and its application to enhance the abiotic stress tolerance of the photosynthetic machinery. *Appl Microbiol Biotechnol* 98:8777–8796. <https://doi.org/10.1007/s00253-014-6020-0>
- Rachwal Gluck F, Coelho GC, Dedecek RA, et al (2002) Influência da Luminosidade sobre a Produção de Massa Foliar e Teores de Macronutrientes, Fenóis Totais, Cafeína e Teobromina em Folhas de Erva-mate
- Sansberro PA, Mroginski LA, Bottini R (2004) Foliar sprays with ABA promote growth of *Ilex paraguariensis* by alleviating diurnal water stress. *Plant Growth Regul* 42:105–111
- Sansberro PA, Mroginski LA, Masciarelli OA, Bottini R (2002) Shoot growth in *Ilex paraguariensis* plants grown under varying photosynthetically active radiation is affected through gibberellin levels. *Plant Growth Regul* 38:231–236. <https://doi.org/10.1023/A:1021567614741>
- Tambussi EA, Casadesus J, Munné-Bosch S, Araus JL (2002) Photoprotection in water-stressed plants of durum wheat (*Triticum turgidum* var. durum): changes in chlorophyll fluorescence, spectral signature and photosynthetic pigments. *Funct Plant Biol* 29:35. <https://doi.org/10.1071/PP01104>
- Tschaplinski TJ, Tuskan GA, Gebre GM, Todd DE (1998) Drought resistance of two hybrid *Populus* clones grown in a large-scale plantation. *Tree Physiol* 18:653–658. <https://doi.org/10.1093/treephys/18.10.653>

Yin C, Wang X, Duan B, et al (2005) Early growth, dry matter allocation and water use efficiency of two sympatric Populus species as affected by water stress. Environ Exp Bot 53:315–322