



UNCUYO
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE CUYO

FACULTAD DE CIENCIAS APLICADAS A LA INDUSTRIA

TESIS DE DOCTORADO

"El $\delta^{13}\text{C}$ como biomarcador del estado hídrico en viñedos cv. Malbec:
optimización del uso del agua y mejora integral de la calidad enológica en
zonas áridas."

Doctorado en Ingeniería de Productos y Procesos de la Industria Alimentaria

Nombre de la tesista:

Directora de tesis:

Mgter. Ing. Irene Carbajal Ramos

Dra. Carina Llano

San Rafael, 25 de noviembre de 2025

Acta de Defensa Pública de Tesis Doctoral

En la ciudad de San Rafael, Mendoza, a los cuatro días del mes de mayo del año 2026, se reúne en Acto Público el jurado encargado de evaluar la defensa de tesis de la carrera de posgrado del Doctorado en Ingeniería de Productos y Procesos de la Industria Alimentaria titulada:

"El $\delta^{13}\text{C}$ como biomarcador del estado hídrico en viñedos cv. Malbec: optimización del uso del agua y mejora integral de la calidad enológica en zonas áridas."

Desarrollada por la Mgtr. Ing. Irene Carbajal Ramos cuya Directora es la Dra. Carina Llano. El Jurado fue designado por el Consejo Directivo de la Facultad de Ciencias Aplicadas a la Industria según Resolución Nº 175/2025 CD.

-Miembros Titulares: Dr. Ing. Daniel Alfredo CASTRO; Dra. Ing. María Carolina GIAROLI y Dra. Ing. Silvia Cristina CLAVIJO.

-Miembro Suplente: Dr. Ing. Mario Daniel NINAGO, Dr. Roberto CÁCERES

La Mgtr. Ing. Irene Carbajal Ramos efectúa la defensa de tesis.

A continuación, los miembros del jurado realizan preguntas, comentarios y consultas que son contestadas por la Mgtr. Ing. Irene Carbajal Ramos.

Seguidamente el Jurado se reúne en sesión privada para calificar la Tesis defendida.

La calificación obtenida es de:

Sobresaliente

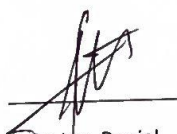
Se comunica a la Mgtr. Ing. Irene Carbajal Ramos la calificación obtenida.

Se cierra este Acto siendo las horas del día 4 de mayo de 2026.



Dra. Ing. María
Carolina GIAROLI

JURADO



Dr. Ing. Daniel
Alfredo CASTRO

JURADO



Dra. Ing. Silvia
CLAVIJO

JURADO

AGRADECIMIENTOS

Final de la segunda década del siglo XXI ...a mitad de la tercera década, siglo XXI... parece una línea de tiempo, y lo es. Es el tiempo que recorrí para llegar donde estoy hoy, y poder decir: ¡lo logré!

Para ello, he necesitado de mucha gente, de ayuda, de apoyo, de aliento, de CONOCIMIENTO. Ha llegado el momento de agradecer, de hacer saber cuán valiosas han sido para mí todas esas personas que han estado a mi lado en tan complejo trayecto y han colaborado de una u otra manera para el desarrollo de esta tesis.

Para mi familia, que siempre está, el primer agradecimiento: a mi esposo Juan, que ha apuntalado incondicionalmente cada iniciativa y ha sido siempre mi apoyo moral y afectivo; a mis cuatro hijos, que han sabido aceptar mis ausencias, mis limitaciones hogareñas por falta de tiempo, mis prioridades laborales, y que aprenden con el día a día lo que es el esfuerzo y la constancia de luchar por los sueños; a mis padres, que me inculcaron que el estudio era la puerta a un futuro diferente y a un desarrollo personal único.

Desde lo profesional, han sido muchas las personas e instituciones que han colaborado en esta meta:

Para CARINA LLANO, mi directora de tesis, un agradecimiento especial, inmenso, eterno, por haber estado siempre presente; ha sido mi guía incondicional, mi soporte laboral y emocional; el ejemplo a seguir, por la constancia, el profesionalismo, el esfuerzo que pone cada minuto y en cada paso.

Para INTA, mi gratitud permanente, por facilitarme cada requerimiento y por brindarme todo lo que la institución tenía para desarrollar mi labor. Un saludo en particular a Gabriel, Pablo, Víctor, Aldo, Rubén, Armando, Laura, Anabel, Melanie, Ceci, que siempre estuvieron presentes, predispuestos y colaborativos.

Para la Facultad de Ciencias Aplicadas a la Industria (UNCuyo), que facilitó sus instalaciones y laboratorios para concretar mis prácticas y respaldó mi investigación, mi reconocimiento intacto de siempre, desde mi formación de base.

Es muy difícil extractar agradecimientos, dedicar mi trabajo, cuando es tanta la gente e instituciones que permitieron y colaboraron para que hoy yo esté aquí. Finalizar este doctorado no hubiese sido posible sin el acompañamiento de todos ellos para que hoy sea una realidad. El apoyo, la confianza, las horas y vivencias compartidas, los trabajos conjuntos, el soporte -económico, humano, profesional-, las palabras de ánimo en momentos de flaqueza, las correcciones y propuestas, los comentarios y sugerencias, los consejos, todo... Todo lo recibido ha contribuido a mi fortaleza para seguir, para superarme; y ha sido fundamental para tan valioso logro. Les estaré eternamente agradecida.

GRACIAS GRACIAS!!!!

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	2
ÍNDICE GENERAL	4
Índice de tablas	9
Índice de figuras	12
Índice de fórmulas	15
Índice de anexos	15
RESUMEN	17
ABSTRACT	19
Capítulo 1: INTRODUCCIÓN	21
1.1. Contextualización y relevancia del estudio	21
1.2. Estado del arte	22
1.3. Objetivos e hipótesis de la tesis	24
1.4. Justificación metodológica	25
1.5. Aportes y proyección del estudio	25
1.6. Estructura del manuscrito	26
Capítulo 2: MARCO TEÓRICO	28
1. Contexto histórico y teórico de la disciplina	28
2. Definición de conceptos clave	29
2.1 Estrés hídrico	29
2.2 Potencial hídrico foliar	29
2.3 Discriminación isotópica de carbono ($\delta^{13}\text{C}$)	30

2.4 Viticultura de precisión	30
3. Metodologías de análisis	31
3.1 Medición del potencial hídrico foliar	31
3.2 Determinación isotópica del $\delta^{13}\text{C}$	31
3.3 Zonificación vitícola y viticultura de precisión	32
3.4 Microvinificaciones y análisis de calidad enológica	32
4. Estudios previos relevantes	33
4.1 Estudios globales	33
4.2 Estudios europeos	33
4.3 Estudios en Mendoza y Argentina	34
4.4 Síntesis de los estudios previos	34
5. Teorías o modelos aplicables	35
5.1 El modelo de Farquhar sobre discriminación isotópica	35
5.2 Modelos de eficiencia en el uso del agua (WUE)	35
5.3 Modelos de zonificación vitícola y viticultura de precisión	36
5.4 Teoría de la adaptación vitícola al cambio climático	36
6. La relevancia del caso de estudio en el marco de la literatura	36
6.1 El Malbec como varietal emblemático	37
6.2 La necesidad de indicadores hídricos integradores en Mendoza	37
6.3 Conexión con la literatura internacional	37
6.4 Implicancias prácticas y científicas	38
7. Síntesis y cierre del Marco Teórico	38
7.1 Avances conceptuales y metodológicos	38

7.2 Aportes de los estudios previos.....	39
7.3 Vacíos de conocimiento y originalidad del estudio	40
7.4 Justificación metodológica	40
7.5 Relevancia científica y práctica	41
7.6 Transición hacia la metodología	41
Capítulo 3: METODOLOGÍA.....	43
1.1 Metodología del diseño experimental	44
1.2 Planta	45
1.2.1 Variables vegetativas	45
1.2.2 Variables de rendimiento	50
1.2.3 Equilibrio vegetativo/productivo	51
1.2.4 Control de maduración	51
1.2.5 Control de madurez	54
1.2.6 Nutrición foliar	57
1.2.7 Ratio isotópico de carbono ($\delta^{13}\text{C}$).....	58
1.3 Vino.....	59
1.3.1 Microvinificaciones.....	59
1.3.2 Composición fisicoquímica	60
1.3.3 Parámetros colorimétricos	61
1.3.4 Análisis sensorial descriptivo	61
1.4 Análisis estadístico.....	62
Capítulo 4: RESULTADOS	64
1.1 Diseño experimental.....	64

1.2 Planta	72
1.2.1 Variables vegetativas	72
1.2.2 Variables de rendimiento	79
1.2.3 Equilibrio vegetativo/productivo	81
1.2.4 Control de maduración	83
1.2.5 Control de calidad de bayas.....	88
1.2.6 Nutrición foliar	94
1.3 Vino.....	100
1.3.1 Composición fisicoquímica de microvinificaciones	104
1.3.2 Parámetros colorimétricos	106
1.3.3 Análisis sensorial descriptivo y multivariado.....	110
1.4 Análisis estadístico: relación de $\delta^{13}\text{C}$ con variables fisiológicas, fisicoquímicas de bayas y cualidades de vinos.....	124
Estado hídrico	125
Materia prima: bayas.....	126
Modelos de regresión.....	127
Microvinificaciones	127
Síntesis del apartado	129
Capítulo 5: DISCUSIÓN.....	130
1. Introducción.....	130
2.1. Relación entre el potencial hídrico foliar y el $\delta^{13}\text{C}$	131
2.2. $\delta^{13}\text{C}$ como indicador de trazabilidad y calidad de la materia prima	139
2.2.1. Variables vegetativas: área, peso y densidad foliar – concentración de clorofila	139

2.2.2. Variables de rendimiento: tamaño y composición gravimétrica de bayas.	141
2.2.3. Variables de calidad: composición fisicoquímica de bayas y hollejos	142
2.2.4. Variables de nutrición foliar: macro y micronutrientes.....	144
2.3.1. Variables fisicoquímicas	146
2.3.2. Variables colorimétricas	148
2.3.3. Variables de análisis sensorial	149
2.4. Comparación con investigaciones previas y análisis de discrepancias.....	150
2.5. Síntesis integradora y proyección para la viticultura en regiones áridas	153
Capítulo 6: CONCLUSIONES Y PROYECCIONES.....	156
BIBLIOGRAFÍA	160
ANEXOS.....	176

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1. Resultados químicos de suelo por parcela a 30 cm de profundidad.

Tabla 4.2. Densidad aparente (g/cm^3) y capacidad de campo para profundidades de 30 y 60 cm.

Tabla 4.3. Registro semanal de lámina de agua por goteo (mm) durante la temporada.

Tabla 4.4. Comparación entre lámina teórica y real aplicada por tratamiento y porcentaje de ahorro.

Tabla 4.5. Agua total recibida (mm) considerando lluvia efectiva y riego por goteo.

Tabla 4.6. Medias ajustadas y errores estándar para Ψ_{pd} , Ψ_{md} , $S\Psi_{pd}$ y $S\Psi_{md}$. Letras distintas indican diferencias significativas (LSD Fisher, $\alpha = 0,05$).

Tabla 4.7. Medias ajustadas del contenido de clorofila ($\mu\text{mol/m}^2$) por tratamiento y día de medición.

Tabla 4.8. Resultado de MLGM para las variables de rendimiento (número de racimos, peso neto de cosecha y peso promedio de racimo) por tratamiento.

Tabla 4.9. Coeficientes de correlación de Pearson entre variables de rendimiento.

Tabla 4.10. Medias ajustadas y errores estándares de la relación vegetativo/productiva (m^2/kg) por tratamiento (LSD Fisher, $\alpha = 0,05$).

Tabla 4.11. Variables analizadas en el seguimiento de maduración de bayas.

Tabla 4.12. Resultados de MLGM para el factor tratamiento de las variables de maduración.

Tabla 4.13. Resultados de análisis estadístico con MLGM para el factor temporal DDB (Días Después de Brotación) de las variables de maduración de las bayas.

Tabla 4.14. Clasificación de medias de °Brix, pH y acidez total por tratamiento (MLGM).

Tabla 4.15. Clasificación de medias de clase modal (mm) y peso medio de baya (g) por tratamiento (MLGM).

Tabla 4.16. Variables auxiliares y nomenclatura empleada para el cálculo de relaciones hollejo/baya y semilla/baya.

Tabla 4.17. Medias ajustadas por tratamiento de los componentes gravimétricos (hollejo, pulpa y semilla).

Tabla 4.18. Nomenclatura y dimensión de las variables de polifenólicas de hollejos.

Tabla 4.19. Medias ajustadas de taninos y antocianos en hollejos (mg/g) por tratamiento.

Tabla 4.20. Variables y nomenclatura empleadas para el análisis de nutrición foliar.

Tabla 4.21. Variables, unidades y nomenclatura de las variables $\delta^{13}\text{C}$.

Tabla. 4.22. Resultado de MLGM por tratamiento de $\delta^{13}\text{C}$ para bayas y hojas (% vs VPDB).

Tabla 4.23. Variables, unidades y nomenclatura empleadas en el análisis de vinos.

Tabla 4.24. Distancias euclídeas entre tratamientos (T1–T4) basadas en variables fisicoquímicas, colorimétricas y sensoriales.

Tabla 4.25. Resultados de los modelos lineales generales y mixtos (MLGL) para variables fisicoquímicas del vino.

Tabla 4.26. Variables colorimétricas y nomenclatura de referencia (I, T, IC, IPT).

Tabla 4.27. Parámetros de color e IPT: medias ajustadas (MLGM), error estándar y letras de significancia.

Tabla 4.28. Variables CIELab: medias ajustadas (MLGM), error estándar y significancia (L^* , a^* , b^* , h^* , C^*).

Tabla 4.29. Diferencia de color (ΔE^*) entre medias ajustadas por tratamiento (pares T1–T4).

Tabla 4.30. Resultados MLGM para los puntajes totales de las degustaciones por tratamiento para los meses de agosto y noviembre 2024.

Tabla 4.31. Distancia euclídea del análisis sensorial (agosto 2024). Comparación por pares de tratamientos, ordenados de mayor a menor (InfoStat).

Tabla 4.32. Distancia euclídea del análisis sensorial (noviembre 2024). Comparación por pares de tratamientos, ordenados de mayor a menor (InfoStat).

Tabla 4.33. Nomenclatura de variables organolépticas consideradas en el análisis multivariado.

Tabla 4.34. Matriz de correlación (agosto 2024) para variables visuales (FV), olfativas (FO) y gustativas (FG).

Tabla 4.35. Matriz de correlación (noviembre 2024) para variables visuales, olfativas y gustativas.

Tabla 4.36. Codificación de categorías características organolépticas de los vinos.

Tabla 4.37. Contribución a la Chi cuadrado Agosto 2024.

Tabla 4.38. Resultado ACM InfoStat, para variables categóricas de la degustación de vinos de agosto de 2024.

Tabla 4.39. Contribución a la Chi cuadrado noviembre 2024 (salida InfoStat).

Tabla 4.40. Resultado ACM InfoStat, para variables categóricas de la degustación de vinos de noviembre de 2024.

Tabla 4.41. Coeficientes de correlación de Pearson/probabilidades.

Tabla 4.41. Coeficientes de correlación de Pearson/probabilidades para $\delta^{13}\text{C B}$ y $\delta^{13}\text{C H}$ y variables colorimétricas, extracto de anexo 16.

Tabla 4.42. Coeficientes de correlación de Pearson/probabilidades para $\delta^{13}\text{C B}$ y $\delta^{13}\text{C H}$ y variables colorimétricas, extracto de anexo 16.

Tabla 4.43. Coeficientes de correlación de Pearson/probabilidades para $\delta^{13}\text{C B}$ y $\delta^{13}\text{C H}$ y composición fisicoquímica de vino, extracto de anexo 17.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1. Medición potencial hídrico foliar preamanecer. Fecha 06/03/2024.

Figura 3.2. a) Cámara Scholander para medición de potencial hídrico foliar con tanques de suministro de N₂. b) Carga de la hoja en cámara de presión c) Lectura de estado hídrico -0.98 MPa (sin estrés hídrico).

Figura 3.3. Muestreo foliar para la determinación de la superficie de hojas primarias y secundarias.

Figura 3.4. Cálculo de porcentaje de área a partir del programa CobCal con ajuste de colorimetría y contraste de fotografías.

Figura 3.5. a) Lectura de concentración de clorofila con medidor portátil. b) Lectura final del instrumento de medición

Figura 3.6. a) Inicio de seguimiento en enero. b) Muestreo de bayas. c) Uvas clasificadas por parcela.

Figura 3.7. Juego de tamices de madera con bayas retenidas de acuerdo con el diámetro (clase modal: diámetro de baya 11 mm).

Figura 3.8. Extracción de hollejos de bayas.

Figura 3.9. a) Hollejos liofilizados. b) Líquido de extracción de hollejos. c) Frascos con las soluciones de extracción almacenados en frascos color caramelo.

Figura 3.10. a) Hojas secas identificadas por parcelas. b) Pecíolos. c) Pecíolos luego del proceso de molienda. d) Reducción de tamaño de limbo.

Figura 3.11. Procesamiento de limbos para determinación isotópica de carbono. a) Deshidratación de hojas. b) Hojas previo a la molienda. c) Reducción de tamaño a fino polvo.

Figura 3.12. Procesamiento de bayas para determinación isotópica de carbono. a) Lavado con agua destilada en baño ultrasónico. b) Secado en estufa hasta peso constante. c) Bayas deshidratadas. d. Reducción de tamaño

Figura 3.13. Cabina de degustación provista de copas técnicas norma ISO 3591:1977.

Figura 4.1. Labor cultural de la poda año 2023.

Figura 4.2. Derivación de tubería principal de sistema de riego por goteo.

Figura 4.3. a) Muestreo a 30 cm de profundidad. b) Visualización de las 3 extracciones por parcela.

Figura 4.4. Diseño experimental con las 16 unidades experimentales identificadas por tratamiento.

Figura 4.5. a) Localización de pozo frente a la planta. b). Cilindro calibrado con muestra enrasada. c). Registro de pesos de tapa, fondos y masa de suelo.

Figura 4.6. Aporte total de agua por tratamiento.

Figura 4.7. Registro de lluvia correspondiente a la tormenta del 21 de enero de 2024 (47,6 mm acumulados).

Figura 4.8. Registro de lluvia de la tormenta del 21-01-2024. Valor acumulado de 47.5 mm.

Figura 4.9. Evolución del potencial hídrico de preamanecer (Ψ_{pd}) entre el 17/01/2024 y el 13/03/2024 (MPa).

Figura 4.10. Evolución del potencial hídrico de mediodía (Ψ_{md}) entre el 17/01/2024 y el 20/03/2024 (MPa).

Figura 4.11. Relación entre las integrales de Myers de mediodía y preamanecer.

Figura 4.12. Integral de Myers del período envero-vendimia por tratamiento. a) Preamanecer, b) mediodía.

Figura 4.13. Medias ajustadas (MLGM) del área foliar primaria (AFP), secundaria (AFS) y total (AFT) por tratamiento (m^2).

Figura 4.14. Medias ajustadas de pesos de hojas primarias, secundarias y totales (g).

Figura 4.15. Densidad foliar específica (Den_P, Den_S, Den_T) por tratamiento (m^2/g).

Figura 4.16. Relación entre concentración de clorofila ($\mu moles/m^2$) y potencial hídrico de mediodía (MPa).

Figura 4.17. Medias ajustadas con MLGM por tratamiento para número de racimos por planta.

Figura 4.18. Medias ajustadas con MLGM por tratamiento para Peso Neto por planta (kg/planta).

Figura 4.19. Medias ajustadas del peso promedio de racimo (kg/racimo) por tratamiento.

Figura 4.20. Distribución de muestreo de área foliar y peso de producción por parcela.

Figura 4.21. Curva de evolución del peso de baya (g) por tratamiento durante el período envero-vendimia.

Figura 4.22. Curva de evolución de los sólidos solubles ($^{\circ}Brix$) por tratamiento durante el período envero-vendimia.

Figura 4.23. Evolución del pH de las bayas por tratamiento durante el período envero-vendimia.

Figura 4.24. Curva de evolución de la acidez total titulable (g/L) por tratamiento durante el período envero-vendimia.

Figura 4.25. Componentes gravimétricos de la baya por tratamiento con error estándar.

Figura 4.26. Contenido medio de taninos y antocianos en hollejos por tratamiento.

Figura 4.27. Análisis de componentes principales (APC) para macro y micronutrientes por tratamiento.

Figura 4.28. Análisis de componentes principales (APC) para macro y micronutrientes de pecíolo y limbo.

Figura 4.29. Medias ajustadas por tratamiento mediante MLGM. a) $\delta^{13}\text{C}$ de bayas b) $\delta^{13}\text{C}$ de hojas.

Figura 4.30. Dispersión $\delta^{13}\text{C}_\text{H}$ vs $\delta^{13}\text{C}_\text{B}$ por tratamiento con ajuste lineal (T1: verde; T2: amarillo; T3: naranja; T4: rojo).

Figura 4.31. Análisis de componentes principales (APC) para macro y micronutrientes por tratamiento.

Figura 4.32. Barras de medias ajustadas (MLGM) con error estándar: a) Intensidad (I); b) Tonalidad (T); c) Índice de color (IC); d) IPT.

Figura 4.33. Barras de medias ajustadas con error estándar: a) L^* ; b) a^* ; c) b^* ; d) h^* ; e) C^* .

Figura 4.34. Puntaje total del análisis sensorial de vinos. a) agosto 2024. b) noviembre 2024.

Figura 4.35. Gráficos de estrellas por tratamientos (agosto 2024).

Figura 4.36. Gráficos de estrellas por tratamientos (noviembre 2024).

Figura 4.37. Biplot ACP para las variables visuales, olfativas y gustativas (agosto 2024).

Figura 4.38. Biplot ACP para las variables visuales, olfativas y gustativas (noviembre 2024).

Figura. 4.39. Modelo de regresión para $\delta^{13}\text{C}$ en bayas y hojas respecto del peso de semillas.

ÍNDICE DE FÓRMULAS

- 3.1. Integral de Myers
- 3.2. Cálculo de acidez titulable total en vinos.
- 3.3. Cálculo de peso medio de baya.
- 3.4. Peso medio de hollejo por baya.
- 3.5. Peso medio de semilla por baya.
- 3.6. Relación hollejo/producción de uvas.
- 3.7. Relación semilla/producción de uvas.
- 3.8. Diferencia en luminosidad.
- 3.9. Diferencia en rojo y verde.
- 3.10. Diferencia en amarillo y azul.
- 3.11. Diferencia total de color.
- 4.1. Ajuste lineal para integral de Myers.

ÍNDICE DE ANEXOS

- Anexo 1. Registro de peso de poda 2023.
- Anexo 2. Cálculo de lámina de riego.
- Anexo 3. MLGM: Acidez titulable total, Modelo 4.
- Anexo 4. MLGM: Nutrición Foliar.
- Anexo 5. Matriz de dispersión para variables fisicoquímicas y sensoriales del vino.
- Anexo 6. Matriz de dispersión para variables colorimétricas del vino.
- Anexo 7. Coeficientes de correlación de Pearson: $\delta^{13}\text{C}$, variables colorimétricas y análisis sensorial.
- Anexo 8. Coeficientes de correlación de Pearson: variables fisicoquímicas de vinos.

Anexo 9. Distancia euclídea para variables de bayas y vinos.

Anexo 10. MLGM: gráficas de barras - Composición fisicoquímica de vinos.

Anexo 11. ACP de Análisis sensorial de vinos: autovalores y autovectores.

Anexo 12. Ecuaciones para el cálculo de I, T, IC, h, C e IPT.

Anexo 13. Análisis sensorial: Resultados de medias mínimas y máximas por parcela.

Anexo 14. Gráficos de dispersión de $\delta^{13}\text{C}$ Bayas: Estado hídrico.

Anexo 15. Gráficos de dispersión de $\delta^{13}\text{C}$ hojas: Estado hídrico.

Anexo 16. Matriz de correlación de composición isotópica, variables gravimétricas de baya.

Anexo 17. Gráficos de dispersión de $\delta^{13}\text{C}$ Bayas y parámetros de calidad de bayas.

Anexo 18. Gráficos de dispersión de $\delta^{13}\text{C}$ hojas y parámetros de calidad de materia prima.

RESUMEN

La presente tesis doctoral evaluó el estado hídrico de viñedos de *Vitis vinifera* cv. Malbec en el oasis sur de Mendoza mediante el uso del ratio isotópico, $\delta^{13}\text{C}$, con el propósito de analizar su relación con el estado hídrico de las cepas y la calidad de la uva y del vino, y su potencial como herramienta de diagnóstico y trazabilidad enológica. El estudio integró mediciones de potencial hídrico foliar (Ψ), análisis isotópicos en hojas y bayas, variables vegetativas y productivas, composición fisicoquímica de las uvas y microvinificaciones experimentales.

Los tratamientos de riego planificados fueron parcialmente modificados por precipitaciones extraordinarias asociadas al fenómeno El Niño, lo que redujo la diferenciación esperada entre ellos. Aun así, el $\delta^{13}\text{C}$ mostró una respuesta clara a los gradientes de disponibilidad hídrica: valores más negativos en plantas con mayor reposición de agua y valores menos negativos bajo riego deficitario. Esto confirmó su sensibilidad como indicador integrador del estado hídrico durante el período envero–vendimia, validando parcialmente la hipótesis principal del estudio.

En contraste, el potencial hídrico foliar no exhibió una relación lineal significativa con el $\delta^{13}\text{C}$, debido a la variabilidad microambiental, mecanismos fisiológicos del cultivo para disminuir la evapotranspiración y a los cambios rápidos del Ψ bajo condiciones de alta demanda atmosférica. Esta divergencia refuerza la utilidad del $\delta^{13}\text{C}$ para integrar la señal hídrica acumulada a lo largo del ciclo, superando las limitaciones de los indicadores fisiológicos instantáneos.

En cuanto a la calidad de la fruta, la mayor disponibilidad hídrica favoreció el tamaño y peso de las bayas, pero redujo la concentración de compuestos fenólicos. El efecto en la canopia se evidenció en el incremento de la concentración de clorofila, aumento del área foliar con mayor concentración de macronutrientes en limbo y pecíolo. Por el contrario, los tratamientos con estrés moderado mostraron granos de menor peso, con menor proporción de hollejo y semillas respecto de la baya, más antocianinas y taninos, y una calidad potencial superior para vinificación. Las microvinificaciones confirmaron que estos frutos dieron origen a vinos de mayor intensidad cromática, estructura y

complejidad sensorial, aun cuando las variables fisicoquímicas no mostraron diferencias significativas.

Entre los aportes originales de esta tesis destacan:

1. La generación de umbrales locales preliminares de $\delta^{13}\text{C}$ para Malbec en Mendoza.
2. La demostración de que el $\delta^{13}\text{C}$ refleja el programa real de riego con mayor precisión que Ψ .
3. La integración metodológica de fisiología, isotopía y enología para evaluar el estado hídrico en sistemas productivos reales.
4. La identificación de vínculos entre $\delta^{13}\text{C}$ y atributos de calidad del vino, con potencial para sistemas de trazabilidad.

Los resultados evidencian que el $\delta^{13}\text{C}$ es una herramienta estratégica para la gestión sustentable del riego, la certificación de origen, la viticultura de precisión y la adaptación al cambio climático. Su implementación en fincas y bodegas permitiría optimizar el uso del agua, mejorar la calidad enológica y fomentar la viticultura de precisión en cv. Malbec de regiones áridas.

ABSTRACT

This doctoral thesis evaluated the water status of *Vitis vinifera* cv. Malbec vineyards in the southern oasis of Mendoza using the carbon isotopic ratio $\delta^{13}\text{C}$, with the purpose of analyzing its relationship with vine water status and with grape and wine quality, as well as its potential as a diagnostic tool and an enological traceability indicator. The study integrated measurements of leaf water potential (Ψ), isotopic analyses in leaves and berries, vegetative and productive variables, grape physicochemical composition, and experimental microvinifications.

The planned irrigation treatments were partially modified by extraordinary rainfall associated with the El Niño phenomenon, which reduced the expected differentiation among them. Even so, $\delta^{13}\text{C}$ showed a clear response to gradients in water availability: more negative values in vines with higher water supply and less negative values under deficit irrigation. This confirmed its sensitivity as an integrative indicator of water status during the veraison–harvest period, partially validating the study’s main hypothesis.

In contrast, leaf water potential did not exhibit a significant linear relationship with $\delta^{13}\text{C}$ due to microenvironmental variability, physiological mechanisms of the cultivar that reduce evapotranspiration, and rapid fluctuations in Ψ under conditions of high atmospheric demand. This divergence reinforces the usefulness of $\delta^{13}\text{C}$ in integrating the accumulated water-status signal throughout the growing cycle, overcoming the limitations of instantaneous physiological indicators.

Regarding fruit quality, greater water availability favored berry size and weight but reduced the concentration of phenolic compounds. Canopy effects were also evident in the increased chlorophyll concentration, larger leaf area, and higher macronutrient content in leaf blades and petioles. Conversely, moderate water-stress treatments resulted in smaller berries with a lower proportion of skins and seeds relative to berry mass, higher anthocyanin and tannin levels, and overall superior winemaking potential. Microvinifications confirmed that these grapes produced wines with greater color intensity, structure, and sensory complexity, even when physicochemical variables did not differ significantly among treatments.

The original contributions of this thesis include:

1. The development of preliminary local $\delta^{13}\text{C}$ thresholds for Malbec in Mendoza.
2. The demonstration that $\delta^{13}\text{C}$ reflects the actual irrigation program more accurately than Ψ .
3. The methodological integration of physiology, isotopic analysis, and enology to evaluate vine water status under real production conditions.
4. The identification of links between $\delta^{13}\text{C}$ and wine quality attributes, with potential applications in traceability systems.

The results demonstrate that $\delta^{13}\text{C}$ is a strategic tool for sustainable irrigation management, origin certification, precision viticulture, and climate-change adaptation. Its implementation in vineyards and wineries would help optimize water use, improve enological quality, and promote precision viticulture for Malbec grown in arid regions.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. Contextualización y relevancia del estudio

La vitivinicultura constituye una de las principales actividades económicas, culturales y tecnológicas de la provincia de Mendoza. En un contexto de cambio climático global y crisis hídrica sostenida, caracterizado por un incremento de las temperaturas medias y una disminución de la disponibilidad de agua en las cuencas de riego (Rivera et al., 2021), la gestión eficiente del recurso hídrico se ha vuelto un eje estratégico para la sostenibilidad de los sistemas productivos. En los oasis agrícolas mendocinos, la agricultura de regadío representa la base de la economía regional, y la vid (*Vitis vinifera* L.) —especialmente el varietal Malbec— es el principal cultivo de exportación (Instituto Nacional de Vitivinicultura [INV], 2024). Sin embargo, aún se carece de indicadores integradores que permitan relacionar, de manera cuantitativa y trazable, el estado hídrico de la vid con la calidad enológica del varietal Malbec en condiciones de cultivo árido, lo que justifica la necesidad de este estudio.

El Malbec simboliza la identidad enológica argentina y concentra más del 80% de la superficie cultivada del país en Mendoza. Su posicionamiento internacional depende estrechamente de la calidad de la uva y, por ende, de las condiciones agroecológicas y de manejo bajo las cuales se desarrolla el viñedo (Urvieta et al., 2021). Sin embargo, los escenarios climáticos recientes, con déficits de precipitaciones y caudales hídricos por debajo del percentil de excedencia del 80% (Q80), han generado desafíos sin precedentes para el sector (Boninsegna & Llop, 2015; Rivera et al., 2021). Esta situación impulsa la búsqueda de herramientas que permitan evaluar de forma precisa, rápida y económicamente viable el estado hídrico de las plantas, con el fin de optimizar las estrategias de riego, mejorar la eficiencia en el uso del agua y preservar la calidad enológica de los vinos.

Tradicionalmente, el potencial hídrico foliar medido mediante cámara de presión tipo Scholander ha sido la técnica de referencia para determinar el nivel de estrés hídrico en los viñedos (Mirás-Avalos & Araujo, 2021). Sin embargo, su aplicación resulta limitada en escala productiva debido a su carácter destructivo, su lentitud y su dependencia de condiciones ambientales momentáneas (Rienth & Scholasch, 2019). Frente a estas

restricciones, la determinación de la composición o ratio isotópico de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) en tejidos vegetales emerge como una herramienta alternativa, integradora y menos invasiva, capaz de reflejar la historia fisiológica del estrés hídrico experimentado por la planta (Farquhar et al., 1989; Gaudillère et al., 2002; van Leeuwen & Destrac-Irvine, 2017). También es un parámetro que se puede evaluar en los alcoholes de los vinos generados a partir de las uvas (van Leeuwen et al., 2023, van Leeuwen et al., 2020).

En este marco, la presente tesis doctoral se orienta al estudio de indicadores isotópicos y fisiológicos aplicados a la gestión del riego en viñedos cv. Malbec de la región de San Rafael, Mendoza. El abordaje combina herramientas de la vitivinicultura de precisión y la ecofisiología vegetal, con el propósito de aportar metodologías replicables que favorezcan un manejo sostenible del riego en ambientes áridos.

1.2. Estado del arte

Las condiciones ambientales —principalmente la disponibilidad de agua, el tipo de suelo y el microclima— determinan el crecimiento de la vid, la composición de la baya y las propiedades sensoriales del vino (van Leeuwen & Destrac-Irvine, 2017). Cuando las condiciones ambientales corresponden a un estado de sequía, las plantas responden mediante mecanismos fisiológicos, celulares y moleculares que conducen a la tolerancia o mitigación del estrés hídrico (Dayer et al., 2020, van Leeuwen et al. 2019).

El estrés hídrico moderado puede mejorar ciertos parámetros de calidad, como la concentración de antocianos y fenoles responsables del color y la astringencia; no obstante déficits hídricos severos afectan negativamente el rendimiento y la uniformidad de la madurez (Jaramillo Canseco, 2022). Comprender esta respuesta diferencial resulta esencial para definir estrategias de manejo hídrico que optimicen la calidad sin comprometer la productividad.

En este contexto, los indicadores fisiológicos e isotópicos se han consolidado como herramientas clave para cuantificar la respuesta de la vid al estrés hídrico. Entre ellos, el contenido isotópico de carbono estable ($\delta^{13}\text{C}$) ofrece una medida integrada de la relación entre asimilación de carbono y transpiración, reflejando la eficiencia en el uso del agua (WUE – Water Use Efficiency, por sus siglas en inglés) a lo largo del ciclo (Farquhar et al.,

1989; Medrano et al., 2007; Brillante et al., 2020). Esta propiedad convierte al $\delta^{13}\text{C}$ en un indicador robusto del estado hídrico y en un parámetro de alto valor para el manejo de la vitivinicultura de precisión.

El riego deficitario controlado (RDI -Regulated Deficit Irrigation por sus siglas en inglés) constituye una estrategia ampliamente estudiada que permite regular el vigor vegetativo y mejorar la eficiencia en el uso del agua (Carrizo et al., 2024). Su implementación requiere indicadores fisiológicos fiables que reflejen el nivel real de estrés hídrico de la planta. Entre los métodos directos se encuentran las mediciones de potencial hídrico foliar, conductancia estomática o contenido relativo de agua, mientras que entre los métodos indirectos destacan las aproximaciones isotópicas y espectrales (Martínez, 2018a; Martínez, 2018b, Santesteban et al., 2015).

El análisis isotópico de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) se basa en la discriminación que realiza la enzima RuBisCo entre las formas estables del carbono (^{12}C y ^{13}C) durante la fotosíntesis. Bajo condiciones de estrés hídrico, el cierre estomático reduce la entrada de CO_2 y favorece la fijación del isótopo pesado, enriqueciendo el tejido vegetal en ^{13}C (Brüggemann et al., 2011; Farquhar et al., 1989). De esta forma, el $\delta^{13}\text{C}$ constituye un indicador integrado del balance entre asimilación de carbono y transpiración, es decir, de la eficiencia en el uso del agua (WUE) (Bchir et al., 2016; Medrano et al., 2007).

Diversos estudios internacionales han demostrado la relación entre $\delta^{13}\text{C}$ y el estado hídrico en distintas variedades de vid (Brillante et al., 2020; Costantini et al., 2013; Gaudillère et al., 2002). Sin embargo, la mayoría de las calibraciones disponibles se desarrollaron en viñedos del hemisferio norte, bajo condiciones climáticas, edáficas y genéticas diferentes, por lo que su aplicación directa en regiones del hemisferio sur — como Mendoza— presenta limitaciones y requiere ajustes locales (Urvieta et al., 2021).

En consecuencia, existe un vacío de conocimiento respecto a la calibración local de los valores de $\delta^{13}\text{C}$ y su correlación con parámetros de potencial hídrico foliar, calidad de uva y vino para el varietal Malbec, principal exponente de la vitivinicultura argentina. En síntesis, si bien se reconoce al $\delta^{13}\text{C}$ como un integrador robusto del balance hídrico de la vid, su validación bajo condiciones áridas del sur mendocino continúa siendo incipiente. Esta tesis propone contribuir a dicho conocimiento mediante la generación de umbrales

regionales de $\delta^{13}\text{C}$ que describan el estado hídrico de las cepas en función de distintos niveles de *riego deficitario controlado*, y su relación con las propiedades fisicoquímicas y sensoriales de las bayas y los vinos obtenidos. De este modo, el trabajo se inscribe en la convergencia entre la fisiología vegetal, la enología y la ingeniería de procesos alimentarios, aportando herramientas de trazabilidad y calidad aplicables al sector vitivinícola.

1.3. Objetivos e hipótesis de la tesis

Objetivo general

Evaluar si el $\delta^{13}\text{C}$ constituye un indicador integrador, sensible y operativo del estado hídrico en viñedos de *Vitis vinifera* L. cv. Malbec cultivados en condiciones áridas, y determinar su correspondencia con las cualidades fisicoquímicas y enológicas de uvas y vinos producidos bajo distintos niveles de disponibilidad hídrica.

Objetivos específicos

- Identificar los umbrales de $\delta^{13}\text{C}$ y potencial hídrico foliar de preamanecer y mediodía para viñedos cv. Malbec con distintos niveles de riego deficitario.
- Analizar el $\delta^{13}\text{C}$ como indicador de trazabilidad de uvas desarrolladas bajo diferentes programas de riego, mediante la comparación de resultados analíticos y físicos validados.
- Estudiar la correlación entre $\delta^{13}\text{C}$ y las cualidades fisicoquímicas y sensoriales del vino obtenido a partir de microvinificaciones.
- Comparar los resultados obtenidos con los umbrales extrarregionales y validarlos en el contexto productivo del sur mendocino.

Hipótesis de trabajo

El $\delta^{13}\text{C}$ refleja de manera robusta las condiciones hídricas integradas del viñedo durante la fase madurativa de las uvas, discriminando adecuadamente entre distintos niveles de disponibilidad de agua incluso bajo escenarios climáticos atípicos, y se asocia con atributos de calidad de uvas y vinos. Por ello, se plantea:

- H1: A menor reposición de agua, el valor de $\delta^{13}\text{C}$ aumenta reflejando el estado hídrico del viñedo y sus efectos sobre la calidad de la uva y el vino.
- H2: Los valores elevados de $\delta^{13}\text{C}$ se correlacionan con mayores presiones de vacío en las mediciones de potencial hídrico foliar.
- H3: Las bayas sometidas a estrés hídrico presentan rendimientos menores y modificaciones en la composición fisicoquímica, que influyen positivamente en las características organolépticas del vino.

1.4. Justificación metodológica

La estrategia metodológica seleccionada integra mediciones fisiológicas, isotópicas y enológicas con el fin de capturar tanto la dinámica instantánea como la señal acumulada del estado hídrico del viñedo. Mientras que el potencial hídrico foliar (Ψ) constituye el indicador tradicional para evaluar estrés hídrico, su carácter puntual limita su capacidad para integrar las fluctuaciones ambientales del ciclo fenológico.

Por el contrario, el $\delta^{13}\text{C}$ sintetiza la historia hídrica de la planta durante el período de crecimiento y maduración de las bayas (Brillante et al., 2018, van Leeuwen et al., 2023), permitiendo evaluar la respuesta fisiológica integrada frente a variaciones en el aporte de agua. La complementariedad entre ambos indicadores proporciona un marco robusto para validar localmente la utilidad del $\delta^{13}\text{C}$ como herramienta de diagnóstico.

La inclusión de análisis gravimétricos, composicionales y de microvinificación permite vincular los gradientes hídricos con atributos de calidad de la materia prima y del vino, generando un diseño de investigación integral altamente alineado con la viticultura de precisión en ambientes áridos.

1.5. Aportes y proyección del estudio

El presente trabajo se propone contribuir al desarrollo de indicadores integradores que permitan mejorar la gestión hídrica y la trazabilidad enológicos en viñedos del sur de Mendoza. En particular, se plantea que el $\delta^{13}\text{C}$ puede constituir una herramienta robusta para interpretar el estado hídrico del Malbec bajo condiciones de cultivo árido, así como

para vincular dicha información con atributos fisicoquímicos y sensoriales de uvas y vinos.

Desde el enfoque metodológico, la investigación aspira a generar umbrales regionales de discriminación isotópica que permitan traducir los valores de $\delta^{13}\text{C}$ en clases hídricas útiles para la toma de decisiones en programas de riego deficitario controlado. Estos umbrales, actualmente inexistentes para el hemisferio sur, buscan aportar una base cuantitativa para el manejo de la vitivinicultura de precisión en contextos de limitación hídrica.

Asimismo, el estudio plantea articular información fisiológica, isotópica y enológica con el objetivo de fortalecer la comprensión de la relación entre ambiente, estado hídrico y calidad. La integración de estas dimensiones se proyecta como una herramienta potencialmente transferible al sector productivo, alineada con estrategias de innovación y sostenibilidad promovidas por el Plan Estratégico Vitivinícola Argentino 2030 (PEVI).

1.6. Estructura del manuscrito

El presente manuscrito se organiza en los siguientes capítulos:

- Capítulo 2. Marco Teórico: desarrolla los fundamentos conceptuales de la fisiología hídrica de la vid, el fraccionamiento isotópico del carbono y su aplicación en la vitivinicultura.
- Capítulo 3. Metodología: describe el diseño experimental, los tratamientos de riego, las determinaciones de potencial hídrico, la obtención y análisis isotópico de muestras y los procedimientos de microvinificación y análisis sensorial.
- Capítulo 4. Resultados: presenta los datos experimentales obtenidos, incluyendo las determinaciones de riego y estado hídrico; rendimientos productivos y parámetros de calidad de bayas; características fisicoquímicas y sensoriales; y por último su relación con $\delta^{13}\text{C}$.
- Capítulo 5. Discusión: interpreta los resultados en el marco teórico, destacando las implicancias de los hallazgos para la vitivinicultura regional.

- Capítulo 6. Conclusiones y Proyecciones: sintetiza los aportes científicos y propone futuras líneas de investigación orientadas a la aplicación de técnicas isotópicas y de teledetección en el monitoreo hídrico de precisión.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

1. Contexto histórico y teórico de la disciplina

La vitivinicultura es una de las actividades agrícolas más sensibles a las condiciones climáticas y, en particular, a la disponibilidad de agua en el perfil edáfico. En regiones áridas y semiáridas, como gran parte de las zonas productoras de Mendoza, el manejo del recurso hídrico ha sido históricamente un factor crítico en la determinación de la productividad y la calidad de la uva (Bchir et al., 2016; van Leeuwen & Destrac-Irvine, 2017). El estrés hídrico, definido como la condición en la que la demanda de agua por parte de la planta supera la disponibilidad en el medio, tiene efectos directos sobre la fisiología de la vid, el desarrollo de las bayas y, en consecuencia, en la composición del vino.

En la disciplina de la enología, la evaluación del estado hídrico de la vid se ha abordado tradicionalmente mediante indicadores fisiológicos instantáneos, como el potencial hídrico foliar (Ψ) medido a través de la cámara de presión de Scholander (Girona et al., 2006; Scholander et al., 1965). Estos métodos, si bien confiables y ampliamente utilizados, requieren mediciones frecuentes y son limitados para integrar las variaciones hídricas a lo largo de un ciclo vegetativo completo.

A partir de los años ochenta, el desarrollo de la fisiología isotópica abrió nuevas perspectivas para la evaluación del estado hídrico de los cultivos. Farquhar y Hubick (1989) demostraron que la discriminación isotópica del carbono ($\delta^{13}\text{C}$) en tejidos de plantas C_3 , como la vid, refleja la relación entre la conductancia estomática y la asimilación fotosintética, constituyéndose en un indicador integrador del balance hídrico a lo largo del tiempo. Desde entonces, este enfoque ha ganado relevancia en viticultura y enología, al permitir correlacionar el estado hídrico con la composición de la uva y parámetros enológicos clave (Brillante et al., 2020; Santesteban et al., 2015).

En las últimas décadas, la integración de la viticultura de precisión con herramientas isotópicas ha fortalecido la capacidad de los investigadores y productores para optimizar el riego, especialmente en contextos de escasez hídrica y creciente variabilidad climática (Straffellini et al., 2023). El uso del $\delta^{13}\text{C}$ no solo se ha validado como indicador fisiológico,

sino que también ha demostrado aplicaciones prácticas en la zonificación intra-predial, la trazabilidad de la materia prima y la predicción de la calidad sensorial de los vinos (Bchir et al., 2016; Gowdy et al., 2022a).

En este contexto, el estudio del estado hídrico mediante $\delta^{13}\text{C}$ representa un avance metodológico que vincula la fisiología vegetal, la química isotópica y la enología, consolidándose como un enfoque robusto frente a los desafíos actuales de la vitivinicultura en regiones áridas.

2. Definición de conceptos clave

La comprensión del estado hídrico en la vid y su impacto en la calidad enológica requiere precisar algunos conceptos fundamentales. Estos permiten establecer un marco común para interpretar las metodologías y resultados derivados de la aplicación de indicadores fisiológicos e isotópicos en viticultura.

2.1 Estrés hídrico

El estrés hídrico se define como la condición en la cual la demanda transpiratoria de la planta excede la disponibilidad de agua en el suelo o la capacidad de absorción del sistema radicular (Chaves et al., 2009). En la vid, este fenómeno provoca el cierre parcial o total de los estomas, reducción de la conductancia estomática, limitación en la fotosíntesis y alteraciones metabólicas que repercuten en la acumulación de azúcares, compuestos fenólicos y aromáticos en las bayas (Costa et al., 2020; Medrano et al., 2015). El manejo controlado del estrés hídrico se reconoce como una práctica enológica de interés, ya que un nivel moderado puede mejorar la concentración de metabolitos secundarios y, en consecuencia, la calidad sensorial de los vinos (van Leeuwen et al., 2009).

2.2 Potencial hídrico foliar

El potencial hídrico foliar (Ψ) representa la energía libre del agua en el tejido vegetal y es un indicador directo del estado hídrico de la planta. Puede medirse en distintos momentos del día, siendo los más utilizados el potencial hídrico de preamanecer (Ψ_{pd}) y el potencial hídrico de mediodía (Ψ_{md}). El Ψ_{pd} refleja la disponibilidad de agua en el suelo, mientras que el Ψ_{md} integra tanto la disponibilidad edáfica como la demanda

atmosférica durante el periodo de máxima transpiración (Williams & Araujo, 2002; Girona et al., 2006). Aunque su uso es ampliamente aceptado, la medición requiere equipos específicos y es sensible a la variabilidad espacial y temporal, lo que limita su aplicación para caracterizar el viñedo a gran escala (Acevedo-Opazo et al., 2010; Gambetta et al., 2020).

2.3 Discriminación isotópica de carbono ($\delta^{13}\text{C}$)

El $\delta^{13}\text{C}$ es un indicador fisiológico basado en la proporción relativa de los isótopos estables de carbono ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) en tejidos vegetales. Su fundamento se encuentra en la discriminación isotópica que ocurre durante la fotosíntesis: la enzima RuBisCO discrimina en favor del ^{12}C frente al ^{13}C , y el grado de discriminación depende de la relación entre la concentración interna y externa de CO_2 (Farquhar et al., 1989). Cuando la planta experimenta estrés hídrico y reduce su conductancia estomática, la concentración interna de CO_2 disminuye, lo que reduce la discriminación isotópica y se refleja en valores menos negativos de $\delta^{13}\text{C}$ en los tejidos (Santesteban et al., 2015; van Leeuwen et al., 2023).

Este parámetro se considera un indicador integrador del estado hídrico porque refleja las condiciones de balance hídrico a lo largo de semanas o incluso todo el ciclo de maduración de la baya, a diferencia de las mediciones puntuales como el Ψ (Bchir et al., 2016; Brillante et al., 2020).

2.4 Viticultura de precisión

La viticultura de precisión se define como el conjunto de herramientas y metodologías que permiten manejar el viñedo de manera diferenciada, considerando la variabilidad espacial y temporal de factores edáficos, fisiológicos y climáticos (Bramley & Hamilton, 2007; Ibáñez Pascual, 2025). En este marco, el $\delta^{13}\text{C}$ se ha consolidado como una herramienta útil para identificar zonas de variabilidad hídrica dentro de un viñedo, lo que permite ajustar estrategias de riego y prácticas culturales a nivel subparcela (Brillante et al., 2020). Su aplicación en enología de precisión posibilita vincular la fisiología de la vid con la calidad de la uva y del vino, aportando información clave para la toma de decisiones en regiones de alta presión hídrica, como Mendoza.

A partir de estos conceptos, resulta necesario describir las metodologías específicas que permiten medir el estado hídrico y su traducción en parámetros enológicos.

3. Metodologías de análisis

El estudio del estado hídrico de la vid y su relación con la calidad de la uva y el vino se apoya en una variedad de metodologías fisiológicas, isotópicas y enológicas. Estas técnicas permiten evaluar tanto respuestas inmediatas de la planta como indicadores integradores a lo largo del ciclo vegetativo.

3.1 Medición del potencial hídrico foliar

El potencial hídrico foliar se mide principalmente mediante la cámara de presión de Scholander, que permite cuantificar la presión necesaria para restablecer el flujo de savia en una hoja seccionada (Scholander et al., 1965). Dentro de este enfoque, se distinguen dos indicadores clave:

- Potencial hídrico de preamanecer (Ψ_{pd}): refleja el equilibrio hídrico entre planta y suelo tras la noche, considerado un estimador fiable de la disponibilidad hídrica edáfica (Williams & Araujo, 2002).
- Potencial hídrico de mediodía (Ψ_{md}): integra la demanda evaporativa atmosférica y la capacidad de absorción radicular, proporcionando información sobre el estrés hídrico en condiciones de máxima transpiración (Girona et al., 2006).

Si bien estas metodologías se han consolidado en la viticultura mundial, su limitación principal radica en el carácter instantáneo y espacialmente reducido de las mediciones, lo que dificulta su extrapolación a nivel de viñedo completo (Acevedo-Opazo et al., 2010; Rienth & Scholasch, 2019).

3.2 Determinación isotópica del $\delta^{13}C$

El $\delta^{13}C$ se cuantifica mediante espectrometría de masas de relaciones isotópicas (IRMS, por sus siglas en inglés), a partir de muestras de hojas, bayas o mosto (Farquhar et al., 1989). Este método ofrece una visión integrada del balance hídrico durante el periodo

de síntesis de carbohidratos en los tejidos vegetales, constituyéndose en una alternativa complementaria a las mediciones fisiológicas instantáneas (Santesteban et al., 2015).

Los valores de $\delta^{13}\text{C}$ reflejan el grado de apertura estomática a lo largo del ciclo de maduración: valores más negativos (-27 a -28 ‰) se asocian con condiciones de riego pleno o ausencia de estrés, mientras que valores menos negativos (-23 a -24 ‰) indican estrés hídrico moderado a severo (Bchir et al., 2016; Brillante et al., 2020). Cabe destacar que estos rangos son orientativos y pueden variar según el cultivar, las condiciones edafoclimáticas y el manejo del viñedo. La fortaleza del método reside en su capacidad integradora, aunque su limitación práctica es que solo puede aplicarse a posteriori, sin permitir ajustes inmediatos de riego (Martínez et al., 2018b).

3.3 Zonificación vitícola y viticultura de precisión

El $\delta^{13}\text{C}$ se ha convertido en una herramienta estratégica en la viticultura de precisión, dado que su variabilidad dentro de un viñedo permite identificar zonas de distinta disponibilidad hídrica y, por ende, de calidad diferencial de la uva (Bramley & Hamilton, 2007; Mena Morales et al., 2022). Estudios recientes han mostrado que mapas de $\delta^{13}\text{C}$ en mosto pueden correlacionarse con la variabilidad espacial del potencial hídrico y la conductancia estomática, constituyendo un indicador de zonificación que complementa mediciones tradicionales y teledetección (Brillante et al., 2020; Gowdy et al., 2022).

3.4 Microvinificaciones y análisis de calidad enológica

Para establecer la relación entre el estado hídrico y la calidad del vino, es necesario complementar los indicadores fisiológicos e isotópicos con ensayos de microvinificación. Este tipo de vinificación controlada permite mantener las condiciones experimentales homogéneas, evaluando parámetros fisicoquímicos (azúcares, acidez, polifenoles, antocianos) y sensoriales (aromas, sabor, astringencia) de los vinos producidos bajo diferentes regímenes hídricos (Acevedo-Opazo et al., 2010; Costa et al., 2020; van Leeuwen et al., 2023).

La integración de $\delta^{13}\text{C}$ con microvinificaciones proporciona un enfoque robusto para validar la correspondencia entre el estrés hídrico de la planta y las características enológicas de los vinos, fortaleciendo el potencial del $\delta^{13}\text{C}$ como herramienta de

trazabilidad y predicción de calidad. Sobre esta base metodológica, diversos estudios han explorado la relación entre estado hídrico, $\delta^{13}\text{C}$ y calidad enológica en distintos contextos vitícolas

4. Estudios previos relevantes

El estudio del estado hídrico en viñedos mediante indicadores fisiológicos e isotópicos ha sido objeto de una amplia investigación a nivel internacional. En esta sección se sintetizan los principales avances globales, europeos y locales, con especial énfasis en aplicaciones al varietal Malbec en Mendoza.

4.1 Estudios globales

Diversas investigaciones han validado la relación entre el $\delta^{13}\text{C}$ en mosto o tejidos vegetales y el estado hídrico de la vid. En California, Brillante et al. (2020) demostraron que el $\delta^{13}\text{C}$ en azúcares del mosto se correlaciona estrechamente con el potencial hídrico del tallo (Ψ_{stem}) y la conductancia estomática, confirmando su utilidad como integrador del balance hídrico. De manera complementaria, Gowdy y colaboradores (2022a) evidenciaron que el $\delta^{13}\text{C}$ mantiene su capacidad de discriminar el estado hídrico incluso después de la fermentación, tanto en vinos como en destilados, lo que amplía su aplicación en la trazabilidad enológica.

En otras regiones, Bchir et al. (2016) analizaron el $\delta^{13}\text{C}$ en hojas y mosto de viñedos mediterráneos, concluyendo que este parámetro constituye un indicador robusto de la eficiencia en el uso del agua (WUE) y de la intensidad del estrés hídrico. Resultados similares fueron reportados en contextos semiáridos de España, donde se analizó la relación entre el $\delta^{13}\text{C}$ y la eficiencia en el uso del agua intrínseca, un parámetro altamente dependiente de las condiciones ambientales y representativo del estado hídrico de la cepa. Estos hallazgos refuerzan la aplicabilidad del $\delta^{13}\text{C}$ en escenarios de escasez hídrica (Pons, 2019).

4.2 Estudios europeos

En España, Santesteban y colaboradores (2015) confirmaron que el $\delta^{13}\text{C}$ en mosto constituye un indicador fiable del estado hídrico en variedades como Tempranillo, demostrando correlaciones consistentes con mediciones de Ψ y con índices de vigor de

la vid. En Francia, van Leeuwen et al. (2009) mostraron que el agua disponible para la vid es determinante en la composición final de la uva y del vino, destacando que el control del estrés hídrico mediante indicadores como el $\delta^{13}\text{C}$ resulta esencial para garantizar la calidad enológica bajo escenarios de cambio climático.

Estos estudios europeos han consolidado el $\delta^{13}\text{C}$ como una herramienta práctica para el monitoreo del viñedo, integrable tanto en programas de riego deficitario controlado como en estrategias de viticultura de precisión (van Leeuwen et al., 2020) y evaluación de variedades minoritarias en España (Mena Morales et al., 2022).

4.3 Estudios en Mendoza y Argentina

En la región de Cuyo, particularmente en San Rafael (Mendoza), los estudios sobre el uso del $\delta^{13}\text{C}$ como indicador de estado hídrico son incipientes pero prometedores. Carbajal Ramos (2024) analizó el $\delta^{13}\text{C}$ en bayas durante la vendimia de viñedos cv. Malbec bajo dos colores diferentes de malla antigranizo, demostrando que los valores obtenidos (-26.3 a -27.6 ‰) reflejaban condiciones de riego pleno y ausencia de estrés, en concordancia con los potenciales hídricos medidos. Además, se observó que la aplicación de mallas de cobertura influía en el microclima y en los valores isotópicos, resaltando la sensibilidad del método a variaciones en el manejo cultural.

Por su parte, Urvieta y colaboradores (2021) destacaron la necesidad de contar con indicadores integradores, como el $\delta^{13}\text{C}$, para evaluar sistemáticamente el impacto del manejo del riego en la calidad de la uva y del vino en zonas áridas de Mendoza. Estos aportes resultan especialmente relevantes considerando la creciente presión sobre los recursos hídricos en la provincia y la importancia del Malbec como variedad emblemática de la vitivinicultura argentina (Straffelini et al., 2023).

4.4 Síntesis de los estudios previos

En conjunto, los estudios revisados confirman que el $\delta^{13}\text{C}$ constituye un indicador robusto, integrador y aplicable para caracterizar el estado hídrico del viñedo y su impacto en la calidad enológica. La evidencia global y europea muestra su utilidad tanto en el diagnóstico fisiológico como en la viticultura de precisión y la trazabilidad enológica. En Argentina, aunque la literatura es aún limitada, los avances iniciales en San Rafael validan

la pertinencia de este enfoque para el Malbec (Carbajal Ramos, 2024) y justifican la necesidad de continuar la investigación en condiciones locales. Es indispensable incrementar la cantidad de determinaciones de $\delta^{13}\text{C}$ en Malbec, para generar una base de datos confiables específicas del varietal, dado que a nivel mundial no se dispone en la actualidad.

5. Teorías o modelos aplicables

La interpretación del estado hídrico de la vid a través del $\delta^{13}\text{C}$ se fundamenta en marcos teóricos de la fisiología vegetal y en modelos aplicados al manejo de viñedos. Entre ellos, destacan los modelos de discriminación isotópica de carbono, los enfoques de eficiencia en el uso del agua (WUE) y los sistemas de zonificación vitícola.

5.1 El modelo de Farquhar sobre discriminación isotópica

El marco teórico central proviene del modelo de Farquhar, O'Leary y Berry (1982) y su posterior desarrollo (Farquhar et al., 1989), que describe la discriminación isotópica del carbono durante la fotosíntesis en plantas C_3 . Este modelo sostiene que la proporción de ^{13}C en los tejidos vegetales depende de la relación entre la concentración interna de CO_2 (C_i) y la concentración atmosférica (C_a). Cuando la planta enfrenta estrés hídrico, la disminución de la conductancia estomática reduce C_i , disminuyendo la discriminación isotópica y aumentando los valores de $\delta^{13}\text{C}$ (menos negativos).

Este modelo constituye la base fisiológica que permite utilizar el $\delta^{13}\text{C}$ como indicador retrospectivo del estado hídrico, integrando las condiciones experimentadas por la planta durante el período de síntesis de azúcares (Rienth & Scholasch, 2019).

5.2 Modelos de eficiencia en el uso del agua (WUE)

El $\delta^{13}\text{C}$ se ha vinculado estrechamente con la eficiencia en el uso del agua (WUE), definida como la relación entre la asimilación de carbono y la transpiración (Medrano et al., 2015). Varios estudios han mostrado correlaciones positivas entre el $\delta^{13}\text{C}$ y la WUE en la vid, lo que refuerza su utilidad no solo como indicador de estado hídrico, sino también como predictor de la productividad fotosintética en condiciones de déficit hídrico (Bchir et al., 2016; Flexas et al., 2014).

En este marco, el $\delta^{13}\text{C}$ no solo se interpreta como una señal de estrés, sino también como un indicador de cómo la planta gestiona el balance carbono-agua, lo que resulta fundamental en la viticultura de regiones áridas y semiáridas.

5.3 Modelos de zonificación vitícola y viticultura de precisión

La heterogeneidad edáfica y microclimática de los viñedos ha impulsado el desarrollo de modelos de zonificación vitícola, que integran indicadores fisiológicos, isotópicos y datos de teledetección. El $\delta^{13}\text{C}$ se utiliza como un marcador espacial de disponibilidad hídrica, ya que permite identificar sectores del viñedo con mayor o menor acceso a agua, correlacionándose con diferencias en vigor y calidad de la uva (Bramley & Hamilton, 2004; Brillante et al., 2020).

Estos modelos sostienen la base de la viticultura de precisión, entendida como la gestión diferencial de parcelas intra-viñedo. La incorporación del $\delta^{13}\text{C}$ en este enfoque ha permitido vincular la variabilidad espacial con la calidad enológica, potenciando la capacidad de predicción del estilo y valor comercial del vino (Santesteban et al., 2015).

5.4 Teoría de la adaptación vitícola al cambio climático

Finalmente, la creciente variabilidad climática ha impulsado el desarrollo de modelos de adaptación vitícola, que integran indicadores fisiológicos como el $\delta^{13}\text{C}$ para evaluar la resiliencia del viñedo. En este marco, el $\delta^{13}\text{C}$ se utiliza como un proxy del historial hídrico de la vid que permite evaluar, a escala de parcela y de región, la eficacia de distintas estrategias de manejo frente a escenarios climáticos más extremos. Van Leeuwen y Destrac-Irvine (2017) sostienen que la composición de la uva bajo condiciones de estrés hídrico se modifica sustancialmente, y que indicadores como el $\delta^{13}\text{C}$ permiten guiar prácticas de riego deficitario controlado como herramienta de mitigación frente al cambio climático.

6. La relevancia del caso de estudio en el marco de la literatura

El estudio del estado hídrico en viñedos a través del $\delta^{13}\text{C}$ adquiere una relevancia particular en el contexto de la vitivinicultura argentina, y en especial en el varietal Malbec, que constituye la cepa emblemática del país. Mendoza, y dentro de ella la región de San Rafael, combina condiciones áridas, alta variabilidad climática y dependencia del

riego, lo que la convierte en un laboratorio natural para validar herramientas de diagnóstico hídrico que fortalezcan la sostenibilidad de la producción.

6.1 El Malbec como varietal emblemático

El Malbec representa más del 20 % de la superficie cultivada en Argentina y es el varietal más exportado, constituyendo un símbolo identitario de la vitivinicultura nacional [INV] (INV, 2024). Su desarrollo en regiones áridas de Mendoza ha permitido obtener vinos de alta calidad reconocidos a nivel internacional (Draque et al., 2024). Sin embargo, su producción enfrenta crecientes desafíos debido a la disminución de caudales de riego y al aumento de la frecuencia de sequías, asociados al cambio climático (Aloy et al., 2024).

6.2 La necesidad de indicadores hídricos integradores en Mendoza

La gestión del riego en regiones como San Rafael históricamente se ha basado en calendarios empíricos y disponibilidad de agua de los ríos. Sin embargo, la variabilidad climática y la creciente competencia por el recurso hídrico exigen metodologías más precisas para evaluar el estado hídrico de los viñedos (Urvieta et al., 2021). En este sentido, el $\delta^{13}\text{C}$ se presenta como un indicador complementario a los métodos fisiológicos tradicionales, con la ventaja de integrar la respuesta de la planta a lo largo del ciclo productivo.

Estudios locales han demostrado que el $\delta^{13}\text{C}$ en mosto de Malbec refleja fielmente las condiciones de riego y cobertura en San Rafael, validando su aplicación en la vitivinicultura regional (Carbajal Ramos, 2024). Estos resultados, en concordancia con estudios internacionales (Brillante et al., 2020; Santesteban et al., 2015), indican que el $\delta^{13}\text{C}$ puede convertirse en una herramienta clave para la viticultura de precisión en zonas áridas.

6.3 Conexión con la literatura internacional

A nivel global, el $\delta^{13}\text{C}$ se ha consolidado como un indicador robusto de estrés hídrico y calidad enológica en variedades como Cabernet Sauvignon, Tempranillo y Shiraz (van Leeuwen et al., 2009; Cernusak et al., 2017; Bchir et al., 2016). Sin embargo, aún existen pocas investigaciones aplicadas al Malbec, lo que resalta la originalidad y necesidad del presente estudio. La validación local de umbrales de $\delta^{13}\text{C}$ en relación con potenciales

hídricos y parámetros de calidad permitirá integrar al varietal Malbec en Mendoza a la discusión internacional sobre el uso de isótopos estables en la viticultura.

6.4 Implicancias prácticas y científicas

La aplicación del $\delta^{13}\text{C}$ en viñedos de Malbec en San Rafael ofrece implicancias prácticas directas:

- optimizar el uso del agua en un contexto de escasez,
- mejorar la trazabilidad y zonificación vitícola,
- y fortalecer la calidad diferencial del vino argentino en mercados internacionales.

Al mismo tiempo, este caso de estudio aporta implicancias científicas, al generar conocimiento local que dialoga con marcos teóricos globales, consolidando el papel de Argentina en la investigación sobre viticultura en condiciones áridas.

En este sentido, el presente trabajo se ubica en la intersección entre la fisiología vegetal, la enología y la gestión sostenible del recurso hídrico, contribuyendo a la innovación metodológica y a la resiliencia del sector vitivinícola frente a los desafíos del cambio climático.

7. Síntesis y cierre del Marco Teórico

La revisión de la literatura realizada permite situar al presente estudio en un marco teórico sólido que integra la fisiología vegetal, la química isotópica y la enología, con especial foco en el contexto de la vitivinicultura argentina y, en particular, en el varietal Malbec cultivado en Mendoza.

7.1 Avances conceptuales y metodológicos

El análisis histórico mostró que el estudio del estado hídrico en viticultura se ha apoyado tradicionalmente en mediciones fisiológicas puntuales, como el potencial hídrico foliar de preamanecer y mediodía, obtenidas mediante la cámara de Scholander (Scholander et al., 1965; Williams & Araujo, 2002). Estas herramientas, aunque ampliamente utilizadas y validadas, presentan limitaciones asociadas a su carácter instantáneo, la necesidad de instrumentación específica y la dificultad de extrapolarlas a la escala completa de un viñedo (Rienth & Scholasch, 2019). Esto conlleva a evaluar alternativas

de gestión de los viñedos para mitigar los efectos de la variabilidad climática sobre el rendimiento del cultivo, composición de bayas y vinos (Clara et al., 2023).

En este contexto, la introducción del $\delta^{13}\text{C}$ como indicador isotópico constituyó un cambio de paradigma, al permitir integrar en una sola medida la respuesta hídrica de la planta a lo largo de un periodo prolongado, como es el ciclo de maduración de las bayas. Fundamentado en el modelo fisiológico de Farquhar et al. (1989), este enfoque explica cómo la discriminación isotópica se reduce bajo condiciones de déficit hídrico, lo que se refleja en valores menos negativos de $\delta^{13}\text{C}$. De esta manera, el parámetro se ha validado como un indicador retrospectivo y robusto del estado hídrico en la vid (Santesteban et al., 2015; Brillante et al., 2020).

Asimismo, la literatura internacional ha demostrado la relación estrecha entre el $\delta^{13}\text{C}$ y la eficiencia en el uso del agua (WUE) (Medrano et al., 2015; Bchir et al., 2016), consolidando su relevancia no solo para el diagnóstico fisiológico, sino también como predictor del rendimiento y la calidad de la uva en condiciones de escasez hídrica.

7.2 Aportes de los estudios previos

Los estudios globales y europeos revisados confirman que el $\delta^{13}\text{C}$ en mosto, hojas o vinos es un indicador fiable del estado hídrico y de la eficiencia fisiológica de la vid (van Leeuwen et al., 2009; Gowdy et al., 2022a). Su utilidad se ha demostrado en variedades de gran difusión internacional, como Tempranillo, Cabernet Sauvignon y Syrah, en diversos contextos climáticos.

Por otra parte, investigaciones recientes han ampliado su aplicación hacia la viticultura de precisión, donde el $\delta^{13}\text{C}$ se emplea para zonificar viñedos y detectar variabilidad intra-parcelaria (Martínez et al., 2018a), constituyéndose en una herramienta de gestión diferenciada que complementa la teledetección y otros indicadores fisiológicos (Bramley & Hamilton, 2004; Brillante et al., 2020).

En el caso de Mendoza, los estudios son todavía incipientes pero reveladores y la viticultura de precisión es un área fundamental para el conocimiento del terroir (Urvieta et al., 2021). De manera específica, la tesis de Carbajal Ramos (2024) validó el $\delta^{13}\text{C}$ como un indicador integrador del estado hídrico en viñedos de San Rafael en concordancia con

valores de potencial hídrico foliar, y mostró que el manejo de coberturas con mallas plásticas antigranizo influye significativamente en los valores isotópicos. Estos hallazgos constituyen un antecedente directo para la presente investigación.

7.3 Vacíos de conocimiento y originalidad del estudio

A pesar de los avances, persisten vacíos de conocimiento que justifican la realización del presente estudio:

1. La mayor parte de la literatura se concentra en variedades europeas (Tempranillo, Cabernet Sauvignon, Syrah), mientras que el Malbec —varietal insignia de Argentina— cuenta con menos estudios específicos sobre $\delta^{13}\text{C}$.
2. En el contexto de Mendoza, los trabajos disponibles son aún limitados en número y cobertura espacial, lo que impide definir umbrales locales de referencia para interpretar el $\delta^{13}\text{C}$ en términos de estrés hídrico.
3. Son escasas las investigaciones que relacionen sistemáticamente el $\delta^{13}\text{C}$ con parámetros fisicoquímicos y sensoriales de microvinificaciones de Malbec, lo cual es clave para validar su aplicabilidad en la enología de precisión.

Este proyecto contribuye, por tanto, a llenar dichos vacíos al generar conocimiento original y contextualizado en la región de San Rafael, ampliando la base de datos sobre $\delta^{13}\text{C}$ en Malbec y fortaleciendo la capacidad de la vitivinicultura argentina para enfrentar escenarios de cambio climático y escasez hídrica.

7.4 Justificación metodológica

La articulación de indicadores fisiológicos instantáneos (Ψ_{pd} , Ψ_{md}) con indicadores integradores como el $\delta^{13}\text{C}$ responde a la necesidad de contar con herramientas complementarias que capturen tanto la dinámica diaria como la respuesta acumulada del viñedo. Este enfoque metodológico mixto permite:

- Validar el $\delta^{13}\text{C}$ como indicador retrospectivo a través de su correlación con mediciones tradicionales de potencial hídrico.
- Establecer umbrales locales de $\delta^{13}\text{C}$ para caracterizar diferentes niveles de estrés hídrico en Malbec.

- Relacionar los valores isotópicos con la composición fisicoquímica y sensorial de los vinos obtenidos en microvinificaciones, lo que refuerza la aplicabilidad práctica en la industria.

La literatura internacional ofrece un marco de referencia sólido, pero la adaptación de estos enfoques al contexto local es indispensable para asegurar su pertinencia. En este sentido, la investigación propuesta no solo es relevante para Mendoza, sino que también aporta al debate global sobre la gestión del agua en viticultura bajo escenarios de cambio climático (van Leeuwen & Destrac-Irvine, 2017).

7.5 Relevancia científica y práctica

El presente trabajo posee una doble relevancia: científica y aplicada. Desde el plano científico, aporta conocimiento novedoso sobre la relación entre la composición isotópica del carbono ($\delta^{13}\text{C}$), el estado hídrico de la vid y la calidad enológica en viñedos de *Malbec* bajo condiciones áridas. Al integrar enfoques de ecofisiología vegetal y enología de precisión, profundiza la comprensión de cómo la gestión del riego modula no solo el desempeño fisiológico de la planta, sino también las características sensoriales y químicas del vino.

Desde una perspectiva práctica, ofrece un valor concreto para productores, enólogos y técnicos vitivinícolas. El $\delta^{13}\text{C}$ se consolida como una herramienta confiable para el monitoreo retrospectivo del estado hídrico del viñedo y, al mismo tiempo, como un predictor temprano de la calidad potencial del vino. Esta capacidad predictiva resulta estratégica: permite optimizar el uso del agua —un recurso crítico en regiones áridas—, fortalecer la toma de decisiones en el viñedo y en la bodega, incrementar la competitividad del sector y, en última instancia, reforzar la trazabilidad y autenticidad de los vinos argentinos en mercados internacionales cada vez más exigentes.

7.6 Transición hacia la metodología

El marco teórico desarrollado permite sostener que el $\delta^{13}\text{C}$ es un indicador robusto, integrador y aplicable al estudio del estado hídrico de viñedos cv. *Malbec* en San Rafael. No obstante, para su validación es necesario diseñar una estrategia metodológica que combine mediciones fisiológicas, isotópicas y enológicas.

El capítulo siguiente se enfocará en describir la metodología propuesta, la cual integra:

- mediciones de potencial hídrico foliar en distintos momentos del día,
- análisis isotópico de $\delta^{13}\text{C}$ en hojas y bayas,
- control de maduración y atributos de uvas,
- y microvinificaciones experimentales para correlacionar estos indicadores con parámetros fisicoquímicos y sensoriales del vino.

Esta aproximación permitirá establecer umbrales locales de $\delta^{13}\text{C}$ y evaluar su correspondencia con la calidad del Malbec, contribuyendo a la vitivinicultura de precisión en regiones áridas.

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

La metodología aplicada en este estudio se estructuró para evaluar el estado hídrico de viñedos *Vitis vinifera* L. cv. Malbec mediante la integración de indicadores fisiológicos, productivos y de calidad de la uva y del vino, con especial énfasis en el análisis isotópico del carbono ($\delta^{13}\text{C}$). El diseño experimental contempló un manejo controlado del riego por goteo, permitiendo establecer condiciones diferenciadas de disponibilidad hídrica. Se relevaron variables en planta, incluyendo estado hídrico, área y densidad foliar, contenido de clorofila, parámetros de rendimiento y equilibrio vegetativo-productivo. Al finalizar la temporada en vendimia, se realizaron microvinificaciones para evaluar la influencia de las condiciones hídricas sobre la composición fisicoquímica, colorimétrica y sensorial del vino. Finalmente, se aplicaron métodos estadísticos multivariados para analizar las interrelaciones entre las variables y explorar el potencial del $\delta^{13}\text{C}$ como biomarcador del uso de agua y de la calidad enológica. Esta sección describe con detalle los procedimientos experimentales y analíticos aplicados, asegurando su reproducibilidad y la validez de los resultados.

La naturaleza multivariable del presente estudio, orientado a evaluar el estado hídrico de viñedos *Vitis vinifera* L. cv. Malbec y su relación con la calidad de la uva y del vino, plantea un escenario de alta complejidad matemática y estadística. Esta complejidad surge de la interacción entre factores fisiológicos, isotópicos y enológicos, cuya integración en un modelo holístico global excede las posibilidades prácticas de un diseño factorial completo, tanto por la magnitud de las combinaciones como por las restricciones operativas en condiciones de campo.

En virtud de ello, se optó por una estrategia metodológica basada en diseños parciales y análisis multivariado posterior, que permite abordar el problema de manera sistemática sin comprometer la robustez estadística. El diseño experimental se estructuró en torno a un factor independiente principal: el régimen de riego, aplicado en cuatro niveles (100%, 80%, 60% y 40% de la evapotranspiración del cultivo, ETc), ajustados según las condiciones climáticas y edáficas. Este enfoque responde a criterios fundamentados de manejo hídrico, considerando la condición fisiológica de la planta, las características del suelo y las variables climatológicas históricas.

Las variables de respuesta incluyeron la composición isotópica del carbono ($\delta^{13}\text{C}$) en hojas y bayas, y el potencial hídrico foliar (Ψ), indicadores clave del estado hídrico. Paralelamente, se definieron clústeres de variables regresoras agrupadas en dos grandes categorías:

- Grupo Planta, que comprende indicadores fisiológicos y productivos (estado hídrico, área y densidad foliar, contenido de clorofila, parámetros de rendimiento, equilibrio vegetativo-productivo y composición fisicoquímica de bayas).
- Grupo Vino, que incluye variables cualitativas y cuantitativas del producto final (composición fisicoquímica, parámetros colorimétricos y perfil sensorial), obtenidas mediante microvinificaciones experimentales.

La integración de estos grupos se realizó mediante modelos lineales generales y mixtos (MLGM) para evaluar efectos fijos (tratamiento) y aleatorios (bloques), complementados con análisis multivariados (distancia euclídea, ACP, ACM) y correlaciones para explorar las interrelaciones entre variables y validar el potencial del $\delta^{13}\text{C}$ como biomarcador del uso de agua y de la calidad enológica.

Este enfoque metodológico se justifica por su capacidad para: capturar la complejidad del sistema viñedo–vino sin sobredimensionar el diseño experimental, permitir la integración de indicadores instantáneos y retrospectivos del estado hídrico y generar información robusta y transferible para la viticultura de precisión en regiones áridas, contribuyendo a la sostenibilidad del manejo hídrico y la mejora de la calidad enológica.

1.1 Metodología del diseño experimental

Durante el reposo invernal, se realizó la poda manual de todas las plantas. Se registró el peso de los sarmientos de un año mediante una balanza digital (TGimportacion, mod. 50 K, Buenos Aires, Argentina). A partir de estos datos, los modelos lineales se utilizaron para verificar la homogeneidad inicial en vigor y peso de poda entre plantas antes de conformar los bloques. El peso de poda de invierno se utilizó como proxy del vigor estructural previo a la temporada, siguiendo criterios establecidos en investigaciones ecofisiológicas de la vid. Este indicador refleja la capacidad de crecimiento acumulado

del ciclo anterior y permite conformar bloques homogéneos antes de la asignación de tratamientos. La verificación estadística de esta homogeneidad mediante modelos lineales mixtos garantiza la robustez del diseño experimental. Con base en esta información, se seleccionaron las cepas para el ensayo experimental mediante modelos lineales generales y mixtos, conformando bloques con parcelas asignadas al azar según tratamientos de riego. Para la implementación en campo se adaptó la red de riego por goteo mediante derivaciones con válvulas esféricas. El análisis edáfico previo permitió asegurar homogeneidad entre bloques. Posteriormente, se definió la lámina de agua y la frecuencia de aplicación, de acuerdo con principios de manejo hídrico orientados a la calidad enológica (van Leeuwen & Destrac-Irvine, 2017).

1.2 Planta

Se determinaron los conjuntos de variables vegetativas: estado hídrico (Ψ_{pd} , Ψ_{md} e integral de estrés), área y densidad foliar, y contenido de clorofila; reproductivas (número de racimos y rendimiento por planta); de equilibrio vegetativo-productivo (índice de área foliar por kg de uva); de maduración (seguimiento semanal de peso de baya, sólidos solubles, pH y acidez titulable); de madurez y calidad de la uva en vendimia (peso y diámetro de baya, clase modal, relaciones hollejo/baya y semilla/baya, y composición polifenólica de hollejos); nutrición foliar (N, P, K) y composición isotópica de carbono ($\delta^{13}C$) en hojas y bayas (Choné, 2001; Coombe & McCarthy, 2000; Gaudillère et al., 2002; Kliewer & Dokoozlian, 2005; Parry et al., 2014).

1.2.1 Variables vegetativas

Las variables vegetativas son indicadores fisiológicos y morfológicos que describen el crecimiento y desarrollo de la parte no reproductiva de la vid (hojas, tallos, raíces y brotes). El nivel de estrés hídrico soportado por la vid es un factor determinante de su respuesta fisiológica y, por tanto, productiva y cualitativa (Choné, 2001; Flexas et al., 2010; Yuste et al., 2023b). Estas variables permiten estimar el vigor, la eficiencia fotosintética y la capacidad de adaptación de la vid bajo diferentes condiciones ambientales. El contenido de clorofila foliar (LCC) es un indicador clave del estado nutricional y fisiológico de la planta, (Li et al., 2025). La determinación del área foliar es necesaria para caracterizar el desarrollo vegetativo, y es usada ampliamente en modelos

fotosintéticos y predicción de producción; evaluación de los sistemas de conducción y poda, manejo de cultivo y diseño de riego (Netzer & Ohana-Levi, 2025; Rodríguez Plaza et al., 2013).

- Estado hídrico del viñedo

El estado hídrico del cultivo se determinó mediante la técnica de Schölander (Schölander et al., 1965), para la extracción de hojas para la determinación del potencial hídrico foliar. Se estableció un recorrido de muestreo estandarizado con el fin de optimizar los tiempos de registro y reducir la variabilidad. En el callejón principal se instaló la cámara de presión, con el tanque de provisión de nitrógeno, a donde se trasladaron inmediatamente las muestras foliares para su lectura. Los muestreos se llevaron a cabo en dos momentos del día: preamanecer (Ψ_{pd}) y mediodía (Ψ_{md}), condiciones ampliamente utilizadas para evaluar el estado hídrico en vid (Choné, 2001; Girona et al., 2005; Rienth & Scholasch, 2019). Se utilizó una cámara de presión Modelo 2, marca Bio-control, escala de 0 a 4 MPa, Industria Argentina.

- Potencial hídrico foliar preamanecer (Ψ_{pd})

El estado hídrico del viñedo antes del amanecer fue evaluado a las 4:00 h, horario en el cual las plantas alcanzan la máxima rehidratación y equilibrio con el potencial hídrico del suelo (Williams & Araujo, 2002)). Para las determinaciones se seleccionaron hojas sanas, enteras, de la parte media de la canopia. Las hojas se trasladaron en bolsas plásticas herméticamente cerradas para preservar su humedad. En cada hoja recién escindida se cortó el pecíolo, generando una superficie uniforme que facilitó la visualización del flujo de savia. Cada hoja fue introducida en la cámara de presión cuidando su integridad estructural. Una vez cerrado y sellado herméticamente, se introdujo nitrógeno gaseoso hasta que se percibió la aparición de agua en el extremo del pecíolo que quedó fuera de la cámara. La observación se asistió con linterna portátil para mayor precisión (Figura 3.1). Se detuvo el flujo gaseoso y se anotó la presión necesaria para la extracción del agua de acuerdo con la lectura del manómetro. Esa presión de equilibrio se corresponde, con signo contrario, al potencial hídrico de la planta. Se generó una planilla de registro de datos diarios y de temporada envero-vendimia.



Figura 3.1. Medición potencial hídrico foliar preamanecer. Fecha 06/03/2024.

- Potencial hídrico foliar de mediodía (Ψ_{md})

Las determinaciones se realizaron los mismos días que las mediciones de preamanecer, a las 12:00 h, coincidiendo con el momento de mayor demanda evaporativa y severidad del estrés hídrico (Williams & Araujo, 2002; Medrano et al., 2015). Se tuvieron en cuenta los pronósticos climatológicos de la región para la definición de las fechas de lectura, respetando la frecuencia semanal y priorizando condiciones de cielo totalmente soleado.

Para la determinación del potencial hídrico de mediodía se seleccionó una hoja madura, sana, de la zona media y expuesta al sol de cada planta de acuerdo con el recorrido de muestreo. Las hojas fueron cortadas y trasladadas rápidamente en doble bolsa (una transparente y otra negra) para resguardarlas de la luz y asegurar el cierre estomático. El procedimiento de lectura en cámara de presión fue idéntico al descrito para las mediciones de preamanecer (Figura 3.2). El período de lecturas se completó en aproximadamente de una hora desde la primera a la última muestra, a fin de minimizar la variabilidad ambiental entre mediciones. Para alcanzar estos límites temporales, se diseñó un muestreo de hojas por parcela que minimizara las distancias recorridas entre la cepa y el equipo de medición.



Figura 3.2. a) Cámara Scholander para medición de potencial hídrico foliar con tanques de suministro de N₂. b) Carga de la hoja en cámara de presión c) Lectura de estado hídrico -0.98 MPa (sin estrés hídrico).

○ Análisis de potencial hídrico foliar: Integral de estrés hídrico

Para evaluar el estrés hídrico a lo largo de la temporada de crecimiento, se trabajó con la integral de estrés hídrico ($S\Psi$) (Myers, 1988). La $S\Psi$ (3.1) expresa la intensidad del estrés experimentado por cada tratamiento al integrar la duración y magnitud del déficit hídrico por debajo de un umbral de Ψ_{pd} y Ψ_{md} (Girona et al., 2006; Santesteban et al., 2011). Se estimó a partir de t mediciones de potencial hídrico foliar realizadas a intervalos regulares de n días mediante la fórmula:

$$S\Psi = \left| \sum_{i=0}^{i=t} (\Psi_{(i,i+1)} - c) \cdot n \right| \quad (3.1)$$

Donde $\Psi (i, i+1)$ es el Ψ medio para cualquier intervalo $i, i+1$ y c es la Ψ máximo medido, n los días transcurridos. En este caso, para el valor c se utilizó el -0,10 MPa en preamanecer y -0,92 MPa para mediodía. El $S\Psi$ se expresa en valores absolutos (MPa); los valores más altos representan un estrés hídrico más severo. Ante evaluaciones longitudinales que abarquen múltiples periodos, la variable c corresponderá al Ψ máximo alcanzado a lo largo de la extensión cronológica de la investigación.

- Área y densidad foliar

El mismo día de la vendimia, se seleccionó una planta por parcela, y de la cual se extrajeron y pesaron todas las hojas primarias y secundarias (Figura 3.3). Se almacenaron y conservaron en cámara frigorífica a 4 °C hasta el procesamiento de estas. Para la determinación, se retiró cuidadosamente el pecíolo de cada hoja y se dispusieron sobre una superficie blanca de 1,2 m². Se registraron dos imágenes con vista superior hasta completar la totalidad de las hojas de las dos clases. Las imágenes fueron procesadas con la aplicación Genius Scan para estandarizar dimensiones y, posteriormente, analizadas con el software CobCal (Figura 3.4), ajustando contraste y colorimetría para estimar el área cubierta. Por cada unidad experimental se realizó la sumatoria de las superficies parciales para calcular en m² el área foliar primaria (AFP), secundaria (AFS) y total (AFT). A partir de la relación entre el área foliar y el peso se calculó la densidad foliar expresadas en m²/g (Netzer & Ohana-Levi, 2025a; Rodríguez Plaza et al., 2013).



Figura 3.3. Muestreo foliar para la determinación de la superficie de hojas primarias y secundarias.

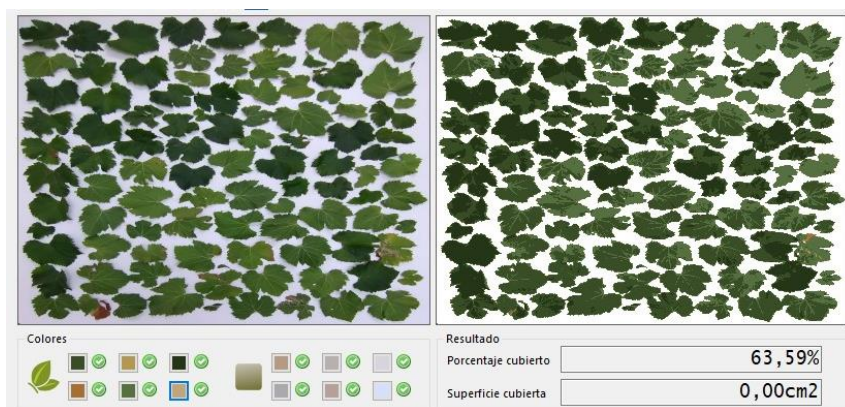


Figura 3.4. Cálculo de porcentaje de área a partir del programa CobCal con ajuste de colorimetría y contraste de fotografías.

- Clorofila

Para determinar la concentración de clorofila, se utilizó un método óptico no destructivo empleando un medidor portátil de clorofila (MC-100, Apogee Instruments Inc., Logan, UT, USA).

Las mediciones se realizaron en hojas sanas, completas y expuestas al sol, antes de su extracción para la determinación del potencial hídrico foliar de mediodía (Figura 3.5). El instrumento fue configurado para promediar tres lecturas por hoja. Los resultados se expresaron en unidades de μmol de clorofila por m^2 .

Dado que el muestreo coincidió con las hojas utilizadas en la determinación de potencial hídrico, se analizó además la relación entre ambas variables fisiológicas (Caruso et al., 2023; Cerovic et al., 2012; Parry et al., 2014).



Figura 3.5. a) Lectura de concentración de clorofila con medidor portátil. b) Lectura final del instrumento de medición.

1.2.2 Variables de rendimiento

Se puede definir el rendimiento de la vid como el resultado de varios componentes reproductivos, cuya interacción determina la producción anual por planta y por hectárea. El rendimiento de la vid incluye principalmente el número de brotes por vid, brotes por brote, racimos por brote y bayas por racimo, además del peso de la baya (Keller, 2020; Keller, 2015; Ollat et al., 2015).

Estas variables se evaluaron en la vendimia. El muestreo se realizó en las tres plantas centrales de cada parcela, determinándose las siguientes variables:

- Número promedio de racimos

Se contabilizaron todos los racimos por planta. Y por parcela se calculó el número promedio mediante el Software InfoStat.

- Rendimiento de planta

Esta variable expresa el total de producción de uvas por planta. Los racimos cosechados fueron pesados en recipientes con tara especificada, utilizando una balanza digital (TGimportacion, mod. 50 K, Buenos Aires, Argentina). Se registraron los pesos parciales en planillas y los datos fueron procesados con el Software InfoStat.

- Peso promedio de racimos planta

El peso promedio de racimos por planta se calculó como la relación entre el rendimiento y el número total de racimos por planta.

1.2.3 Equilibrio vegetativo/productivo

La relación entre el área foliar y la producción de uvas, expresada como Índice de Índice de Área Foliar (IAF), es crucial para la calidad del vino, ya que afecta la exposición solar y la fotosíntesis que influyen en la maduración y características de la uva (Kliewer & Dokoozlian, 2005). El IAF constituye una métrica fisiológica clave en viticultura, asociada a la salud de la vid, el rendimiento y la respuesta a factores ambientales y prácticas de manejo (Netzer & Ohana-Levi, 2025). Un rango óptimo de 1.0 a 1.5 m² de área foliar por kg de uva es ideal, aunque puede variar según las condiciones climáticas, el portainjerto y el sistema de conducción. El objetivo es alcanzar un equilibrio que garantice suficiente actividad fotosintética para la maduración de la fruta, evitando un exceso de sombreado que reduzca la calidad (Ollat et al., 2015).

1.2.4 Control de maduración

La maduración del fruto comienza en el envero y se asocia con cambios fisiológicos y bioquímicos tales como el ablandamiento de la pulpa, el engrosamiento del hollejo, la acumulación de azúcares, antocianinas y taninos, el aumento del pH y la disminución de la acidez y de los compuestos herbáceos. La composición del fruto en la cosecha varía considerablemente, tanto dentro de un viñedo como entre viñedos, y entre años, debido

a las diferencias en la madurez y a la influencia de factores ambientales como la luz, la temperatura, el estado hídrico y nutricional. Asimismo, influyen variables de manejo como la carga de cultivo y el portainjerto (Keller, 2020). La composición de la baya, y consecuentemente la calidad del vino, está determinada fundamentalmente por el equilibrio entre el rendimiento y el desarrollo vegetativo, así como por el microclima del dosel vegetal (van Leeuwen et al., 2009) y la disponibilidad de nutrientes del suelo (Spangenberg & Zufferey, 2023).

Para controlar el proceso de maduración de los viñedos, se realizaron los análisis de rutina conforme con los procedimientos vigentes (Vila, 2009).

Debido a las características destructivas de los ensayos, se dispusieron cinco cepas por unidad experimental, distintas a las destinadas a medición de isótopos y potencial hídrico foliar, para el seguimiento de bayas. Se realizaron muestreos en diez fechas, con frecuencia semanal (Figura 3.6). Los ensayos incluyeron: peso de baya, sólidos solubles, pH y acidez total.

La muestra de bayas se conformó de 30 unidades, extraídas en forma aleatoria de los racimos de cinco plantas por unidad experimental. Las bayas se almacenaron en bolsas plásticas rotuladas, cuidando que no se rompieran durante el transporte al laboratorio.



Figura 3.6. a) Inicio de seguimiento en enero. b) Muestreo de bayas. c) Uvas clasificadas por parcela.

- Peso de baya

Los pedúnculos de cada baya fueron recortados y se eliminaron restos sólidos (hojas, tierra u otros contaminantes). Posteriormente, se pesaron en una balanza digital de alta

precisión (Denver Instrument, modelo APX-203, de capacidad de 200 g., precisión 0.001 g, Estados Unidos). Se registraron los pesos 9 totales y se calculó el peso promedio por baya mediante planilla de cálculo (Coombe & McCarthy, 2000).

- Sólidos solubles

Tras el pesaje, cada muestra fue molida manualmente dentro de su bolsa plástica para evitar la contaminación cruzada. Se utilizó un refractómetro autocompensado por temperatura, (ATC-1E, ATAGO, Tokio, Japón), con resolución de lectura 0,1 °Brix. Antes de cada serie de mediciones se calibró el refractómetro con agua destilada (0 °Brix). Posteriormente, se colocaron gotas de mosto fresco sobre el prisma y se leyó directamente el valor en el visor. El refractómetro se enjuagó con agua destilada y se secó con papel libre de pelusas entre cada determinación.

- pH

El pH se determinó mediante un peachímetro digital (827PHLAB, METROHM, Herisau, Suiza). El equipo fue calibrado antes de cada serie con soluciones buffer pH 4.0 y 7.0, enjuagando el electrodo con agua destilada y secándolo cuidadosamente. El mosto se obtuvo por molienda manual de las bayas en un vaso de precipitado; el electrodo se introdujo en el jugo sobrenadante para realizar la lectura directa. Todos los datos se registraron en planillas.

- Determinación de acidez total

La acidez total se determinó por titulación: se tomaron 10 mL de jugo, se diluyeron con 40–50 mL de agua destilada y se adicionaron 2–3 gotas de azul de bromotimol como indicador. La muestra se tituló con NaOH N/10 hasta el viraje a verde-azulado, registrándose el volumen consumido. Los resultados se expresaron como g de ácido tartárico por litro de mosto (OIV, 2021). Se calculó la acidez total de acuerdo con:

$$\text{Acidez total} \left(\text{g ácido tartárico} * \frac{\text{L}^{-1}\text{mosto}}{\text{vino}} \right) = 0.75 * n \quad (3.2)$$

Donde:

n: gasto en ml de la solución de NaOH N/10

1.2.5 Control de madurez

La composición física y química de las bayas en la cosecha determina su calidad para el consumo en fresco o el procesamiento, (Keller, 2020). Se determinaron las mismas variables evaluadas en el control de maduración (peso de baya, sólidos solubles, pH y acidez total), además de las variables relacionadas con la granulometría; relaciones gravimétricas hollejo/baya y semilla/baya; y composición polifenólica de hollejos.

- Determinación de clase modal, diámetro y peso medio de baya

Se siguió el procedimiento de Vila y colaboradores (2009). En vendimia se muestrearon 200 bayas sanas, con pedicelo cortado de manera uniforme, que fueron pesadas en una balanza digital de alta precisión (Denver Instrument, modelo APX-203, capacidad 200 g, precisión 0.001 g, EE. UU.). El peso promedio se calculó como la relación entre el peso total y el número de bayas (3.3). Posteriormente, las bayas se clasificaron mediante un juego de cinco tamices de diámetros decrecientes (17, 15, 13, 11 y 9 mm) (Figura 3.7). La clase modal se definió como el grupo de bayas retenidas en el tamiz de mayor frecuencia. La muestra se almacenó en bolsas plásticas rotuladas y conservadas a -21°C.



Figura 3.7. Juego de tamices de madera con bayas retenidas de acuerdo con el diámetro (clase modal: diámetro de baya 11 mm).

$$\text{Peso medio de baya (g)} = \frac{\text{peso de 200 bayas (g)}}{200} \quad (3.3)$$

- Determinación de las relaciones hollejo/baya y semilla/baya

Las proporciones de hollejo y semilla respecto al peso total de la baya se calcularon siguiendo el procedimiento de Vila y colaboradores (2009). Se tomaron al azar 30 bayas de la clase modal conservada en freezer. Se registró el peso inicial. A cada grano se le separó el hollejo con bisturí, evitando restos de pulpa (Figura 3.8). Luego se separaron las semillas, que fueron contadas y secadas junto con los hollejos con papel absorbente. Finalmente, hollejos y semillas se pesaron en una balanza analítica (Denver Instrument, modelo APX-203, de capacidad de 200 g., precisión 0.001 g, Estados Unidos). Con los pesajes por componente, se calcularon las siguientes relaciones:

$$\text{Peso medio de hollejo por baya (g)} = \frac{\text{peso hollejo de 30 bayas (g)}}{30} \quad (3.4)$$

$$\text{Peso medio de semilla por baya (g)} = \frac{\text{peso de semillas de 30 bayas (g)}}{30} \quad (3.5)$$

$$\text{Relación } \frac{\text{hollejo}}{\text{Kg uva}} \left(\frac{\text{g}}{\text{Kg uva}} \right) = \frac{(B \cdot 1000)}{A} \quad (3.6)$$

$$\text{Relación } \frac{\text{semilla}}{\text{Kg uva}} \left(\frac{\text{g}}{\text{Kg uva}} \right) = \frac{(C \cdot 1000)}{A} \quad (3.7)$$



Figura 3.8. Extracción de hollejos de bayas.

- Determinación de composición polifenólica en hollejos

Se utilizaron los hollejos obtenidos en el análisis anterior. Tras registrar su peso inicial en fresco, fueron sometidos a liofilización (RIFICOR L-A-E50-CRT, Buenos Aires, Argentina). Las muestras secas se conservaron a -40 °C en bolsas herméticas hasta su análisis. La extracción y cuantificación de compuestos fenólicos se realizó de acuerdo con la metodología Harbertson y Adams (2002). Consecutivamente, se realizó el proceso de

extracción. Se molió y pesó 1 gramo de hollejos liofilizados con el registro del peso exacto. Se colocaron en tubos de 50 ml con el disolvente de extracción. Se sonificó en baño ultrasónico durante 15 minutos en un rango de temperatura de 15 a 20°C y se centrifugó posteriormente a 2500-3000 rpm por 5 minutos. Se recogió el sobrenadante y sobre el pellet remanente se repitió la extracción. El líquido se almacenó en frasco color caramelo y se conservó a -18°C hasta el momento de las determinaciones (Figura 3.9). Las muestras fueron analizadas en el laboratorio de aromas y sustancias naturales de la Estación Experimental Agropecuaria Mendoza, INTA. Se determinó antocianinas totales y taninos. Para la primera variable, se diluyó el líquido de extracción con una relación 1:3 y ajuste de pH a 3,6. Se tomaron 500 µL de muestra diluida y se colocaron en una cubeta de 1,5 ml de paso óptico, con 1 ml de solución buffer para antocianinas. Se mantuvo en reposo en la oscuridad durante 5 minutos y se procedió a la lectura a 520 nm en un espectrofotómetro UV- visible (Catania et al., 2020.; Harbertson et al., 2002). Para la cuantificación de los taninos, se trabajó sobre una muestra de 500 µL diluida con 1 ml de solución proteica con concentración de 1 mg/mL. Se homogeneizó y se tuvo en reposo en la oscuridad por 15 minutos. Se centrifugó a 1400 rpm por 5 minutos. Se tomó 1 mL de sobrenadante y se colocó en una cubeta con 80 µL de reactivo de decoloración. Luego de homogeneizar y reposo de 10 minutos, se tomó lectura a 520 nm. Del tubo con el pellet se eliminó el sobrenadante y se lavó dos veces con solución buffer indicada por la técnica. Se agregó 875 µL de solución de resuspensión y se mantuvo en reposo en la oscuridad por 10 minutos. Con un vórtex, se disolvió el pellet completamente, se colocó en una cubeta y nuevamente se sostuvo el reposo por 10 minutos. Tomar lectura de A a 510 nm (A510 background tanino). Sobre la muestra se agregó 125 µL de reactivo de cloruro férrico a la muestra y al blanco, se homogeneizó por inversión y reposo de 10 min. Se tomó el blanco del equipo con 875 µL de solución de resuspensión y 125 µL de cloruro férrico. Se procedió a la lectura a 510 nm, obteniendo A510 final tanino.



Figura 3.9. a) Hollejos liofilizados. b) Líquido de extracción de hollejos. c) Frascos con las soluciones de extracción almacenados en frascos color caramelo.

1.2.6 Nutrición foliar

Se determinó la concentración de los macronutrientes o macroelementos, nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca) y magnesio (Mg) en materia seca, es decir, pecíolos y limbos. De igual modo, se evaluó la concentración de micronutrientes o microelementos: hierro (Fe), manganeso (Mn), zinc (Zn) y cobre (Cu). Los parámetros nutricionales foliares se determinaron de acuerdo con el método de Kjeldhal (Kalra & Soil and Plant Analysis Council, 1998). Las muestras vegetales se obtuvieron en vendimia. Se seleccionaron hojas sanas, maduras ubicadas en la parte media de la canopia entre el cuarto y quinto nudo de los pámpanos. El material se secó en estufa a 65 °C hasta alcanzar peso constante. Posteriormente, se separaron pecíolos y limbos, los cuales se molieron y tamizaron a través de una malla de 2 mm utilizando un molino Culatti DFH 48, ver Figura 3.10.

El nitrógeno total se determinó por el método Kjeldahl a partir de 0,5 g de muestra vegetal. El fósforo y el potasio se cuantificaron a partir de extractos clorhídricos de cenizas obtenidas en mufla a 550 °C. El fósforo total se determinó por colorimetría, utilizando la reacción con nitrovanadato-molibdato y lectura a 430 nm en un espectrofotómetro UV-VIS (Milton Roy) (García-Esparza et al., 2006). El potasio total se midió por espectrofotometría de absorción atómica (Perkin Elmer Aanalyst 200) a 766 nm, utilizando diluciones 1:50 del extracto clorhídrico (Corradini, 2023; Sánchez Ormeño, 2020).

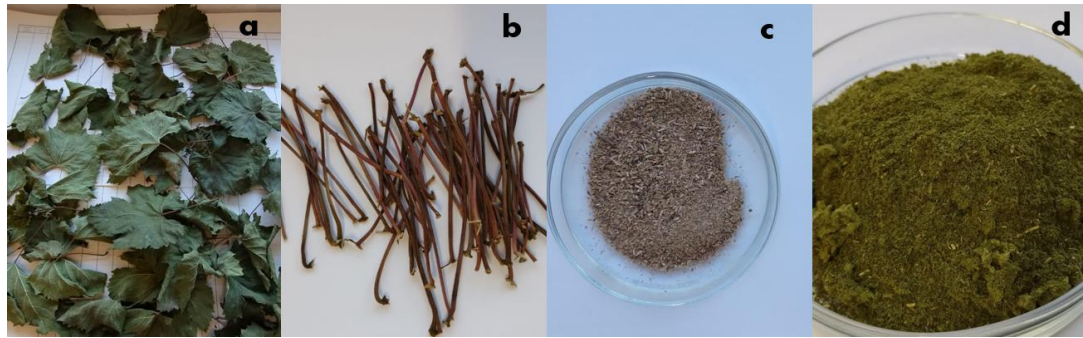


Figura 3.10. a) Hojas secas identificadas por parcelas. b) Pecíolos. c) Pecíolos luego del proceso de molienda. d) Reducción de tamaño de limbo.

1.2.7 Ratio isotópico de carbono ($\delta^{13}\text{C}$)

El muestreo se realizó previo a la vendimia, el día 20 de marzo de 2024. Para la medición de los isótopos estables, el material vegetativo fue manipulado con guantes de nitrilo para evitar contaminación cruzada. Las hojas se secaron en cámara de cultivo al resguardo de la luz hasta peso constante. Se molieron hasta reducir el tamaño a polvo (Figura 3.11). Por otra parte, para la muestra de bayas se seleccionaron 50 unidades con pedicelo, seleccionadas de cinco plantas (10 bayas por planta), representando la parte superior, media e inferior de cada racimo. El secado se realizó siguiendo el procedimiento estandarizado con una duración mayor (187 h) hasta alcanzar peso constante y una actividad acuosa promedio de 0,28. El material seco se redujo en molino, obteniéndose una pasta en lugar de polvo fino, como ocurrió en el estadio de envero, Figura 3.12, (Plantevin et al., 2022). Esta consistencia es debido al incremento de azúcares complejos en la fase de madurez.

La determinación de $\delta^{13}\text{C}$, se llevó a cabo en el Instituto de Geocronología y Geología Isotópica (INGEIS) de la Universidad de Buenos Aires (UBA). Para las mediciones, se pesaron $3 \pm 0,5 \mu\text{g}$ de muestra en una balanza analítica (Mettler Toledo AT20, precisión $10/2 \mu\text{g}$) y se encapsularon en microcápsulas de estaño (6x4 mm, 97,5 % pureza). Los valores de $\delta^{13}\text{C}$ se calcularon en relación con el estándar internacional V-PDB. El análisis se realizó en un espectrómetro de masas Finnigan MAT Delta-S, configurado para relaciones isotópicas de carbono respecto de V-PDB (de Souza et al., 2005; Gaudillère et al., 2002, Martínez et al., 2018b).



Figura 3.11. Procesamiento de limbos para determinación isotópica de carbono. a) Deshidratación de hojas. b) Hojas previo a la molienda. c) Reducción de tamaño a fino polvo.

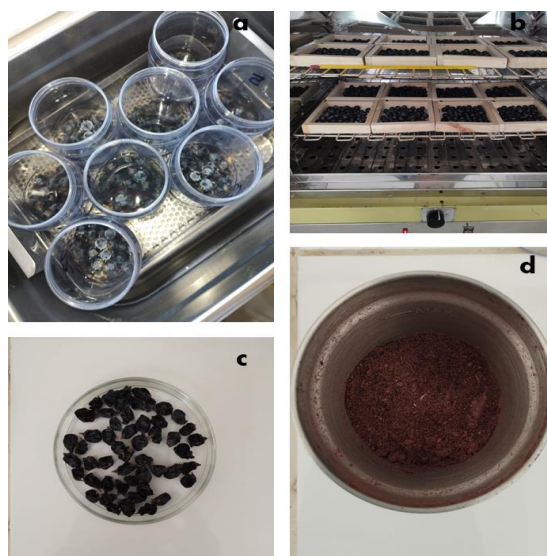


Figura 3.12. Procesamiento de bayas. a) Lavado con agua destilada en baño ultrasónico. b) Secado en estufa hasta peso constante. c) Bayas deshidratadas. d) Reducción de tamaño

1.3 Vino

1.3.1 Microvinificaciones

Se elaboró una microvinificación por parcela, a partir de las uvas cosechadas de las tres plantas centrales de la hilera media. Las vinificaciones se realizaron a escala de laboratorio en tanques plásticos de grado alimentario (20 L) provistos de válvula inferior de extracción. Se siguieron protocolos estándares de microvinificación establecidos por la Estación Experimental Agropecuaria Rama Caída – INTA (Ribéreau-Gayon et al., 2006).

Previo a la vinificación, se evaluó la calidad de la materia prima mediante análisis fisicoquímicos: pH, peso medio de baya, acidez titulable total y concentración de sólidos

solubles (Nazralla et al., 2009). De cada parcela se destinaron 11 kg de uva limpia (sin escobajos, hojas ni impurezas), que se molieron manualmente. El pH se ajustó a 3,6 mediante la adición de ácido tartárico (1 g/L).

El mosto se inoculó con levadura comercial SAF VR44 (30 g/hL), espolvoreada sobre la superficie en una proporción equivalente a diez veces su propio peso en mosto. Se incorporó ViniLiquid™ (Fermentis by Lesaffre) para aportar 20 ppm de nitrógeno fácilmente asimilable. Se adicionó metabisulfito de potasio (40 mg/L, factor de corrección 2) como medida de protección antimicrobiana. La fermentación se condujo en condiciones semi-anaeróbicas, con remontajes manuales diarios para el hundimiento del sombrero. Se controló diariamente la temperatura y el pH del mosto. Al final de la fermentación se verificó mediante la lectura de grados Baumé, hasta alcanzar el valor 0.

El vino se trasegó a recipientes de vidrio (damajuanas de 3 L), donde se realizaron dos trasiegos sucesivos para separar borras. Finalmente, se filtraron las muestras en placas de celulosa CAS 40, utilizando equipo de filtración presurizado con CO₂. Se les determinó la concentración de anhídrido sulfuroso libre (SO₂ libre) y se corrigió con metabisulfito de potasio (K₂S₂O₅) que actúa como conservante y antioxidante hasta los alcanzar valores óptimos entre 30-35 mg/L de SO₂ libre. Los vinos se fraccionaron en botellas de vidrio de 750 mL y se conservaron en condiciones controladas (20–22 °C, oscuridad) para favorecer su estabilización hasta su evaluación sensorial.

1.3.2 Composición fisicoquímica

En los vinos se procedió a la determinación de parámetros analíticos generales (alcohol, pH, acidez titulable y volátil), de acuerdo con las metodologías oficiales de la Organización Internacional de la Viña y el Vino (OIV, 2021).

El análisis se complementó con la determinación de compuestos característicos mediante un analizador multiparamétrico ALPHA Wine ATR (Bruker, Inglaterra), disponible en el Instituto Nacional de Vitivinicultura, Delegación San Rafael. En este se evaluaron los parámetros: ácido acético, ácido cítrico, densidad, fructosa, glucosa, glicerol, ácido láctico, ácido málico, sacarosa, ácido tartárico y azúcares residuales totales (Iland et al., 2013).

1.3.3 Parámetros colorimétricos

Los parámetros colorimétricos se determinaron siguiendo la metodología propuesta por Glories, (1984) y Ribéreau-Gayon y colaboradores (2006). Sobre vinos previamente clarificados se registraron absorbancias a 420, 520 y 620 nm en un espectrofotómetro UV-VIS (DR600, Hach, Alemania), empleando cubetas de 1 mm de trayecto óptico. Se calcularon los índices de intensidad ($I = A_{420\text{ nm}} + A_{520\text{ nm}} + A_{620\text{ nm}}$) y tonalidad ($T = A_{420\text{ nm}} / A_{520\text{ nm}}$), de uso clásico en enología. El índice de color está dado por la relación entre la intensidad y la tonalidad del color por el factor de multiplicidad de mil ($IC = I/T \cdot 1000$). El índice de polifenoles totales (IPT) se obtuvo midiendo la absorbancia a 280 nm en cubetas de 1 cm de trayecto óptico, tras dilución 1:100 del vino.

Adicionalmente, se calcularon las coordenadas CIELab (L^* , a^* , b^*) mediante espectrofotometría UV-VIS (DR600, Hach, Alemania), donde L^* corresponde a luminosidad (0 = negro, 100 = blanco), a^* al eje rojo-verde y b^* al eje amarillo-azul. Se complementó el cálculo con el matiz del color (h^*) y C^* (croma o pureza) en función de los resultados de a^* y b^* . Las diferencias de color entre vinos se calcularon siguiendo las recomendaciones de la Commission Internationale de l'Éclairage (OIV, 2006), obteniendo ΔL (luz/oscuridad) (3.8), Δa (rojo/verde) (3.9), Δb^* (amarillo/azul) (3.10) y la diferencia total de color (ΔE^*) (3.11).

$$\Delta L_{21}^* = L_2^* - L_1^* \quad (3.8)$$

$$\Delta a_{21}^* = a_2^* - a_1^* \quad (3.9)$$

$$\Delta b_{21}^* = b_2^* - b_1^* \quad (3.10)$$

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (3.11)$$

Todas las determinaciones se realizaron tras dos meses de almacenamiento en botella.

1.3.4 Análisis sensorial descriptivo

Todos los vinos obtenidos fueron evaluados en dos etapas por un panel de expertos. La primera a los tres meses después del embotellado. Este período de tiempo en botella correspondió a la categoría de vinos jóvenes, donde la estabilización en botella puede variar entre uno a tres meses (Catelén, 2022; Fernández de Ulivarri, 2024; Pérez-

Magariño, S., & González-San José, 2002). Y para evaluar su potencial de guarda, se repitió la experiencia a los seis meses. Cada evaluación sensorial se realizó en una sala de cata diseñada conforme a la norma ISO 8589:2010 (NORME ISO 8589, 2010) por un panel de experto. La sala se mantuvo a 20 °C mediante aire acondicionado. Cada catador dispuso de una cabina individual equipada con iluminación de luz natural diurna, pileta y estante posterior para la entrega de muestras.

Las muestras se sirvieron en copas estandarizadas de acuerdo con la norma ISO 3591:1977 (NORME ISO 3591, 1977), perfectamente limpias y secas. Además, cada cabina contó con una copa adicional con agua potable.

Cada panelista recibió una ficha de cata y bolígrafo para registrar los resultados. La ficha incluyó tres atributos sensoriales principales (vista, olfato y gusto), evaluados en tres niveles de intensidad, junto con un espacio para observaciones. Se aplicó un análisis descriptivo con dieciséis vinos (uno por parcela), codificados con números aleatorios de tres dígitos para asegurar anonimato (Lawless & Heymann, 2010).



Figura 3.13. Cabina de degustación provista de copas técnicas norma ISO 3591:1977.

1.4 Análisis estadístico

Con el fin de analizar los resultados obtenidos, los datos se procesaron con el software InfoStat (versión 2020; Di Rienzo et al., 2020). El análisis multivariado incluyó estadísticos descriptivos (medidas resumen), matrices de correlación total, diagramas de dispersión múltiple y distancia euclidiana entre individuos y tratamientos (Di Rienzo et al., 2020). El

análisis exploratorio se complementó con Análisis de Componentes Principales (ACP) para reducir dimensionalidad y explorar relaciones entre variables (Abdi & Williams, 2010).

Las diferencias entre tratamientos se evaluaron mediante modelos lineales generales y mixtos (MLGM). En dichos modelos se incluyeron como efectos fijos los tratamientos y como efectos aleatorios los bloques.

Se plantearon cuatro modelos por variables de acuerdo con las siguientes estructuras de covarianza, combinando adecuadamente efectos aleatorios (bloque y parcela) y estructuras de correlación y heterocedasticidad residual.

1. Efecto aleatorio de bloque y errores independientes y homoscedásticos.
2. Efectos aleatorios de bloque y parcela dentro de cada bloque, errores independientes y homoscedásticos.
3. Efecto aleatorio de bloque y errores independientes y heteroscedásticos.
4. Efectos aleatorios de bloque y parcela dentro de cada bloque, errores independientes y heteroscedásticos.

Se exploraron los modelos mediante los gráficos de residuos estandarizados de Pearson frente a valores ajustados y con QQ-plots de cuantiles muestrales versus teóricos. El modelo óptimo se seleccionó considerando criterios de información Akaike (AIC), Bayesiano (BIC), log-verosimilitud, desviación residual (σ) y coeficiente de determinación (R^2). Asimismo, se aplicaron pruebas de cociente de verosimilitud entre modelos alternativos. Las variables cualitativas del análisis sensorial se evaluaron mediante Análisis de Correspondencias Múltiples (ACM) y representaciones gráficas tipo estrella (Greenacre, 2017). Finalmente, para predecir el valor del $\delta^{13}\text{C}$ en hojas y bayas en función de variables vegetativas, productivas y enológicas, se analizaron los coeficientes de correlación de Pearson y las gráficas de dispersión de puntos por tratamiento. Se aplicó regresión lineal múltiple definiendo como variables respuestas los valores de $\delta^{13}\text{C}$ en hojas y bayas, y como regresoras las variables medidas a nivel de planta, fruto y microvinificación. Se evaluó la significancia de cada modelo, sus parámetros y la adecuación de los ajustes (Montgomery, 2021).

CAPÍTULO 4: RESULTADOS

1.1 Diseño experimental

El criterio de selección de las unidades experimentales se basó en el vigor del cultivo, expresado en la poda realizada durante los meses de julio y agosto de 2023. Se registró el peso de materia seca de 240 plantas de las 10 hileras asignadas para el ensayo, totalizando 134,34 kilos (Figura. 4.1, Anexo 1). El análisis estadístico, basado en modelos lineales generales y mixtos, se presenta en la Figura 1.2, donde se detalla el diseño experimental compuesto por cuatro bloques y cuatro parcelas, totalizando 16 unidades experimentales.



Figura 4.1. Labor cultural de la poda año 2023.

En el plano del ensayo, Figura 4.4, se rotularon con la letra “V” las válvulas de corte y derivación del riego. El detalle de la conexión se observa en la Figura 4.2, donde se reemplazó la tubería central por un tramo de manguera sin goteros. Los tratamientos se identificaron cromáticamente: T1 (100% ETc) en color verde; T2 (80% ETc) en amarillo, T3 (60% ETc) en naranja y T4 (40 %ETc) en rojo. Estos porcentajes definen los diferentes niveles de estrés hídrico:

- sin estrés hídrico,
- débil o leve,
- leve a moderado,
- moderado a severo y
- severo.



Figura 4.2. Derivación de tubería principal de sistema de riego por goteo.

Se estudió el perfil edáfico del ensayo a partir de dos muestreos, con el propósito de comprender la estructura y composición del suelo en el área de desarrollo radicular. Esta caracterización fue indispensable para planificar el programa de riego correspondiente a la temporada envero-vendimia 2024. Se realizaron dos muestreos, primavera y verano, propiedades fisicoquímicas del terreno y capacidad de campo. El primero muestreo se realizó el 28 de septiembre del año 2023. Se tomaron muestras de las 16 parcelas en las tres plantas centrales de la hilera principal (Figura 4.3). A una profundidad de 30 cm se extrajeron aproximadamente 500 g de suelo, libre de restos orgánicos e impurezas visibles bajo la norma IRAM-SAGyP 29572 de Calidad ambiental - Calidad del suelo. Se analizaron la conductividad eléctrica (CE), pH, anión cloruro (Cl^-), catión sodio (Na^+), calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}) y la relación de absorción de sodio (RAS). La textura del suelo se determinó por volumen de sedimentación, clasificándose como arenosa a franco-arenosa.



Figura 4.3. a) Muestreo a 30 cm de profundidad. b) Visualización de las 3 extracciones por parcela.

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1	1											1	1
	2											2	
	3											3	
	4											4	
2	5	V	V	V	V	V	V					5	2
	6		1			7						6	
	7											7	
	8											8	
	9	V			V	V						9	
3	10				V			V	V			10	3
	11											11	
	12		2					12				12	
	13											13	
	14		V	V	V		V	V	V			14	
4	15	V	V	V				V	V	V		15	4
	16											16	
	17		3						13			17	
	18											18	
	19							V	V	V		19	
5	20											20	5
	21											21	
	22		4			8			14			22	
	23											23	
	24	V	V	V								24	
6	25				V	V	V					25	6
	26											26	
	27					9						27	
	28											28	
	29				V	V	V					29	
7	30				V	V	V	V	V	V		30	7
	31											31	
	32		5			10			15			32	
	33											33	
	34				V			V	V	V		34	
8	35		V	V	V			V				35	8
	36											36	
	37			6			11			16		37	
	38											38	
	39		V	V	V	V	V	V				39	
9	40											40	9
	41											41	
	42											42	
	43											43	

Figura 4.4. Diseño experimental con las 16 unidades experimentales identificadas por tratamiento.

A partir de los resultados obtenidos (Tabla 4.1), se realizó el análisis estadístico mediante modelos lineales generales y mixtos, considerando el tratamiento como efecto fijo y el bloque como efecto aleatorio. No se detectaron diferencias significativas para ninguna de las variables químicas entre los tratamientos T1, T2, T3 y T4; por lo que el diseño del sistema de riego por goteo se basó en las medias globales de las parcelas. Con base en

estos resultados, se caracterizó el suelo del ensayo. En promedio, la conductividad eléctrica (2,99 dS/m) corresponde a un suelo no salino, salvo en las parcelas 10, 12 y 13, cuyos valores superan los 4 dS/m que se clasifican como ligeramente salinos. del pH ubica el suelo en el rango neutro a levemente alcalino. Los valores aniónicos y catiónicos, así como la relación de absorción de sodio (RAS), indican un suelo químicamente equilibrado y característico de la zona.

Tabla 4.1. Resultados químicos de suelo por parcela a 30 cm de profundidad.

Parcela	CE (dS/m)	pH pasta	Cl ⁻ (me/L)	Na ⁺ (me/L)	Ca ⁺² +Mg ⁺² (me/L)	RAS
1	2.03	7.49	8.64	97.16	8.70	63.48
2	2.10	7.32	12.48	148.25	8.8	67.79
3	1.55	7.39	5.18	54.84	7.7	52.79
4	2.52	7.38	11.52	130.13	9.6	70.01
5	2.30	7.32	9.60	111.16	8.5	63.67
6	2.00	7.39	9.60	75.46	8.6	43.66
7	2.89	7.38	17.28	179.92	10.3	69.81
8	3.11	7.34	20.16	214.36	12.8	88.41
9	2.27	7.48	12.48	133.33	9.3	64.34
10	4.05	7.40	22.08	219.82	15.8	102.18
11	2.69	7.39	18.24	220.65	10.0	78.18
12	5.86	7.26	21.12	222.44	19.3	131.86
13	4.37	7.33	19.20	205.59	17.8	123.34
14	3.25	7.38	12.48	143.23	12.1	89.99
15	3.97	7.40	19.20	214.04	13.0	93.64
16	2.87	7.47	16.32	179.68	9.8	70.22
Media	2.99	7.38	14.72	159.38	11.37	79.59

El segundo muestreo se efectuó el 26 de diciembre del 2023 en doce parcelas, con el fin de determinar la densidad aparente y la capacidad de campo. Las muestras se tomaron 24 horas después del riego, con el objetivo de estimar la capacidad de campo bajo condiciones de humedad representativas. Se registraron los pesos de los componentes

del cilindro contenedor, las muestras fueron secadas hasta alcanzar peso constante y se calcularon las variables correspondientes (Figura 4.5).

Los resultados correspondientes a cada parcela se presentan en la Tabla 4.2. El análisis estadístico mediante modelos lineales generales y mixtos no evidenció diferencias significativas entre tratamientos. Los valores de densidad aparente confirmaron una clase textural entre arenosa y franco-arenosa. A partir de las medias globales se definieron las características hídricas del suelo, que sirvieron de base para el cálculo del volumen de riego en función de las condiciones climáticas y fisiológicas del cultivo.



Figura 4.5. a) Localización de pozo frente a la planta. b). Cilindro calibrado con muestra enrasada. c). Registro de pesos de tapa, fondos y masa de suelo.

Tabla 4.2. Densidad aparente (g/cm^3) y capacidad de campo para profundidades de 30 y 60 cm.

Parcela	Bloque	Tratamiento	30 cm		60 cm	
			Densidad aparente (g/cm^3)	Capacidad de campo (g de agua/g suelo)	Densidad aparente	Capacidad de campo
1	3	2	1.57	17.30	1.64	17.22
2	4	2	1.48	20.37	1.65	18.81
4	2	4	1.43	19.97	1.57	19.70
5	3	1	1.41	18.80	1.60	17.56
6	1	3	1.65	17.04	1.61	16.06

Parcela	Bloque	Tratamiento	30 cm		60 cm	
			Densidad aparente (g/cm ³)	Capacidad de campo (g de agua/g suelo)	Densidad aparente	Capacidad de campo
7	4	3	1.49	18.23	1.70	16.61
8	4	1	1.49	17.64	1.67	18.98
10	4	4	1.48	20.74	1.68	18.02
11	1	4	1.53	17.08	1.64	18.63
12	2	3	1.64	16.59	1.63	18.44
13	1	2	1.70	15.75	1.61	19.55
14	1	1	1.62	17.29	1.62	19.72

Durante la temporada envero-vendimia se respetó la programación de riego establecida en función de la evapotranspiración del cultivo (ETc) para cada tratamiento (Anexo 2). La dosificación de agua se ajustó de acuerdo con las mediciones de potencial hídrico foliar y los eventos de precipitación registrados. Se registraron semanalmente las horas de funcionamiento del sistema de bombeo y se calculó la lámina de agua aplicada (mm) para cada tratamiento según el modelo FAO Penman-Monteith (Allen et al., 2005). La tabla 4.3 presenta las 8 semanas efectivas de riego por goteo. En los tratamientos T3 y T4, durante las semanas quinta y octava, las válvulas permanecieron cerradas debido al elevado aporte de lluvia.

Tabla 4.3. Registro semanal de lámina de agua por goteo (mm) durante la temporada.

Mes	Semana	Lámina de agua (mm)			
		T1	T2	T3	T4
Enero	1	7.5	4.3	2.7	1.1
Enero/Febrero	2	33.6	25.6	10.7	8.5
Febrero	3	35.2	32.0	22.4	19.2
Febrero	4	32	28.8	22.4	19.2
Febrero	5	20	12.8	0	0
Febrero/Marzo	6	43.2	32	19.2	12
Marzo	7	32	19.2	6.4	4.8
Marzo	8	9.6	9.6	0	0
Total		213	164	84	65

El monitoreo semanal del potencial hídrico foliar (preamanecer y mediodía) permitió optimizar el uso de agua de riego respecto de la lámina teórica estimada. Los porcentajes de ahorro por tratamiento se presentan en la Tabla 4.4, donde se observa que el mayor ahorro correspondió al tratamiento T3. En promedio, el ensayo permitió un ahorro global del 23% de agua de riego por goteo. Este resultado es relevante para mejorar la eficiencia y sostenibilidad de la práctica de riego en el viñedo.

Tabla 4.4. Comparación entre lámina teórica y real aplicada por tratamiento y porcentaje de ahorro.

Tratamiento	Lámina teórica	Lámina real aplicada	% Ahorro riego
T1	234	213	9
T2	187	164	12
T3	140	84	40
T4	93	65	31

Al considerar el aporte total de agua por el cultivo —suma del riego por goteo y la lluvia efectiva—, se observó un exceso de agua respecto de la ETc (Tabla 4.5). El manejo más eficiente correspondió al tratamiento T3, con solo un 9% de exceso respecto del valor teórico, mientras que el tratamiento T4 presentó el mayor exceso alcanzando el 43%.

Tabla 4.5. Agua total recibida (mm) considerando lluvia efectiva y riego por goteo.

Tratamiento	Lámina teórica (mm)	Lámina real aplicada (mm)	Lluvia (mm)	Agua total (mm)	Exceso (%)
T1	234	213	69	282	20
T2	187	164	69	233	25
T3	140	84	69	153	45
T4	93	65	69	134	51

La proporción de agua de lluvia efectiva respecto del total recibido fue del 20% en T1, 25% en T2, 9% en T3 y 44% en T4. Estos valores son característicos de años asociados a la fase cálida del fenómeno El Niño, que provoca excesos de lluvia y eventos extremos en el hemisferio sur (El Niño en Argentina, 2024). Por ejemplo, el 21 de enero de 2024 se registró una tormenta con una precipitación de 47,6 mm, equivalente al promedio histórico mensual de la región (Figura 4.6).

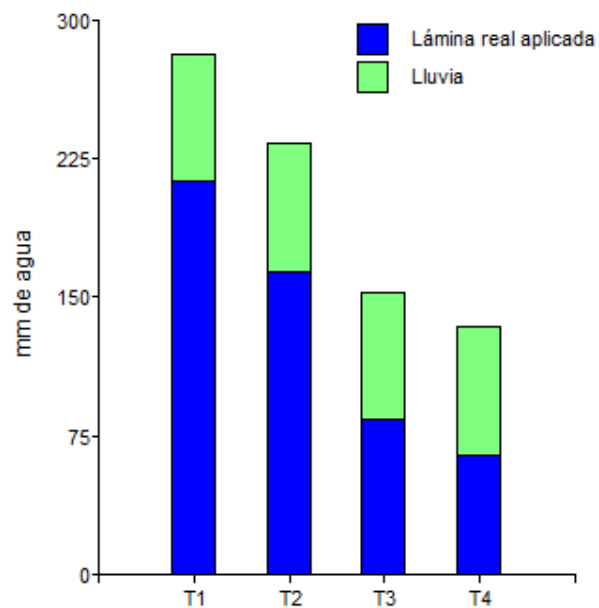


Figura 4.6. Aporte total de agua por tratamiento.



Figura 4.7. Registro de lluvia correspondiente a la tormenta del 21 de enero de 2024 (47,6 mm acumulados).

En función de la lámina teórica calculada a partir de los promedios históricos climáticos, condiciones del cultivo y características del suelo; el agua total fue superada en todos los tratamientos, como se observa en la Figura 4.8 representada por las barras de color verde. El valor más semejante, fue para el tratamiento T3, donde la diferencia entre el aporte real y el teórico fue del 9%.

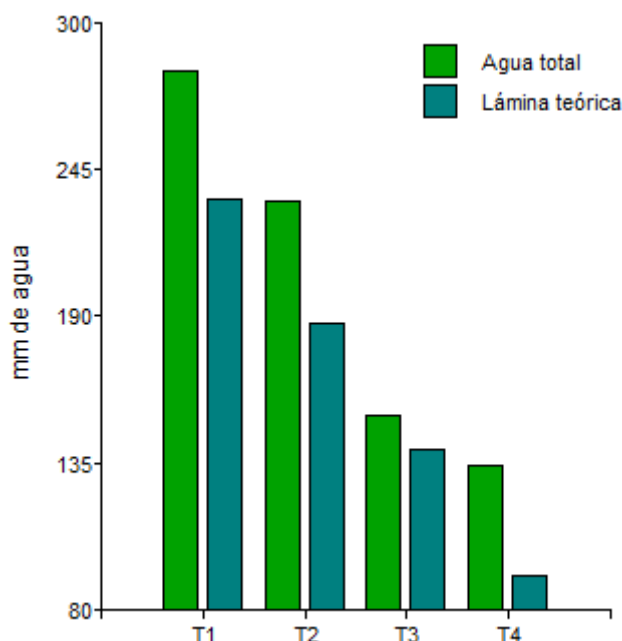


Figura 4.8. Registro de lluvia de la tormenta del 21-01-2024. Valor acumulado de 47.5 mm.

1.2 Planta

1.2.1 Variables vegetativas

- Estado hídrico del viñedo: potencial hídrico foliar

Durante la temporada envero-vendimia de 2024 se registraron nueve determinaciones en preamanecer y 10 determinaciones en mediodía por tratamiento, destinadas a evaluar el estado hídrico de las vides. Las fechas de medición se expresaron en días después de la brotación (DDB). El ensayo comenzó a los 107 DDB (17 de enero de 2024) y finalizó a los 170 DDB (20 de marzo de 2024) con lecturas semanales. El análisis estadístico, basado en modelos lineales generales y mixtos, generó las curvas de evolución representadas en las Figuras 4.9 y 4.10. Los resultados demostraron diferencias significativas entre tratamientos ($p\text{valor} < 0,05$). Para ambas curvas se

observaron variaciones entre tratamientos a partir de la tercera fecha de medición, evidenciando el efecto del riego deficitario controlado en la interacción de tratamiento:tiempo donde los pvalores fueron $< 0,001$ y $0,023$ para preamanecer y mediodía respectivamente. En las mediciones de preamanecer, las vides del tratamiento T1 presentaron los valores más altos de potencial (menor presión negativa), indicando un mejor estado hídrico. Exceptuando el día 135 DDB, en el cual se registró un descenso asociado a temperaturas máximas extremas los días 133 y 134, los valores se mantuvieron por encima de $-0,2$ MPa, límite que indica déficit hídrico leve según las escalas de referencia. En contraste, las vides del tratamiento T4 mostraron la curva más baja, con valores de potencial entre $-0,5$ y $-0,6$ MPa, correspondientes a estrés hídrico severo. Los tratamientos T2 y T3 oscilaron entre $-0,2$ y $-0,5$ MPa, reflejando un nivel de estrés hídrico moderado. En las mediciones de mediodía, los valores fueron más negativos. El tratamiento T1 registró presiones entre $-1,2$ y $-1,4$ MPa a partir de febrero, a pesar de recibir riego durante las mediciones, lo que indica un estrés moderado. Este comportamiento se asoció a las altas temperaturas y mínimas elevadas registradas durante el período. El tratamiento T2 presentó condiciones de estrés moderado a severo, mientras que T3 y T4 evidenciaron estrés severo. El control periódico del potencial hídrico permitió ajustar la programación y lograr un ahorro del 26% respecto de la lámina bruta calculada en función de las condiciones de suelo, clima y planta.

La clasificación de medias según MLGM, tabla 4.6, demostró que hubo diferencias significativas para cada tratamiento. Para preamanecer todos los valores ajustados les correspondió una clasificación diferente, T1 (a), T2 (b), T3 (c) y T4 (d). Según las escalas vigentes, (Rienth & Scholasch, 2019), las cepas de los dos primeros se encontraron con un estrés hídrico leve, mientras que las restantes con déficit hídrico moderado. Para las determinaciones de mediodía el comportamiento también fue diferenciado en la temporada envero-vendimia, dando como resultados T1 (a), T2 - T3 (b) y T4 (c). En este momento del día el estado hídrico fue más crítico, ya que T1 se encontró en un rango de déficit hídrico moderado a severo; y todos los demás con estrés hídrico severo. Estos resultados reflejan el carácter instantáneo de la técnica de medición del potencial hídrico foliar. Además, podría haber existido una sobreestimación debido a la cavitación que ocurre en condiciones ambientales extremas.

No obstante, al momento de las mediciones, siguiendo el cronograma de riego para T1, las parcelas habían recibido 5 horas de riego por goteo, y aun así las presiones de vacío de la cámara de Scholander indicaban estrés hídrico.

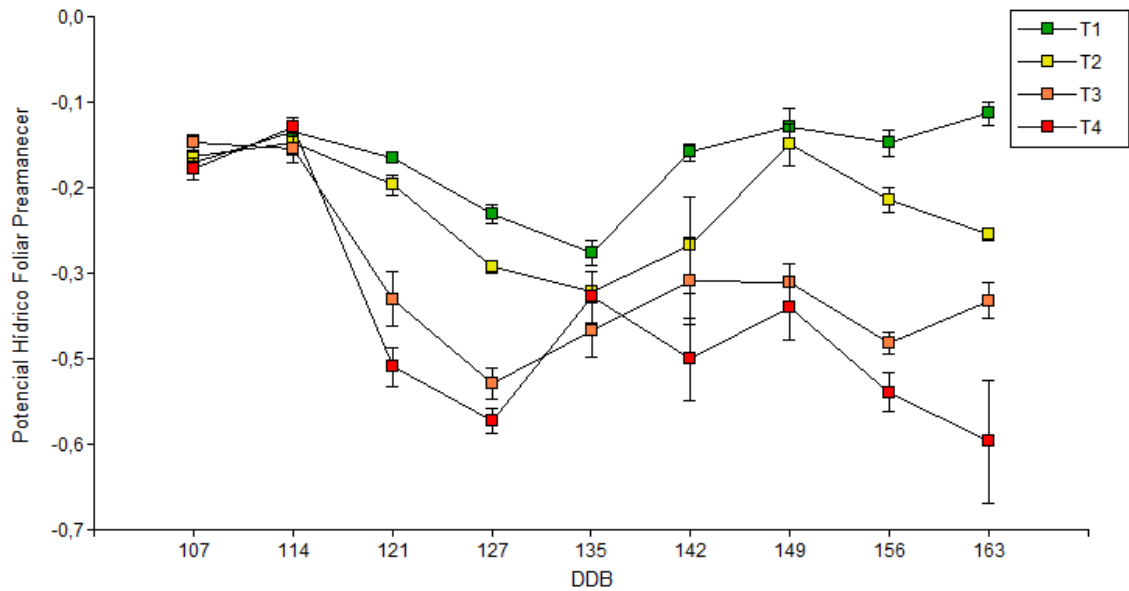


Figura 4.9. Evolución del potencial hídrico de preamanecer (Ψ_{pd}) entre el 17/01/2024 y el 13/03/2024 (MPa).

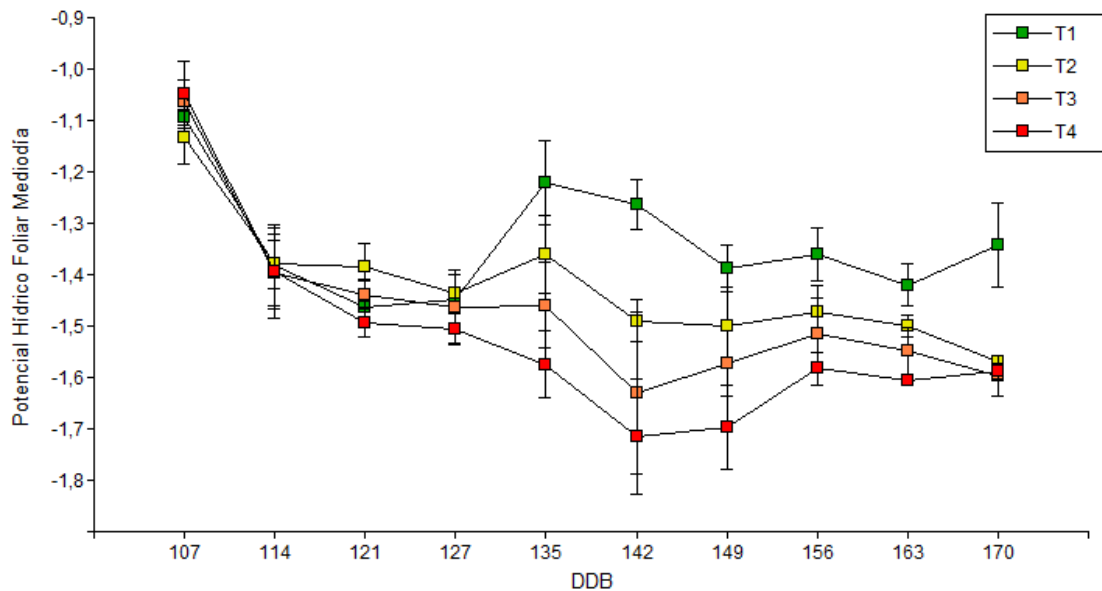


Figura 4.10. Evolución del potencial hídrico de mediodía (Ψ_{md}) entre el 17/01/2024 y el 20/03/2024 (MPa).

- Análisis de potencial hídrico foliar: Integral de estrés hídrico

Para cuantificar el efecto del riego acumulado durante la temporada se aplicó la integral de estrés hídrico propuesta por Myers (1988). Se utilizó un modelo de regresión lineal simple para evaluar la relación entre las mediciones de preamanecer y mediodía. Como se muestra en la Figura 4.10, se observó una relación lineal positiva entre las variables. Los tratamientos con menor aporte de agua (T3 y T4) presentaron los valores más altos de la integral, lo que indica un mayor estrés hídrico acumulado. El modelo de ajuste presentó un coeficiente de determinación (R^2) de 0,68; explicando una proporción considerable de la variabilidad observada.

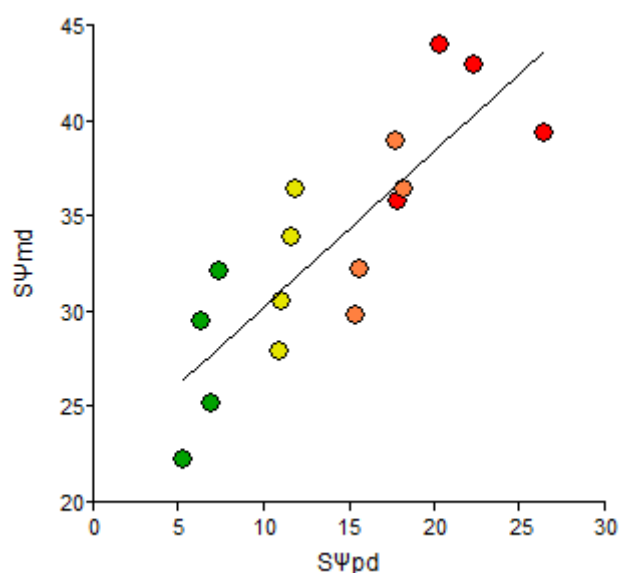


Figura 4.11. Relación entre las integrales de Myers de mediodía y preamanecer.

$$S\Psi_{md} = S\Psi_{pd} * 0,82 + 22,066 ; R^2 = 0,69 \quad (4.1)$$

Conforme a los modelos lineales generales y mixtos, se detectaron diferencias significativas entre los tratamientos ($p < 0,01$). En las condiciones de preamanecer, consideradas más estables por la ausencia de radiación solar, las medias ajustadas mostraron diferencias significativas entre T1, T2 y T3, pero no entre T3 y T4. En las mediciones de mediodía, T1 y T2 presentaron valores estadísticamente similares, igual que T3 y T4 (Figura 4.12).

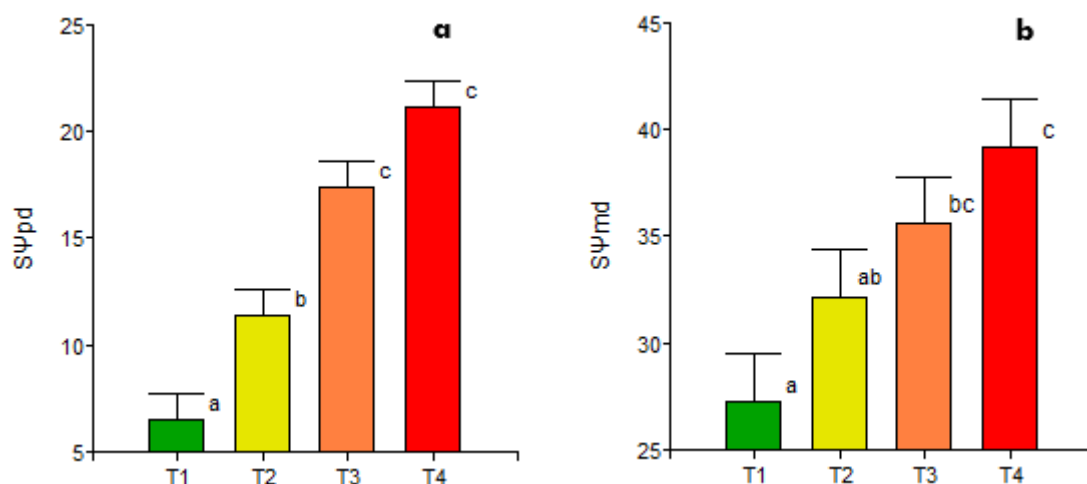


Figura 4.12. Integral de Myers del período envero-vendimia por tratamiento. a) Preamanecer, b) mediodía.

Tabla 4.6. Medias ajustadas y errores estándar para Ψ_{pd} , Ψ_{md} , $S\Psi_{pd}$ y $S\Psi_{md}$. Letras distintas indican diferencias significativas (LSD Fisher, $\alpha = 0,05$).

Trat	Ψ_{pd}			Ψ_{md}			$S\Psi_{pd}$			$S\Psi_{md}$		
T1	-0,21	$\pm 0,01$	a	-1,34	$\pm 0,03$	a	6,50	$\pm 1,22$	a	27,23	$\pm 2,24$	a
T2	-0,29	$\pm 0,01$	b	-1,41	$\pm 0,03$	b	11,38	$\pm 1,22$	b	32,18	$\pm 2,24$	ab
T3	-0,37	$\pm 0,01$	c	-1,45	$\pm 0,03$	b	17,40	$\pm 1,22$	c	35,58	$\pm 2,24$	bc
T4	-0,43	$\pm 0,01$	d	-1,51	$\pm 0,03$	c	21,13	$\pm 1,22$	c	39,23	$\pm 2,24$	c
p-valor	<0,0001			<0,0001			0,001			0,0036		

○ Área y densidad foliar

Para determinar las variables foliares, se analizó una planta por parcela, clasificando la canopia en hojas primarias y secundarias. Se determinaron superficie y peso de cada categoría, y se calcularon las relaciones: AFP (Área Foliar Primaria), AFS (Área Foliar Secundaria), AFT (Área Foliar Total), Pes_FP (Peso de Hojas Primarias), Pes_FS (Peso de Hojas Secundarias), Pes_FT (Peso del total de hojas), Den_P (Densidad de Hojas Primarias), Den_S (Densidad de Hojas Secundarias) y Den_T (Densidad de del total). El análisis mediante MLGM (Modelos Lineales Generales y Mixtos) no evidenció diferencias significativas entre los tratamientos, aunque se observó que T2 presentó las mayores medias ajustadas de superficies foliar primaria y secundaria (Figura 4.13). Este mismo patrón se observó en las variables de peso (Figura 4.14). Sin embargo, las relaciones superficie/peso mostraron diferencias significativas entre tratamientos. Las mayores densidades foliares

(Figura 4.15) específicas se registraron en T4 (Den_P y Den_T) y en T3 (Den_S). El tratamiento T1, con mayor disponibilidad de agua, presentó las menores relaciones superficie/peso, reflejando hojas más delgadas.

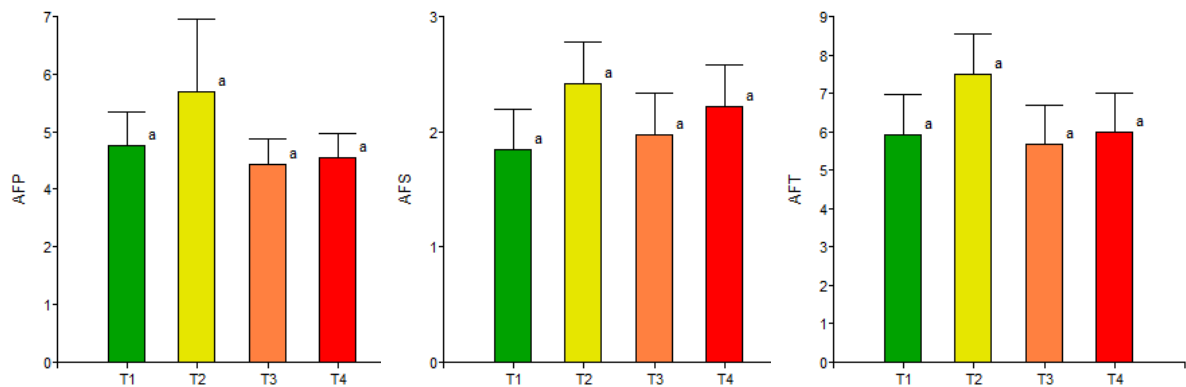


Figura 4.13. Medias ajustadas (MLGM) del área foliar primaria (AFP), secundaria (AFS) y total (AFT) por tratamiento (m²).

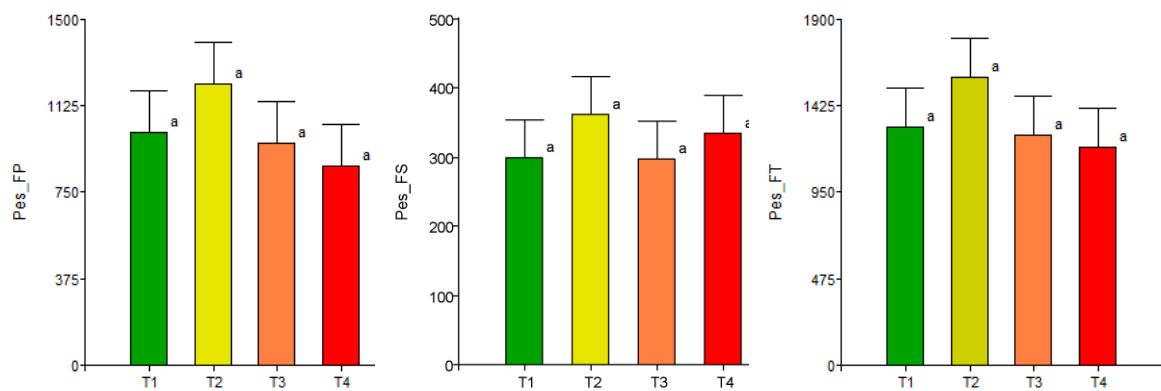


Figura 4.14. Medias ajustadas de pesos de hojas primarias, secundarias y totales (g).

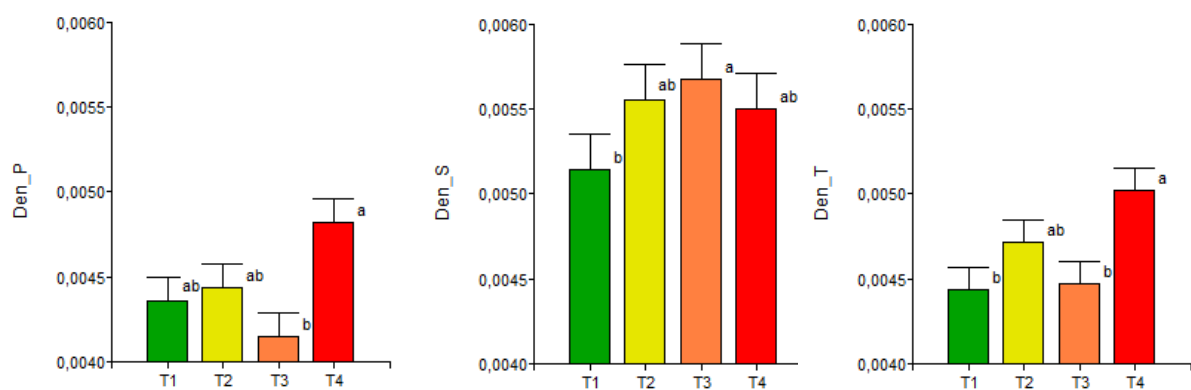


Figura 4.15. Densidad foliar específica (Den_P, Den_S, Den_T) por tratamiento (m²/g).

○ Clorofila

Las determinaciones del contenido de clorofila se efectuaron el 13 y 20 de marzo de 2024. Se observaron diferencias significativas para los factores “tratamiento” y “día de la medición”, pero no para su interacción ($p = 0,1131$). Según los resultados de la Tabla 4.7, el mayor contenido de clorofila correspondió a las cepas más irrigadas (T1). T2 y T3 no mostraron diferencias significativas entre sí, mientras que T4 presentó los valores mínimos ($\mu\text{moles}/\text{m}^2$).

Tabla 4.7. Medias ajustadas del contenido de clorofila ($\mu\text{mol}/\text{m}^2$) por tratamiento y día de medición.

Clorofila ($\mu\text{moles}/\text{m}^2$)	Tratamiento	T1	454,21	$\pm 22,43$	a
		T3	436,29	$\pm 22,43$	ab
		T2	415,26	$\pm 22,43$	ab
		T4	402,85	$\pm 22,43$	b
		p-valor	0,0166		
	Día	170	452,74	$\pm 20,33$	a
		163	401,56	$\pm 20,33$	b
		p-valor	0,0010		
	Trat*Día	p-valor	0,1131		

Se analizaron simultáneamente la concentración de clorofila y el potencial hídrico foliar de mediodía. La distribución de los datos (Figura 4.16). muestra que mayores valores de clorofila se asocian con potenciales hídricos menos negativos (MPa). Esto indica que las plantas mejor hidratadas presentan un mayor contenido de pigmentos fotosintéticos. El coeficiente de correlación de Pearson ($r=0,31$) mostró una relación positiva y moderada entre ambas variables.

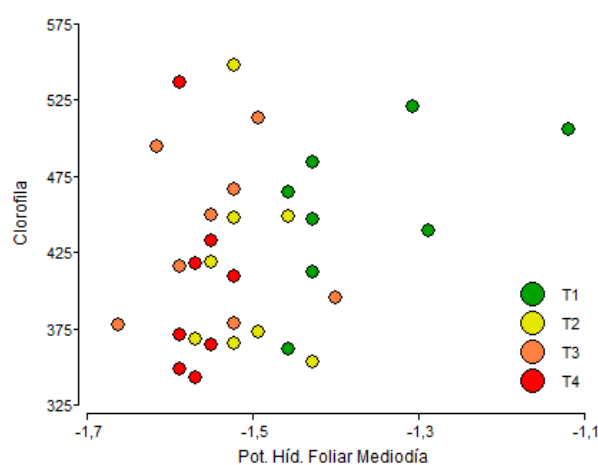


Figura 4.16. Relación entre concentración de clorofila ($\mu\text{moles}/\text{m}^2$) y potencial hídrico de mediodía (MPa).

1.2.2 Variables de rendimiento

En la fecha de vendimia, 20 de marzo del 2024, se evaluaron tres variables productivas: número de racimos por planta, peso neto de cosecha y peso promedio de racimo. La Tabla 4.8 presenta los valores medios ajustados, desviaciones estándar y rangos (mínimo y máximo) obtenidos para cada tratamiento mediante modelos lineales generales y mixtos, y se realizó la comparación de medias mediante la prueba LSD de Fisher con un valor de significancia de $\alpha = 0,05$.

Tabla 4.8. Resultados MLGM para las variables de rendimiento (número de racimos, peso neto de cosecha y peso promedio de racimo) por tratamiento.

Trat	N° de racimos				Peso total de racimos (Kg)				Peso de racimo (Kg)			
	Media	D.E.	Mín	Máx	Media	D.E.	Mín	Máx	Media	D.E.	Mín	Máx
T1	60,25	±5,76	41,00	85,00	7,12	±0,85	4,71	12,90	0,12	±0,01	0,08	0,20
T2	47,50	±5,76	33,00	72,00	7,12	±0,85	3,67	10,70	0,15	±0,01	0,08	0,26
T3	58,00	±5,76	28,00	98,00	7,89	±0,85	3,46	10,01	0,14	±0,01	0,09	0,18
T4	52,08	±5,76	34,00	87,00	7,57	±0,85	3,47	11,08	0,15	±0,01	0,09	0,23
p-valor	0,0607 (ns)				0,7971 (ns)				0,1725 (ns)			

○ Número promedio de racimos

El análisis mediante MLGM indicó diferencias significativas entre las medias ajustadas (Figura 4.17.a, $p = 0,0148$). El tratamiento T1 presentó el mayor número de racimos por planta con una media de 60,25 racimos/planta, seguido de T3 con un comportamiento estadísticamente similar (58 racimos/planta). El menor número de racimos correspondió a T2, con 47,50 racimos/planta.

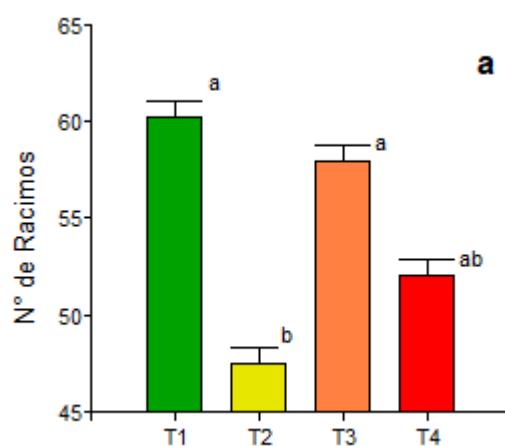


Figura 4.17. Medias ajustadas con MLGM por tratamiento para número de racimos por planta.

- Rendimiento de planta

El rendimiento total por planta no mostró diferencias estadísticamente significativas entre los distintos tratamientos evaluados (Tabla 4.9, $p = 0.7971$), lo que indica que las variaciones en las condiciones hídricas aplicadas no ejercieron un efecto determinante en la producción total de la planta dentro del período de estudio. Es importante destacar que, a pesar de que el tratamiento T1 recibió la mayor dotación de agua durante la etapa de envero-vendimia, este tratamiento presentó el rendimiento promedio más bajo en comparación con los otros tratamientos. Este resultado puede estar relacionado con la influencia del exceso hídrico en la fisiología de la vid, específicamente en la reducción de la tasa de cuajado, que afecta la formación de frutos y, en consecuencia, la producción total. Por el contrario, los tratamientos con menor irrigación (T3 y T4) alcanzaron los mayores valores de cosecha.

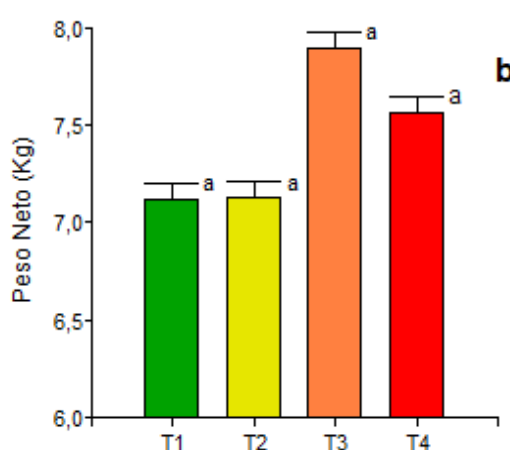


Figura 4.18. Medias ajustadas con MLGM por tratamiento para Peso Neto por planta (kg/planta).

- Peso promedio de racimos

En esta variable se observaron diferencias significativas entre tratamientos (Figura 4.18, $p = 0.0345$). En T1, el mayor número de racimos se asoció con un menor peso promedio por racimo. Se observó una relación inversa entre número y tamaño de racimos: T1 presentó la menor media ajustada (0,120 Kg/racimo); mientras que T2, con menor número de racimos, alcanzó el mayor peso promedio (0,151 Kg/racimo). A pesar de que en cada planta se trabajó con la misma cantidad de pitones en la época de poda, se realizó un desbrote en verde y se llevó a cabo un raleo de racimos mal posicionados para equiparar las condiciones productivas, existieron diferencias entre los tratamientos de los diferentes indicadores de rendimiento.

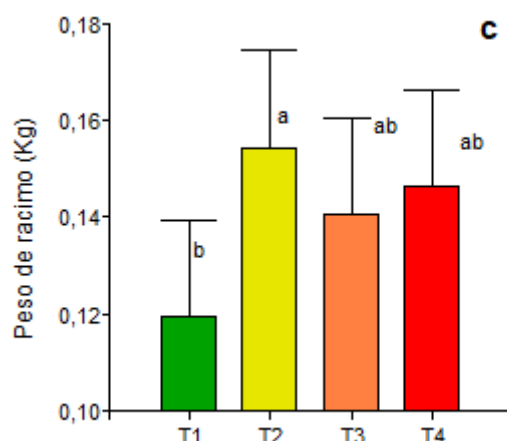


Figura 4.19. Medias ajustadas del peso promedio de racimo (kg/racimo) por tratamiento.

○ Análisis de correlación

Se analizaron conjuntamente las tres variables de rendimiento mediante el coeficiente de correlación de Pearson (Tabla 4.9). Se obtuvo una correlación positiva moderada ($r = 0,46$) entre número de racimos y rendimiento total por planta, y una correlación negativa débil-moderada ($r = -0,32$) entre peso promedio de racimo y número de racimos, lo que indica que, a mayor carga frutal, menor tamaño de racimo. Los valores de probabilidades asociados confirman que las correlaciones observadas son estadísticamente significativas ($p < 0,05$).

Tabla 4.9. Coeficientes de correlación de Pearson entre variables de rendimiento.

Coeficientes\probabilidades	N° de racimos	Rendimiento por planta (Kg)	Peso de racimo (Kg)
N° de racimos	1,00	9,1E-04	0,03
Rendimiento por planta (Kg)	0,46	1,00	2,7E-07
Peso de racimo (Kg)	-0,32	0,66	1,00

1.2.3 Equilibrio vegetativo/productivo

Para establecer la relación vegetativo-productiva se analizó una planta por parcela (Figura 4.20), midiendo el área foliar total (m^2) y el peso de uvas por planta (Kg). De acuerdo con los resultados (Tabla 4.10), no se observaron diferencias significativas entre tratamientos, aunque T2 presentó el valor medio más alto, representando condiciones

óptimas de equilibrio. El valor más bajo se registró en T1, con una relación área foliar/peso de uva inferior al rango recomendado (1–1,5 m²/kg), lo que sugiere una sobrecarga productiva que podría afectar la maduración.

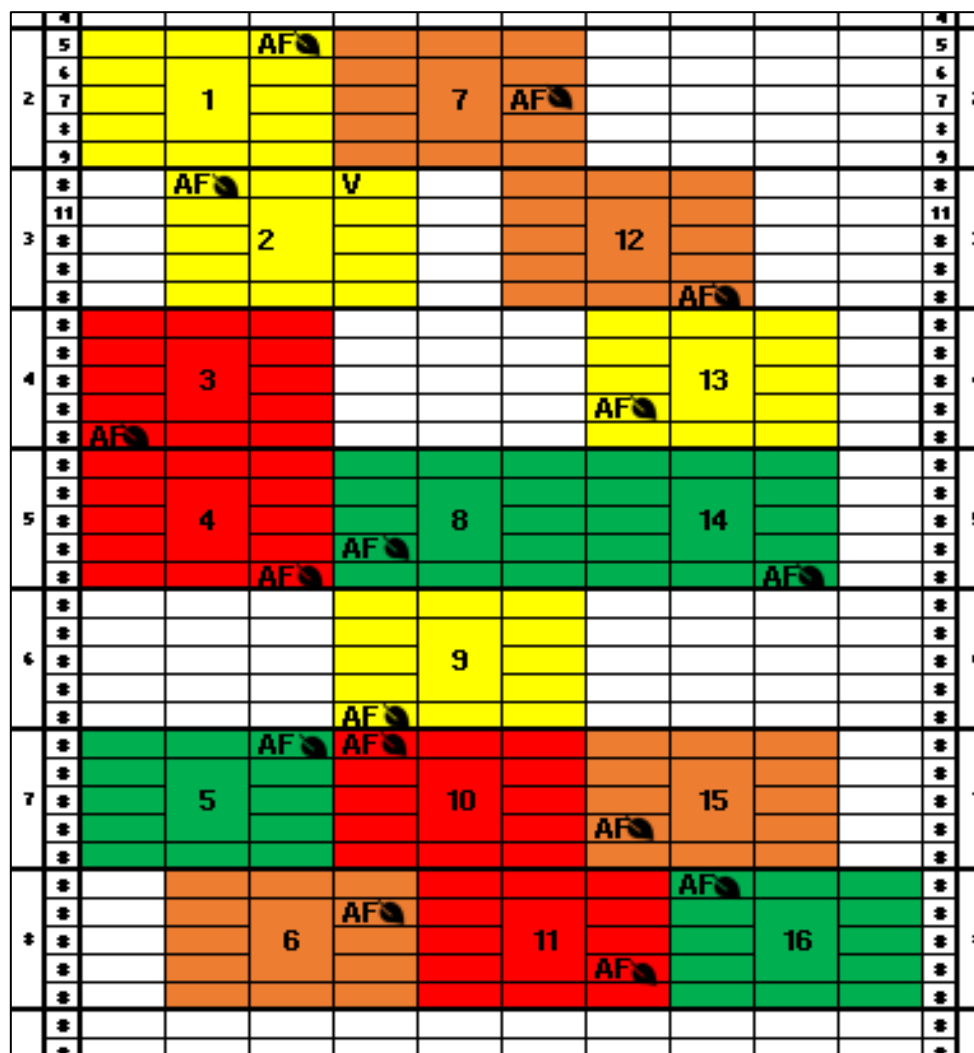


Figura 4.20. Distribución de muestreo de área foliar y peso de producción por parcela.

Tabla 4.10. Medias ajustadas y errores estándares de la relación vegetativo/productiva (m²/kg) por tratamiento (LSD Fisher, $\alpha = 0,05$).

Tratamiento	Área foliar/producción		
	Medias	Errores estándares	p-valor
T1	0,65	±0,27	ns
T2	1,22	±0,27	ns
T3	0,78	±0,27	ns
T4	0,76	±0,27	ns
p-valor	0,4717		

1.2.4 Control de maduración

El análisis de las bayas se centró en el seguimiento del proceso de maduración desde el envero hasta la vendimia. Se registraron semanalmente los valores de pH, sólidos solubles (°Brix), peso de baya y acidez total. Las determinaciones se realizaron en diez fechas comprendidas entre el 17 de enero y el 20 de marzo de 2024. La tabla 4.11 presenta las unidades de medida y nomenclatura utilizadas en el análisis estadístico.

Tabla 4.11. Variables analizadas en el seguimiento de maduración de bayas.

Variable	Unidades	Nomenclatura
Potencial Hidrógeno	Adimensional	pH
Sólidos solubles	°Bx	°Bx
Peso de una baya	g	Pes_Bay
Acidez Total	g/L	AT

Se analizaron los datos de medidas repetidas en el tiempo y se ajustaron los modelos con diferentes estructuras de covarianza, combinando adecuadamente efectos aleatorios (bloque y parcela), estructuras de correlación y heterocedasticidad residual. Dando como resultado las medias ajustadas de la tabla 4.12 para el factor tratamiento, y tabla 4.13 para el tiempo.

Se puede concluir que las diferencias no fueron significativas para el peso de bayas, °Brix, pH y acidez total en la temporada envero-vendimia. Si bien se observa que las bayas de T1 obtuvieron los valores de mayor peso, menor concentración de sólidos solubles y pH, y el valor de acidez total fue con tendencia elevada, así como las uvas generadas en T3.

Para el factor temporal, los MLGM indicaron que todas las variables del seguimiento evolutivo de las bayas fueron diferentes significativamente semana a semana, lo que también se observa en las curvas de maduración. Esto fue consistente con la fase de estudio envero-maduración, que corresponde a la etapa final de la curva doble sigmoide. En esta fase que inició con el cambio de coloración, se produjo el ablandamiento, acumulación de azúcares, caída de la acidez y las bayas alcanzaron su tamaño máximo.

Tabla 4.12. Resultados de MLGM para el factor tratamiento de las variables de maduración.

Medias ajustadas con MLGM - Modelo 4												
Trat	Peso de bayas			Brix			pH			Acidez Total		
T1	1,17	±0,05	Ns	15,83	±0,80	ns	3,11	±0,03	ns	15,77	±0,37	ns
T2	1,12	±0,05	Ns	16,32	±0,80	ns	3,13	±0,03	ns	15,30	±0,37	ns
T3	1,14	±0,05	Ns	16,60	±0,80	ns	3,12	±0,03	ns	15,86	±0,37	ns
T4	1,13	±0,05	Ns	16,45	±0,80	ns	3,14	±0,03	ns	15,33	±0,37	ns
p-valor	0,9152			0,8834			0,8597			0,6230		

Tabla 4.13. Resultados de análisis estadístico con MLGM para el factor temporal DDB (Días Después de Brotación) de las variables de maduración de las bayas.

Medias ajustadas con MLGM - Modelo 4												
DDB	Peso de bayas			Brix			pH			Acidez Total		
107	0,69	±0,03	a	6,04	±0,64	a	2,65	±0,03	a	43,97	±0,45	a
114	0,94	±0,03	b	10,46	±0,63	b	2,74	±0,03	b	32,27	±0,75	b
121	1,04	±0,04	cb	14,00	±0,53	c	2,91	±0,02	c	18,98	±0,42	c
128	1,00	±0,05	cb	16,05	±0,51	d	3,03	±0,02	d	14,69	±0,21	d
135	1,14	±0,05	de	16,15	±0,53	d	3,13	±0,02	e	10,96	±0,27	e
142	1,12	±0,04	de	18,23	±0,53	e	3,22	±0,02	f	9,19	±0,29	f
149	1,23	±0,05	ef	18,81	±0,51	f	3,27	±0,02	g	7,49	±0,23	g
156	1,40	±0,05	g	20,26	±0,50	g	3,39	±0,02	h	6,35	±0,18	h
163	1,36	±0,06	fg	20,59	±0,52	g	3,38	±0,02	h	6,07	±0,16	i
170	1,46	±0,06	g	22,38	±0,67	h	3,55	±0,03	i	5,70	±0,22	j
p-valor	<0,0001			<0,0001			<0,0001			<0,0001		

○ Peso de baya

El peso promedio de las bayas mostró una tendencia ascendente a lo largo de la temporada. Aunque no se observaron diferencias significativas entre los tratamientos (Tabla 4.12), las bayas de T1 presentaron los mayores valores medios de peso (Figura

4.21). Respecto del factor tiempo (DDB), el incremento de tamaño de las bayas fue marcado durante la primera quincena de enero del 2024. Posteriormente, el crecimiento se ralentizó. En los días 142 y 149 DDB (21 y 28 de febrero respectivamente), se registró una ligera disminución del peso de baya en T1. Debido a la sensibilidad de esta variable a las condiciones climáticas, se registraron las temperaturas para interpretar el comportamiento observado, ya que las altas temperaturas estivales limitan la actividad fotosintética y la acumulación de sustancias de reservas en los frutos. Según datos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2024) y la estación meteorológica automática Pegasus, la temperatura mínima del día 142 fue de 20,8 °C, 6,1°C por encima de la media histórica. La máxima alcanzó 38,2°C a las 14:45 hs, superando en 8°C los registros habituales. El día 149 las temperaturas también fueron superiores: +5,1°C en la mínima y +7,3°C en la máxima respecto del promedio histórico. Asimismo, entre el 23 de enero y el 12 de febrero se registró la ola de calor de 23 días consecutivos, con temperaturas máximas absolutas de 38,4°C según el SMN. Este fenómeno se reflejó en la reducción de la tasa de crecimiento a partir del día 114 DDB para los tratamientos T2, T3 y T4. Estos resultados sugieren que las plantas con mayor aporte hídrico mostraron una mayor variabilidad en la tasa de incremento de peso desde el envero hasta la vendimia. En cambio, las cepas menos irrigadas evidenciaron una tendencia descendente desde el día 121 DDB, alcanzando los menores valores de peso a la cosecha.

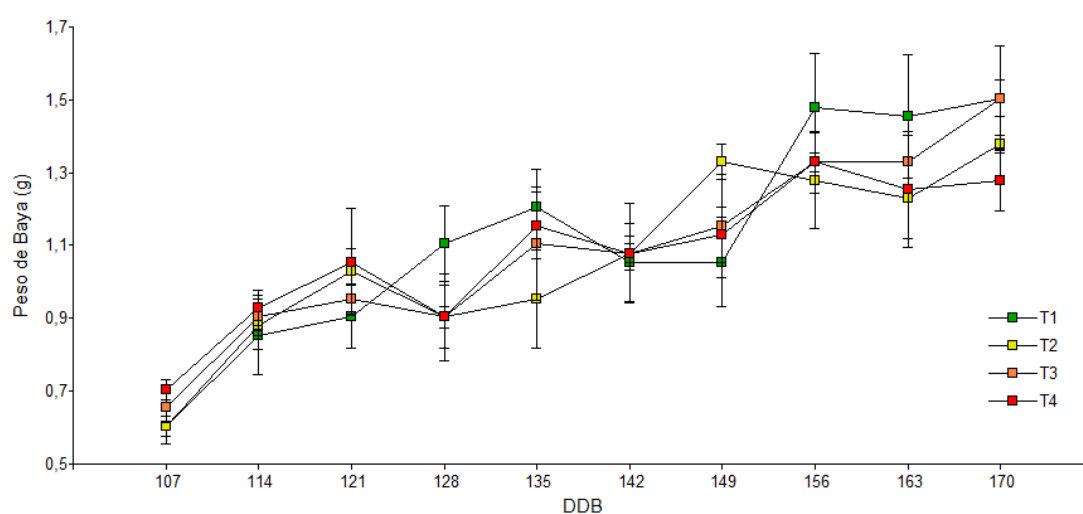


Figura 4.21. Curva de evolución del peso de baya (g) por tratamiento durante el período envero-vendimia.

- Sólidos solubles (°Brix)

La evolución de los sólidos solubles mostró una tendencia ascendente, similar al de peso de baya. Este aumento reflejó la acumulación de azúcares y otros solutos (ácidos, polifenoles, minerales, polisacáridos) que influyen en el índice de refracción medido. El análisis estadístico no reveló diferencias significativas entre los tratamientos (Tabla 4.12). No obstante, las bayas más irrigadas (T1) acumularon menor concentración de sólidos solubles, en comparación con las menos irrigadas, destacándose T3 con la mayor media ajustada. El factor tiempo resultó significativo, con diferencias entre las medias semanales (Tabla 4.13). La tasa de incremento de °Brix se redujo en las primeras quincenas de febrero y marzo, coincidiendo con la cercanía a vendimia, cuando el riego disminuyó y la ligera deshidratación concentró los azúcares. Este efecto fue más marcado en T1, cuyas plantas mostraron menor capacidad de amortiguación hídrica. El aumento de °Bx tuvo tendencia creciente como la variable pH.

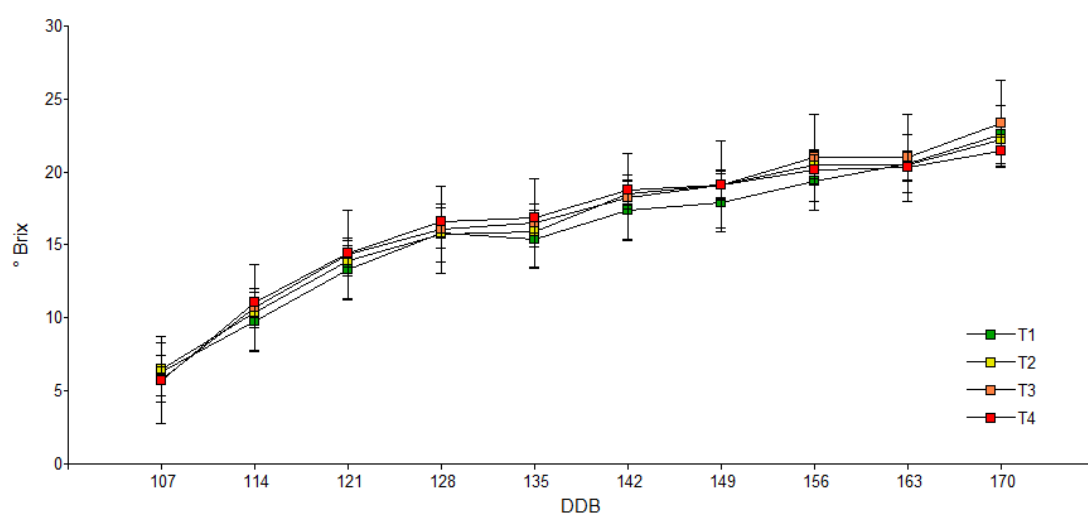


Figura 4.22. Curva de evolución de los sólidos solubles (°Brix) por tratamiento durante el período envero-vendimia.

- pH

El pH del jugo de uvas se determinó semanalmente durante el período de maduración. Esta variable refleja el grado de disociación de los ácidos, determinado por la concentración de iones hidrógenos (H^+) liberados. No se observaron diferencias

significativas entre tratamientos; por lo tanto, los diferentes regímenes de riego no modificaron el pH durante la maduración (Tabla 4.12) (Figura 4.23).

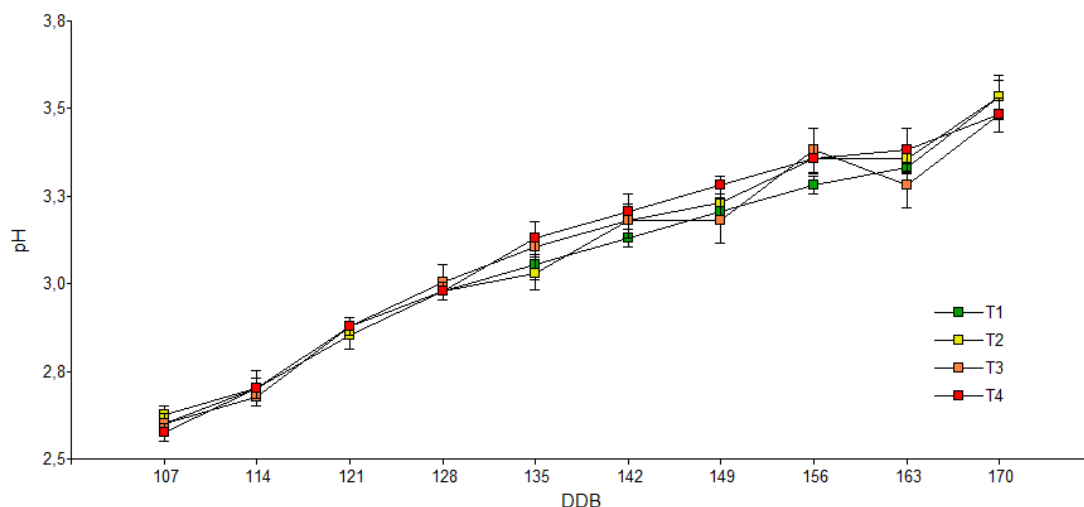


Figura 4.23. Evolución del pH de las bayas por tratamiento durante el período envero-vendimia.

El factor tiempo, (DDB), mostró diferencias significativas entre semanas (Tabla 4.13), dado que se inició el envero con un valor medio ajustado de 2,65 y finalizó en vendimia con 3,55. La tendencia fue creciente, excepto entre la primera y segunda semana de marzo (DDB 156 y 163) donde el pH se mantuvo estable, esta tendencia también se reflejó en la Figura 4.23. Esta variable tuvo relación inversa con la acidez titulable total, donde a medida que pasó el tiempo el pH aumentó y la acidez fue descendiendo como era de esperarse.

○ Acidez titulable total (ATT)

Como se observa en la Figura 4.22, la acidez titulable total (ATT) disminuyó progresivamente durante la temporada, de acuerdo con el patrón esperado. El análisis estadístico no mostró diferencias significativas entre los tratamientos (Tabla 4.12), aunque T3 presentó los valores medios más altos, mientras que T2 y T4 registraron los más bajos. Esta tendencia fue inversa a la observada en los sólidos solubles. Para el factor tiempo (DDB) y la interacción tratamiento*DDB mostraron diferencias significativas en las medias ajustadas. La Tabla 4.13 muestra la marcada evolución semanal de esta variable. El detalle de la evolución temporal por tratamiento se presenta en el Anexo 3. En aproximadamente el 60% de las fechas evaluadas, T3 presentó los valores más altos de ATT; mientras que T2 mostró los más bajos. Esto sugiere que el régimen hídrico

aplicado en T3, favoreció la conservación de los ácidos orgánicos, principalmente el ácido tartárico. Estas condiciones son óptimas para favorecer la estabilidad, conservación y vida útil de los vinos, además de contribuir al equilibrio sensorial.

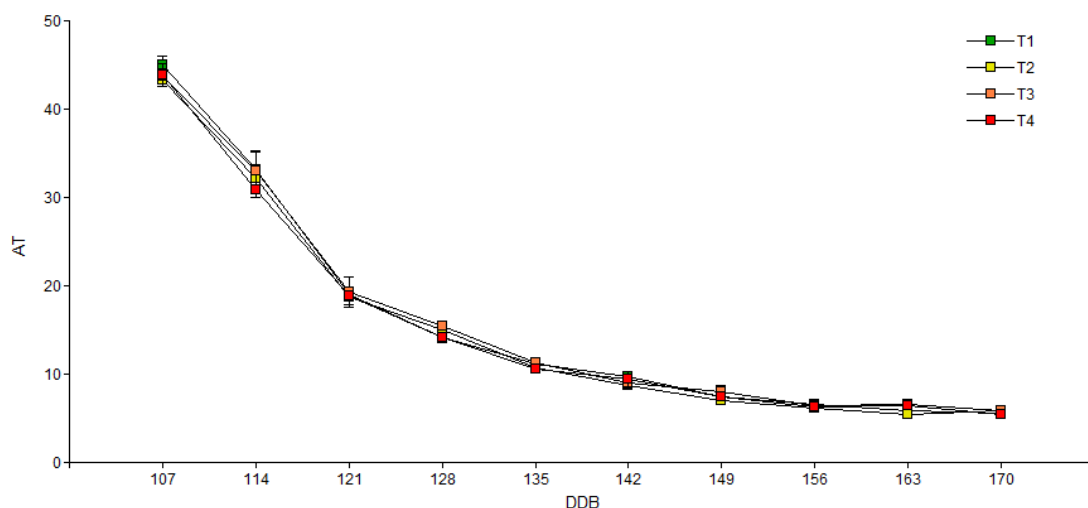


Figura 4.24. Curva de evolución de la acidez total titulable (g/L) por tratamiento.

1.2.5 Control de calidad de bayas

Al momento de la cosecha se analizaron las mismas variables registradas durante la temporada envero-vendimia: concentración de sólidos solubles, pH y acidez total. Se evaluaron también parámetros de tamaño de baya: clase modal, diámetro y peso medio de baya y relaciones de proporciones de hollejo/baya y semilla/baya. Por último, se evaluó la composición polifenólica en hollejos, que es un indicador de la capacidad colorimétrica de las uvas con relación directa con el perfil sensorial visual de los vinos tintos.

- Determinación de concentración de sólidos solubles, pH y acidez total

El análisis estadístico mediante modelos lineales generales y mixtos (MLGM), con prueba LSD de Fischer ($\alpha = 0.05$), no arrojó diferencias significativas entre las medias ajustadas (Tabla 4.14). Sin embargo, se observó una tendencia según la cual los tratamientos con menor riego (T3), presentaron mayores concentraciones de sólidos solubles. El rango para todos los tratamientos quedó establecido entre 21,43°Bx y 22,58 °Bx. El pH se mantuvo dentro del rango característico del varietal para la región, donde los valores

máximos para T1 y T2 fueron 3,58 y mínimos se dieron en T3 y T4 con 3,53; consistentes con los valores observados para acidez total. Estas condiciones favorecen la estabilidad cromática, la madurez fenólica y la conservación de los aromas en los vinos obtenidos.

Tabla 4.14. Clasificación de medias de °Brix, pH y acidez total por tratamiento (MLGM).

Trat	°Brix			pH			Acidez Total		
T1	22,58	±1,11	ns	3,58	±0,05	Ns	±5,63	0,21	ns
T2	22,23	±1,11	ns	3,58	±0,05	Ns	± 5,83	0,21	ns
T3	23,30	±1,11	ns	3,53	±0,05	Ns	±5,64	0,21	ns
T4	21,43	±1,11	ns	3,53	±0,05	Ns	± 5,84	0,21	ns
p-valor	0,4429			0,7375			0,6032		

- Determinación de clase modal, diámetro y peso medio de baya

Las variables gravimétricas evidenciaron que las condiciones de riego influyeron significativamente en la clase modal según el diámetro de las bayas (Tabla 4.15). El tratamiento T1, con mayor aporte de agua, produjo bayas de mayor tamaño, con diámetros entre los 13 y 15 mm. Las menores dimensiones se registraron en T4, con diámetros de 11 a 13 mm. Sin embargo, para el peso medio de baya los modelos MLGM no detectaron diferencias significativas entre tratamientos, aunque se observó una tendencia de relación positiva entre riego y peso, con el máximo en T1 y el mínimo en T4.

Tabla 4.15. Clasificación de medias de clase modal (mm) y peso medio de baya (g) por tratamiento (MLGM).

Trat	Cl_Mod (mm)			Pes_Bay (g)		
T1	13,00	±0,41	a	1,56	±0,09	ns
T2	12,00	±0,41	ab	1,44	±0,09	ns
T3	12,00	±0,41	ab	1,53	±0,09	ns
T4	11,00	±0,41	b	1,32	±0,09	ns
p-valor	0,0460			0,2528		

- Determinación de las relaciones hollejo/baya y semilla/baya

Para calcular las relaciones hollejo/baya y semilla/baya se utilizaron las variables auxiliares detalladas en la Tabla 4.16. Las medias ajustadas de los componentes gravimétricos se presentan en la Tabla 4.17. Como se mencionó previamente, el peso de baya no fue significativamente afectado por el régimen de riego. Sin embargo, para el resto de las variables, sí se observaron diferencias significativas. Un mayor aporte agua se asoció con bayas de mayor peso de pulpa, hollejos (frescos y liofilizados) y semillas, así como con un mayor número de semillas por baya. Estas tendencias se ilustran en la Figura 4.25.

La relación hollejo/baya no fue significativamente afectada por los tratamientos, mientras que la relación semilla/baya sí mostró variación. Un mayor peso de semilla por baya implica que la planta destinó más recursos (azúcares y fotoasimilados) a la formación de las semillas, que ocurren en etapas tempranas del desarrollo. Este indicador es desfavorable para la calidad enológica, por lo que T1 resultó el tratamiento más afectado. Si bien los taninos (flavon-3-oles) y ácidos fenólicos presentes en parte en las semillas son cruciales para la determinación de la estructura, complejidad, longevidad, aporte de propiedades antioxidantes en los vinos, si se encuentran en una cantidad desproporcionada pueden generar astringencia y amargor excesivos. Estas cualidades interfieren negativamente en el perfil sensorial gustativo de los vinos tintos desvalorizando la calidad productiva.

Tabla 4.16. Variables auxiliares y nomenclatura empleada para el cálculo de relaciones hollejo/baya y semilla/baya.

Variable	Unidades	Nomenclatura
Peso de hollejo/1 Baya	G	Pes_Holl
Peso de hollejo liofilizado/1 Baya	G	Pes_Holl_L
Peso de pulpa/ 1 Baya	G	Pes_Pul
Peso de semillas/1 Baya	G	Pes_Sem
Cantidad de semillas/1 Baya	Unidades	N_Sem
Relación hollejo/baya		Holl_Bay
Relación semilla/baya		Sem_Bay

Tabla 4.17. Medias ajustadas por tratamiento de los componentes gravimétricos (hollejo, pulpa y semilla).

Trat	Pes_Bay (g)			Pes_Holl (g)			Pes_Holl_L (g)			Pes_Pul (g)		
T1	1,56	±0,09	ns	0,22	±0,02	a	0,05	±3,2E-03	a	1,55	±0,02	a
T2	1,44	±0,09	ns	0,17	±0,02	ab	0,05	±3,2E-03	a	1,27	±0,13	ab
T3	1,53	±0,09	ns	0,18	±0,02	ab	0,05	±3,2E-03	a	1,35	±0,19	ab
T4	1,32	±0,09	ns	0,12	±0,02	b	0,03	±3,2E-03	b	1,08	±0,02	b
p-valor	0,2528			0,0501			0,0185			<0,0001		
Trat	Pes_Sem (g)			N_Sem			Holl_Bay			Sem_Bay		
T1	0,06	±0,01	a	2,13	±0,12	a	0,12	±0,01	ns	0,04	±3,4E-03	a
T2	0,03	±3,5E-03	ab	2,00	±0,12	a	0,12	±0,01	ns	0,02	±3,4E-03	b
T3	0,04	±0,01	b	1,94	±0,12	ab	0,11	±0,01	ns	0,03	±3,4E-03	ab
T4	0,03	±0,01	b	1,57	±0,12	b	0,10	±0,01	ns	0,03	±3,4E-03	ab
p-valor	0,0250			0,0505			0,1901			0,014		

○ Determinación de composición polifenólica en hollejos

Se determinaron las concentraciones de taninos y antocianos en las soluciones de extracción de hollejos de cada parcela de acuerdo con la técnica Harbertson y Adams (2002), (Tabla 4.18). Aunque las diferencias entre tratamientos no fueron estadísticamente significativas (Table 4.19), T3 presentó la mayor concentración media de taninos. Estos compuestos aportan estructura, complejidad y astringencia, atributos que se reflejaron posteriormente en los vinos de T3. Este comportamiento es coherente con la fracción hollejo/baya, que no fue modificada por los tratamientos de riego.

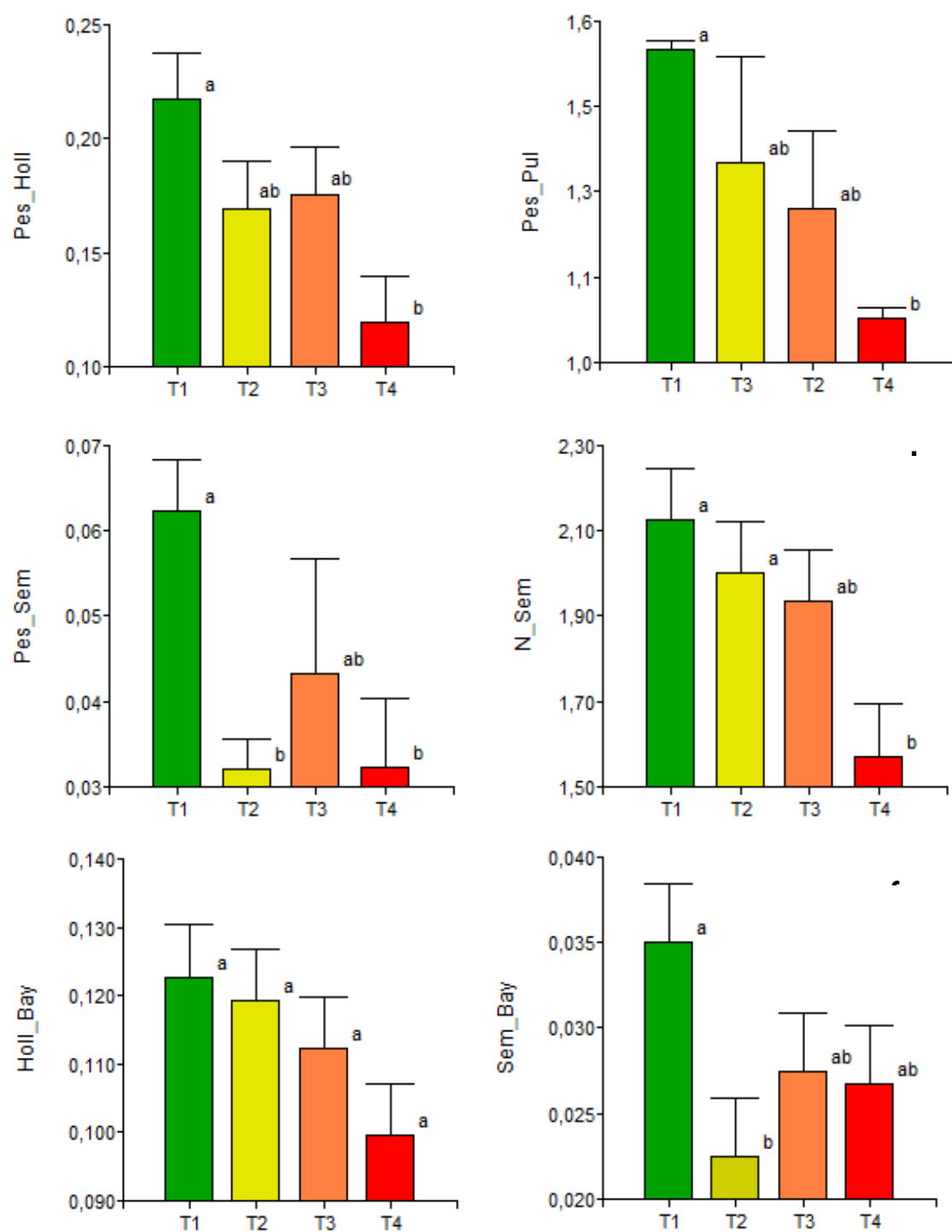


Figura 4.25. Componentes gravimétricos de la baya por tratamiento con error estándar.

Tabla 4.18. Nomenclatura y dimensión de las variables de polifenólicas de hollejos.

Variable	Unidades	Nomenclatura
Taninos en hollejos	mg/g	Tan
Antocianos en hollejos	mg/g	Ant

Tabla 4.19. Medias ajustadas de taninos y antocianos en hollejos (mg/g) por tratamiento.

Trat	Tan			Ant		
T1	25,36	±1,09	ns	46,82	±3,20	ns
T2	24,62	±1,09	ns	49,73	±3,20	ns
T3	27,36	±1,09	ns	51,35	±3,20	ns
T4	24,88	±1,09	ns	52,92	±3,20	ns
p-valor	0,3233			0,5962		

La concentración de taninos no fue significativamente diferente para los tratamientos, si bien puede observarse un máximo para T3, Figura 4. 26.a. De acuerdo con la Figura 4.26.b se observa una tendencia al incremento de antocianos con la restricción hídrica. Los pigmentos flavonoides, en particular las antocianinas, son responsables de la pigmentación característica de los vinos tintos. Estos resultados concuerdan con los datos obtenidos para el índice de color (IC), conforme a lo descrito en la sección 1.3.2 parámetros colorimétricos, ya que las antocianinas constituyen el principal componente responsable.

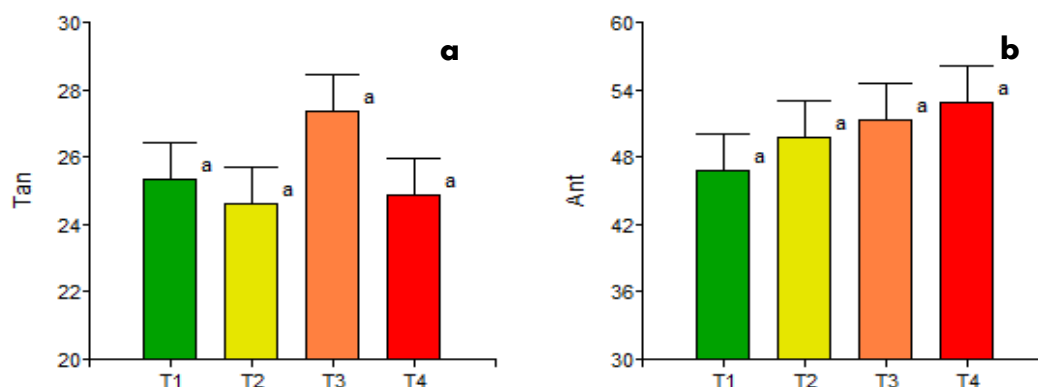


Figura 4.26. Contenido medio de taninos y antocianos en hollejos por tratamiento.

1.2.6 Nutrición foliar

El análisis de nutrición foliar se centró en la composición de macronutrientes y micronutrientes, evaluados por separado en pecíolo y limbo. El muestreo se llevó a cabo en vendimia. La nomenclatura utilizada se resume en la Tabla 4.20. El tratamiento incluyó un análisis de componentes principales (ACP) considerando 18 variables respuesta.

Las dos primeras componentes principales, CP1(50,2) y CP2(30,4) explicaron conjuntamente el 80,6% de la variabilidad total (Figura 4.27). En relación con los tratamientos, T1 (identificado en color verde) se asoció principalmente con los macronutrientes nitrógeno (N), fósforo (P), potasio(K) de limbo y pecíolo, así como calcio (Ca) en pecíolo. T2 se vinculó con la mayoría de los micronutrientes presentes en el limbo. T3 mostró asociación con hierro (Fe), zinc (Zn) y magnesio (Mg) de limbo. Por último, T4 se asoció con mayores concentraciones de cobre (Cu) en toda la hoja y calcio (Ca) en el limbo.

El análisis multivariado para zonas foliares (Figura 4.28) mostró un comportamiento entre limbo y pecíolo, con clara separación de los datos en dos grupos. La variabilidad observada en el limbo se asoció principalmente con los micronutrientes Fe, Cu y Mn. En el pecíolo predominó la asociación con macronutrientes (Ca, Mg y, en menor grado K) y con el micronutriente Zn. El fósforo (P), presentó baja contribución a la varianza total, indicando escasa variabilidad entre tratamientos.

La proximidad de los vectores de Fe y Cu indica una correlación positiva entre ambos, atribuible a que ambos son elementos de transición capaces de formar complejos estables y participar en reacciones redox. El ángulo de 180 ° entre Fe y Ca refleja una relación inversa: altos niveles de Ca y pH elevados reducen la solubilidad y absorción radicular de Fe, fenómeno típico en suelos calcáreos

Tabla 4.20. Variables y nomenclatura empleadas para el análisis de nutrición foliar.

Pecíolo	Macronutrientes	Nitrógeno (%)	N_P
		Fósforo (%)	P_P
		Potasio (%)	K_P

Limbo		Calcio (%)	Ca_P
		Magnesio (%)	Mg_P
	Micronutrientes	Hierro (mg/Kg)	Fe_P
		Cobre (mg/Kg)	Cu_P
		Zinc (mg/Kg)	Zn_P
		Manganeso (mg/Kg)	Mn_P
	Macronutrientes	Nitrógeno (%)	N_L
		Fósforo (%)	P_L
		Potasio (%)	K_L
		Calcio (%)	Ca_L
		Magnesio (%)	Mg_L
	Micronutrientes	Hierro (mg/Kg)	Fe_L
		Cobre (mg/Kg)	Cu_L
		Zinc (mg/Kg)	Zn_L
		Manganeso (mg/Kg)	Mn_L

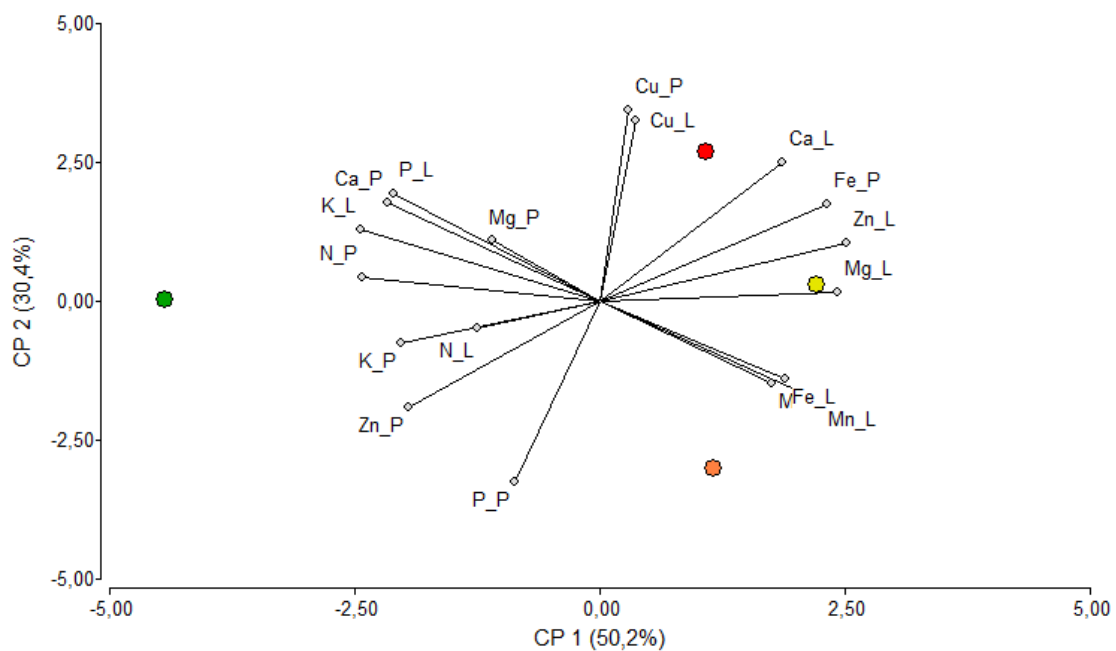


Figura 4.27. Análisis de componentes principales (APC) para macro y micronutrientes por tratamiento.

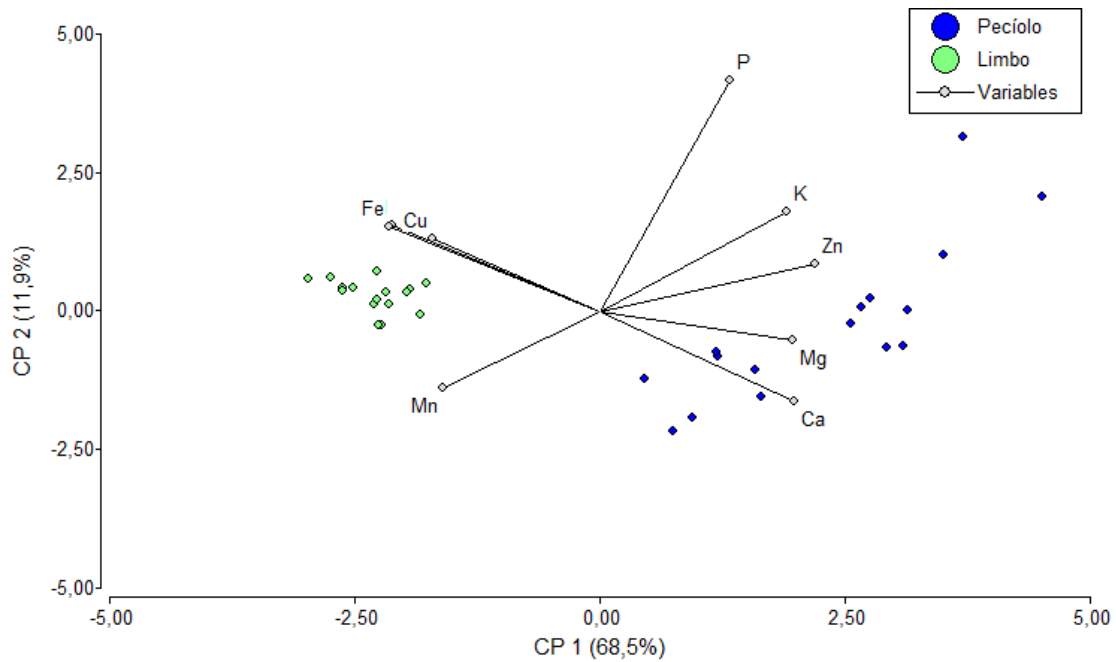


Figura 4.28. Análisis de componentes principales (APC) para macro y micronutrientes de pecíolo y limbo.

El estudio estadístico se complementó con modelos lineales generales y mixtos (MLGM), cuyos resultados indicaron que ni los macronutrientes ni los micronutrientes en pecíolo y limbo fueron significativamente afectados por los tratamientos ($p > 0,05$). Las medias ajustadas (Anexo 4, Tabla 2) confirman la ausencia de diferencias significativas entre tratamientos ($p > 0,05$). No obstante, se observó que los mayores porcentajes de nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio, tanto en pecíolo como limbo, correspondieron al tratamiento 1. Comparando las dos regiones foliares, los macronutrientes mostraron concentraciones superiores en pecíolo respecto al limbo, excepto el nitrógeno, que fue mayor en este último. En cuanto a los micronutrientes, la tendencia fue distinta: el menor aporte hídrico (T4) favoreció concentraciones de Fe en pecíolos, Cu en toda el área foliar y Zn en el limbo. El tratamiento T3 presentó mayores concentraciones de Mn en ambas regiones foliares. En general, los niveles de micronutrientes fueron más elevados en el limbo que en el pecíolo, con la excepción del cobre, cuyo contenido fue superior en el limbo. Según los límites óptimos reportados (Anexo 4, Tabla 1), las concentraciones de Fe, Zn y Mn fueron superiores a los rangos ideales, aunque sin alcanzar niveles de toxicidad. En cambio, el caso del cobre en el limbo superó el umbral máximo recomendado (100 ppm) en los tratamientos. El equilibrio

nutricional observado sugirió que la restricción hídrica moderada no comprometió la disponibilidad de nutrientes esenciales.

1.2.7 Ratio isotópico de carbono ($\delta^{13}\text{C}$)

La composición isotópica de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) se determinó en vendimia en muestras secas de bayas y hojas. La nomenclatura utilizada en tablas y figuras se resume a continuación (Tabla 4.21). La determinación de $\delta^{13}\text{C}$, se llevó a cabo en el Instituto de Geocronología y Geología Isotópica (INGEIS) de la Universidad de Buenos Aires (UBA). Los valores de $\delta^{13}\text{C}$ se calcularon en relación con el estándar internacional V-PDB. El análisis se realizó en un espectrómetro de masas Finnigan MAT Delta-S, configurado para relaciones isotópicas de carbono respecto de V-PDB.

Tabla 4.21. Variables, unidades y nomenclatura de las variables $\delta^{13}\text{C}$.

Variable	Unidades	Nomenclatura
Composición isotópica de carbono en baya	‰ vs VPDB	$\delta^{13}\text{C_B}$
Composición isotópica de carbono en hoja	‰ vs VPDB	$\delta^{13}\text{C_H}$

De acuerdo con las escalas de interpretación vigentes, los resultados de $\delta^{13}\text{C}$ en bayas y hojas indican condiciones hídricas desde adecuadas hasta ligeramente deficitarias (Tabla 4.22). El valor menos negativo (mayor enriquecimiento en ^{13}C) se registró en T4—parcela 10 para bayas (-25,90 ‰), lo que sugiere déficit hídrico leve durante envero-vendimia. Este resultado es coherente con el análisis hídrico: frente a una lámina teórica de 234 mm (estimada con clima, suelo y planta), el Tratamiento 4 permitió ahorrar ~100 mm respecto de la lámina real aplicada, sin alcanzar niveles de estrés severo, lo que equivale a un ahorro del 43 %.

En función de los resultados de los MLGM, existieron diferencias significativas para la composición isotópica de carbono en bayas y hojas (Tabla 4.22). La clasificación reveló que T1 fue diferente al resto, alcanzando los valores mínimos para ambas partes de la cepa. Para T2, T3 y T4 el comportamiento de las uvas y limbos fue similar lo que indicó un comportamiento del estado hídrico semejante. Estos resultados son acordes a lo descrito en el agua total aportada por tratamiento, considerando el riego por goteo y

aporte de lluvias efectivas durante el período de tiempo evaluado. Respecto a las escalas internacionales vigentes, todos valores corresponden a nulo estrés hídrico. La diferencia de T1, estaría asociado al exceso de agua calculada; mientras que la equiparación de T2, T3 y T4 estaría sujeta a la semejanza de la lámina real de agua, ya que no se pudo dosificar el agua necesaria para generar los diferentes niveles de estrés hídrico.

Tabla. 4.22. Resultado de MLGM por tratamiento de $\delta^{13}\text{C}$ para bayas y hojas (‰ vs VPDB).

Tratamiento	$\delta^{13}\text{C}$ Baya			$\delta^{13}\text{C}$ Hoja		
T1	-27,55	$\pm 0,25$	a	-28,23	$\pm 0,25$	a
T2	-26,35	$\pm 0,25$	b	-27,43	$\pm 0,25$	b
T3	-26,63	$\pm 0,25$	b	-27,28	$\pm 0,25$	b
T4	-26,70	$\pm 0,25$	b	-27,15	$\pm 0,25$	b
p-valor	0,0014			0,0240		

Aunque la clasificación de medias fue similar tanto para las bayas como para los limbos, los valores correspondientes a las hojas presentaron mayor negatividad. Esto se puede observar en la Figura 4.29. Es notable que, en el caso de las bayas, el tratamiento T2 mostró el valor más alto, lo cual indica una menor condición hídrica en dichas muestras. Por otro lado, en las hojas, el tratamiento T4 alcanzó el mayor valor, lo que sugiere que las hojas de estas plantas estaban en un estado de menor hidratación.

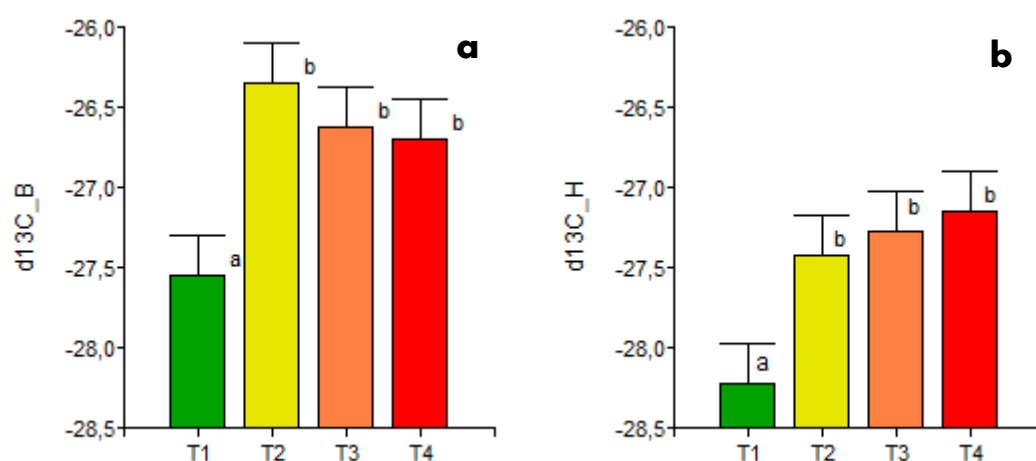


Figura 4.29. Medias ajustadas por tratamiento mediante MLGM. a) $\delta^{13}\text{C}$ de bayas b) $\delta^{13}\text{C}$ de hojas.

Para evaluar la relación entre $\delta^{13}\text{C}$ en bayas y hojas, se estimó el coeficiente de correlación de Pearson. Se obtuvo $r = 0,68$, una correlación positiva moderada-fuerte

estadísticamente significativa. En la Figura 4.30 muestra la proporcionalidad directa entre ambas variables. Los símbolos por tratamiento se codificaron por color: T1 (verde), T2 (amarillo), T3 (naranja), T4 (rojo).

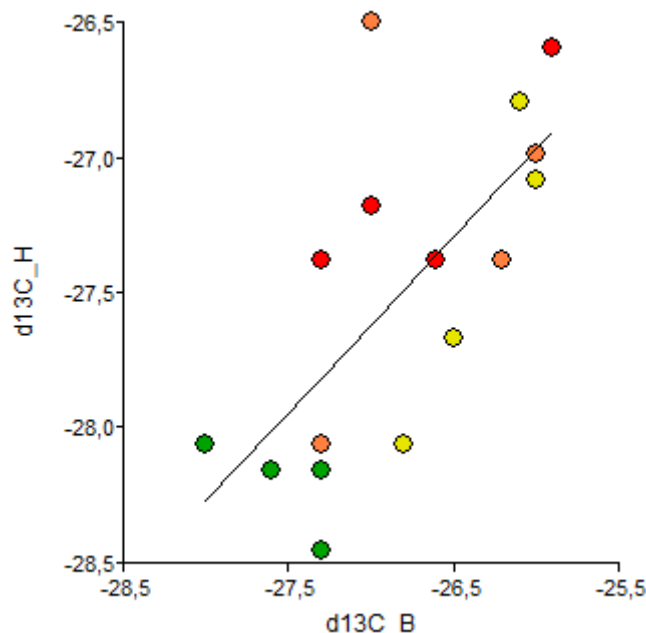


Figura 4.30. Dispersión $\delta^{13}C_H$ vs $\delta^{13}C_B$ por tratamiento con ajuste lineal (T1: verde; T2: amarillo; T3: naranja; T4: rojo).

La correlación fue significativa ($p = 0,0034$). La ecuación de ajuste fue: $\delta^{13}C_H = 0,67 \cdot \delta^{13}C_B - 9,63$, lo que indica que, en promedio, $\delta^{13}C$ en hojas es más negativo que en bayas.

En conjunto, los resultados de composición isotópica de carbono confirman que la discriminación isotópica ($\delta^{13}C$) constituye un indicador robusto e integrador del estado hídrico del viñedo. Las variaciones registradas entre tratamientos reflejan diferencias en la eficiencia intrínseca del uso del agua y validan la aplicación de riegos deficitarios controlados como estrategia agronómica sostenible en ambientes áridos. El leve enriquecimiento isotópico observado en las bayas de los tratamientos con menor aporte hídrico (T3 y T4) sugiere un ajuste fisiológico eficiente ante la restricción de agua, que favorece la síntesis de compuestos fenólicos sin afectar el rendimiento global. De esta manera, el $\delta^{13}C$ se consolida como una herramienta cuantitativa de alta sensibilidad para

evaluar el balance hídrico y orientar decisiones de manejo orientadas a la calidad enológica y a la eficiencia en el uso del recurso hídrico.

1.3 Vino

En las 16 microvinificaciones obtenidas por parcela se evaluaron variables fisicoquímicas, colorimétricas y sensoriales, detalladas en la Tabla 4.23, después de haber evolucionado en botella durante 2,5 meses desde al segundo trasiego. Se trabajó bajo normativa vigente, OIV, 2021. Para las variables colorimétricas se siguieron las técnicas establecidas por Glories et al., (1984), Ribéreau-Gayon y colaboradores (2006) y se calcularon las coordenadas CIELab (L, a, b*) con las recomendaciones de la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE, 2004). El análisis sensorial de los vinos se llevó a cabo en una sala de degustación diseñada de acuerdo con la norma ISO 8589:2010 (ISO 8589, 2010).

Tabla 4.23. Variables, unidades y nomenclatura empleadas en el análisis de vinos.

Variable	Unidades	Nomenclatura
Azúcares reductores	(g/L)	AR
Anhídrido sulfuroso libre	(g/L)	ASL
Alcohol	(° Gay Lussac, % V/V)	ALC
Densidad	(g/mL)	DEN
Ácido Acético	(g/L)	AC AC
Ácido Cítrico	(g/L)	AC CI
Ácido Láctico	(g/L)	AC LA
Ácido Málico	(g/L)	AC MA
Ácido Tartárico	(g/L)	AC TA
Ácido Total	(g/L)	AC TOT
Glicerol	(g/L)	GLI
Fructosa	(g/L)	FRU
Glucosa	(g/L)	GLU
Sacarosa	(g/L)	SAC
Azúcar Total	(g/L)	AZ TOT
Intensidad de color	n/A	I

Tonalidad	n/A	T
Índice de Color	n/A	IC
Luminosidad	n/A	L*
Coordenada roja/verde	n/A	a*
Coordenada amarilla/azul	n/A	b*
Matiz del color	°	h*
Pureza	n/A	C*
Índice de Polifenoles Totales	n/A	IPT
Puntaje Total Agosto/24	Puntos	PT 08/24
Puntaje Total Noviembre/24	Puntos	PT 11/24

Dada la amplitud de variables registradas, se aplicó un análisis estadístico descriptivo multivariado. Se incluyeron tres herramientas principales: matriz de diagramas de dispersión, distancia euclídea y análisis de componentes principales (ACP). En la matriz de dispersión (Anexo 5) se identificaron tanto variables con correlaciones curvilíneas como aquellas sin relación aparente, representadas por distribuciones aleatorias de puntos. Las correlaciones lineales positivas más destacadas fueron: alcohol-ácido acético, alcohol-puntaje sensorial, ácido acético-glicerol, fructosa-azúcares residuales y glicerol-alcohol. Las correlaciones negativas se observaron entre ácido acético-pH, acidez total-pH y ácido tartárico-pH. En cambio, no se registraron relaciones consistentes entre anhídrido sulfuroso libre-puntaje sensorial, densidad-azúcar residual y glucosa-ácido acético, entre otras combinaciones. La matriz de dispersión correspondiente a las variables colorimétricas se presenta en el Anexo 6. Las correlaciones lineales positivas más destacadas fueron: intensidad de color-índice de color, intensidad de color-coordenada roja/verde (a), y tonalidad-matiz del color (h). Entre las relaciones inversas se observaron coordenada roja/verde-coordenada amarilla/azul (a-b) y luminosidad-intensidad de color (L*-I). Las variables sin relación aparente (dispersión aleatoria de puntos) fueron índice de polifenoles totales-matiz de color e intensidad de color-tonalidad. Estas tendencias también se reflejan en los coeficientes de correlación de Pearson, ver Anexo 7 y 8. Se destaca la correlación lineal entre la componente de color rojo (a*) y la concentración de antocianos en hollejos, con una ecuación de ajuste: $y_{ant} = 0,6635 \cdot x_{a^*} + 35,982$; con un coeficiente $R^2 = 0,976$.

Para estimar la variabilidad entre las muestras en el espacio multivariado (características fisicoquímicas, colorimétricas y sensoriales), se utilizó la distancia euclídea, que permite generalizar la comparación en espacios de alta dimensión. Se calcularon las distancias tanto entre unidades experimentales (16 parcelas) como entre tratamientos (T1–T4). Según los resultados (Anexo 9.C), la mayor distancia —indicativa de menor similitud— se observó entre la parcela 14 (T1) y la parcela 7 (T3). A nivel de tratamientos, la mayor disimilitud correspondió a T1 y T4, con distancia euclídea de 9,78. Los tratamientos más semejantes fueron T2 y T3, con una distancia de 5,51 (Tabla 4.24).

Tabla 4.24. Distancias euclídeas entre tratamientos (T1–T4) basadas en variables fisicoquímicas, colorimétricas y sensoriales de microvinificaciones.

Euclídea	T1	T2	T3	T4
T1	0,00	7,56	8,71	9,78
T2	7,56	0,00	5,51	5,71
T3	8,71	5,51	0,00	5,70
T4	9,78	5,71	5,70	0,00

El análisis de componentes principales (ACP), explicó el 67,5% de la variabilidad total mediante las dos primeras componentes (CP1 y CP2), considerando 26 variables originales. De acuerdo con los *scores* (valores de las componentes principales) representados en el *biplots*, no se observó una separación clara de grupos por tratamiento. En la representación de las variables (*loading plot*), se identificaron aquellas con alta correlación lineal, definidas por ángulos menores a 30° entre vectores. Se delimitaron cinco regiones principales en el espacio bidimensional definido por CP1 y CP2 (Figura 4.31), las cuales agrupan variables con comportamientos similares o dependientes, como se detalla a continuación:

1. Región I (violeta)— Variables de acidez y azúcares:

Agrupación de acidez total, ácidos tartárico y málico; fructosa, glucosa y azúcares residuales, inversamente correlacionados con el pH y alcohol. Esta zona se asocia con vinos de mayor frescura y menor madurez fisiológica.

Predominio de T1 y T2, con mayor aporte hídrico y menor concentración alcohólica. Representa vinos con fermentaciones incompletas o mayor contenido de azúcares residuales.

2. Región II (naranja)– Variables de color e intensidad cromática:

Comprende intensidad de color, índice de color, coordenada a^* (rojo) y pureza cromática (C^*). Explica la concentración fenólica y la calidad visual del vino. Se relaciona con T4, donde el leve déficit hídrico favoreció la síntesis de antocianos.

3. Región III (celeste) – Puntuación de análisis sensorial e índice de polifenoles totales:

Involucra los resultados de las evaluaciones de análisis sensorial realizadas en agosto-noviembre de 2024 y el IPT.

Asociada principalmente a T3, que obtuvo las mayores puntuaciones de la temporada en relación con los taninos.

4. Región IV (azul) – Variables de composición alcohólica, glicerol, pH, resto de componentes ácidos:

Incluye alcohol, glicerol, ácido acético y láctico. Refleja vinos con buena fermentación, cuerpo y complejidad.

Asociada principalmente a T3, caracterizado por riego moderado y mejor balance fisiológico.

5. Región V (rosado)– Variables colorimétricas y sacarosa:

Agrupar a las variables colorimétricas luminosidad, componente color amarillo, matiz del color y tonalidad. Muestran relación inversa con las otras componentes de color, IC y componente de color rojo. Estas variables están relacionadas con vinos de menor color y menos intensidad.

Más asociada a T1 dado que el exceso de agua diluyó los componentes flavonoides de las bayas.

En conjunto, el análisis multivariado de las microvinificaciones muestra que los tratamientos de riego diferenciados produjeron vinos con perfiles fisicoquímicos y sensoriales coherentes con las respuestas ecofisiológicas observadas en el viñedo. Los tratamientos con restricción hídrica moderada (T3 y T4) se asociaron a vinos de mayor concentración alcohólica, glicerol y color, atributos directamente vinculados con la acumulación de compuestos fenólicos. Por el contrario, los tratamientos con mayor dotación hídrica (T1 y T2) presentaron vinos de menor intensidad cromática y acidez más elevada. De esta manera, el conjunto de variables enológicas confirma que el manejo del riego impacta significativamente en la expresión final del vino, y que estrategias de riego deficitario controlado pueden mejorar la calidad sensorial sin comprometer la estabilidad tecnológica ni el equilibrio productivo.

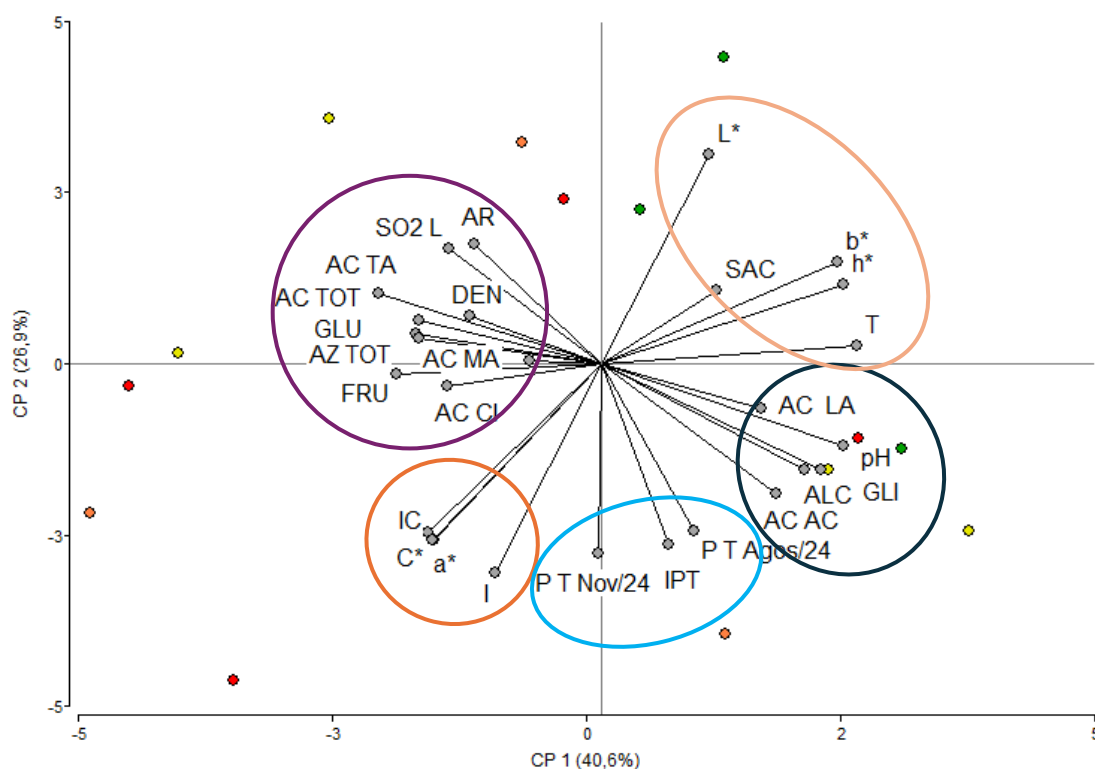


Figura 4.31. Análisis de componentes principales (APC) para macro y micronutrientes por tratamiento.

1.3.1 Composición físicoquímica de microvinificaciones

Las variables evaluadas fueron los parámetros de acidez: ácido acético, ácido cítrico, ácido láctico, ácido málico, ácido tartárico y acidez total; densidad, contenido alcohólico expresado en concentración de glicerol; variables del tenor azucarino: fructosa, glucosa,

sacarosa y azúcares residuales totales. De acuerdo con el análisis estadístico multivariado (Tabla 4.25), los diferentes regímenes de riego aplicados en cada tratamiento no produjeron variaciones significativas en la composición fisicoquímica de las microvinificaciones correspondientes a cada parcela. Los gráficos de barras de las medias ajustadas y errores estándar por tratamiento (LSD Fisher, $\alpha=0,05$), presentados en el Anexo 10 tampoco evidenciaron comportamientos diferenciados. En general, las variables fisicoquímicas presentaron valores dentro de los rangos habituales para vinos de la variedad estudiada en condiciones áridas. La ausencia de diferencias significativas entre tratamientos sugiere que el manejo hídrico no afectó de manera determinante la fermentación alcohólica ni la composición básica del vino, aunque sí se pudo analizar mediante la distancia euclídea que las vinificaciones más semejantes fueron las de T2 y T3, y las más disímiles las de T1 respecto a T4 (Anexo 9). Esto indica una buena estabilidad tecnológica de las microvinificaciones frente a variaciones moderadas de riego.

Tabla 4.25. Resultados de modelos lineales generales y mixtos (MLGL) de variables fisicoquímicas del vino.

Trat	AC AC		AC CI		AC LA		AC MA		AC TA		AC TOT	
T1	0,46	±0,04	0,00	±0,01	0,21	±0,14	1,55	±0,24	1,95	±0,18	4,05	±0,21
T2	0,43	±0,04	0,01	±0,01	0,22	±0,14	1,40	±0,24	2,25	±0,18	4,45	±0,21
T3	0,45	±0,04	0,02	±0,01	0,02	±0,14	1,78	±0,24	2,09	±0,18	4,25	±0,21
T4	0,41	±0,04	0,01	±0,01	0,00	±0,14	1,85	±0,24	2,20	±0,18	4,28	±0,21
p-valor	0,7325 (ns)		0,4056 (ns)		0,3645 (ns)		0,5517 (ns)		0,4453 (ns)		0,3645 (ns)	
Trat	DEN		GLI		FRU		GLU		SAC		AZ TOT	
T1	0,99	±3,7E-04	10,13	±0,70	1,13	±0,48	0,70	±0,22	0,53	±0,14	0,95	±0,57
T3	0,99	±3,7E-04	9,55	±0,70	1,40	±0,48	0,93	±0,22	0,65	±0,14	1,63	±0,57
T2	0,99	±3,7E-04	9,40	±0,70	1,73	±0,48	1,20	±0,22	0,50	±0,14	2,00	±0,57
T4	0,99	±3,7E-04	9,03	±0,70	1,38	±0,48	1,33	±0,22	0,33	±0,14	1,40	±0,57
p-valor	0,6033 (ns)		0,6579 (ns)		0,8096 (ns)		0,1331 (ns)		0,2963 (ns)		0,5488 (ns)	

1.3.2 Parámetros colorimétricos

La extracción de color se evaluó mediante los parámetros clásicos de vinificación (Tabla 4.26). Se trabajó con espectrofotometría 420, 520 y 620 nm de longitud de onda. Los cálculos de las variables se pueden consultar en el anexo 12. El color de una muestra se define por la intensidad de color (I) y el tono (T), donde este último representa la importancia relativa del amarillo sobre el rojo. De acuerdo con los resultados (Tabla 4.27), la variable I no fue afectada significativamente por los tratamientos; no obstante, se observó una tendencia a la disminución de las medias a medida que aumentó la cantidad de agua aplicada (Figura 4.32.a). La tonalidad (T) si fue afectada significativamente por el riego. Si bien en todos los tratamientos predominaron tonalidades rojas, el tratamiento T1 (mayor riego) mostró un perfil cromático menos rojizo que T2 y T4 (Figura 4.32.b). Para el índice de color (IC) no se detectó efecto significativo del riego; sin embargo, se observó una tendencia de incremento del IC bajo restricción hídrica (Figura 4.32.c). De acuerdo con la Resolución INV 135/2018 la media para T1 se ubicó próxima al límite (500) establecido para vinos tintos (Tabla 4.27).

Para el índice de polifenoles totales (IPT), que refleja mayoritariamente el contenido de taninos, no se observaron diferencias significativas entre las medias ajustadas (MLGM Tabla 4.27). Aun cuando se evidenció una tendencia de incremento del IPT con la reducción hídrica (Figura 4.32.d), ninguno de los valores superó 40, umbral de referencia para calidad estándar.

Tabla 4.26. Variables colorimétricas y nomenclatura de referencia (I, T, IC, IPT).

Variable	Nomenclatura
Intensidad de color	I
Tonalidad del color	T
Índice de Color	IC
Índice de Polifenoles Totales	IPT
Luminosidad	L*
Coordenada roja/verde	a*
Coordenada amarilla/azul	b*
Matiz del color	h*
Pureza o Croma	C*

Tabla 4.27. Parámetros de color e IPT: medias ajustadas (MLGM), error estándar y letras de significancia.

Trat	I		T		IC		IPT	
T1	0,34	ns	0,59	a	579,1	Ns	28,90	ns
T2	0,43	ns	0,53	b	810,6	Ns	30,96	ns
T3	0,47	ns	0,54	ab	888,7	Ns	33,59	ns
T4	0,49	ns	0,51	b	1002	Ns	33,60	ns
p-valor	0,3233		0,0462		0,1777		0,5089	

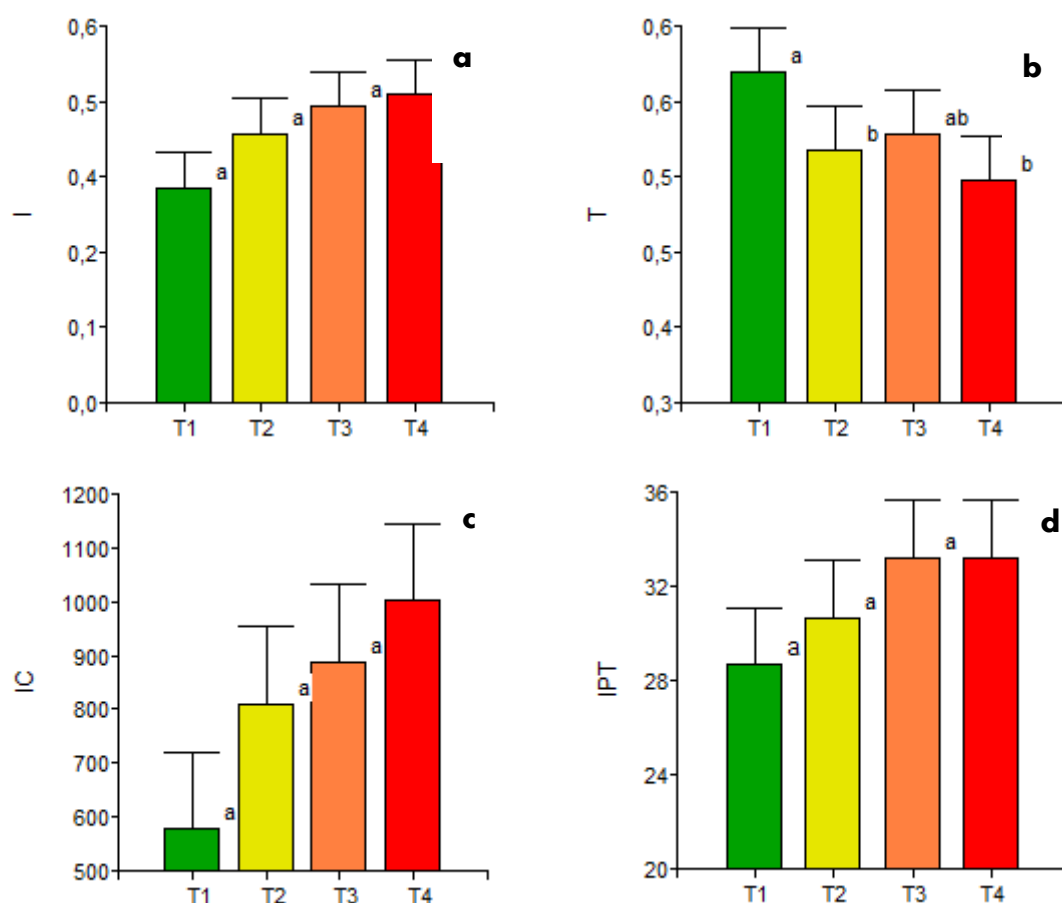


Figura 4.32. Barras de medias ajustadas (MLGM) con error estándar: a) Intensidad (I); b) Tonalidad (T); c) Índice de color (IC); d) IPT.

Se analizaron los vinos utilizando el espacio de color CIELab para caracterizar su composición cromática. L^* (0–100) define la luminosidad (negro–blanco), mientras que a (rojo–verde) y b^* (amarillo–azul) representan los ejes cromáticos; de ellos derivan el

matiz (h^*) y la pureza o croma (C^*) (Catelen, 2022; OIV, 2021). Para L^* , a^* y C^* no se observaron diferencias significativas entre tratamientos (Tabla 4.28). No obstante, se observó una correlación positiva entre L y el aporte hídrico: T1 produjo vinos más claros/brillantes que los tratamientos con mayor restricción (Figura 4.33.a). A su vez, a^* y C^* mostraron correlación negativa con la cantidad de riego (Figura 4.33.b, e), los tratamientos menos irrigados presentaron valores más altos (mayor rojez y saturación). En todos los vinos generados por parcela, la rojez y la saturación se ubicaron en rangos moderados. Para los parámetros b^* y h^* se evidenciaron diferencias significativas entre los vinos de T1 y el resto (Tabla 4.28). Las cepas con mayor aporte hídrico generaron vinos con b más alto, indicando menor componente violáceo y mayor amarillez que T2–T3–T4; este desplazamiento cromático fue coherente con los valores de h . La correlación positiva de b y h con el riego (Figura 4.33.c y d, indica que el aumento del agua desplazó el color hacia tonalidades menos violáceas y más rojizas/amarillas).

Tabla 4.28. Variables CIELab: medias ajustadas (MLGM), error estándar y significancia (L^* , a^* , b^* , h^* , C^*).

Trat	L^*		a^*		b^*		$h^*(^\circ)$		C^*	
T1	87.8	ns	16.05	ns	0.48	a	0,03	a	16,07	ns
T2	84.4	ns	21.63	ns	-1.26	b	-0,06	b	21,68	ns
T3	83.3	ns	22.88	ns	-1.13	b	-0,04	b	22,93	ns
T4	82.3	ns	25.18	ns	-2.06	b	-0,07	b	25,29	ns
p-valor	0.2951		0.1777		0.0197		0,0069		0,1770	

La métrica ΔE^* cuantifica la diferencia perceptual de color entre dos muestras. Se utilizó para cuantificar la diferencia total entre tratamientos (Tabla 4.29). Diferencias $\Delta E^* > 2,7-3,0$ se consideran perceptibles por el ojo humano. Los resultados indicaron que T1 presentó diferencias cromáticas perceptibles respecto de T2, T3 y T4. Asimismo, se detectaron diferencias relevantes para T4 frente a T2 y T3. En cambio, entre T2 y T3 no se identificaron contrastes perceptibles.

En conjunto, los parámetros clásicos (L , T , IC , IPT) y el análisis CIELab muestran que una mayor dotación hídrica incrementa la luminosidad (L^*) y desplaza el color hacia matices menos violáceos (b^* y h^* más altos), mientras que la restricción hídrica moderada se

asocia con mayor rojez y saturación (a^* y C^*), en concordancia con la mayor concentración fenólica observada en bayas.

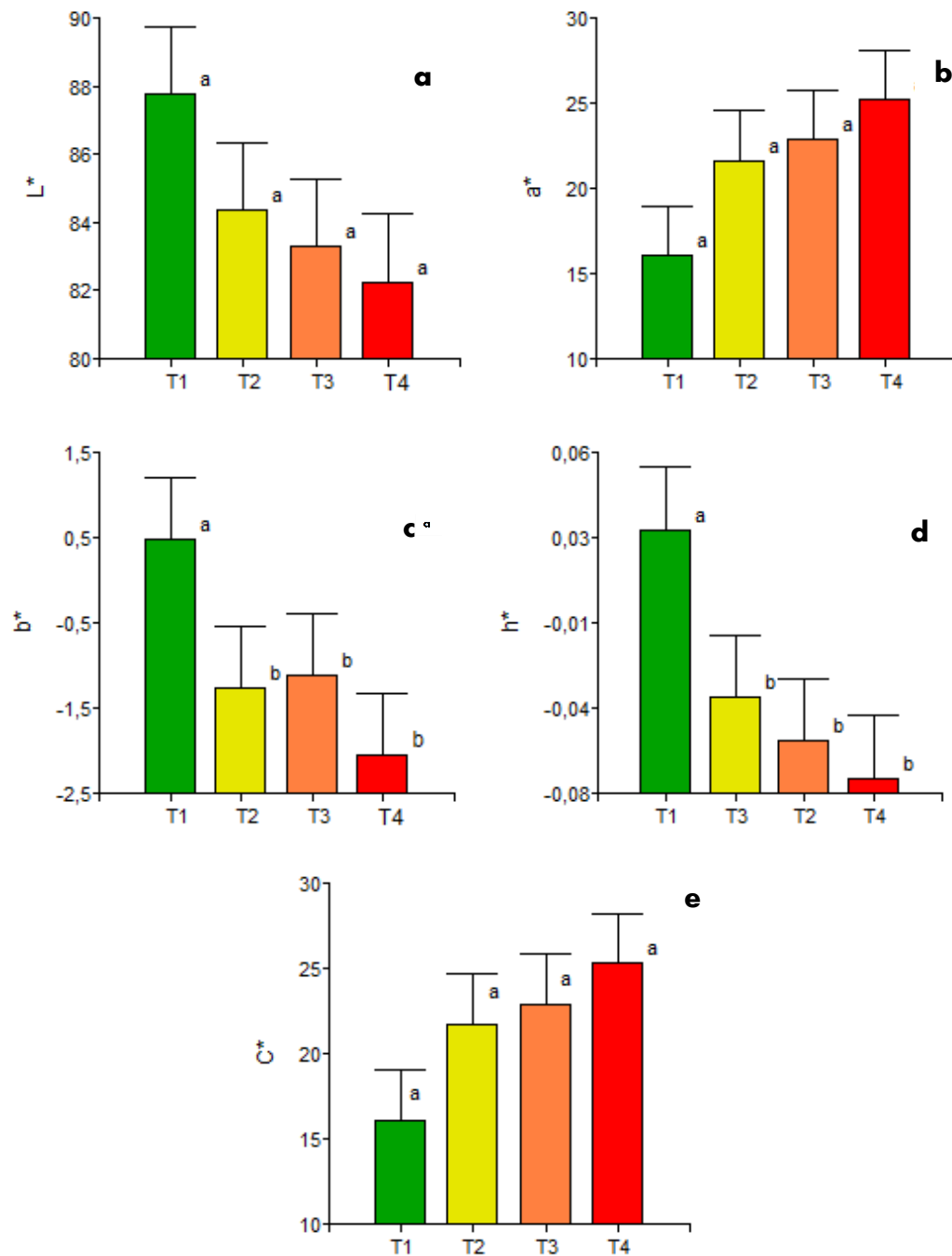


Figura 4.33. Barras de medias ajustadas con error estándar: a) L^* ; b) a^* ; c) b^* ; d) h^* ; e) C^* .

Tabla 4.29. Diferencia de color (ΔE^*) entre medias ajustadas por tratamiento (pares T1–T4).

$\Delta E^* T 1$	$\Delta E^* T 2$	$\Delta E^* T 3$	$\Delta E^* T 4$
	23.0	34.7	60.3
23.0		1.4	8.9
34.7	1.4		3.6
60.3	8.9	3.6	

Estas evidencias consolidan el efecto del manejo hídrico sobre la expresión cromática del vino y respaldan el uso de riego deficitario controlado para optimizar atributos visuales sin comprometer la estabilidad tecnológica.

1.3.3 Análisis sensorial descriptivo y multivariado

Todos los vinos obtenidos fueron evaluados tres meses después del embotellado por un panel por siete catadores (4 hombres y 3 mujeres), compuesto por investigadores, docentes de la Licenciatura en Enología (FCAI, UNCuyo) y un representante del Departamento de Vitivinicultura de la EEA Rama Caída (INTA).

Durante dos sesiones, los panelistas evaluaron los atributos según los descriptores: intensidad de color y tonalidad (fase visual); intensidad de olor, limpieza, armonía y caracterización de olor (fase olfativa); e intensidad, limpieza, equilibrio, cuerpo y persistencia (fase gustativa). Las muestras (30–40 mL) se sirvieron de forma aleatoria, a 16–18 °C, en copas técnicas normalizadas para degustación.

Cada descriptor fue calificado en una escala ordinal discreta de tres niveles de categorización: 6, 8 y 10 según la intensidad percibida. El número 0 correspondió a la no aplicabilidad de la categoría. No se brindó información sobre los tratamientos a los catadores para evitar sesgos cognitivos. Cada parcela sometida al análisis sensorial se consideró réplica de cada tratamiento. No se sometió el ensayo a análisis de consenso.

Los resultados se analizaron mediante estadísticos descriptivos (mínimo, máximo y puntaje total) junto con el cálculo de la distancia euclídea entre tratamientos. El estudio se complementó con un análisis multivariado exploratorio para identificar patrones comunes entre atributos sensoriales.

Según los resultados de las medidas resumen para las evaluaciones sensoriales (Anexo 13), el mejor vino en la cata de agosto de 2024 correspondió a la parcela 15 del tratamiento T3, con un puntaje promedio máximo de 90 puntos, mientras que la menor valoración correspondió a la parcela 1 del tratamiento T2. En la segunda degustación (noviembre 2024), la parcela 15 repitió la puntuación más alta (88,57 puntos), mientras que la menor correspondió al vino de la parcela 4 (T4), con una media de 76,86 puntos. Esto demostró que el T3 fue el vino joven de mejores características.

- Puntaje total por tratamiento

El puntaje total obtenido se calculó en función de los descriptores visuales, olfativos y gustativos evaluados en el análisis sensorial, con una escala utilizada de 0 a 100 puntos. En función de los resultados de los análisis estadísticos, tabla 4.30, las diferencias no fueron significativas entre las medias ajustadas por tratamiento para ninguno de las sesiones ya que el p-valor para agosto fue $0,8122 > \alpha = 0,05$; y para noviembre $0,6183 > \alpha = 0,05$. Sin embargo, se puede apreciar que según los modelos lineales generales y mixtos (MLGM), Figura 4.34.a, el tratamiento T3 alcanzó la mejor puntuación sensorial en la cata de agosto de 2024, con un promedio de 85,25 puntos, mientras que T1 obtuvo la valoración más baja (83,64 puntos). En la evaluación posterior, realizada en noviembre de 2024 (Figura 4.34.b), el período de guarda favoreció a T2, que alcanzó el puntaje más alto (84,07 puntos). El tratamiento T1 mantuvo el menor puntaje, con una media de 81,79 puntos.

Tabla 4.30. Resultados MLGM para los puntajes totales de las degustaciones por tratamiento para los meses de agosto y noviembre de 2024.

Tratamiento	PT agosto 2024			PT noviembre 2024		
T1	83.64	+1.44	ns	81.79	+1.32	ns
T2	84.64	+1.44	ns	84.07	+1.32	ns
T3	85.29	+1.44	ns	83.21	+1.32	ns
T4	84.07	+1.44	ns	83.79	+1.32	ns
p-valor	0.8122			0.6183		

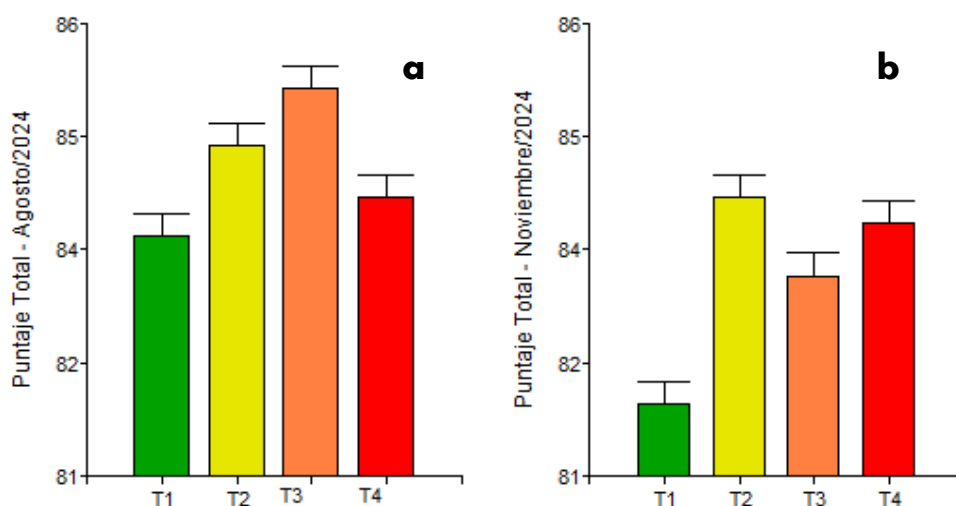


Figura 4.34. Puntaje total del análisis sensorial de vinos. a) agosto de 2024. b) noviembre de 2024.

- Distancia euclídea

Para identificar la disimilitud entre dos tratamientos, se calculó la distancia euclídea considerando las puntuaciones sensoriales de cada fecha de cata. En la degustación de agosto, los tratamientos más disímiles fueron T1 y T3, con una distancia de 5,97 (Tabla 4.31) y los más semejantes fueron T3 y T4, con una distancia de 3,70. Este resultado fue coherente con la clasificación de medias ajustadas del puntaje total. En la segunda degustación (noviembre), los tratamientos más diferentes fueron T1 y T2 (Tabla 4.32). Además, T3 y T4 mantuvieron la misma tendencia, aunque con distancias menores, lo que indica mayor similitud en el perfil sensorial. Esto es comparativamente similar a los resultados de las bayas que demuestra la estrecha relación entre la calidad de materia prima y el producto generado. Las diferencias se evidenciaron en mayor proporción entre T1 y T4 (Anexo 9.A); y para el análisis entre parcelas se identificó que la número 15 generó las bayas más diferentes respecto de las de la parcela 1, replicando los mismos resultados en los vinos generados de estas unidades experimentales (Anexo.9.C y D).

Tabla 4.31. Distancia euclídea del análisis sensorial (agosto de 2024).

I	j	Distancia euclídea
T1	T3	5,97
T2	T4	4,67
T1	T4	4,81
T1	T2	4,22

T2	T3	4,14
T3	T4	4,05

Tabla 4.32. Distancia euclídea del análisis sensorial (noviembre de 2024).

I	j	Distancia euclídea
T1	T2	6,27
T1	T4	5,49
T2	T3	4,85
T1	T3	4,49
T2	T4	3,48
T3	T4	2,60

En conjunto, los resultados sensoriales reflejan una coherencia general con los parámetros fisicoquímicos y colorimétricos. Los tratamientos con restricción hídrica moderada (T3 y T4) mantuvieron los puntajes más altos y mayor equilibrio entre fase visual, olfativa y gustativa, destacándose por vinos armónicos, con buena estructura y persistencia. En cambio, los tratamientos con mayor aporte de agua (T1 y T2) mostraron menor complejidad y expresión sensorial. Las diferencias detectadas entre catas (agosto y noviembre) evidencian además la influencia negativa del período de guarda sobre la integración aromática y gustativa del vino, es especial para vinos con menor cuerpo como los correspondientes a T1.

- Análisis multivariado

Con el fin de comprender las relaciones entre las características visuales, olfativas y gustativas, e identificar patrones y asociaciones complejas entre ellas, se aplicó un análisis multivariado estadístico. Se emplearon las siguientes herramientas exploratorias: gráfico de estrellas, análisis de componentes principales (ACP), gráfico tipo tela de araña, matriz de correlación y análisis de correspondencias múltiples (ACM). En ellas se trabajaron con los resultados por parcelas, considerando efecto fijo al tratamiento y aleatorio al factor bloques. La nomenclatura utilizada para las variables organolépticas en el software InfoStat se presenta en la Tabla 4.33.

Tabla 4.33. Nomenclatura de variables organolépticas consideradas en el análisis multivariado.

Nomenclatura	
FV IC	Fase Visual - Intensidad de Color
FV T	Fase Visual – Tonalidad
FO IO	Fase Olfativa - Intensidad de Olor o Aromática
FO LO	Fase Olfativa – Limpieza
FO A	Fase Olfativa – Armonía
FG IG	Fase Gustativa - Intensidad Gustativa
FG LG	Fase Gustativa – Limpieza
FG EG	Fase Gustativa - Equilibrio Gustativo
FG C	Fase Gustativa – Cuerpo
FG P	Fase Gustativa – Persistencia

- Gráficos de estrellas

Para representar de manera concisa y comparativa las observaciones multivariadas de las variables sensoriales, se elaboraron gráficos de estrella por tratamiento, correspondientes a las dos fechas de degustación (agosto y noviembre 2024). Cada radio del gráfico representa una de las diez variables sensoriales, definidas por sus valores medios ajustados. La comparación de la longitud de los radios permite visualizar las diferencias relativas entre las características organolépticas.

En concordancia con los puntajes totales, en agosto de 2024 el tratamiento T3 obtuvo la mayor puntuación global, mientras que T1 presentó la menor (Figura 4.35). Esto se reflejó en el área total de las estrellas, donde T3 abarcó la superficie más amplia. En T3 destacaron las variables de mayor ponderación: intensidad olfativa, color y cuerpo. Sin embargo, las variables equilibrio e intensidad fueron las menos favorecidas. En T1, los radios fueron simétricamente más cortos, aunque se observó un leve aumento en intensidad de olor. En los tratamientos intermedios, T2 mostró un mejor desempeño en las variables gustativas, aunque no así en las olfativas. Por el contrario, en T4 se destacaron las características olfativas y visuales, mientras que las gustativas fueron menos valoradas.

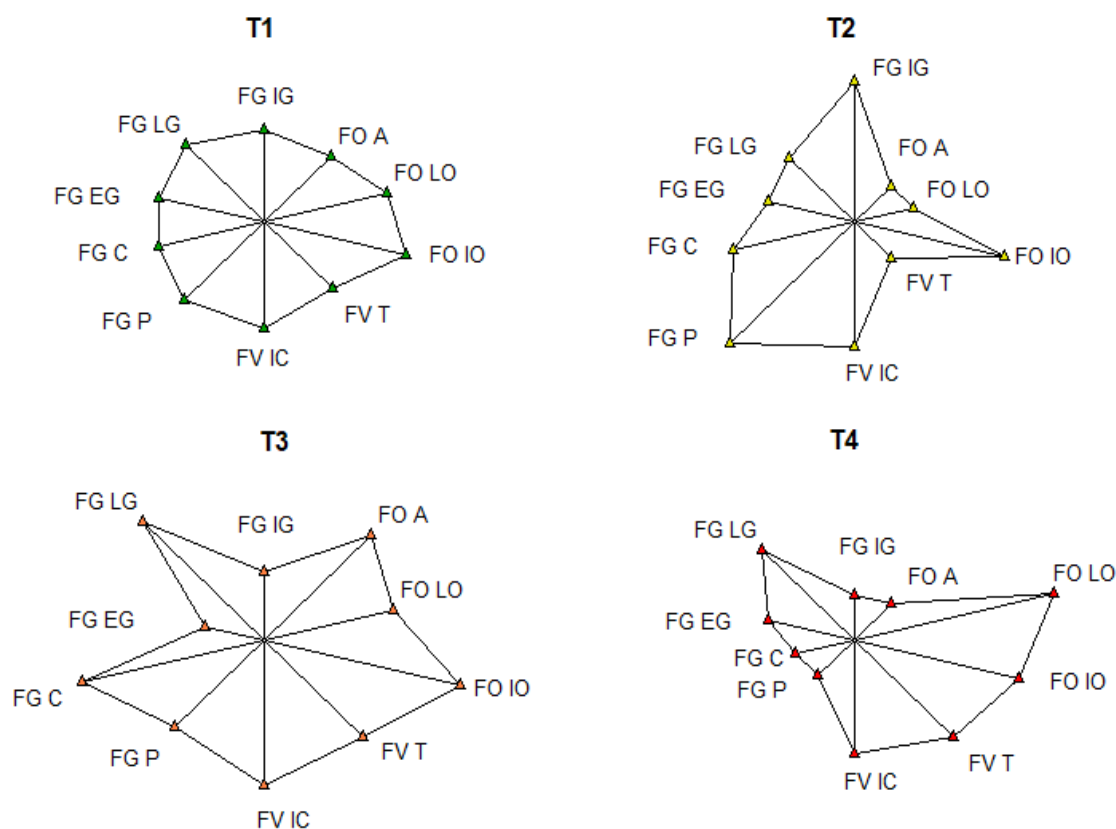


Figura 4.35. Gráficos de estrellas por tratamientos (agosto de 2024).

En noviembre de 2024 (Figura 4.36) el proceso de maduración afectó principalmente al tratamiento T3, particularmente en las variables olfativas y gustativas. Se observó un acortamiento de los radios correspondientes a estas características. En contraste con la cata de agosto, los vinos de T2 mostraron una mejora notable en las fases visual y olfativa, aunque una ligera disminución en la gustativa. El tratamiento T1 no presentó modificaciones sustanciales con el tiempo, manteniendo la menor área total del gráfico. T3 fue el tratamiento más afectado negativamente tras la guarda, con reducción general de los radios salvo en equilibrio gustativo, que se mantuvo estable. Por el contrario, T4 se benefició durante la estabilización temporal, mejorando en persistencia y cuerpo, aunque con una leve pérdida en limpieza aromática y tonalidad.

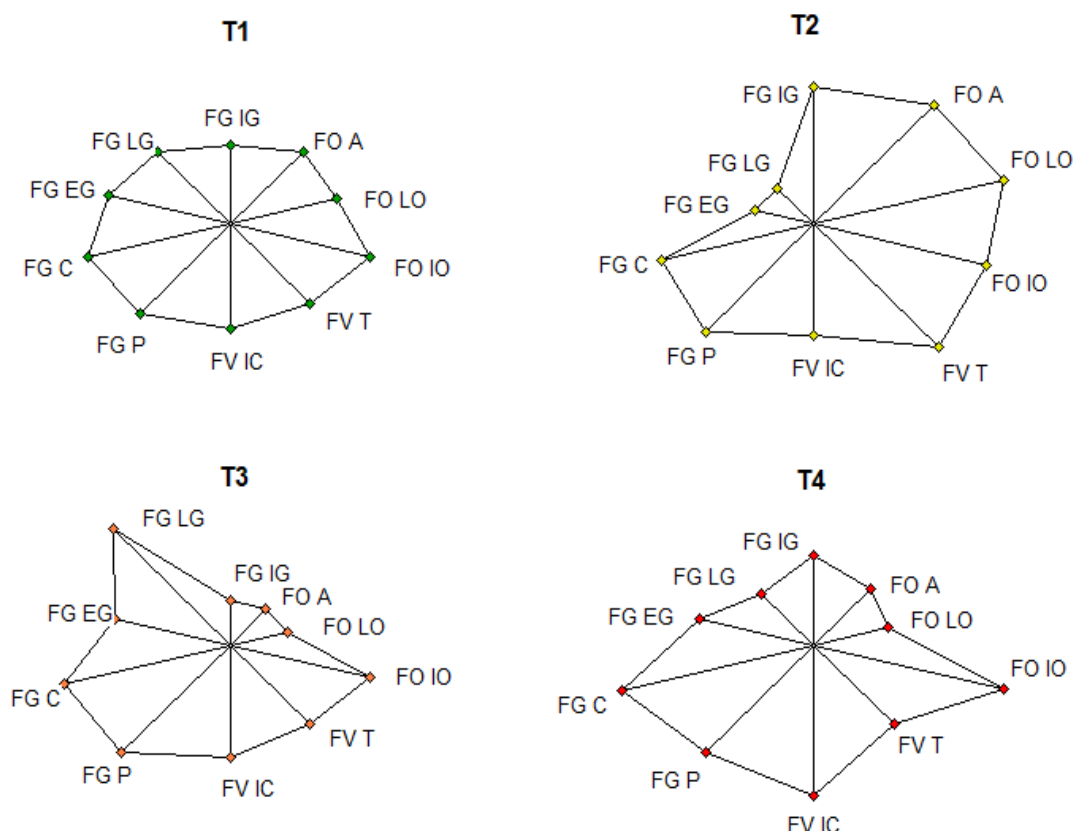


Figura 4.36. Gráficos de estrellas por tratamientos (noviembre de 2024).

En síntesis, los gráficos de estrellas evidencian que el perfil sensorial de los vinos varió de manera coherente con el manejo hídrico y el tiempo de guarda. En la primera evaluación (agosto 2024), los tratamientos con restricción moderada (T3 y T4) presentaron mayor amplitud de atributos, especialmente en color, aroma e intensidad gustativa. Tras el período de estabilización (noviembre 2024), se observó una reorganización de los perfiles: T2 mejoró sus características visuales y olfativas, mientras que T4 consolidó su equilibrio gustativo y persistencia. Estos resultados reflejan la dinámica evolutiva de los vinos y confirman la influencia del régimen hídrico en la complejidad y equilibrio sensorial a lo largo del tiempo.

- Análisis de componentes principales (ACP)
 - Agosto 2024

En la evaluación de agosto 2024, las dos primeras componentes principales (CP1 y CP2) explicaron el 54,9 % y el 31,7 % de la varianza, respectivamente, acumulando un 86,6 %

de la variabilidad total (Figura 4.37). Este valor indica que las dos dimensiones retienen la mayor parte de la información contenida en los datos sensoriales. La longitud y orientación de cada vector indican la contribución y el peso relativo de cada variable dentro de la componente principal. Las variables de intensidad olfativa (FO IO), limpieza gustativa (FG LG) y tonalidad (FV T) mostraron mayor peso sobre la CP1, debido a la mayor longitud de sus vectores y su pequeño ángulo con dicho eje. En cambio, las variables persistencia (FG P), cuerpo (FG C) y limpieza olfativa (FO LO) contribuyeron principalmente a la CP2. Esta tendencia se confirma en los autovectores de mayor valor absoluto (Anexo 11), que corresponden a las variables mencionadas. En cuanto a los *scores* (coordenadas de cada unidad experimental en el espacio CP1–CP2), no se observaron agrupamientos definidos por tratamiento, por lo que no se incluyeron en la figura. Los ángulos entre vectores del biplot indican el grado de correlación entre variables (Figura 4.37). Vectores con ángulos pequeños representan correlaciones positivas (por ejemplo, armonía olfativa (FO A) y cuerpo (FG C). Direcciones opuestas ($\approx 180^\circ$) representan correlaciones negativas, como entre equilibrio gustativo (FG EG) e intensidad de color (FV IC). Ángulos cercanos a 90° reflejan baja o nula correlación, como entre limpieza olfativa (FO LO) e intensidad de color (FV IC), o limpieza gustativa (FG LG) y persistencia (FG P). En síntesis (Figura 4.37), las variables que más contribuyeron a la variabilidad entre tratamientos fueron:

- T1: equilibrio gustativo (FG EG)
- T2: persistencia (FG P) e intensidad gustativa (FG IG);
- T3: cuerpo (FG C), limpieza gustativa (FG LG), intensidad de color (FV IC) e intensidad de olor (FO IO);
- T4: tonalidad (FV T) y limpieza de olor (FO LO).

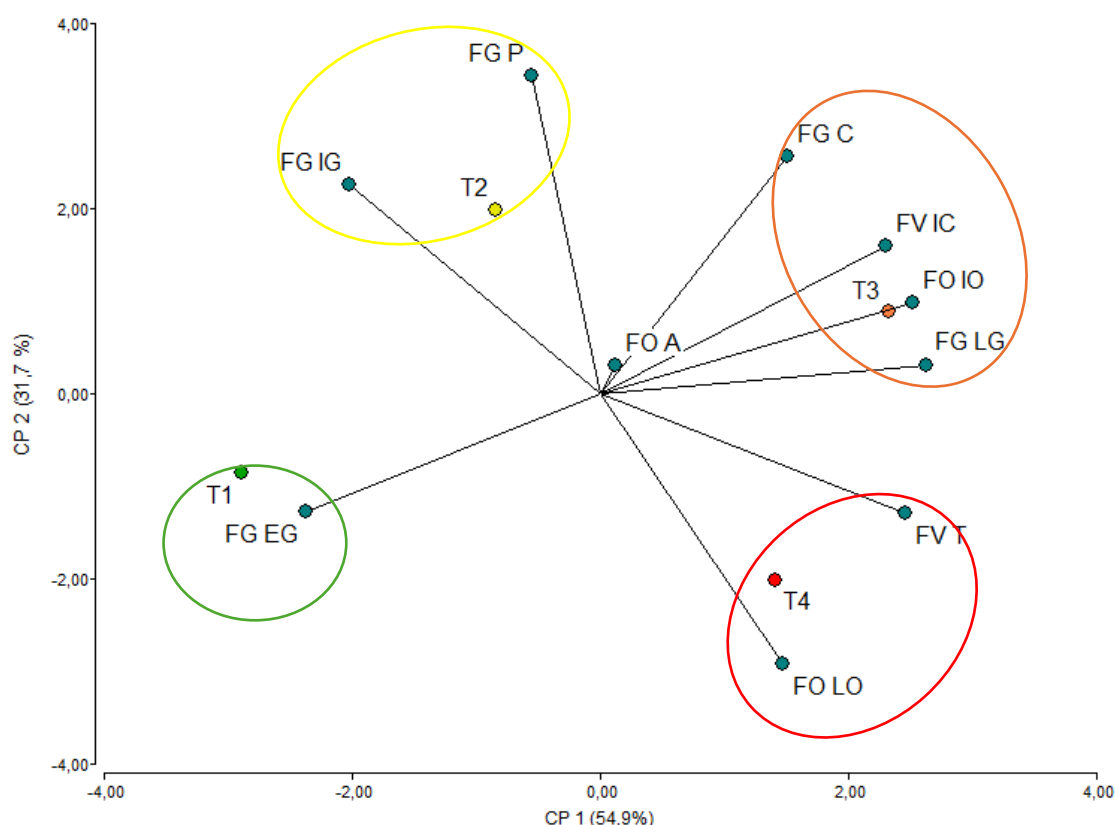


Figura 4.37. Biplot ACP para las variables visuales, olfativas y gustativas (agosto 2024).

En noviembre de 2024, las dos primeras componentes (CP1 y CP2) explicaron el 62,7 % y el 31,8 % de la varianza, respectivamente, acumulando un 94,5 % de la variabilidad total (Figura 4.38). Este resultado indica un ajuste más robusto que el obtenido en agosto. Según la longitud y dirección de los vectores, las variables tonalidad (FV T) y equilibrio gustativo (FG EG) fueron las que más aportaron a la CP1. Esto se corrobora en los autovectores del Anexo 11, con valores absolutos de -0,38 y 0,38, respectivamente. La CP2 se asoció principalmente con limpieza olfativa (FO LO) y armonía olfativa (FO A), con autovectores de 0,49 y 0,52, respectivamente. Los ángulos entre los vectores del biplot (Figura 4.38) reflejan correlaciones entre variables. Las variables armonía (FO A) y limpieza olfativa (FO LO), al igual que intensidad de color (FV IC) y cuerpo (FG C), mostraron correlaciones positivas. En cambio, las correlaciones negativas se observaron entre intensidad gustativa (FG IG) y limpieza gustativa (FG LG), así como entre tonalidad (FV T) y equilibrio gustativo (FG EG). Las variables con ángulos cercanos a 90°, como armonía (FO A) e intensidad olfativa (FO IO), presentaron baja o nula correlación. Como

en agosto, los scores no mostraron agrupamientos definidos por tratamiento, por lo que no se incluyeron en la figura.

En síntesis (Figura 4.38), las variables más influyentes por tratamiento fueron:

- T1: equilibrio gustativo (FG EG);
- T2: tonalidad (FV T) e intensidad gustativa (FG IG);
- T3: limpieza gustativa (FG LG);
- T4: intensidad olfativa (FO IO), intensidad de color (FV IC), persistencia (FG P) y cuerpo (FG C).

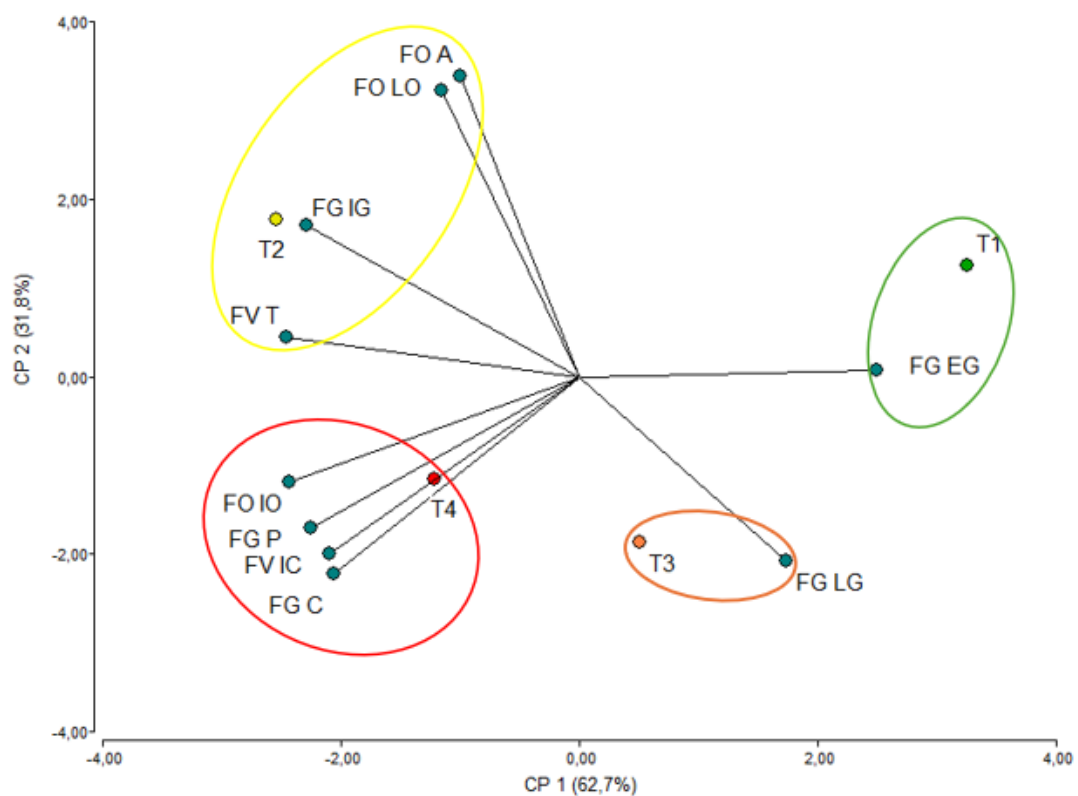


Figura 4.38. Biplot ACP para variables visuales, olfativas y gustativas (noviembre 2024).

- Matriz de correlación

Se utilizó esta herramienta para visualizar y cuantificar las relaciones entre las variables sensoriales del vino, considerando ambas fechas de evaluación (agosto y noviembre de 2024).

○ Agosto 2024

Considerando correlaciones de magnitud moderada a fuerte, todas fueron positivas, lo que indica que, al aumentar el puntaje de una variable, también aumenta el de la variable asociada, en promedio. En la matriz de correlación de Pearson de agosto de 2024 (Tabla 4.34) se observaron correlaciones positivas moderadas entre:

- FV IC con las variables: FO IO, FG IA, FG LA y FG C.
- FO IO con las características de la fase gustativa: FG LA, FG C y FG P.
- FO LO con FG EG y FG P.
- FO A y FG EG
- FG IA con FG LA y FG C.

Se observaron correlaciones fuertes positivas entre FO LO y FO A; entre FG IG y FO IO, así como con FG P; y entre FG C y FG LG, de forma similar con FG P.

Tabla 4.34. Matriz de correlación (agosto 2024) para variables visuales (FV), olfativas (FO) y gustativas (FG).

AGOSTO	FV IC	FV T	FO IO	FO LO	FO A	FG IG	FG LG	FG EG	FG C	FG P
FV IC	1,00	0,01	0,00	0,37	0,44	0,00	0,00	0,61	0,00	0,00
FV T	-0,25	1,00	0,46	0,01	0,00	0,01	0,98	0,13	0,95	0,77
FO IO	0,35	0,07	1,00	0,01	0,28	0,00	0,00	0,22	0,00	0,00
FO LO	0,09	0,23	0,26	1,00	0,00	0,07	0,00	0,00	0,02	0,00
FO A	-0,07	0,29	0,10	0,56	1,00	0,16	0,05	0,00	0,01	0,01
FG IG	0,34	-0,23	0,50	0,17	0,13	1,00	0,00	0,18	0,00	0,00
FG LG	0,36	0,00	0,39	0,27	0,19	0,48	1,00	0,00	0,00	0,00
FG EG	0,05	0,14	0,12	0,30	0,42	0,13	0,31	1,00	0,34	0,44
FG C	0,46	-0,01	0,31	0,22	0,23	0,44	0,54	0,09	1,00	0,00
FG P	0,29	-0,03	0,48	0,35	0,23	0,57	0,43	0,07	0,59	1,00

○ Noviembre 2024

En la matriz de Pearson de noviembre de 2024 (Tabla 4.35) se observaron correlaciones positivas moderadas entre:

- Entre la intensidad de color (FV IC) con las variables: intensidad de olor (FO IO), intensidad de gustativa (FG IG) (como ocurrió en la degustación anterior) y FG P.
- FO IO con las características de la fase gustativa: FO LO, FG IG, FG C y FG P. Estas dos últimas tuvieron un comportamiento semejante en el mes de agosto de 2024.
- La misma tendencia que en el primer análisis sensorial, ocurrió entre FO LO con FG EG Y FG P. Se sumó la correlación moderada con FG IG y LA.
- FO A y FG EG (ídem agosto 2024), también con FG LA.

Se observaron correlaciones fuertes positivas entre FV IC y FG C; FO LO y FO A; FG IG con FG P y FG C; FG FG LG con FG EG; y se mantuvo una relación alta entre FG C y FG P, similar a la de agosto.

Tabla 4.35. Matriz de correlación (noviembre 2024) para variables visuales, olfativas y gustativas y descriptores por categoría.

NOVIEMBRE	FV IC	FV T	FO IO	FO LO	FO A	FG IG	FG LG	FG EG	FG C	FG P
FV IC	1,00	0,01	0,00	0,06	0,06	0,00	0,07	0,94	0,00	0,00
FV T	- 0,23	1,00	0,20	1,00	0,72	0,82	0,32	0,06	0,60	0,88
FO IO	0,43	-0,12	1,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00
FO LO	0,18	0,00	0,42	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
FO A	0,18	-0,03	0,23	0,61	1,00	0,05	0,00	0,00	0,09	0,31
FG IG	0,37	0,02	0,42	0,36	0,18	1,00	0,00	0,38	0,00	0,00
FG LG	0,17	0,09	0,29	0,46	0,38	0,27	1,00	0,00	0,00	0,00
FG EG	0,01	0,18	0,20	0,30	0,31	0,08	0,63	1,00	0,01	0,00
FG C	0,53	-0,05	0,43	0,29	0,16	0,51	0,29	0,26	1,00	0,00
FG P	0,38	0,01	0,31	0,23	0,10	0,56	0,29	0,28	0,60	1,00

- Análisis de correspondencias (ACM)

Para analizar las asociaciones entre niveles categóricos de las variables sensoriales, se aplicó ACM en ambas fechas de evaluación, tabla 4.36.

Tabla 4.36. Codificación de categorías características organolépticas de los vinos.

Fase Visual		Fase Gustativa	
Intensidad de Color	Identificación	Intensidad Gustativa	Identificación
Intensa	FV_IC_I	Intenso - Muy Aromático	FG_IG_I
Mediana	FV_IC_M	Mediana	FG_IG_M
Baja	FV_IC_B	Baja - Poco aromático	FG_IG_B
Tonalidad	Identificación	Limpieza Gustativa	Identificación
Rojo Joven - con Matices	FV_T_Rj	Intenso - Muy Aromático	FG_LG_I
Rojo - poco Oxidado	FV_T_R	Mediana	FG_LG_M
Medianamente Oxidado	FV_T_Med_Ox	Baja - Poco aromático	FG_LG_B
Fase Olfativa		Equilibrio Gustativo	Identificación
Intensidad de Olor	Identificación	Equilibrado	FG_EG_E
Intenso	FO_IC_I	Algo Desequilibrado	FG_EG_ADes
Mediana	FO_IC_M	Desequilibrado	FG_EG_D
Baja	FO_IC_B	Cuerpo	Identificación
Limpieza de Olor	Identificación	Cuerpo Alto – Estructurado	FG_C_E
Limpio-Agradable	FO_LO_L	Cuerpo Medio – Redondo	FG_C_R
Aceptable	FO_LO_A	Cuerpo Bajo - Flaco	FG_C_F
Sucio-Desagradable	FO_LO_S	Persistencia	Identificación
Armonía	Identificación	Muy Persistente	FG_P_MP
Equilibrado	FO_A_E	Bastante	FG_P_P
Algo Desequilibrado	FO_A_ADes	Poco Persistente	FG_P_PP
Desequilibrado	FO_A_D		

Para ambas fechas se obtuvieron resultados consistentes. Los autovalores principales fueron 0,62 (agosto) y 0,61 (noviembre) para el eje 1; los ejes 1–2 concentraron la mayor parte de la estructura de asociación. La inercia total explicada fue moderada (0,38 en agosto; 0,37 en noviembre; Tabla 4.37 y 4.39), indicando diferenciación media de categorías. Las características asociadas a cada categoría se pueden visualizar en la Tabla 4.38 para el mes de agosto 2024, y tabla 4.40 para noviembre 2024.

Tabla 4.37. Contribución a la Chi cuadrado Agosto 2024 (salida InfoStat).

	Autovalor	Inercias	Chi-Cuadrado	(%)	% acumulado
1	0,62	0,38	756,94	21,05	21,05
2	0,47	0,22	441,62	12,28	33,33
3	0,46	0,21	424,14	11,79	45,12

Tabla 4.38. Resultado ACM InfoStat, para variables categóricas de la degustación de vinos de agosto de 2024.

Grupo	Categorías asociadas		Características
1	FG_C_E FG_P_MP		Vinos estructurados y muy persistentes en boca.
2	FV_IC_B FO_IO_B FG_IA_B FG_C_F FG_P_PP		Coloración e intensidad olfativa y aromática baja. Vinos flacos y de poca persistencia en boca.
3	FV_T_R FV_T_Rj FO_A_E FG_EG_E FG_P_BP FG_C_R	FV_IC_M FO_IO_M FO_LO_A FG_LA_A FG_IA_M	Tonalidades rojas con características olfativas y gustativas equilibradas. Vinos redondos, aunque bajos persistencia. ----- Vinos de intensidad de color, de aromas y de olor moderada. Limpieza olfativa y aromática aceptable.
4	FV_IC_I FO_IO_I FO_LO_L FG_LA_L		Alta intensidad de color y olor. Limpieza en notas olfativas y aromáticas.
5	FG_IA_I FG_P_MP FG_C_E		En boca, mucha persistencia, alta intensidad aromática y vinos estructurados.
6	FG_EG_ADes FO_A_Ades		Aromas y aspectos gustativos algo desequilibrados.

Tabla 4.39. Contribución a la Chi cuadrado noviembre 2024 (salida InfoStat).

	Autovalor	Inercias	Chi-Cuadrado	(%)	% acumulado
1	0,61	0,37	708,87	18,46	18,46
2	0,49	0,24	463,49	12,07	30,53
3	0,43	0,19	359,76	9,37	39,90

Tabla 4.40. Resultado ACM InfoStat, para variables categóricas de la degustación de vinos de noviembre.

Grupo	Categorías asociadas			Características
1	FO_A_D FO_LO_S FG_LA_S FG_EG_D			Aromas - gustos desagradables y suciedad (En agosto no se visualiza la asociación, debido seguramente al deterioro en la conservación de las muestras).
2	FO_IO_B FG_IA_B	FV_IC_B FG_C_F FG_P_PP		Baja intensidad aromática y olfativa. ----- Vinos de baja coloración, flacos y de poca persistencia.
3	FO_A_ADes FG_EG_ADes	FV_T_Rj FV_T_R FO_A_E FG_P_BP FG_EG_E FG_C_R	FV_IC_M FO_IO_M FO_LO_A FG_LA_A FG_IA_M	Aromas y aspectos gustativos algo desequilibrados (Igual que en agosto). ----- Tonalidades rojas con características olfativas y gustativas equilibradas. Vinos redondos, aunque bajos persistentes (Igual que en agosto). ----- Limpieza aromática y olfativa aceptable, con mediana intensidad de color, aroma y olor. (Bajó la intensidad respecto de agosto).
4	FV_IC_I FO_IO_I FO_LO_L FG_LA_L			Vinos limpios y con alta intensidad de color y aromas.
5	FG_IA_I FG_P_MP FG_C_E			Fase gustativa con intensidad aromática, mucha persistencia y vinos estructurados.
S/agrupación	FV_T_Med_Ox			El proceso oxidativo de los vinos no estaría asociado a otras categorías.

1.4 Análisis estadístico: relación de $\delta^{13}\text{C}$ con variables fisiológicas, fisicoquímicas de bayas y cualidades de vinos.

Con el propósito de evaluar la composición isotópica de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) como indicador del estado hídrico del cultivo y su correspondencia con la calidad de las uvas y los vinos, se contrastaron los resultados de potencial hídrico foliar-riego, de composición

fisiquímica de materia prima, y de cualidades analíticas y sensoriales de las microvinificaciones.

Estado hídrico

Se analizaron cuatro parámetros de estado hídrico como variables regresoras: $S\Psi_{pd}$ (Integral de Myers de preamanecer), $S\Psi_{md}$ (Integral de Myers de mediodía), Ψ_{pd} (Potencial hídrico foliar de preamanecer) y Ψ_{md} (Potencial hídrico foliar de mediodía).

Las medias ajustadas por parcela se estimaron mediante un Modelo Lineal Generalizado Mixto (MLGM). Los coeficientes de correlación de Pearson obtenidos se presentan en la Tabla 4.41. En este ensayo no se pudieron establecer modelos de regresión múltiple, se considera incrementar el número de repeticiones por parcela para mejorar el ajuste y correlación de datos.

Se observaron correlaciones fuertes y positivas entre $\delta^{13}\text{C B} - \delta^{13}\text{C H}$, $\delta^{13}\text{C H} - S\Psi_{pd}$ y $\delta^{13}\text{C H} - S\Psi_{md}$; correlaciones moderadas y positivas entre $\delta^{13}\text{C B} - S\Psi_{pd}$ y $\delta^{13}\text{C B} - S\Psi_{md}$; correlaciones fuertes y negativas entre $\delta^{13}\text{C H} - \Psi_{pd}$ y $\delta^{13}\text{C H} - \Psi_{md}$; y correlaciones moderadas y negativas entre $\delta^{13}\text{C B} - \Psi_{pd}$ y $\delta^{13}\text{C B} - \Psi_{md}$. La distribución de estos valores por parcela se muestra en los Anexos 14 y 15.

Si bien la clasificación de medias de las variables de potencial hídrico foliar fueron más estratificadas, los resultados de $\delta^{13}\text{C}$ fueron más acorde a la dosificación total de agua por tratamiento.

En conjunto, estos resultados evidencian una asociación estadísticamente consistente entre la composición isotópica del carbono ($\delta^{13}\text{C}$) y los indicadores hídricos de los viñedos durante el período evaluado.

Tabla 4.41. Coeficientes de correlación de Pearson/probabilidades.

Variables	$\delta^{13}\text{C B}$	$\delta^{13}\text{C H}$	$S\Psi_{pd}$	$S\Psi_{md}$	Ψ_{pd}	Ψ_{md}
$\delta^{13}\text{C B}$	1,00	0,00	0,03	0,01	0,01	0,02
$\delta^{13}\text{C H}$	0,68	1,00	0,02	0,01	0,02	0,01
$S\Psi_{pd}$	0,40	0,58	1,00	0,00	0,00	0,00
$S\Psi_{md}$	0,43	0,63	0,83	1,00	0,00	0,00
Ψ_{pd}	-0,36	-0,57	-1,00	-0,82	1,00	0,00
Ψ_{md}	-0,40	-0,62	-0,81	-1,00	0,80	1,00

Materia prima: bayas

Con el fin de analizar la funcionalidad del $\delta^{13}\text{C}$ como indicador de trazabilidad en el proceso de vinificación, se determinaron sus correlaciones con los parámetros de calidad de las uvas.

Las gráficas de dispersión de $\delta^{13}\text{C}$ de bayas y hojas en función de los parámetros de calidad de las uvas se pueden consultar en el anexo 16 y 17 respectivamente. La matriz completa de correlación entre las variables de composición gravimétrica, parámetros fisicoquímicos y compuestos fenólicos se presenta en el Anexo 18. En la misma, están identificadas:

Composición isotópica de carbono en bayas ($\delta^{13}\text{C B}$):

- Se registraron correlaciones negativas fuertes entre $\delta^{13}\text{C B}$ y las variables de peso de baya (Pes_Bay), peso de hollejos frescos (Pes_Holl), peso de pulpa (Pes_Pul), peso de semillas (Pes_Sem), sólidos solubles ($^{\circ}\text{Bx}$), pH y clase modal (Cl_Mod). Esto significó que, a mayor dotación de agua de riego, se obtuvieron valores de $\delta^{13}\text{C B}$ más negativos (plantas más hidratadas) y produjeron uvas de mayor peso-volumen, con mayor cantidad de pulpa, mayor peso de hollejos frescos y semillas de mayor tamaño.
- Se observó una correlación negativa moderada entre $\delta^{13}\text{C B}$ y el peso de hollejos liofilizados (Pes_Holl_L). Esto implicó una relación lineal discernible, pero no precisa de que, para los viñedos más irrigados, se generaron bayas con mayor peso de hollejos, que una vez secos y liofilizados presentaron la misma relación.
- Además, se encontró una correlación positiva moderada entre $\delta^{13}\text{C B}$ y el contenido de antocianos (Ant), donde para mayores valores de la composición isotópica, se encontraron las plantas con menor estado hídrico y mayor cantidad de antocianos que son los pigmentos naturales contenidos en los hollejos.

Estas asociaciones muestran una coherencia interna entre la señal isotópica del carbono y las variables morfológicas y composicionales de las bayas, reflejando la influencia del estado hídrico sobre los atributos de la fruta.

Composición isotópica de carbono en hojas ($\delta^{13}\text{C H}$):

Las tendencias observadas en hojas fueron similares a las registradas en bayas, aunque con menor grado de correlación hoja/baya que baya/baya. Se detectaron correlaciones negativas fuertes entre $\delta^{13}\text{C}$ H y las variables Pes_Holl, Pes_Pul, Pes_Sem, pH y Cl_Mod, y correlaciones negativas moderadas con Pes_Holl y °Bx. Asimismo, $\delta^{13}\text{C}$ H mostró correlaciones positivas moderadas con el contenido de antocianos.

Modelos de regresión

Se aplicó un modelo de regresión lineal múltiple para explorar la capacidad predictiva de las variables morfológicas y fisicoquímicas sobre el $\delta^{13}\text{C}$ B. No se obtuvo un ajuste significativo ($p > 0,05$) para la mayoría de las variables, con excepción del peso de las semillas (Pes_Sem), cuyo modelo presentó un R^2 ajustado=0,34 y un p-valor=0,0081.

Esto indica que, aunque la relación entre $\delta^{13}\text{C}$ B y Pes_Sem fue estadísticamente significativa, la proporción de varianza explicada por esta variable fue relativamente baja. El modelo ajustado se muestra en la Figura 4.39.

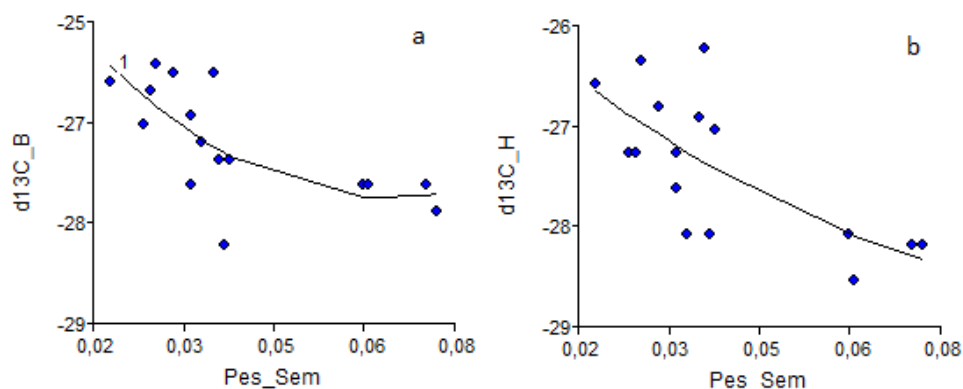


Figura. 4.39. Modelo de regresión para $\delta^{13}\text{C}$ en bayas y hojas respecto del peso de semillas.

Microvinificaciones

Con el propósito de estudiar la correspondencia de $\delta^{13}\text{C}$ con las cualidades fisicoquímicas de las microvinificaciones se generaron los coeficientes de correlación de Pearson para las características colorimétricas y composición fisicoquímica, anexo 16 y 17. La relación con los resultados de análisis sensorial fue baja, por ello no se anexaron los resultados. Se observó que para la mayoría de las variables las correlaciones fueron fuertes. Sin embargo, no se pudieron generar modelos de regresión lineal. De acuerdo con la Tabla 4.42 se registraron correlaciones negativas fuertes entre $\delta^{13}\text{C}$ B y las variables de tonalidad

(T), coordenada azul/amarilla (b^*) y matiz del color (h^*); y moderada para la luminosidad (L^*). Para índice de color (IC), coordenada roja/verde (a^*) y pureza de color o croma (C^*); las correlaciones fueron positivas y fuertes. Para la composición isotópica evaluada en hojas, $\delta^{13}\text{C H}$, la tendencia fue similar a los resultados obtenidos en bayas. Aunque se intensificó la correlación con intensidad de color (I) y la luminosidad (L^*). Estos resultados indicarían que la relación entre estos parámetros es más representativa en hojas que en bayas.

Tabla 4.42. Coeficientes de correlación de Pearson/probabilidades para $\delta^{13}\text{C B}$ y $\delta^{13}\text{C H}$ y variables colorimétricas, extracto de anexo 16.

Variables	$\delta^{13}\text{C B}$	$\delta^{13}\text{C H}$
d13C B	1,00	0,00
d13C H	0,68	1,00
I	0,41	0,52
T	-0,71	-0,64
IC	0,56	0,61
L^*	-0,38	-0,51
a^*	0,54	0,59
b^*	-0,69	-0,64
h^*	-0,74	-0,67
C^*	0,54	0,59

En el caso de las variables fisicoquímicas de los vinos obtenidos, las correlaciones en su mayoría también fueron fuertes, tabla 4.43. Como en las variables anteriores, los resultados de las regresiones lineales mixtas no fueron consistentes. Para $\delta^{13}\text{C B}$ se establecieron correlaciones negativas fuertes con pH, alcohol (ALC), ácido acético (AC AC) y glicerol (GLI); moderadas para ácido láctico (AC LA). Correlaciones fuertes positivas para ácido cítrico (AC CI), densidad (DEN), ácido tartárico (AC TA) y azúcares residuales totales (AZ TOT). Las tendencias para $\delta^{13}\text{C B}$ fueron semejantes, pero disminuyeron los coeficientes para AC AC, AC CI y DEN.

Tabla 4.43. Coeficientes de correlación de Pearson/probabilidades para $\delta^{13}\text{C}$ B y $\delta^{13}\text{C}$ H y composición fisicoquímica de vino, extracto de anexo 17.

Variables	$\delta^{13}\text{C}$ B	$\delta^{13}\text{C}$ H
pH	-0,70	-0,47
ALC	-0,61	-0,42
AC AC	-0,59	-0,36
ALC B	-0,61	-0,46
AC CI	0,53	0,33
DEN	0,61	0,31
GLI	-0,62	-0,52
AC LA	-0,37	-0,41
pH B	-0,73	-0,53
AC TA	0,58	0,52
AC TOT	0,50	0,33

Síntesis del apartado

En síntesis, los análisis de correlación realizados confirman que los valores de $\delta^{13}\text{C}$ en hojas y bayas son coherentes con los indicadores fisiológicos de estado hídrico del viñedo, si bien no se pudieron establecer modelos de regresión lineal múltiple. Las asociaciones observadas entre $\delta^{13}\text{C}$ B y las variables de composición gravimétrica y fisicoquímica de bayas y vinos respaldan su uso como indicador potencial de trazabilidad y de condiciones hídricas en el cultivo de *Vitis vinifera* cv. Malbec. Para ampliar el análisis estadístico con modelos de regresión lineal múltiple es recomendable aumentar la cantidad de repetitividad de datos por parcela en ensayos futuros para disminuir el error y favorecer el ajuste. Estos resultados constituyen la base para los análisis comparativos y de validación regional que se abordan en las secciones posteriores. Estos datos permitirán identificar las variables más influyentes para la selección de parámetros a evaluar en futuros estudios.

CAPÍTULO 5: DISCUSIÓN

1. Introducción

El presente capítulo tiene por finalidad interpretar de manera integral los resultados obtenidos en esta investigación, articulándolos con el marco teórico y los antecedentes revisados. La discusión constituye una instancia de análisis crítico en la cual se contrastan los datos experimentales con los supuestos de partida y las hipótesis planteadas en el plan de tesis, buscando establecer su coherencia, alcance y posibles limitaciones. En este sentido, el propósito de esta sección no se restringe a reiterar los resultados, sino a explicar sus implicancias fisiológicas, metodológicas y enológicas dentro del contexto de la viticultura en regiones áridas.

El enfoque interpretativo adoptado combina una perspectiva ecofisiológica —centrada en los mecanismos de respuesta de la vid frente al déficit hídrico— con un análisis enológico y aplicado, orientado a comprender cómo dichas respuestas se reflejan en la composición y calidad de la uva y el vino. La integración de los indicadores fisiológicos tradicionales (potencial hídrico foliar), isotópicos ($\delta^{13}\text{C}$) y enológicos (composición de bayas, variables fisicoquímicas, colorimétricas y sensoriales) permite discutir el comportamiento del sistema vid – materia prima – vino desde un enfoque holístico, considerando tanto las escalas temporales de respuesta de la planta como las repercusiones prácticas en el producto final.

Este capítulo se organiza en cinco secciones principales. En primer lugar (Sección 2.1), se analiza la relación entre el potencial hídrico foliar y la discriminación isotópica de carbono, evaluando la validez del $\delta^{13}\text{C}$ como indicador integrador del estado hídrico en viñedos cv. Malbec considerando el programa real de riego aportado durante la temporada envero-vendimia 2024. A continuación (Sección 2.2), se discuten las implicancias del $\delta^{13}\text{C}$ como parámetro de trazabilidad y calidad de la materia prima, considerando la relación entre el estrés hídrico y las variables productivas y composicionales de las uvas. En la Sección 2.3, se interpretan los resultados de las microvinificaciones experimentales, analizando la correspondencia entre los valores isotópicos y las propiedades fisicoquímicas, colorimétricas y sensoriales de los vinos. La Sección 2.4 compara los hallazgos locales con investigaciones previas realizadas en

distintas regiones vitícolas del mundo, identificando coincidencias, discrepancias y posibles explicaciones teóricas o metodológicas. Finalmente, la Sección 2.5 presenta una síntesis integradora y una reflexión prospectiva sobre la aplicabilidad de los resultados para el desarrollo de una viticultura de precisión sustentable en zonas áridas.

El análisis que se desarrolla a continuación busca, por tanto, trascender la descripción de los datos, ofreciendo una interpretación que permita comprender los procesos fisiológicos subyacentes, valorar la coherencia entre las distintas escalas de observación —planta, baya y vino— y proyectar los alcances de este estudio en el contexto de la vitivinicultura regional y global, aportando criterios para su aplicación práctica y su proyección futura.

2.1. Relación entre el potencial hídrico foliar y el $\delta^{13}\text{C}$

El presente estudio demostró que la discriminación isotópica de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) constituye un indicador integrador y sensible del estado hídrico en viñedos de *Vitis vinifera*, L. cv. Malbec bajo condiciones áridas de San Rafael, Mendoza. Los valores de $\delta^{13}\text{C}$ registrados en hojas y bayas durante la temporada envero-vendimia 2024 se correspondieron estrechamente con las mediciones de potencial hídrico foliar (Ψ), validando parcialmente las hipótesis H1 y H2 planteadas en el plan de tesis, que postulaban que el incremento de $\delta^{13}\text{C}$ refleja el efecto de la restricción hídrica y su correspondencia con mayores presiones negativas de Ψ .

En concordancia con lo descripto por Farquhar y Hubick (1989), el tratamiento con mayor reposición hídrica (T1) presentó valores más negativos de $\delta^{13}\text{C}$ en bayas (-28,00 a -27,3 ‰) y en hojas (-28,50 a -28,1 ‰), lo cual indicó un menor enriquecimiento relativo en $\delta^{13}\text{C}$ asociado a una reducción de la conductancia estomática y, por ende, a un mejor estado hídrico. Los valores máximos de $\delta^{13}\text{C}$ en bayas se encontraron en T4 (-25,9 ‰), y para hojas en T3 (-26,5 ‰). Para estos valores, las escalas vigentes indican una temporada sin estrés hídrico para todos los tratamientos, a excepción de la parcela 10 de T4 que obtuvo el valor -25,9 ‰, que correspondió a estrés leve. Para otros estudios realizados bajo riego pleno, se obtuvieron resultados similares tales como los reportados en ensayos de cultivos Malbec bajo diferentes coberturas antigranizo (Carbajal Ramos, 2024). En los varietales como Chasselas y Pinot noir en condiciones de irrigación

adecuada localizados en Suiza, los valores de composición isotópica en bayas de -27,26 ‰ y -26,47 ‰, indicando que las cepas se habían desarrollado en el período enverovendimia sin estrés hídrico (Spangenberg et al., 2017; Spangenberg y Zufferey, 2018). También para una experiencia en función de la poda y frecuencia de riego con el varietal Tempranillo, en parcelas regadas 2 y 3 veces por semana, se obtuvieron valores de $\delta^{13}\text{C}$ -26,94 ‰ y -27,44‰ (Santesteban et al., 2017b). Además, los resultados de van Leeuwen y sus colaboradores demuestran que las uvas y los vinos reflejan fuertemente el estado hídrico de la vid, lo que permitió diferenciar y establecer gradientes geográficos que están intrínsecamente ligados a las condiciones climáticas locales y la disponibilidad de agua para los variedades Chaselas (-27,29 ‰), Pinot Noir (-27,16%) y Petite Arvine (-27,04%) (van Leeuwen et al., 2023; Spangenberg et al., 2025). Por otro lado, en un estudio de mapeo mediante imágenes de alta resolución obtenidas por vehículos no tripulados se obtuvieron valores entre -27,9‰ (sin estrés hídrico) y -24,1‰ (con estrés severo) (Santesteban et al., 2017a).

Si bien el diseño experimental estuvo basado en la generación de cuatro rangos de nivel hídrico en las cepas, el aporte de lluvias atípico debido al factor climático de la corriente del Niño (Servicio Meteorológico Nacional, 2024) modificó la lámina total de agua de los tratamientos. Con cada evento climatológico de aporte pluvial, se calculó la lámina bruta semanal y se ajustó el programa de riego reduciendo o suspendiendo el aporte de agua por goteo. A pesar de las medidas llevadas a cabo, los tratamientos T3 y T4 fueron semejantes al final de la temporada, debido a que las tormentas se desarrollaron en su mayoría en horarios de tarde, después que el riego ya había sido aplicado. Esto coincidió con la clasificación de medias ajustadas mediante modelos lineales generales y mixtos para $\delta^{13}\text{C}$ en bayas y en hojas, donde en el mismo nivel se encontraron T2, T3 y T4. Esto sugiere que las composiciones isotópicas observadas en T1 podrían situarse en la escala de un régimen de exceso de riego, debido a que el volumen total de agua recibida superó en un 20% los cálculos del programa de riego basados en datos climatológicos e históricos del cultivo. Esta interpretación es relevante ya que en las escalas vigentes el límite superior establecido es -26‰ para condiciones sin estrés hídrico (van Leeuwen et al., 2023), actualmente no existen referencias publicadas que aborden específicamente el impacto de aportes de agua en demasía. Este patrón fue consistente con lo observado

en las mediciones de ahorro de agua: el tratamiento T3 alcanzó un ahorro del 40 % respecto de la lámina teórica, con solo un 9 % de exceso total de agua considerando la precipitación efectiva. Las lluvias atípicas redujeron la separación real entre tratamientos, afectando la validación de H2. Igualmente, el régimen hídrico moderadamente restrictivo no sólo mejoró la eficiencia en el uso del agua, sino que también promovió una respuesta fisiológica favorable, evidenciada por el equilibrio entre la integridad foliar y la productividad. Similares resultados fueron presentados por Morejón Escudero (2022) en un ensayo frecuencia de riego sobre vides Tempranillo.

El coeficiente de correlación de Pearson obtenido en este estudio ($r = 0,68$) entre $\delta^{13}\text{C}$ de hojas y bayas refuerza su coherencia fisiológica: las hojas, como órganos fotosintéticamente activos, integran la señal isotópica diaria, mientras que las bayas acumulan el carbono fijado durante un período más prolongado, reflejando condiciones hídricas promedio a lo largo del ciclo fenológico (Santesteban et al., 2015). Asimismo, los valores menos negativos de $\delta^{13}\text{C}$ en los tratamientos T3 y T4 corroboran que las vides sometidas a menor reposición de agua ajustan su fisiología reduciendo la apertura estomática y manteniendo niveles de fotosíntesis suficientes para evitar comprometer significativamente la producción.

Los valores de $\delta^{13}\text{C}$ fueron consistentemente más altos en bayas, lo cual es esperable dado que las bayas integran la señal isotópica acumulada durante el período de llenado. Esto indicó que la discriminación isotópica es más sensible en las uvas que funcionan como órganos sumideros de reservas, mientras que las hojas son los órganos fotosintéticos. La diferencia entre las medias ajustadas por MLGM para bayas fue de 0,51‰, y 1,08‰ en hojas. En concordancia con los hallazgos de Spangenberg y colaboradores (2020), se observaron resultados semejantes en vides Pinot noir (sin fertilización foliar). En el mismo sentido, estudios llevados a cabo en España donde se utilizaron cultivares Tempranillo y Garnacha, el $\delta^{13}\text{C}$ la de las bayas fue más alta (menos negativa, indicando mayor estrés hídrico acumulado o menor discriminación isotópica) que la de las hojas en los mismos tratamientos y etapas fenológicas (Bchir et al., 2016). Específicamente, la diferencia entre los valores de $\delta^{13}\text{C}$ de los azúcares de la baya ($\Delta^{13}\text{C}_{\text{sugars}}$) entre vides bien regadas y vides estresadas fue de 0,51‰. Esta diferencia en las bayas fue menor al ser comparadas con la diferencia registrada en las hojas ($\Delta^{13}\text{C}_{\text{leaf}}$),

que alcanzó 0,83‰ en la cosecha. Esto indicó que la respuesta de los valores de $\delta^{13}\text{C}$ en las hojas ante el déficit hídrico fue aproximadamente el doble de amplificada en comparación con la respuesta observada en los valores de $\delta^{13}\text{C}_{\text{sugars}}$. Esta variabilidad en la parte foliar se debe a varios factores a saber: 1) heterogeneidad intra-hoja debido a que la composición isotópica puede variar incluso dentro de una misma hoja debido a fenómenos fisiológicos y la composición heterogénea del tejido; 2) gradiente longitudinal (base a punta/ápice), donde se ha observado una disminución ($\delta^{13}\text{C}$ se vuelve más negativo), lo que indica una mayor discriminación isotópica de la base a la punta de las hojas de vid. Esto se atribuye a un aumento del índice estomático con mayor concentración intercelular de en las regiones apicales (puntas) en comparación con las regiones basales que le permite mayor capacidad para la asimilación y fijación de carbono y una consecuente mayor discriminación isotópica en el tejido fotosintético intacto en las hojas jóvenes (apicales); y por último, 3) heterogeneidad estomática que genera asimilación fotosintética no uniforme, lo que induce variaciones en la discriminación dentro de la hoja (Spangenberg et al., 2021). Por lo tanto, si bien las hojas son útiles para la determinación de la composición isotópica, el órgano más recomendado y confiable para la determinación serían las bayas en la evaluación integral del estado hídrico. Otras investigaciones también sugieren trabajar con jugo de uva (van Leeuwen et al., 2009); residuos sólidos y compuestos volátiles del vino (Spangenberg et al., 2017); y etanol del vino y vino (Spangenberg et al. 2019). En el presente trabajo, los valores de las medias ajustadas por MLGM en bayas (-27,55 ‰ para T1 y -26,70 ‰ para T4) y hojas (-28,23‰ para T1 y -27,15 ‰ para T4) se ubicaron dentro de este rango, validando la correspondencia de los umbrales internacionales para el varietal Malbec en el hemisferio sur.

El potencial hídrico (medido con la cámara de presión) es un indicador fisiológico clave para evaluar el estado hídrico de la vid (Rienth & Scholasch, 2019; van Leeuwen et al., 2009, 2023). Se ha demostrado que los valores de $\delta^{13}\text{C}$ de los azúcares de la uva en el momento de cosecha están altamente correlacionados con el potencial hídrico de la hoja antes del amanecer (Ψ_{pd}) (Santesteban et al., 2017b; Spangenberg et al., 2025; Spangenberg & Zufferey, 2018; van Leeuwen et al., 2023). Los valores de umbral específicos para clasificar el estrés (débil, moderado, severo) se basan en investigaciones

realizadas en el hemisferio norte, principalmente en Francia, España y Suiza. Si bien en varios estudios se observó relación lineal entre el potencial hídrico foliar promedio con la composición isotópica de carbono en diferentes rangos de estado hídrico (Costantini et al., 2013; Gaudillère et al., 2002; Herrero-Langreo et al., 2013; Spangenberg & Zufferey, 2019, 2023; van Leeuwen et al., 2009; van Leeuwen & Destrac-Irvine, 2017), en la presente tesis no se obtuvo una relación lineal entre el $\delta^{13}\text{C}$ con ninguna de las variables de estado hídrico foliar evaluadas (valores medios ajustados de: potencial hídrico foliar de preamanecer y de mediodía, integral de estrés hídrico de Myers de preamanecer y de mediodía ($S\Psi_{pd}$ y $S\Psi_{md}$)). Tampoco se encontró ajuste lineal entre Ψ_{pd} y $\delta^{13}\text{C}$ para el cultivar Grenache (Bchir et al., 2016) y en viñedos Malbec protegidos bajo malla antigranizo (Carbajal Ramos, 2024). En este contexto, la falta de linealidad encontrada en este estudio debe interpretarse como un efecto directo de las condiciones ambientales atípicas de la temporada y no como una limitación del método isotópico en sí (Urvieta et al., 2021). Por otra parte, van Leeuwen (2023) afirma que existen diferencias específicas de variedad en la eficiencia general del uso del agua que deben considerarse al evaluar las respuestas de $\delta^{13}\text{C}$ entre diferentes cultivares.

Los valores de potencial hídrico de preamanecer (Ψ_{pd}) y mediodía (Ψ_{md}), junto con sus correspondientes integrales de Myers ($S\Psi_{pd}$ y $S\Psi_{md}$), mostraron diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,01$); sin embargo, el comportamiento fue dependiente del momento de la determinación. La correlación directa de las curvas de Ψ_{pd} y Ψ_{md} con la integral de Myers permitió establecer una jerarquía de estrés coherente con los tratamientos de riego ($T1 < T2 < T3 \approx T4$). En horario de madrugada, T1 y T2 evidenciaron un estrés leve, mientras que T3 y T4 alcanzaron un estrés moderado. Estos hallazgos son consistentes con estudios de cartografía regional en vid (Pichon et al., 2023) que reportaron rangos de -0,2 a -0,8 MPa para el estado hídrico. No obstante, al mediodía se observó que las cepas de T1 entraron en un estrés moderado, y el resto se mantuvo en estrés moderado a severo. Al comparar nuestros valores con vides Malbec regadas a capacidad de campo (-0,88 MPa) (Hugalde y Vila, 2014), las presiones de vacío registradas en este ensayo fueron más negativas (-1,34 MPa), acercándose a los valores reportados en diferentes portainjertos sobre el mismo cultivar (-1,4 MPa) (Di Filippo, 2008). Llama la atención el contraste con los datos de Shellie y Bowen (2014) en

viñedos Malbec de Estados Unidos (con diferentes regímenes de 70 % y 23 % de la ETc), cuyos valores promedio corrigieron para preamanecer (-0,46 MPa y -0,92 MPa) y mediodía (-0,66 MPa y -1,31 MPa). Estos datos discrepan de los obtenidos en nuestro trabajo, donde Ψ_{pd} del tratamiento con menos riego (T4) fue de -0,43 MPa y el Ψ_{md} para T1 fue de -1,34 MPa.

En comparación con otros cultivares, los valores medios de Ψ_{pd} en vides de Chardonnay bien regadas fueron de -0,26 MPa y en Garnacha de -0,29 MPa. Al someterlas a estrés hídrico, el potencial de 'Garnacha' (-0,7 MPa y -1,05 MPa en preamanecer y mediodía, respectivamente) fue significativamente más alto que en las vides de Chardonnay (-1,17 y -1,44 MPa), lo que evidencia la influencia del varietal en la respuesta al estrés hídrico (Shelden et al., 2017). Por su parte, valores de Ψ_{pd} en vides no irrigadas de los cultivares Chasselas y Petite Arvine, fueron -0,73 MPa y -0,62 MPa respectivamente (Spangenberg et al., 2018). Respecto a los integrales de Myers o de estrés hídrico acumulado, $S\Psi_{pd}$ mostró comportamientos similares entre T3 y T4 a lo largo de la temporada, mientras que para $S\Psi_{md}$ se diferenció categóricamente a todos los tratamientos donde T3 y T4 obtuvieron los máximos. Estos valores son propios de cada ensayo por lo que no es factible cotejar con otros resultados, pero su interpretación está asociada a mayores integrales de Myers para cultivos estresados. En este sentido, un trabajo desarrollado en Francia en las variedades: Viognier (uva blanca), Marselan (uva tinta) Petit Verdot (uva tinta) con distintos sistemas de conducción y poda, concluyeron que la poda mínima al tener la mayor superficie foliar y alta demanda hídrica, resultó en los mayores valores de Ψ_S en las variedades de estudio (Bas, 2019). Es importante notar que todos los rangos descritos difirieron de los obtenidos para $\delta^{13}C$. La variabilidad observada en el Ψ estaría sujeta a las limitaciones inherentes a la técnica de potencial hídrico foliar, particularmente en condiciones de sequía y alto déficit de presión de vapor, así como los mecanismos de la regulación hidráulica y estomática de la planta (Bortolami et al., 2021). Además, existe influencia en la frecuencia de aplicación del riego deficitario controlado (Mancha Ramírez, 2020).

La determinación del mediodía presenta la desventaja de que la rápida homeostasis entre el potencial hídrico foliar y el potencial hídrico del suelo subyace a rápidas fluctuaciones temporales en función de las condiciones ambientales, además de

depender del microclima particular de cada hoja. Es crucial considerar el comportamiento hídrico del varietal: las vides pueden ser an- o isohídrico, limitando las variaciones en el potencial hídrico de sus hojas mediante la regulación estomática (Rienth & Scholasch, 2019), que en nuestro ensayo de acuerdo con los resultados diferenciados de Ψ_{md} , el comportamiento fue anisohídrico. En contraposición, Vila y Hugalde (2014), identificaron que Malbec en maceta, bajo condiciones de estrés moderado, exhibe un comportamiento casi-isohídrico. Esto implica que cierran sus estomas ante la caída del potencial hídrico del suelo o un aumento de la demanda atmosférica, permitiendo a la planta mantener su potencial hídrico foliar dentro de rangos constantes, pero con cierta variabilidad en la conductancia estomática. Incluso la medición horaria de madrugada, considerada más segura, está condicionada por diversos factores. Se ha demostrado que el equilibrio completo entre los potenciales hídricos del suelo y de la planta a menudo no se alcanza al amanecer durante el verano debido a la corta duración del período de oscuridad y la probable transpiración nocturna asociada a un alto déficit de presión de vapor atmosférico (Spangenberg & Zufferey, 2018; van Leeuwen et al., 2009). Otro factor para tener en cuenta es la variación en la conductancia estomática global que exhibe una variación diurna significativa y disminuciones estacionales asociadas con un mayor estrés hídrico en la vid, el cual fue medido mediante el potencial hídrico de preamanecer (Ψ_{pd}) (Gowdy, 2022b). Finalmente, en los indicadores fisiológicos instantáneos es fundamental reconocer que la tolerancia a la sequía es un rasgo complejo e interactivo, que involucra mecanismos morfológicos, fisiológicos e hidráulicos (Dayer et al., 2020) y que y que el portainjerto también ejerce una influencia significativa (Di Filippo, 2008).

Por lo tanto, la integración del $\delta^{13}C$ con el potencial hídrico foliar permite una comprensión multiescalar del estado hídrico: el primero como indicador retrospectivo e integrador del ciclo, y el segundo como diagnóstico instantáneo de la planta. Esta complementariedad metodológica fortalece la validación del $\delta^{13}C$ como herramienta de monitoreo retrospectivo y su potencial de aplicación en viticultura de precisión.

La concordancia observada entre los resultados experimentales y los modelos teóricos de discriminación isotópica (Farquhar et al., 1989) confirman la validez fisiológica del enfoque: bajo déficit hídrico, la reducción de la relación C_i/C_a (concentración

interna/externa de CO₂) disminuye la discriminación isotópica y enriquece el carbono fijado en $\delta^{13}\text{C}$. De este modo, la restricción hídrica actúa como modulador fisiológico que, dentro de márgenes controlados, puede ser aprovechado para optimizar la calidad enológica del Malbec, como lo sostienen van Leeuwen et al. (2009) y Medrano et al. (2015).

En términos metodológicos, la consistencia entre las mediciones isotópicas y fisiológicas confirma la robustez del diseño experimental y la pertinencia de los modelos lineales generales y mixtos aplicados. A pesar de que el modelo de ajuste lineal no alcanzó la significancia estadística, los coeficientes de Pearson permitieron identificar tendencias consistentes con las expectativas fisiológicas, es decir, la relación entre $\delta^{13}\text{C} - \Psi$ y $\delta^{13}\text{C} - S\Psi$ muestra una correlación moderada para bayas y fuerte para hojas, con una direccionalidad negativa y positiva, respectivamente. Estos resultados expresaron que las variaciones del $\delta^{13}\text{C}$ explicaron una proporción sustantiva de la variabilidad fisiológica observada en el viñedo, lo que refuerza su potencial como herramienta de diagnóstico ecofisiológico.

Finalmente, la correspondencia entre los patrones observados en San Rafael y los reportados en regiones mediterráneas, como España o el sur de Francia (Santesteban et al., 2015; van Leeuwen & Destrac-Irvine, 2017) respaldan la aplicabilidad del $\delta^{13}\text{C}$ en zonas áridas del hemisferio sur. No obstante, los resultados también señalan la necesidad de establecer umbrales locales de interpretación, dado que las condiciones edafoclimáticas de Mendoza —alta radiación solar, amplitud térmica y precipitaciones estivales irregulares— generan dinámicas fisiológicas particulares que pueden modificar la sensibilidad isotópica del Malbec respecto de otras variedades y regiones. Además, para poder garantizar la generación de una escala con todos los niveles hídricos, se debe replicar el ensayo en diferentes temporadas, a fin de evaluar el factor temporal en el estado hídrico del viñedo. Para obtener un mejor ajuste de los datos por tratamiento, es necesario aumentar la cantidad de determinaciones, con el fin de disminuir el error y validar el modelo estadístico.

2.2. $\delta^{13}\text{C}$ como indicador de trazabilidad y calidad de la materia prima

El análisis conjunto de las variables vegetativas, productivas y de calidad de bayas permitió establecer relaciones parciales entre el estado hídrico del viñedo —reflejado en el $\delta^{13}\text{C}$ — y los atributos enológicos de la materia prima. Tal como se anticipó en la hipótesis H3, en forma parcial se pudo validar que el mayor aporte hídrico en el tratamiento T1, mostró un menor enriquecimiento isotópico que se correspondió con un aumento de los indicadores de rendimiento fructífero y foliar, pero con afectación o deficiencias en parámetros cualitativos de las uvas. A continuación, se detallan los análisis de resultados de acuerdo con las variables relacionadas.

2.2.1. Variables vegetativas: área, peso y densidad foliar – concentración de clorofila

Respecto a las variables vegetativas relacionadas con la canopia, área y densidad foliar y concentración de clorofila, nuestra investigación demuestra resultados estadísticamente significativos en función de los niveles de riego solamente para las dos últimas. Si bien no existió una clasificación de medias por tratamiento para al área foliar primaria, secundaria y total; se pudo visualizar una tendencia a menores valores cuando existe restricción hídrica. Esta tendencia también se evidenció en el peso de estas, donde la biomasa de canopia fue mínima en T3 y T4. Esto también es confirmado por Netzer y Benítez Quintana, a través de sus correlaciones con el coeficiente de cultivo, KC, lograron confirmar que el índice de área foliar es un parámetro de la vid directamente influenciado por la dotación hídrica (a mayor restricción, menor índice) (Benítez Quintana, 2023; Netzer & Ohana-Levi, 2025).

Para las variables de densidad foliar, se validó que, a menor tasa de reposición de lámina de agua, la cantidad de superficie de limbo en relación con la masa (m^2/g), fue mayor para T4 lo que implica menor espesor de las hojas. Esta tendencia se presentó en hojas primarias y totalidad foliar. La mayor densidad de hojas secundarias se registró para las vides de T3. En contraposición, el tratamiento con mayor cantidad de agua, T1, presentó el menor índice de equilibrio entre el área foliar y la producción con un valor de $0,65 \text{ m}^2/\text{Kg}$ de uva. Ningún tratamiento alcanzó el nivel óptimo de equilibrio ($1 \text{ m}^2/\text{Kg}$), lo que sugiere que la mayoría de los tratamientos presentaban un exceso de superficie foliar en relación con la producción, a excepción de T2. Este impacto fue más marcado en T1,

donde se ralentizó la maduración de las uvas como se reflejó en las curvas de maduración de la temporada, generó el menor nivel de azúcares y la mínima acumulación de antocianinas en hollejos, con un impacto negativo en la calidad del vino, coincidente con el análisis de van Leeuwen y sus colaboradores (van Leeuwen et al., 2019). Dado el impacto de la canopia en la calidad y la producción, se recomienda la aplicación futura de técnicas no destructivas. También se debe tener en cuenta que el exceso de área foliar incrementa la demanda hídrica (Bas, 2019). Es crucial obtener modelos que permitan relacionar mediciones sencillas de campo para evitar la extracción de hojas y el consecuente debilitamiento de la producción. Ejemplos de estas metodologías incluyen la propuesta por Rodríguez Plaza en cv. Malbec (Rodríguez Plaza et al., 2013) o la ecuación de regresión desarrollada para el varietal Listán Negro en Tenerife que predice el área foliar a partir de la medición del largo máximo de la hoja (Benítez Quintana, 2023).

En nuestro estudio, la concentración de clorofila en hojas primarias de Malbec estuvo influenciada por la lámina de agua irrigada: a mayor dotación hídrica, mayor cantidad de clorofila foliar. Esta observación es consistente con los resultados de Caruso y colaboradores (2023) en 'Sangiovese' (Italia), donde el estrés hídrico inducido después del envero provocó una reducción más rápida de la clorofila foliar en comparación con vides con riego completo. Dicha reducción fue de aproximadamente el 25%, pasando de valores iniciales cercanos a 0,7 g/dm² a finales de 0,52 g/dm². Sin embargo, Caruso señaló que la reducción asociada a la restricción hídrica fue más drástica en condiciones controladas (maceta) que en campo (Caruso et al., 2023). En contraste, la reducción de la concentración observada en nuestro ensayo entre T1 y T4 fue menor, alcanzando el 11,8%.

Adicionalmente, otros trabajos se han centrado en la estimación de la clorofila foliar utilizando técnicas no destructivas. Por ejemplo, Li y colaboradores (2025) en 'Sunshine Rose' y 'Cabernet Sauvignon' emplearon datos hiperespectrales y aprendizaje automático, destacando que la curva de respuesta espectral de la clorofila foliar se ve significativamente afectada por el contenido de agua de la hoja (Li et al., 2025). Respecto a la variabilidad por varietal, un estudio realizado en Chile para evaluar las consecuencias del iso- y anisohidrismo en la fotosíntesis no encontró diferencias significativas en la

concentración de clorofila entre cepas control y aquellas sometidas a estrés hídrico severo (Romero Mendoza, 2020). Específicamente, en 'Chardonnay' (considerado anisohídrico) se registraron valores de 1,41 y 1,13 mg/g (control/estrés), mientras que 'Cabernet Sauvignon' (isohídrico) mantuvo valores estables de 0,94 mg/g en ambos tratamientos. En otros varietales, un análisis en viñedos Syrah, que analizaron el efecto del déficit hídrico progresivo, también reportaron una baja influencia sobre la disminución de la concentración de clorofila atribuible al comportamiento anisohídrico del cultivar (Jaramillo Canseco, 2022). Estos estudios concluyen que el estrés hídrico genera como respuesta adaptativa una disminución en la concentración de clorofila foliar (Ballester et al., 2018).

La reducción de clorofila bajo menor disponibilidad hídrica indica una limitación fotosintética que favorece condiciones de menor conductancia estomática; esto tiende a disminuir la discriminación isotópica y aumentar el $\delta^{13}\text{C}$, reforzando la función del isótopo como integrador del estado hídrico.

2.2.2. Variables de rendimiento: tamaño y composición gravimétrica de bayas

Las vides con mayor disponibilidad hídrica (T1) mostraron los valores más altos en las variables de rendimiento, evidenciando un aumento del tamaño de baya y clase modal, la cantidad de racimos por planta, máximos pedos los componentes de la uva (hollejo, semilla y pulpa) y las relaciones más altas de hollejo/baya y semilla/baya. Este comportamiento coincide con lo esperado fisiológicamente: en condiciones de mayor hidratación, la expansión celular se ve favorecida y la planta prioriza la acumulación de biomasa, generando frutos de mayor peso (Keller, 2020). No obstante, al comparar estos resultados con estudios realizados en otras regiones vitivinícolas, se observa que el peso de las bayas puede variar sustancialmente según el sitio, la añada y el manejo, lo que subraya la influencia determinante del terruño en la expresión del rendimiento (Mirás-Avalos et al., 2016). Este patrón también se relaciona con el hecho de que, tras el envero, las bayas se vuelven relativamente insensibles a variaciones puntuales del potencial hídrico, lo que explica que los tratamientos deficitarios no siempre produzcan reducciones drásticas del tamaño (Gambetta et al., 2020).

No obstante, al comparar estos resultados con estudios realizados en otras regiones vitivinícolas, se observa que el peso de las bayas puede variar sustancialmente según el sitio, la añada y el manejo (Dayers, 2012; Shellie & Bowen, 2014) lo que subraya la influencia determinante del terruño en la expresión del rendimiento (Bonfante & Brillante, 2022; Brillante et al., 2020; OIV, 2010; Spangenberg et al., 2025; van Leeuwen et al., 2020). Este patrón también se relaciona con el hecho de que, tras el envero, las bayas se vuelven relativamente insensibles a variaciones puntuales del potencial hídrico, lo que explica que los tratamientos deficitarios no siempre produzcan reducciones drásticas del tamaño del fruto (Keller et al., 2015; Gambetta et al., 2020). Como en el caso de uvas Albariño de Galicia, España; donde no hubo diferencia significativa el peso de las bayas con distintos riegos (Mirás-Avalos et al., 2016), y por el contrario en otros ensayos, a menor reposición de lámina de agua, se generó la disminución de peso en las variables vegetativas reportadas en uvas del varietal Cabernet Sauvignon de California, Estados Unidos (Castellarin et al., 2007) y en Chile (Cáceres-Mella et al., 2017).

En este contexto, la respuesta observada en T4 —bayas más pequeñas, correspondientes a los potenciales hídricos más bajos— es consistente con estudios previos que relacionan el estrés hídrico con una menor disponibilidad de agua para el crecimiento celular (Mirás-Avalos e Intrigliolo, 2017). En conjunto, estos resultados confirman que la dotación hídrica modula el rendimiento, pero también evidencian que esta respuesta está mediada por factores ambientales y fisiológicos propios de cada temporada. Además, la menor masa de las bayas en condiciones de menor disponibilidad hídrica incrementa de manera proporcional la concentración de antocianos en los hollejos, lo que favorece los atributos visuales en los vinos provenientes de los tratamientos deficitarios, expresado en nuestro ensayo en la componente colorimétrica a^* (rojo), L (intensidad) e IC (índice de color).

2.2.3. Variables de calidad: composición fisicoquímica de bayas y hollejos

La maduración de la fruta comienza en el envero y se asocia con el ablandamiento de la baya, el endurecimiento de la piel, la acumulación de azúcares, antocianinas, taninos y componentes de sabor y aroma, el aumento del pH y la disminución de la clorofila, los ácidos orgánicos y los componentes aromáticos herbáceos (Keller, 2020). Estos procesos

fueron coherentes con la evolución observada en las curvas de maduración del viñedo. En relación con la disminución de peso bajo menor aporte de agua, se observaron mecanismos de ajuste fisiológico que favorecieron una mayor concentración de solutos en las bayas. El valor de sólidos solubles (°Brix) fue superior en el tratamiento T3, lo que reflejó una tendencia coherente con el aumento de $\delta^{13}\text{C}$. Este comportamiento coincide con lo reportado por Costa et al. (2020), quienes observaron que niveles moderados de déficit hídrico modifican la composición de la uva al inducir una mayor eficiencia fotosintética por unidad de agua transpirada.

Otras características fisicoquímicas de las uvas no parecieran ser tan sensibles a las diferentes dosificaciones de riego. Tal es el caso de las pH y acidez titulable total. Si bien en nuestro estudio se demostró que un mayor valor de pH se asocia con una menor expresión de acidez —particularmente del ácido tartárico—, no existieron diferencias significativas entre los tratamientos, y todos los valores se mantuvieron dentro de rangos óptimos para procesos de vinificación. Un comportamiento similar tuvieron las cepas de Cabernet Sauvignon en la región metropolitana de Chile, sometidas a diferentes tipos de estrés hídrico, donde los sólidos solubles aumentaron durante la maduración y la acidez titulable disminuyó desde el envero hasta la cosecha, sin mostrar diferencias significativas entre los tratamientos. Una revisión de estudios de variedades tintas, principalmente Cabernet Sauvignon, Merlot, Syrah y Tempranillo, encontraron que solamente el 30% de los experimentos evidenció efectos del déficit hídrico sobre la acidez total (Gambetta et al., 2020). Contrariamente, en un estudio de metanálisis, se demostró que a medida que el potencial hídrico disminuye (aumenta el estrés), los ácidos orgánicos (y, por lo tanto, la acidez titulable) también tienden a disminuir, mientras que el pH, que es inversamente proporcional a la acidez, tiende a aumentar (Mirás-Avalos & Intrigliolo, 2017). Años posteriores, estudios complementarios revelaron relaciones significativas entre el estado hídrico de la vid y varios parámetros del vino, como el pH y el ácido tartárico (Mirás-Avalos & Araujo, 2021).

En paralelo, conocer la composición polifenólica de los hollejos es de importancia capital para la vitivinicultura y la enología, ya que estos compuestos son los principales determinantes de la calidad sensorial, la estabilidad química y el valor comercial de los vinos tintos. El contenido de taninos y antocianos en nuestro ensayo fue mayor en T3

(+7% con T1) y T4 (+13% con T1), lo que indica que el estrés hídrico moderado actuó como estímulo metabólico para la síntesis de compuestos fenólicos. Las antocianos son los pigmentos responsables del color en las uvas y en los vinos tintos jóvenes (Cáceres-Mella et al., 2017). Fanzone Sánchez (2012) explica que el efecto positivo del déficit hídrico en la concentración de compuestos fenólicos (como antocianinas y proantocianidinas) está frecuentemente relacionado con la disminución del tamaño de la baya y la modificación de la relación peso de hollejo/peso de baya, aspecto coincidente con la tendencia observada en este estudio. En los cultivares Cabernet Sauvignon y Malbec bajo riego deficitario, también se reportaron resultados experimentales directos sobre las antocianinas y el estrés hídrico, dado que la concentración de antocianinas totales aumentó en promedio un 6 % y 7 % en ambos cultivares en respuesta directa a la disminución del potencial hídrico foliar a mediodía (Shellie & Bowen, 2014). La disminución del peso de semilla registrado en fusión del menor aporte hídrico es un factor positivo para aspectos cualitativos (Pugliese, 2023). Estos resultados se encuentran en concordancia con los estudios de van Leeuwen et al. (2023, 2017, 2009), quien señaló que un control adecuado del riego puede mejorar la estructura fenólica del vino, incrementando la concentración de pigmentos responsables de la coloración y la astringencia.

2.2.4. Variables de nutrición foliar: macro y micronutrientes

Para nuestro estudio no se reflejaron diferencias estadísticamente significativas por tratamiento, pero sí se observó una tendencia marcada a mayor concentración de macronutrientes en limbo y pecíolo en T1, que fue el tratamiento más regado durante la temporada envero-vendimia. Los resultados indicaron que todos los tratamientos fueron nutricionalmente adecuados, a excepción de los límites de Cu debido a labores culturales de control fitosanitario. Esto podría explicarse porque, junto con el agua, las raíces absorben nutrientes minerales de la solución del suelo y lo distribuyen a través del flujo de transpiración, de modo que un mayor aporte hídrico favorece el proceso de intercambio iónico: las raíces superficiales absorben preferentemente nutrientes inmóviles y las raíces profundas aquellos más móviles (Keller, 2020). Según las recomendaciones de muestreo en diferentes fases del ciclo vegetativo de la vid, en floración y envero se sugiere analizar N, P, K, Mg y Zn en el limbo; en tanto que para

floración se recomienda evaluar Ca, Fe, Cu y B en el pecíolo, y para envero Ca y B en el pecíolo. Para el caso de nutrientes con variabilidad similar, los limbos y pecíolos mostraron una reproducibilidad similar para el Ca y el Mg, así como para el Fe en envero (Bermejo, 2015). Para nuestra etapa de muestreo no se cuenta con estudios previos específicos, sin embargo, siguiendo los lineamientos de Benito Bermejo, los valores más negativos de $\delta^{13}\text{C}$ asociaron a mayores contenidos de N, P, K, Mg y Zn en limbo y pecíolo (como en T1), mientras que Ca, Fe, Cu mostraron valores más bajos en el mismo tratamiento. En el análisis de componentes principales se obtuvieron similares resultados que para vides del varietal Garnacha implantadas en España (Benito Bermejo, 2015), donde la composición de macro y micronutrientes se diferencia entre pecíolo y limbo. Sin embargo, para la composición de macronutrientes en limbo, las concentraciones en cv. Tempranillo, fueron superiores a las encontradas en nuestro estudio del varietal Malbec, al igual que las cantidades de N, P y Mg en limbo (Romero Laibarra, 2014).

Cabe destacar que esta metodología representa una herramienta instantánea del estado fisiológico, por lo que la comparación de los resultados debe realizarse a lo largo del tiempo (Sánchez Ormeño, 2020). Sin embargo, una de sus principales limitaciones radica en la variabilidad dentro de la planta, entre cultivares y variedades, ya que las hojas pueden absorber y concentrar nutrientes en proporciones diferentes según su posición, edad fisiológica y características genéticas (Corradini, 2023).

En resumen, la correspondencia entre los resultados fisiológicos (Ψ , $\delta^{13}\text{C}$) y las variables vegetativas, composicionales de bayas y de nutrición foliar evidenciaron parcialmente que el $\delta^{13}\text{C}$ no solo es un indicador de estado hídrico, sino también un parámetro de trazabilidad que integra la respuesta ecofisiológica del viñedo y su expresión enológica. Este hallazgo reviste relevancia práctica, dado que el $\delta^{13}\text{C}$ puede emplearse como una herramienta de certificación de origen y de control de calidad del vino, en coincidencia con las aplicaciones propuestas por Gaudillère et al (2002) y validada posteriormente por (Gowdy et al., 2022a) para distintos sistemas vitícolas. Si bien algunas variables fueron menos sensibles a los diferentes aportes de riego, y no pudo definirse una clasificación estadísticamente significativas de medias para todos los indicadores

analizados, es importante reconocer que la composición de la fruta cosechada varía considerablemente tanto dentro de un mismo viñedo como entre viñedos y entre años (Keller, 2020). A corto plazo, las respuestas fisiológicas incluyen ajustes de conductancia estomática, señalización de sequía y la regulación genética, mientras que a largo plazo se relacionan con el equilibrio raíz/vástago, la aclimatación metabólica, las características de calidad de la baya y el rendimiento (Costa et al., 2020). Dado que la formación del rendimiento se produce a lo largo de dos temporadas de crecimiento, y los factores ambientales y de desarrollo interactúan para determinar la cosecha final a través de su impacto variable en los diferentes componentes del rendimiento (Keller, 2020), sería relevante replicar el estudio en temporadas consecutivas para evaluar si las tendencias observadas se mantienen o se amplifican con el tiempo.

2.3. Correlación entre $\delta^{13}\text{C}$ y las variables enológicas del vino

Los resultados obtenidos en las microvinificaciones confirmaron que el manejo del riego influye de manera indirecta, en la composición fisicoquímica, colorimétrica y sensorial del vino. Aunque las diferencias estadísticas entre tratamientos no fueron significativas para todas las variables analizadas, las tendencias observadas en los análisis multivariados y de componentes principales (ACP) revelaron asociaciones coherentes entre los valores isotópicos, la calidad de la materia prima, las características del vino y el régimen hídrico aplicado.

2.3.1. Variables fisicoquímicas

En términos fisicoquímicos, las variables evaluadas (ácidos, densidad, azúcares y pH) no mostraron diferencias significativas entre tratamientos, lo que indica que el riego diferenciado no modificó de manera marcada la composición de los vinos. La acidez fija, constituida por el ácido tartárico, málico y cítrico; la acidez volátil, principalmente ácido acético; y la acidez total, que es la suma de ambas, se mantuvieron dentro de los límites permitidos por la Resolución 138/2018 (INV, 2018).

Si bien se esperaba que los vinos procedentes de los tratamientos T3 y T4 presentaran una mayor graduación alcohólica y contenido de glicerol -en concordancia con la mayor concentración de azúcares en las uvas de origen-, los procesos prefermentativos,

fermentativos y de estabilización no diferenciaron los resultados de los tratamientos con mayor riego y menor concentración de sólidos solubles en bayas. Esto se debería en principio a la equiparación de agua recibida en la temporada que imposibilitó la restricción hídrica moderada y severa esperada en T3 y T4. Esta relación ha sido ampliamente documentada en la literatura (Dayer et al., 2020), donde se destaca que el déficit hídrico moderado incrementa la síntesis de glicerol, contribuyendo a la untuosidad y al cuerpo del vino. En cambio, los vinos de T1 y T2, correspondientes a regímenes de riego más altos, presentaron valores ligeramente superiores de acidez total, indicador de una madurez fisiológica más tardía. Este fenómeno también se presentó en aspectos de calidad de materia prima, donde T1 obtuvo los valores mínimos ajustados de sólidos solubles ($^{\circ}\text{Bx}$) y pH durante la curva de maduración del período envero-vendimia. Lo anteriormente expuesto se relaciona con el estado hídrico de los viñedos, el cual está sujeto al manejo cultural y su relación con las condiciones ambientales. Estos factores influyeron en el crecimiento de la vid, en la composición de la fruta y en la calidad del vino; tal como expresó Urvieta y colaboradores (2021) en una investigación de Malbec y terroir en Mendoza. Los autores concluyeron que las características climáticas de la añada (particularmente el régimen de lluvias) influyeron en que la composición y la calidad de los vinos (medida por los CFs) estando íntimamente ligadas al estado hídrico y térmico del viñedo. A su vez, esta relación estaría mediada por el aumento de las temperaturas medias durante el verano, principal consecuencia del cambio climático, y la diferente distribución de las precipitaciones durante la fase de maduración que han provocado alteraciones en la concentración de azúcares y en el perfil de acidez de la uva (Droulia & Charalampopoulos, 2022).

Otra variable relevante fue la concentración de ácido málico. En nuestro ensayo no se generó la fermentación maloláctica, proceso en el cual el ácido málico se transforma en ácido láctico. después de la fermentación alcohólica. Aunque se detectó ácido málico (AC MA) en todos los tratamientos, aquellos que recibieron mayor aporte hídrico mostraron las concentraciones estadísticamente más bajas. Específicamente, las microvinificaciones de T1 no solo obtuvieron las mínimas cantidades de AC MA, sino también la menor expresión de acidez total. La reducción de este ácido está típicamente asociada a cambios en los vinos que resultan en desacidificación por fermentación

maloláctica, proceso que suaviza los vinos jóvenes, genera acidez volátil y aumenta el pH (Catelen, 2022; Fernández De Ullivarri et al., 2024; Nazralla, 2009).

Po lo tanto, garantizar la fecha de vendimia óptima es un desafío que debe conciliar el estado hídrico del viñedo con los parámetros de calidad de la uva. Estos parámetros incluyen, concretamente, la relación azúcar/acidez y la calidad sanitaria (Faralli et al., 2024).

2.3.2. Variables colorimétricas

Las variables colorimétricas mostraron un patrón particularmente interesante: la intensidad y el índice de color tendieron a incrementarse a medida que disminuyó el aporte hídrico, alcanzando los valores más altos en T3 y T4 (IC = 888–1002). Este comportamiento se relaciona con la mayor concentración de antocianos y taninos observada en las bayas de los tratamientos deficitarios. Todos los tratamientos cumplieron con la reglamentación vigente de define el límite igual o superior a 500 para vinos tintos en circulación, Res. 135/2018 (INV, 2018), aunque las cepas más irrigadas generaron los vinos con menor índice cercanos al límite (IC = 579), valor considerado no apto para guarda (Riffle et al., 2022).

El riego pleno (T1) también afectó negativamente a los parámetros de CIELab, se observó una mayor componente amarilla (b^*), colores más claros (menor IC) en relación inversa a la luminosidad (L^*) y matiz de color (h^*). Esta misma correlación negativa fue identificada por Catelen, 2022 en un estudio sobre Malbec y Sauvignon Blanc en Mendoza, enfocado en estrategias para reducir el contenido de alcohol y pH en vinos.

La correlación negativa entre el aporte hídrico y los parámetros I (intensidad), a^* (rojez) y C^* (croma) indica que los vinos provenientes de cepas bajo estrés hídrico presentaron tonalidades más intensas y saturadas. Estos resultados también fueron descritos por Fanzone Sánchez et al. (2020) para vinos Malbec de regiones contrastantes de Mendoza. Se destaca la correlación entre materia prima y vinificados, a través del ajuste lineal entre la concentración de antocianos en hollejos y la componente de color rojo (a^*), con un coeficiente de determinación $R^2 = 0,976$ que evidenció la alta correlación positiva de los

datos. Estos resultados también fueron reportados en viñedos de Malbec localizados en La Pampa, Argentina (Varela et al., 2022).

2.3.3. Variables de análisis sensorial

El análisis de componentes principales (ACP) explicó el 67,5% de la variabilidad total, permitiendo identificar cinco agrupamientos de variables. Las regiones II y III del biplot —asociadas con alcohol, glicerol, ácido acético, intensidad e índice de color— estuvieron dominadas por muestras de T3 y T4, lo que confirma que la restricción hídrica moderada favorece la formación de vinos estructurados, de mayor cuerpo y color. Por el contrario, las regiones I y IV —caracterizadas por pH bajo, mayor acidez y presencia de azúcares residuales— se asociaron principalmente a T1 y T2, con vinos más ligeros y de perfil aromático menos complejo. Este patrón concuerda con los resultados de van Leeuwen et al. (2009) y Santesteban et al. (2015), quienes demostraron que la gestión del déficit hídrico puede modular la expresión sensorial final del vino mediante su efecto sobre los precursores fenólicos y aromáticos. Sin embargo, algunos estudios, como el de Fernández (2013) en España, sugieren que el riego precosecha en 'Cabernet Sauvignon' puede reducir la acumulación de azúcar sin modificar significativamente la composición fenólica ni la calidad sensorial. En cuanto a las variables gustativas, el tratamiento T3 registró la máxima concentración de taninos en bayas, lo cual se reflejó en la puntuación más alta para fase gustativa (máximo de 40,91). Si bien las diferencias en la percepción de la astringencia y la sequedad en vinos tintos no se explican únicamente por la concentración de taninos, esta fue identificada como la variable de mayor influencia en un estudio de 37 muestras (Pavez et al., 2022). De modo similar, Catelen (2022) y Fanzone Sánchez y colaboradores (2020) reportaron una concordancia entre el contenido de taninos medido y la percepción de volumen en boca y astringencia en vinos de la variedad 'Malbec'.

Aun cuando las puntuaciones globales no fueron significativamente diferentes entre los tratamientos, los jueces entrenados sí identificaron diferencias claras en atributos específicos como color, cuerpo y persistencia. No obstante, el análisis multivariado evidenció una correlación positiva entre el puntaje total y el índice de color (IC) Esto se reflejó en los resultados de ΔE^* (diferencia total de color en CIELab). Esta variable superó

el límite inferior ($>2,7$) para todas las comparaciones por tratamientos, a excepción de T2 y T3, que significó que los colores de los vinos de estas parcelas no podían diferenciarse entre sí. Estos hallazgos refuerzan la asociación entre un $\delta^{13}\text{C}$ más alto (menos negativo) con vinos de mejor estructura y atributos sensoriales, reflejado en las puntuaciones más altas en color, cuerpo, intensidad olfativa y persistencia; especialmente en vinos jóvenes. El riego deficitario generó vinos más complejos, pero su estabilidad en el periodo de guarda dependió del nivel de estrés. Por el contrario, los vinos generados con las uvas del tratamiento T1, con valores de $\delta^{13}\text{C}$ menores, fueron flacos, en términos enológicos, y de baja intensidad global; por ende, presentaron indicadores de menor calidad. Esto sugiere que el $\delta^{13}\text{C}$ puede emplearse no solo como indicador del estado hídrico, sino también como *proxy* indirecto de calidad y trazabilidad sensorial, una hipótesis respaldada por estudios recientes en viticultura de precisión (Brillante et al., 2020; Gowdy et al., 2022a).

En síntesis, la interpretación integrada de los resultados fisicoquímicos, colorimétricos y sensoriales confirma que la moderación del riego induce un efecto cualitativo positivo en la composición final del vino, validando la aplicabilidad del $\delta^{13}\text{C}$ como herramienta de predicción y control de calidad enológica. Los tratamientos T3 y T4, con menor dotación hídrica, lograron vinos con mayor intensidad cromática, equilibrio ácido-alcohólico y perfil sensorial más complejo, atributos deseables para vinos de alta gama en regiones áridas. La diferenciación en las cantidades de agua de riego suministrada por tratamiento influyó de manera más representativa en las variables colorimétricas y los atributos sensoriales relacionados con el color; sin afectar significativamente la composición fisicoquímica de los vinos. Los coeficientes de correlación de Pearson refuerzan este análisis, a partir de valores de correlación fuerte entre las variables colorimétricas y $\delta^{13}\text{C}$ de bayas y hojas. Para lograr un modelo estadístico predictivo robusto, se sugiere la ampliación de la base de datos a futuro para mejorar el ajuste.

2.4. Comparación con investigaciones previas y análisis de discrepancias

Los resultados obtenidos en esta investigación coinciden en líneas generales con los reportados en regiones vitícolas de características climáticas similares, principalmente del hemisferio norte. La relación directa entre el aumento de $\delta^{13}\text{C}$ y la reducción del

potencial hídrico foliar confirma la validez del modelo de Farquhar et al. (1989), que vincula la discriminación isotópica con la eficiencia en el uso del agua. Esta coincidencia global se basa en el rol del $\delta^{13}\text{C}$ como integrador de las condiciones hídricas del ciclo vegetativo, reflejando la capacidad de la vid para adaptarse (Brillante et al. 2020; Santesteban et al. 2015). Autores clave como C. van Leeuwen y J. E. Spangenberg han posicionado el $\delta^{13}\text{C}$ como un indicador esencial en la viticultura moderna, estableciendo que el déficit hídrico es un factor clave en la calidad y que su correlación con el $\delta^{13}\text{C}$ se mantiene hasta en los productos finales del vino (van Leeuwen et al., 2009, 2023; Spangenberg & Zufferey, 2019).

En estudios mediterráneos (Bchir et al., 2016; Costa et al., 2020), el $\delta^{13}\text{C}$ se ha utilizado con éxito para estimar la eficiencia hídrica (WUE) y definir zonas de manejo diferenciado dentro de un mismo viñedo. Los rangos de $\delta^{13}\text{C}$ obtenidos para el 'Malbec' de San Rafael (-27,55 a -25,9 ‰) son consistentes con la referencia para variedades C_3 bajo déficit controlado y sin estrés (Bchir et al., 2016; Costa et al., 2020), lo que valida la aplicabilidad del método en este contexto árido del hemisferio sur. Estos valores también son semejantes a los reportados previamente para el mismo varietal y región, incluso bajo riego de 100% de ETC (-27,31 y -26,86‰) (Carbajal Ramos, 2024). Sin embargo, se observó una menor amplitud isotópica en el 'Malbec' respecto a la registrada en 'Tempranillo' o 'Cabernet Sauvignon' en condiciones experimentales similares (Santesteban et al., 2015; Brillante et al., 2020). Esta diferencia puede atribuirse a las particularidades fisiológicas del 'Malbec', una variedad moderadamente anisohídrica que tiene una mayor capacidad para sostener la actividad fotosintética incluso con una reducción notoria en la disponibilidad hídrica. También puede ocurrir que, más allá de cierto umbral, la correlación entre $\delta^{13}\text{C}$ y estrés hídrico deja de ser lineal debido a la caída de la actividad fotosintética (Flexas et al., 2014; Flexas, et al., 2010). Otro factor son las variaciones interanuales registradas en los parámetros hídricos, disponibilidad de agua de riego, a las condiciones climáticas de cada temporada (Benítez Quintana, 2023) y la calidad de agua de riego (Martínez-Moreno et al., 2025).

En función de la aplicabilidad del $\delta^{13}\text{C}$ como indicador del estado hídrico del viñedo, en nuestro estudio se identificó una tendencia de proporcionalidad inversa sin evidenciar una correlación lineal entre la composición isotópica de carbono en bayas y hojas con el

potencial hídrico foliar (Ψ). Esta discrepancia es notable, ya que diversos estudios sí han alcanzado modelos de ajuste lineal robustos, lo que respalda la trazabilidad hídrica en vides y vinos. Por ejemplo, Spangenberg y sus colaboradores demostraron una fuerte correlación negativa (coeficientes entre -0,95 y -0,83) entre el $\delta^{13}\text{C}$ de varios componentes del vino y el Ψ , abarcando múltiples varietales (Spangenberg & Zufferey, 2018, 2019). Asimismo, C. van Leeuwen y su equipo fueron cruciales en la definición de escalas de estrés (-20‰ severo, -27‰ sin estrés) a partir de la correlación lineal integrada del $\delta^{13}\text{C}$ (van Leeuwen et al., 2023; Rienth & Scholasch, 2019). Esta relación lineal también fue validada por L. G. Santesteban en 'Tempranillo', encontrando una estrecha correlación entre el $\delta^{13}\text{C}$ de las bayas y los valores medios de Ψ_{pd} y Ψ_{md} (Santesteban et al., 2015; Martínez et al., 2018b).

No obstante, la falta de ajuste lineal, nuestro estudio aporta datos relevantes al ser uno de los pocos registros para el varietal 'Malbec' en esta región vitivinícola de Argentina. Además, el trabajo contribuye al conocimiento sobre la condición de riego en exceso, un rango para el cual las escalas vigentes de $\delta^{13}\text{C}$ no diferencian umbrales. Las variaciones interanuales observadas en los parámetros hídricos sugieren una asociación con las diferencias en la disponibilidad de agua de riego y las condiciones climáticas de cada temporada. Por ello, la estandarización de las mediciones a lo largo de múltiples ciclos vegetativos sería crucial para fortalecer la robustez de los umbrales locales del $\delta^{13}\text{C}$ para el diagnóstico hídrico.

Los resultados de microvinificación también concuerdan con los hallazgos de van Leeuwen et al. (2009), quienes demostraron que el estrés hídrico moderado mejora la concentración de compuestos fenólicos y la estructura sensorial del vino. En coincidencia, el presente estudio confirma que los tratamientos con riego deficitario controlado (T3 y T4) generaron vinos de mayor intensidad cromática, con equilibrio ácido-alcohólico y características sensoriales más complejas, sin evidencias de pérdida de productividad significativa ni afectación de la composición fisicoquímica. Estas coincidencias consolidan el papel del $\delta^{13}\text{C}$ como indicador integrador del proceso productivo, desde la fisiología de la vid hasta la calidad del vino, también reportado por Spangenberg y colaboradores (Spangenberg & Zufferey, 2018, 2019).

Otro factor relevante es la influencia de las mallas antigranizo, que modifican el microclima del dosel al reducir la radiación y la evaporación, amortiguando los efectos del déficit hídrico sobre la planta. Esta interacción ya ha sido señalada por Carbajal Ramos (2024), quien demostró que las coberturas modifican los valores isotópicos al alterar la demanda evaporativa atmosférica, hallazgo también respaldado por estudios en cv. 'Merlot' que compararon diferentes sistemas de mallas (Nahuel et al., 2024). Esta observación subraya la importancia de integrar los factores de manejo cultural en la interpretación de los resultados isotópicos en regiones como Mendoza.

Finalmente, en el plano enológico, la ausencia de diferencias significativas en los puntajes sensoriales globales podría deberse a la escala experimental de las microvinificaciones, donde los efectos del estrés hídrico se expresan con menor magnitud que en vinificaciones comerciales. A pesar de ello, la tendencia consistente observada en los análisis multivariados respalda la validez del enfoque, sugiriendo que el $\delta^{13}\text{C}$ puede incorporarse como parámetro predictor de calidad al combinarse con otros indicadores composicionales.

2.5. Síntesis integradora y proyección para la viticultura en regiones áridas

La discusión de los resultados permite afirmar que el $\delta^{13}\text{C}$ constituye un indicador robusto, integrador y aplicable al monitoreo del estado hídrico de viñedos cv. Malbec en condiciones áridas y semiáridas. En conjunto, los hallazgos validan dos de las tres hipótesis planteadas: (H1) el $\delta^{13}\text{C}$ se incrementa a medida que disminuye el aporte hídrico; (H3) Las bayas sometidas a estrés hídrico presentan rendimientos menores y modificaciones en la composición fisicoquímica, que influyen positivamente en las características organolépticas del vino. Debido a la influencia de las condiciones ambientales (que limitaron la diferenciación del riego), H2 —la correlación de valores elevados de $\delta^{13}\text{C}$ con mayores presiones de vacío Ψ — no pudo ser validada. Se propone repetir el estudio en una añada que no coincida con períodos de El Niño, ya que esta corriente modifica las condiciones ambientales con temperaturas extremas y patrones de lluvia no habituales en la región (frecuencia, caudal e intensidad).

Nuestros resultados confirman la utilidad del $\delta^{13}\text{C}$ no solo como herramienta de investigación, sino también como parámetro operativo para la gestión vitícola. En

comparación con los indicadores fisiológicos convencionales (Ψ_{pd} , Ψ_{md}), el $\delta^{13}C$ ofrece ventajas prácticas al integrar la señal hídrica acumulada durante el ciclo vegetativo y requerir un número reducido de determinaciones. Su correlación con parámetros enológicos refuerza su valor como indicador de trazabilidad, permitiendo vincular la gestión del riego con la calidad final del vino. Además, el $\delta^{13}C$ reflejó con mayor precisión el programa de riego real aplicado en el período envero-vendimia; lo que permitiría un uso eficiente de agua de riego en las próximas temporadas.

Desde una perspectiva productiva, los tratamientos con déficit hídrico moderado demostraron ser los más equilibrados, optimizando la eficiencia del uso del agua sin comprometer el rendimiento. Este hallazgo tiene relevancia estratégica en un contexto de creciente escasez hídrica en la región cuyana. Tal como sostienen Urvieta et al. (2021), el manejo sostenible del agua en viticultura requiere herramientas que permitan cuantificar la respuesta fisiológica de la vid para ajustar las estrategias de riego. En este sentido, la aplicación del $\delta^{13}C$ ofrece una alternativa científica y económicamente viable para complementar las metodologías tradicionales.

La validación local de umbrales de $\delta^{13}C$ constituye un aporte original del presente trabajo, permitiendo establecer rangos de referencia adaptados al varietal Malbec y a las condiciones agroclimáticas de Mendoza. Estos resultados amplían la base de datos nacional y fortalecen el desarrollo de la viticultura de precisión en el país, alineándose con los objetivos del Plan Estratégico Vitivinícola 2030 orientado a la sostenibilidad y competitividad del sector. Para alcanzarlos, es necesario la tarea coordinada entre todos los participantes. El Departamento General de Irrigación (DGI), que es el organismo público encargado de la administración, regulación y control del recurso hídrico superficial y subterráneo de la provincia, impulsa el riego eficiente adaptado a la demanda hídrica del cultivo, clave ante la crisis hídrica. Frente a estas condiciones de suministro, se recomienda al sector productivo iniciar controles de consumo de agua de acuerdo con las tecnologías de riego instaladas, ya sea riego por superficie o presurizado.

A nivel científico, este estudio contribuye al conocimiento de la ecofisiología de la vid en ambientes áridos y ofrece evidencia empírica sobre la relación entre los procesos de discriminación isotópica, el manejo del riego y la calidad enológica. Desde el punto de

vista metodológico, la integración de mediciones fisiológicas, isotópicas y enológicas constituye un enfoque interdisciplinario que puede ser replicado en otras regiones productivas o variedades de interés.

Finalmente, desde una perspectiva prospectiva, los resultados aquí discutidos abren nuevas líneas de investigación orientadas a:

- Establecer escalas isotópicas multianuales que consideren variaciones interanuales de temperatura y precipitación;
- Integrar el $\delta^{13}\text{C}$ con índices multiespectrales derivados de teledetección (NDVI, NDWI) para desarrollar modelos predictivos de estrés hídrico;
- Explorar la relación entre $\delta^{13}\text{C}$ y compuestos aromáticos volátiles, profundizando el vínculo entre fisiología hídrica y perfil sensorial del vino;
- Ampliar el estudio del $\delta^{13}\text{C}$ como indicador y herramienta de gestión hídrica para alcanzar indicadores de sustentabilidad vitivinícola;
- Aplicar este conocimiento a programas de zonificación y certificación de origen.

En síntesis, los resultados de esta tesis aportan evidencia concreta sobre el valor del $\delta^{13}\text{C}$ como indicador de diagnóstico hídrico y de calidad enológica en el Malbec de Mendoza. Su incorporación en las prácticas vitícolas y enológicas representa un avance hacia la gestión sustentable del recurso hídrico, la diferenciación de los vinos de zonas áridas y la consolidación de una vitivinicultura resiliente frente a los escenarios de cambio climático.

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y PROYECCIONES

La presente tesis tuvo como propósito principal evaluar el estado hídrico de viñedos de *Vitis vinifera* cv. Malbec en condiciones áridas mediante la composición isotópica de carbono ($\delta^{13}\text{C}$), y analizar su relación con el estado hídrico del cultivo, la calidad de la uva y del vino en un sistema productivo representativo del oasis sur de Mendoza. A partir de un diseño experimental que integró indicadores fisiológicos convencionales (potencial hídrico foliar y sus integrales), parámetros isotópicos en hojas y bayas, variables vegetativas, productivas y composicionales, y microvinificaciones controladas, se buscó determinar si el $\delta^{13}\text{C}$ constituye un indicador robusto, operativo y aplicable al monitoreo del riego deficitario controlado y a la trazabilidad de la materia prima y sus productos.

Los resultados permiten afirmar que el $\delta^{13}\text{C}$ es un indicador integrador altamente sensible a la disponibilidad de agua, aun en condiciones donde las lluvias atípicas — propias de la influencia de la corriente del Niño durante la temporada 2023–2024— reducen la diferenciación esperada entre tratamientos de riego. En este contexto, el $\delta^{13}\text{C}$ mostró una respuesta coherente con los gradientes de reposición hídrica, diferenciando los tratamientos con mayor aporte de agua (valores más negativos) de aquellos con niveles más restringidos (valores menos negativos). Esta correspondencia apoya la validez de la hipótesis H1 y confirma que el $\delta^{13}\text{C}$ refleja fielmente las condiciones hídricas integradas del ciclo fenológico, superando las limitaciones propias de los indicadores instantáneos.

En contraste, la hipótesis H2, que proponía una correlación lineal entre $\delta^{13}\text{C}$ y el potencial hídrico foliar (Ψ_{pd} y Ψ_{md}), no pudo ser validada. Los valores de Ψ mostraron una diferencia significativa entre los todos los tratamientos para los dos momentos de las determinaciones, preamanecer y mediodía. Sin embargo, $\delta^{13}\text{C}$ en bayas y hojas, solamente pudo diferenciar a T1 del resto. La variabilidad entre los resultados de ambas metodologías radicaría principalmente en la interpretación en función del tiempo de cada una. El Ψ evidencia el estado hídrico del cultivo en el momento, sujeto a las condiciones edáficas, ambientales y microclimáticas del cultivo. Estas son limitaciones inherentes a los indicadores fisiológicos de corto plazo, que pueden verse afectados por eventos meteorológicos puntuales, la estabilidad nocturna insuficiente o el

comportamiento hidráulico del portainjerto. Por otra parte, $\delta^{13}\text{C}$, depende del estado hídrico acumulado del cultivo; por lo que se reconoce como un indicador integrado en el período de maduración de la uva. De este modo, la divergencia entre Ψ y $\delta^{13}\text{C}$ no representa una contradicción, sino que refuerza la naturaleza multiescalar del estado hídrico en vid y la relevancia de combinar indicadores instantáneos para el manejo cultural y seguimiento de los viñedos, con integradores que proporcionen una evaluación a posteriori del déficit hídrico.

En cuanto a la composición y calidad de las uvas, se confirmó parcialmente la hipótesis H3. La mayor disponibilidad hídrica incrementó el peso y tamaño de las bayas, el número de racimos y la proporción de pulpa; pero tendió a disminuir la concentración de compuestos fenólicos, especialmente antocianos y taninos. También se evidenciaron respuestas en la canopia, con una mayor área foliar primaria y secundaria, menor densidad superficial específica, mayor concentración de clorofila y macronutriente en limbo y pecíolo. Por el contrario, los tratamientos con restricción hídrica moderada (T3 y T4) presentaron frutos más pequeños, con mayor concentración de fenoles, lo que favoreció la obtención de vinos de mayor intensidad cromática y mejor estructura sensorial. Las hojas fueron más delgadas, con menor concentración de clorofila y micronutrientes. Estas respuestas son consistentes con la literatura internacional que vincula estrés hídrico controlado con vinos de mayor calidad y confirma que el riego deficitario controlado constituye una herramienta decisiva para orientar el perfil enológico del Malbec en regiones áridas.

En el plano enológico, las microvinificaciones mostraron diferencias claras a nivel colorimétrico y sensorial, aunque las variables fisicoquímicas se mantuvieron dentro de rangos similares entre tratamientos. Este resultado es coherente con dos factores: por un lado, la moderación efectiva del estrés debido a las precipitaciones de la temporada; por otro, los efectos de la escala experimental, donde los procesos fermentativos tienden a homogeneizar variaciones iniciales en sólidos solubles y acidez. Aun así, el análisis multivariado reveló tendencias que vinculan $\delta^{13}\text{C}$ menos negativo, mayor concentración de compuestos fenólicos y vinos con mayor intensidad colorante y cuerpo, lo que confirma que el isótopo no solo permite reconstruir el estado hídrico, sino

también predecir atributos enológicos clave, controlar adulteraciones y en conjunto con otros isótopos controlar la trazabilidad en la cadena vitivinícola productiva.

Los resultados obtenidos evidencian aportes originales relevantes para la vitivinicultura argentina. En primer lugar, la tesis generó umbrales locales parciales de interpretación de $\delta^{13}\text{C}$ para el Malbec mendocino, hasta ahora inexistentes para el oasis sur. Esta contribución permite sentar bases para construir escalas regionales que consideren las particularidades edafoclimáticas de Mendoza —alta radiación, marcada amplitud térmica, suelos de textura variable y precipitación estival irregular—, condiciones que pueden afectar la sensibilidad isotópica en comparación con regiones mediterráneas o templadas del hemisferio norte. En segundo lugar, la investigación demuestra que el $\delta^{13}\text{C}$ refleja con mayor precisión el programa real de riego aplicado que los indicadores fisiológicos instantáneos, lo cual posiciona a este parámetro como una herramienta operativa valiosa para la planificación del riego a nivel de finca y bodega. Finalmente, la integración entre fisiología, isotopía y enología constituye un enfoque metodológico poco explorado en estudios locales, aportando una mirada interdisciplinaria alineada con los desafíos actuales de la vitivinicultura de precisión.

Aunque el estudio presenta evidencia sobre la capacidad del $\delta^{13}\text{C}$ para describir el estado hídrico del Malbec en ambientes áridos, existen limitaciones que es necesario considerar, vinculadas principalmente a la intercepción de lluvias inusuales y a la imposibilidad de sostener diferencias extremas entre los tratamientos de riego, evidencian la necesidad de replicar el experimento en temporadas adicionales para capturar la variabilidad interanual y consolidar la robustez de los umbrales propuestos. Asimismo, sería valioso ampliar el número de parcelas y mediciones, incluir vides testigo sin riego, incorporar distintos portainjertos y explorar otros indicadores de teledetección, como NDVI o NDWI, para generar modelos predictivos más integrales del estado hídrico. La inclusión de análisis aromáticos en vinos y la evaluación de compuestos volátiles asociados al metabolismo bajo estrés también constituirían una línea futura promisoría, especialmente para profundizar la relación entre $\delta^{13}\text{C}$ y calidad sensorial.

En perspectiva, los resultados de esta tesis demuestran que el $\delta^{13}\text{C}$ es una herramienta estratégica para la gestión hídrica en contextos de creciente escasez de agua. Su poder integrador —capaz de condensar la historia hídrica de la planta en una señal estable y reproducible— lo convierte en un indicador ideal para programas de riego deficitario controlado, certificaciones de origen, monitoreo retrospectivo y toma de decisiones orientada a la sustentabilidad. En un escenario de cambio climático donde las temperaturas aumentan, las olas de frío y calor tienen mayor duración, la demanda atmosférica es más intensa y las precipitaciones presentan alta variabilidad; contar con indicadores robustos que permitan anticipar y corregir desequilibrios es indispensable para mantener la competitividad y calidad de los vinos del oasis sur de Mendoza.

En síntesis, esta tesis aporta evidencia científica sólida sobre la utilidad del $\delta^{13}\text{C}$ como indicador de diagnóstico hídrico y como herramienta de trazabilidad enológica para el Malbec. Expande el conocimiento ecofisiológico de la vid en ambientes áridos, ofrece fundamentos prácticos para optimizar el uso del agua y propone líneas de desarrollo futuras que fortalecen la vitivinicultura de precisión en Argentina. Los hallazgos aquí presentados no solo contribuyen a la comprensión de la interacción entre manejo hídrico, fisiología y calidad del vino, sino que también proporcionan bases concretas para avanzar hacia una viticultura más sustentable, resiliente y adaptada a los desafíos productivos y ambientales del siglo XXI.

BIBLIOGRAFÍA

- Abdi, H., & Williams, L. J. (2010). Principal component analysis. *Wiley interdisciplinary reviews: computational statistics*, 2(4), 433-459.
- Acevedo-Opazo, C., Ortega-Farias, S., & Fuentes, S. (2010). Effects of grapevine (*Vitis vinifera* L.) water status on water consumption, vegetative growth and grape quality: An irrigation scheduling application to achieve regulated deficit irrigation. *Agricultural Water Management*, 97(7), 956-964. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.01.025>
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Smith, M., Raes, D. y Wright, J.L. (2005). *Método del coeficiente de cultivo dual FAO-56 para la estimación de la evaporación del suelo y extensiones de aplicación*. *Journal of irrigation and drain engineering*, 131 (1), 2-13.
- Aloy, K. G., Bergmann, A. R., Costa, V. B., & Malgarim, M. B. (2024). Impact of climate change on grape composition: A review. *Ciência e Natura*, 46. <https://doi.org/10.5902/2179460X75359>
- Ballester, C., Zarco-Tejada, P. J., Nicolás, E., Alarcón, J. J., Fereres, E., Intrigliolo, D. S., & Gonzalez-Dugo, V. (2018). Evaluating the performance of xanthophyll, chlorophyll and structure-sensitive spectral indices to detect water stress in five fruit tree species. *Precision Agriculture*, 19(1), 178-193. <https://doi.org/10.1007/s11119-017-9512-y>
- Bas Nahas, G. G. (2019). Comparación de variables vegetativas, ecofisiológicas y enológicas del mosto de uvas blancas y tintas, de viñedos conducidos en tres sistemas: poda mínima, poda rasa de precisión y espaldero vertical simple en la región Occitania Francia. (Magister dissertation, Universidad Nacional De Cuyo).
- Bchir, A., Escalona, J. M., Gallé, A., Hernández-Montes, E., Tortosa, I., Braham, M., & Medrano, H. (2016). Carbon isotope discrimination ($\delta^{13}\text{C}$) as an indicator of vine water status and water use efficiency (WUE): Looking for the most representative sample and sampling time. *Agricultural Water Management*, 167, 11-20. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.12.018>
- Benítez Quintana, J. M., Saenz Pisaca, D. F., & Ritter Rodríguez, A. (2023). *Estudio del uso consuntivo de la vid (CV. Listán Negro), cultivada en la finca La Tahonilla. TM DE San Cristóbal De Laguna*.

- Bermejo, A. B. (2015). Utilización del análisis de limbo y pecíolo para el diagnóstico nutricional del cv. Garnacha tinta (*Vitis vinífera* L.) (Doctoral dissertation, Universidad de La Rioja).
- Bonfante, A., & Brillante, L. (2022). Terroir analysis and its complexity: This article is published in cooperation with Terclim 2022 (XIVth International Terroir Congress and 2nd ClimWine Symposium), 3-8 July 2022, Bordeaux, France. *OENO One*, 56(2), 375-388. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2022.56.2.5448>
- Boninsegna, J., & Llop, A. (2015). *Impactos y vulnerabilidad al cambio climático de los principales ríos de Mendoza y San Juan a partir de la evolución de los glaciares cordilleranos*.
- Bortolami, G., Gambetta, G. A., Cassan, C., Dayer, S., Farolfi, E., Ferrer, N., Gibon, Y., Jolivet, J., Lecomte, P., & Delmas, C. E. L. (2021). Grapevines under drought do not express esca leaf symptoms. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(43), e2112825118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2112825118>
- Bramley, R. G. V., & Hamilton, R. P. (2007). Terroir and precision viticulture: Are they compatible? *OENO One*, 41(1), 1. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2007.41.1.855>
- Brillante, L., Martínez-Lüscher, J., Yu, R., & Kurtural, S. K. (2020). Carbon Isotope Discrimination ($\delta^{13}\text{C}$) of Grape Musts Is a Reliable Tool for Zoning and the Physiological Ground-Truthing of Sensor Maps in Precision Viticulture. *Frontiers in Environmental Science*, 8, 561477. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.561477>
- Brillante, L., Mathieu, O., Lévêque, J., van Leeuwen, C., & Bois, B. (2018). Water status and must composition in grapevine cv. Chardonnay with different soils and topography and a mini meta-analysis of the $\delta^{13}\text{C}$ /water potentials correlation. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98(2), 691-697. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8516>
- Brüggemann, N., Gessler, A., Kayler, Z., Keel, S. G., Badeck, F., Barthel, M., Boeckx, P., Buchmann, N., Brugnoli, E., Esperschütz, J., Gavrichkova, O., Ghashghaie, J., Gomez-Casanovas, N., Keitel, C., Knohl, A., Kuptz, D., Palacio, S., Salmon, Y., Uchida, Y., & Bahn, M. (2011). Carbon allocation and

- carbon isotope fluxes in the plant-soil-atmosphere continuum: A review. *Biogeosciences*, 8(11), 3457-3489. <https://doi.org/10.5194/bg-8-3457-2011>
- Cáceres-Mella, A., Talaverano, M. I., Villalobos-González, L., Ribalta-Pizarro, C., & Pastenes, C. (2017). Controlled water deficit during ripening affects proanthocyanidin synthesis, concentration and composition in Cabernet Sauvignon grape skins. *Plant Physiology and Biochemistry*, 117, 34-41. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.05.015>
- Carbajal Ramos, I. (2024). Evaluación de la metodología de discriminación isotópica $\delta^{13}\text{C}$ como indicador de estado hídrico en viñedos cv. Malbec de San Rafael. Maestría en Ingeniería Química. Universidad Nacional de Cuyo.
- Carrizo, C., De La Vega, E. D., & Guimarães, M. (2024). The quantitative and qualitative influence of controlled deficit irrigation on the Torrontés Riojano and Malbec grapes. *Semiárida: Revista de la Facultad de Agronomía. Universidad Nacional de La Pampa*, 34(2), 43-54.
- Caruso, G., Palai, G., Tozzini, L., D'Onofrio, C., & Gucci, R. (2023). The role of LAI and leaf chlorophyll on NDVI estimated by UAV in grapevine canopies. *Scientia Horticulturae*, 322, 112398. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112398>
- Castellarin, S. D., Matthews, M. A., Di Gaspero, G., & Gambetta, G. A. (2007). Water deficits accelerate ripening and induce changes in gene expression regulating flavonoid biosynthesis in grape berries. *Planta*, 227(1), 101-112. <https://doi.org/10.1007/s00425-007-0598-8>
- Catania, A., Catania, C., Sari, S. y Fanzone, M. (2020). Predicción de parámetros fenólicos del ensayo Harbertson-Adams en vinos tintos utilizando espectros visibles. En XII Congreso de AgroInformática (CAI 2020)-JAIIO 49 (Modalidad virtual).
- Catania, C. D., & Avagnina, S. (2010). *La interpretación sensorial del vino curso superior de degustación*.
- Catelén, M. J. (2022). Combinación de estrategias pre-fermentativas y fermentativas para reducir el contenido de alcohol y el pH en vinos Malbec (Doctoral dissertation, Universidad Nacional De Cuyo).

- Cernusak, L. A., Ubierna, N., Winter, K., Holtum, J. A. M., Marshall, J. D., & Farquhar, G. D. (2013). Environmental and physiological determinants of carbon isotope discrimination in terrestrial plants. *New Phytologist*, 200(4), 950-965. <https://doi.org/10.1111/nph.12423>
- Cerovic, Z. G., Masdoumier, G., Ghazlen, N. B., & Latouche, G. (2012). A new optical leaf-clip meter for simultaneous non-destructive assessment of leaf chlorophyll and epidermal flavonoids. *Physiologia Plantarum*, 146(3), 251-260. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2012.01639.x>
- Chaves, M. M., Flexas, J., & Pinheiro, C. (2009). Photosynthesis under drought and salt stress: Regulation mechanisms from whole plant to cell. *Annals of Botany*, 103(4), 551-560. <https://doi.org/10.1093/aob/mcn125>
- Choné, X. (2001). Stem Water Potential is a Sensitive Indicator of Grapevine Water Status. *Annals of Botany*, 87(4), 477-483. <https://doi.org/10.1006/anbo.2000.1361>
- Clara, A., Piccardo, D., Cazzola, V., & Fourment, M. (2023). Evaluación de alternativas de gestión de viñedo para mitigar los efectos de la variabilidad climática sobre el rendimiento y la composición de uvas. *BIO Web of Conferences*, 56, 01028. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20235601028>
- Coombe, B. G., & McCarthy, M. G. (2000). Dynamics of grape berry growth and physiology of ripening. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 6(2), 131-135. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2000.tb00171.x>
- Corradini, F. (2023). *Referencias para análisis foliares: valores esperados para la prognosis de deficiencias nutricionales*.
- Costa, J. M., Vaz, M., Escalona, J. M., Egipto, R., Medrano, H., & Chaves, M. M. (2020). Water as a critical issue for viticulture in southern Europe: Sustainability vs competitiveness: Sourced from the research article “Modern viticulture in southern Europe: vulnerabilities and strategies for adaptation to water scarcity” (Agricultural Water Management, 2016). *IVES Technical Reviews, Vine and Wine*. <https://doi.org/10.20870/IVES-TR.2020.3182>
- Costantini, E. A. C., Agnelli, A., Bucelli, P., Ciambotti, A., Dell’Oro, V., Ntarelli, L., Pellegrini, S., Perria, R., Priori, S., Storchi, P., Tsolakis, C., & Vignozzi, N. (2014). Unexpected relationships between $\delta^{13}\text{C}$

- and wine grape performance in organic farming. *OENO One*, 47(4), 269.
<https://doi.org/10.20870/oeno-one.2013.47.4.1556>
- Dayer, S., Gowdy, M., Van Leeuwen, C., & Gambetta, G. A. (2020). Leveraging the grapevine drought response to increase vineyard sustainability. *IVES Technical Reviews, vine and wine*.
<https://doi.org/10.20870/IVES-TR.2020.4482>
- Dayer, S., Perez Peña, J., Prieto, J., Galat, E. & Pulitti, F. (2012). *Evaluación de la sostenibilidad del riego deficitario controlado y manejo de la carga en vid*.
- De Souza, C. R., Maroco, J. P., Dos Santos, T. P., Rodrigues, M. L., Lopes, C. M., Pereira, J. S., & Chaves, M. M. (2005). Impact of deficit irrigation on water use efficiency and carbon isotope composition ($\delta^{13}C$) of field-grown grapevines under Mediterranean climate. *Journal of Experimental Botany*, 56(418), 2163-2172. <https://doi.org/10.1093/jxb/eri216>
- Di Filippo, M. (2008). *Influencia de seis portainjertos de vid sobre el comportamiento vitícola de la cv. Malbec y estudio de las relaciones hídricas que se establecen (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Cuyo. Facultad de Ciencias Agrarias)*.
- Di Rienzo, J., Casanoves, F., González L., Tablada, E., Díaz, M., Robledo, C., & Balzarini, M. (2020). InfoStat versión 2020. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba.
- Draque, A., Fanzone, M. L., Sari, S. E., & Catania, A. A. (2024). Argentine Malbec market: Comparative study of general chemical parameters and sensory properties within low, medium and high price segments: This article is published in cooperation with the XVth International Terroir Congress, 18-22 November 2024, Mendoza, Argentina. Guest editors: Federico Berli, Jorge Prieto and Martín Fanzone. *OENO One*, 58(4). <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2024.58.4.8207>
- Droulia, F., & Charalampopoulos, I. (2022). A Review on the Observed Climate Change in Europe and Its Impacts on Viticulture. *Atmosphere*, 13(5), 837. <https://doi.org/10.3390/atmos13050837>
- Fanzone Sánchez, M. L. (2012). *Caracterización de la composición fenólica de uvas y vinos de la variedad Malbec (Vitis Vinifera L.): su relación con el origen geográfico, factores vitivinícolas y valor comercial*.

- Faralli, M., Mallucci, S., Bignardi, A., Varner, M., & Bertamini, M. (2024). Four decades in the vineyard: The impact of climate change on grapevine phenology and wine quality in northern Italy. *OENO One*, 58(3). <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2024.58.3.8083>
- Farquhar, G. & Hubick, K. (1989). Discriminación de isótopos de carbono y fotosíntesis. *Revisión anual de fisiología vegetal y biología molecular vegetal*.
- Fernández, O., Sánchez, S., Rodríguez, L., & Lissarrague, JR (2013). Efectos de diferentes estrategias de riego sobre la composición de las bayas y del vino en vides Cabernet sauvignon cultivadas en Madrid (España). *Ciencia y Técnica Vitivinícola*, 28, 112-117.
- Fernández de Ulivarri, M., Merín, M. G., Raya, R. R., Morata De Ambrosini, V. I., & Mendoza, L. M. (2024). Killer yeasts used as starter cultures to modulate the behavior of potential spoilage non-Saccharomyces yeasts during Malbec wine fermentation. *Food Bioscience*, 57, 103424. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.103424>
- Flexas, J., Diaz-Espejo, A., Gago, J., Gallé, A., Galmés, J., Gulías, J., & Medrano, H. (2014). Photosynthetic limitations in Mediterranean plants: A review. *Environmental and Experimental Botany*, 103, 12-23. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2013.09.002>
- Flexas, J., Galmés, J., Gallé, A., Gulías, J., Pou, A., Ribas-Carbo, M., Tomàs, M., & Medrano, H. (2010). Improving water use efficiency in grapevines: Potential physiological targets for biotechnological improvement. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 16, 106-121. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2009.00057.x>
- Gambetta, G. A., Herrera, J. C., Dayer, S., Feng, Q., Hochberg, U., & Castellarin, S. D. (2020). The physiology of drought stress in grapevine: Towards an integrative definition of drought tolerance. *Journal of Experimental Botany*, 71(16), 4658-4676. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa245>
- García-Esparza, M. A., Capri, E., Pirzadeh, P., & Trevisan, M. (2006). Copper content of grape and wine from Italian farms. *Food Additives and Contaminants*, 23(3), 274-280. <https://doi.org/10.1080/02652030500429117>

- Gaudillère, J., van Leeuwen, C., & Ollat, N. (2002). Carbon isotope composition of sugars in grapevine, an integrated indicator of vineyard water status. *Journal of Experimental Botany*, 53(369), 757-763. <https://doi.org/10.1093/jexbot/53.369.757>
- Girona, J., Gelly, M., Mata, M., Arbonès, A., Rufat, J., & Marsal, J. (2005). Peach tree response to single and combined deficit irrigation regimes in deep soils. *Agricultural Water Management*, 72(2), 97-108. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.09.011>
- Girona, J., Mata, M., Del Campo, J., Arbonés, A., Bartra, E., & Marsal, J. (2006). The use of midday leaf water potential for scheduling deficit irrigation in vineyards. *Irrigation Science*, 24(2), 115-127. <https://doi.org/10.1007/s00271-005-0015-7>
- Glories, Y. (1984). El color de los vinos rojos. *Connecticut Vigne Vin*, 18 (4), 253-271.
- Gowdy, M., Julliard, S., Frouin, M., Poitou, X., Destrac Irvine, A., & van Leeuwen, C. (2022a). Carbon Isotope Discrimination as an Indicator of Vine Water Status is Comparable in Grape Must, Wine, and Distilled Wine Spirits. *Frontiers in Food Science and Technology*, 2, 936745. <https://doi.org/10.3389/frfst.2022.936745>
- Gowdy, M., Pieri, P., Suter, B., Marguerit, E., Destrac-Irvine, A., Gambetta, G., & van Leeuwen, C. (2022b). Estimating Bulk Stomatal Conductance in Grapevine Canopies. *Frontiers in Plant Science*, 13, 839378. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.839378>
- Greenacre, M. (2017), 'Size' and 'shape' in the measurement of multivariate proximity. *Methods Ecol Evol*, 8: 1415-1424. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12776>
- Harbertson, J. F., Kennedy, J. A., & Adams, D. O. (2002). Tannin in Skins and Seeds of Cabernet Sauvignon, Syrah, and Pinot noir Berries during Ripening. *American Journal of Enology and Viticulture*, 53(1), 54-59. <https://doi.org/10.5344/ajev.2002.53.1.54>
- Herrero-Langreo, A., Tisseyre, B., Goutouly, J.-P., Scholasch, T., & Van Leeuwen, C. (2013). Mapping Grapevine (*Vitis vinifera* L.) Water Status during the Season Using Carbon Isotope Ratio ($\delta^{13}\text{C}$) as Ancillary Data. *American Journal of Enology and Viticulture*, 64(3), 307-315. <https://doi.org/10.5344/ajev.2013.12125>

- Hugalde & Vila. (2014). *¿Una controversia sin fin? Comportamiento isohídrico o anisohídrico en vides...* (pp. 75 - 82). RIA / Vol. 40 / N.º 1.
- Ibáñez Pascual, S. (2025). Retos actuales de investigación en viticultura del Instituto de Ciencias de la Vid y del Vino. In *Tendencias en vino y agroalimentación en el siglo XXI: retos y oportunidades* (pp. 153-174). Universidad de La Rioja.
- Iland P, Bruer N, Edwards G, Chalogiris S and Wilkes E. (2013). *Chemical analysis of grapes and wines*, 2nd ed. Patrick Iland Wine Promotions Pty Ltd. Campbelltown, South Australia.
- INV. (2018). *Resolución 135-2018*. Instituto Nacional de Vitivinicultura. Argentina.
- INV. (2024). *Informe anual de superficie 2024*. Instituto Nacional de Vitivinicultura. Argentina.
- Jaramillo Canseco, J. I. (2022). Efecto de un déficit hídrico progresivo sobre fotosíntesis, conductancia estomática, fotoinhibición y senescencia en vides cv. Syrah.
- Kalra, Y. P. & Soil and Plant Analysis Council (Eds.). (1998). *Handbook of reference methods for plant analysis*. CRC Press.
- Keller, M. (2015). *The science of grapevines: Anatomy and physiology* (2nd edition). Elsevier/AP, Academic Press is an imprint of Elsevier.
- Keller, M. (2020). Phenology and growth cycle. En *The Science of Grapevines*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816365-8.00002-6>
- Kliewer, W. M., & Dokoozlian, N. K. (2005). Leaf Area/Crop Weight Ratios of Grapevines: Influence on Fruit Composition and Wine Quality. *American Journal of Enology and Viticulture*, 56(2), 170-181. <https://doi.org/10.5344/ajev.2005.56.2.170>
- Lawless, H. T., & Heymann, H. (2010). *Sensory Evaluation of Food: Principles and Practices*. Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6488-5>
- Li, Y., Xu, X., Wu, W., Zhu, Y., Gao, L., Jiang, X., Meng, Y., Yang, G., & Xue, H. (2025). Hyperspectral estimation of chlorophyll content in grapevine based on feature selection and GA-BP. *Scientific Reports*, 15(1), 8029. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-84977-x>

- Mancha Ramírez, L. A. (2020). Nuevas metodologías para la determinación del consumo hídrico en la vid. Efectos del momento de aplicación del déficit hídrico y carga de cosecha en parámetros productivos y cualitativos en climas semiáridos.
- Martínez, (2011). *Nutrición.Descripcion Metodología Vegetal*. Laboratorio INTA, Mendoza, Argentina.
- Martínez, A, Á., & Gómez-Miguel, V. D. (2018a). Caracterización del terroir: Influencia en la composición de la uva y relación con el NDVI dentro de la D.O.Ca.Rioja / *Terroir* characterization: influence on grape composition and relationship with NDVI within D.O.Ca.Rioja. *E3S Web of Conferences*, 50, 01009. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20185001009>
- Martínez, A., Galarza, R., Intrigliolo, D. S., & Martín, D. (2018b). *El ratio isotópico de carbono en viticultura: Fundamentos de la técnica y utilidades*. España.
- Martínez-Moreno, A., Parra, M., Intrigliolo, D. S., López-Urrea, R., & Pérez-Álvarez, E. P. (2025). Medium-term impacts of saline water deficit irrigation on soil, vine nutrient status, yield and grape composition of *Vitis vinifera* L. cv. Monastrell. *Scientia Horticulturae*, 342, 114036. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2025.114036>
- Medrano, H., Bota, J., Cifre, J., Flexas, J., & Gulías, J. (2007). Eficiencia en el uso del agua por las plantas. *Investigaciones Geográficas*.
- Medrano, H., Tomás, M., Martorell, S., Escalona, J.-M., Pou, A., Fuentes, S., Flexas, J., & Bota, J. (2015). Improving water use efficiency of vineyards in semi-arid regions. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(2), 499-517. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0280-z>
- Mena Morales, A., Gascueña, J. M., Vozmediano, J. L. C., Cañas, P. M. I., & Organero, G. M. (2022). Evaluación del estado hídrico de variedades minoritarias de vid de diferentes zonas vitícolas de España por medidas de la relación isotópica del carbono ($\delta^{13}\text{C}$). In IV Jornadas del Grupo de Viticultura: Acta de Horticultura: Comunicaciones Técnicas Sociedad Española de Ciencias Hortícolas: 26-28 de octubre 2022, Pamplona/Iruña (pp. 186-193). SECH (Sociedad Española de Ciencias Hortícolas).

- Mirás-Avalos, J., & Araujo, E. (2021). Optimization of Vineyard Water Management: Challenges, Strategies, and Perspectives. *Water*, 13(6), 746. <https://doi.org/10.3390/w13060746>
- Mirás-Avalos, J. M., & Intrigliolo, D. S. (2017). Grape Composition under Abiotic Constrains: Water Stress and Salinity. *Frontiers in Plant Science*, 8, 851. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00851>
- Mirás-Avalos, J. M., Trigo-Córdoba, E., Bouzas-Cid, Y., & Orriols-Fernández, I. (2016). Irrigation effects on the performance of grapevine (*Vitis vinifera* L.) cv. 'Albariño' under the humid climate of Galicia. *OENO One*, 50(4). <https://doi.org/10.20870/oenone.2016.50.4.63>
- Montgomery, DC, Peck, EA y Vining, GG (2021). *Introducción al análisis de regresión lineal*. John Wiley & Sons.
- Morejón Escudero, L. (2022). Modificación de la frecuencia de riego deficitario y del posicionamiento de la superficie foliar en espaldera en Tempranillo: efectos hídricos, fisiológicos y agronómicos.
- Myers, E. W., & Miller, W. (1988). *Optimal alignments in linear space*. *Bioinformatics*, 4(1), 11-17.
- Nahuel, C. G., Castro, P., Nahuel, E., Ramos, I. C., & Peña, J. P. (2024). Comportamiento de *Vitis vinifera* L. cv. Merlot bajo tres sistemas de instalación de malla antigranizo. . . Vol., 4(2).
- Nazralla, J. J. B., Paladino, S. C., Vila, H. F., & Lucero, C. C. (2009). *Manual de técnicas analíticas para mostos y vinos*.
- Netzer, Y., & Ohana-Levi, N. (2025). *Leaf Area Dynamics: Interactions with Vineyard Performance, Environment, and Viticultural Practices*. Biology and Life Sciences. <https://doi.org/10.20944/preprints202502.1379.v1>
- NORME ISO 8589. (2010). Sensory analysis. General guidance for the design of test rooms.
- NORME ISO 3591. (1977). Sensory analysis. Apparatus Wine Tasting Glass.
- OIV. (2021). *Compendium Methods of Analysis of Wine and Musts Vol1 and Vol2*.
- OIV. (2010). *Asamblea general de la organización internacional de la vid y el vino. Resolución OIV/VITI 333/2010*. París, Francia: OIV

- OIV. (2006). Compendium of international analysis of methods - Chromatic Characteristics. Determination of chromatic characteristics according to CIELab. Resolution Oeno 1/2006.
- Ollat, N., Peccoux, A., Papura, D., Esmenjaud, D., Marguerit, E., Tandonnet, J. -P., Bordenave, L., Cookson, S. J., Barrieu, F., Rossdeutsch, L., Lecourt, J., Lauvergeat, V., Vivin, P., Bert, P. -F., & Delrot, S. (2015). Rootstocks as a component of adaptation to environment. En H. Gerós, M. M. Chaves, H. M. Gil, & S. Delrot (Eds.), *Grapevine in a Changing Environment* (1.^a ed., pp. 68-108). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118735985.ch4>
- Parry, C., Blonquist, J. M., & Bugbee, B. (2014). *In situ* measurement of leaf chlorophyll concentration: Analysis of the optical/absolute relationship. *Plant, Cell & Environment*, 37(11), 2508-2520. <https://doi.org/10.1111/pce.12324>
- Pavez, C., González-Muñoz, B., O'Brien, J. A., Laurie, V. F., Osorio, F., Núñez, E., Vega, R. E., Bordeu, E., & Brossard, N. (2022). Red wine astringency: Correlations between chemical and sensory features. *LWT*, 154, 112656. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112656>
- Pérez-Magariño, S., & González-San José, M. L. (2002). Prediction of red and rosé wine CIELab parameters from simple absorbance measurements. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 82(11), 1319–1324. <https://doi.org/10.1002/jsfa.1191>
- Pichon, L., Brunel, G., Zhang, Y., & Tisseyre, B. (2023). Vers une cartographie régionale de l'état hydrique de la vigne basée sur des observations collaboratives: Article prenant sa source de l'article de recherche "Towards a regional mapping of vine water status based on crowdsourcing observations" (OENO One, 2022). Langue originale de l'article: français. *IVES Technical Reviews, vine and wine*. <https://doi.org/10.20870/IVES-TR.2023.7499>
- Plantevin, M., Gowdy, M., Destrac-Irvine, A., Marguerit, E., Gambetta, G. A., & Van Leeuwen, C. (2022). Using $\delta^{13}\text{C}$ and hydroscares for discriminating cultivar specific drought responses: This article is published in cooperation with Terclim 2022 (XIVth International Terroir Congress and 2nd ClimWine Symposium), 3-8 July 2022, Bordeaux, France. *OENO One*, 56(2), 239-250. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2022.56.2.5434>

- Pons, A. M. (2019). *Interés del ^{13}C como indicador en el uso del agua en vid.* (Máster Universitario. Universitat de les Illes Balears).
- Pugliese, M. B. (2023). Fisiología de la respuesta de Superior Seedless (*Vitis vinífera* L.) a reguladores de crecimiento naturales de plantas (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Cuyo. Facultad de Ciencias Agrarias).
- Ribéreau-Gayon, P., D. Dubourdieu, B. Doneche and A. Lonvaud. 2006. Handbook of enology: the microbiology of wine and vinifications. 2nd ed. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, United Kingdom. 497p.
- Rienth, M., & Scholasch, T. (2019). State-of-the-art of tools and methods to assess vine water status. *OENO One*, 53(4). <https://doi.org/10.20870/oenone.2019.53.4.2403>
- Riffle, V. L., Arredondo, J. A., LoMonaco, I., Appel, C., Catania, A. A., Dodson Peterson, J. C., & Casassa, L. F. (2022). Vine Age Affects Vine Performance, Grape and Wine Chemical and Sensory Composition of cv. Zinfandel from California. *American Journal of Enology and Viticulture*, 73(4), 277-293. <https://doi.org/10.5344/ajev.2022.22014>
- Rivera, J., Lauro, C., & Otta, S. A. (2021). Cuantificación del déficit hidrológico reciente en la región de Cuyo a partir de indicadores de caudales bajos. *Boletín de Estudios Geográficos*, 116, 23-44. <https://doi.org/10.48162/rev.40.006>
- Rodríguez Plaza, L., Mastrantonio, L., Maffei, J., Pérez Valenzuela, R., & Brandi, F. (2013). Determinación del área foliar no extractiva en vides regadías (*Vitis vinífera* L.) var Malbec.
- Romero Laibarra, I., Benito, A., Dominguez, N., Garcia-Escudero, E., & Martin, I. (2014). Leaf blade and petiole nutritional diagnosis for *Vitis vinífera* L. cv. Tempranillo by deviation from optimum percentage method. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 12(1), 206-214. <https://doi.org/10.5424/sjar/2014121-4308>
- Romero Mendoza, I. D. (2020). Consecuencia del iso y anisohidrismo sobre la fotoinhibición y senescencia en *Vitis vinífera* (L.) bajo estrés hídrico. Magister Universidad de Chile.

- Sánchez Ormeño, M., Amorós Ortiz-Villajos, J. Á., Bravo Martín-Consuegra, S., Pérez de los Reyes, C., & García Navarro, F. J. (2020). *Nutrición vegetal en el cultivo de la vid*.
- Santesteban, L. G., Di Gennaro, S. F., Herrero-Langreo, A., Miranda, C., Royo, J. B., & Matese, A. (2017a). High-resolution UAV-based thermal imaging to estimate the instantaneous and seasonal variability of plant water status within a vineyard. *Agricultural Water Management*, 183, 49-59. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.08.026>
- Santesteban, L. G., Miranda, C., Urrestarazu, J., Loidi, M., & Royo, J. B. (2017b). Severe trimming and enhanced competition of laterals as a tool to delay ripening in Tempranillo vineyards under semiarid conditions. *OENO One*, 51(2), 191. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2016.0.0.1583>
- Santesteban, L. G., Miranda, C., Barbarin, I., & Royo, J. B. (2015). Application of the measurement of the natural abundance of stable isotopes in viticulture: A review: Stable isotopes in viticulture: a review. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 21(2), 157-167. <https://doi.org/10.1111/ajgw.12124>
- Santesteban, L. G., Miranda, C., & Royo, J. B. (2011). Regulated deficit irrigation effects on growth, yield, grape quality and individual anthocyanin composition in *Vitis vinifera* L. cv. 'Tempranillo'. *Agricultural Water Management*, 98(7), 1171-1179. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.02.011>
- Scholander, P. F., Bradstreet, E. D., Hemmingsen, E. A., & Hammel, H. T. (1965). Sap Pressure in Vascular Plants: Negative hydrostatic pressure can be measured in plants. *Science*, 148(3668), 339-346. <https://doi.org/10.1126/science.148.3668.339>
- SMN. (2024). *Servicio Meteorológico Nacional, 2024. Informe Final: Estado del clima en Argentina 2024*.
- Sharkey, T. D. (2012). Mesophyll conductance: Constraint on carbon acquisition by C_3 plants. *Plant, Cell & Environment*, 35(11), 1881-1883. <https://doi.org/10.1111/pce.12012>
- Shelden, M. C., Vandeleur, R., Kaiser, B. N., & Tyerman, S. D. (2017). A Comparison of Petiole Hydraulics and Aquaporin Expression in an Anisohydric and Isohydric Cultivar of Grapevine in Response to

- Water-Stress Induced Cavitation. *Frontiers in Plant Science*, 8, 1893.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01893>
- Shellie, K. C., & Bowen, P. (2014). Isohydrodynamic behavior in deficit-irrigated Cabernet Sauvignon and Malbec and its relationship between yield and berry composition. *Irrigation Science*, 32(2), 87-97. <https://doi.org/10.1007/s00271-013-0416-y>
- Spangenberg, J. E., Baumann, J., & Zufferey, V. (2025). Classification of the geographical origin of Pinot noir wines from southwestern Switzerland using isotopes, volatile organic compounds, and chemometrics. *Food Chemistry*, 491, 145147. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.145147>
- Spangenberg, J. E., Schweizer, M., & Zufferey, V. (2020). Shifts in carbon and nitrogen stable isotope composition and epicuticular lipids in leaves reflect early water-stress in vineyards. *Science of The Total Environment*, 739, 140343. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140343>
- Spangenberg, J. E., Schweizer, M., & Zufferey, V. (2021). Carbon and nitrogen stable isotope variations in leaves of two grapevine cultivars (Chasselas and Pinot noir): Implications for ecophysiological studies. *Plant Physiology and Biochemistry*, 163, 45-54.
<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.03.048>
- Spangenberg, J. E., Vogiatzaki, M., & Zufferey, V. (2017). Gas chromatography and isotope ratio mass spectrometry of Pinot Noir wine volatile compounds ($\delta^{13}\text{C}$) and solid residues ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$) for the reassessment of vineyard water-status. *Journal of Chromatography A*, 1517, 142-155.
<https://doi.org/10.1016/j.chroma.2017.08.038>
- Spangenberg, J. E., & Zufferey, V. (2018). Changes in soil water availability in vineyards can be traced by the carbon and nitrogen isotope composition of dried wines. *Science of The Total Environment*, 635, 178-187. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.078>
- Spangenberg, J. E., & Zufferey, V. (2019). Carbon isotope compositions of whole wine, wine solid residue, and wine ethanol, determined by EA/IRMS and GC/C/IRMS, can record the vine water status—A comparative reappraisal. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 411(10), 2031-2043.
<https://doi.org/10.1007/s00216-019-01625-4>

- Spangenberg, J. E., & Zufferey, V. (2023). Soil management affects carbon and nitrogen concentrations and stable isotope ratios in vine products. *Science of The Total Environment*, 873, 162410. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162410>
- Straffelini, E., Carrillo, N., Schilardi, C., Aguilera, R., Estrella Orrego, M. J., & Tarolli, P. (2023). Viticulture in Argentina under extreme weather scenarios: Actual challenges, future perspectives. *Geography and Sustainability*, 4(2), 161-169. <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2023.03.003>
- Urvieta, R., Jones, G., Buscema, F., Bottini, R., & Fontana, A. (2021). Terroir and vintage discrimination of Malbec wines based on phenolic composition across multiple sites in Mendoza, Argentina. *Scientific Reports*, 11(1), 2863. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82306-0>
- van Leeuwen, C., Barbe, J.-C., Darriet, P., Geffroy, O., Gomès, E., Guillaumie, S., Helwi, P., Laboyrie, J., Lytra, G., Le Menn, N., Marchand, S., Picard, M., Pons, A., Schüttler, A., & Thibon, C. (2020). Recent advancements in understanding the terroir effect on aromas in grapes and wines: This article is published in cooperation with the XIIIth International Terroir Congress November 17-18 2020, Adelaide, Australia. Guests editors: Cassandra Collins and Roberta De Bei. *OENO One*, 54(4). <https://doi.org/10.20870/oenone.2020.54.4.3983>
- van Leeuwen, C., Bois, B., Brillante, L., Destrac-Irvine, A., Gowdy, M., Martin, D., Plantevin, M., De Rességuier, L., Santesteban, L. G., & Zufferey, V. (2023). Carbon isotope discrimination (so-called $\delta^{13}\text{C}$) measured on grape juice is an accessible tool to monitor vine water status in production conditions: Original language of the article: English. *IVES Technical Reviews, Vine and Wine*. <https://doi.org/10.20870/IVES-TR.2023.7742>
- van Leeuwen, C., & Destrac-Irvine, A. (2017). Modified grape composition under climate change conditions requires adaptations in the vineyard. *OENO One*.
- van Leeuwen, C., Destrac-Irvine, A., Dubernet, M., Duchêne, E., Gowdy, M., Marguerit, E., Pieri, P., Parker, A., De Rességuier, L., & Ollat, N. (2019). An Update on the Impact of Climate Change in Viticulture and Potential Adaptations. *Agronomy*, 9(9), 514. <https://doi.org/10.3390/agronomy9090514>

van Leeuwen, C., Trégoat, O., Choné, X., Bois, B., Pernet, D., & Gaudillère, J.-P. (2009). Vine water status is a key factor in grape ripening and vintage quality for red Bordeaux wine. How can it be assessed for vineyard management purposes? *OENO One*, 43(3), 121. <https://doi.org/10.20870/oenone.2009.43.3.798>

Varela, A., Masseroni, L., Sari, S., Prieto, J., Sartor, P., Zamora, D., Aumassanne, C., & Fanzone, M. (2022). *Caracterización química de vinos Malbec y Cabernet franc provenientes de dos localidades de La Pampa (Argentina), en relación al grado de madurez de las uvas.*

Vila, H. F., Paladino, S. C., Nazralla, J. J. B., & Lucero, C. C. (2009). *Manual de técnicas analíticas para la evaluación de compuestos fenólicos y otros componentes de la uva.*

Williams, L. E., & Araujo, F. J. (2002). Correlations among Predawn Leaf, Midday Leaf, and Midday Stem Water Potential and their Correlations with other Measures of Soil and Plant Water Status in *Vitis vinifera*. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 127(3), 448-454. <https://doi.org/10.21273/JASHS.127.3.448>

Yuste, J., Montoro, A., Cancela, J. J., Martínez-Porro, D., Mancha, L. A., Moreno, D., Torija, I., Rodríguez-Febreiro, M., Vilanova, M., & Uriarte, D. (2023a). Frecuencia de riego en variedades tintas: Repercusión en la producción y la composición de la uva, durante un periodo bienal, en 4 regiones de España. *BIO Web of Conferences*, 68, 01004. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20236801004>

Yuste, J., Vicente, A., & Martínez-Porro, D. (2023b). Rehidratación según el nivel de estrés del cv. Cabernet Sauvignon en el valle del río Duero: Efectos en producción, desarrollo vegetativo y calidad de uva. *BIO Web of Conferences*, 56, 01024. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20235601024>

ANEXOS

ANEXO 1 – Peso de poda año 2023

Claro	Hilera	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	1780	2050	2620	40	230	2410	1870	x	1930	X
	2	385	1040	680	515	1035	535	1320	760	350	X
	3	185	520	320	680	1270	x	1810	785	1305	X
	4	980	970	x	765	685	x	x	1015	285	X
2	5	420	900	1170	1315	60	265	515	2210	N	1000
	6	1020	205	385	520	540	650	760	785	N	250
	7	2025	600	280	550	590	1315	850	1150	TILDE	450
	8	365	675	270	440	420	65	285	355	TILDE	X
	9	135	280	235	825	375	110	400	625	455	310
3	10	610	770	415	420	455	990	290	80	X	375
	11	335	725	655	385	505	860	780	175	X	X
	12	390	45	135	330	800	110	765	335	R	X
	13	415	955	520	590	x	115	520	115	810	X
	14	295	595	235	640	365	1380	465	1305	505	X
4	15	550	550	450	1090	220	445	520	2035	725	X
	16	195	475	375	565	470	1085	295	890	375	515
	17	360	545	95	405	535	925	290	1460	940	230
	18	860	560	225	390	470	995	1125	1450	1035	635
	19	985	540	350	675	445	1025	990	740	990	910
5	20	455	475	430	265	190	710	410	325	685	370
	21	1220	720	580	535	210	490	595	1220	375	790
	22	720	750	375	230	435	1050	570	860	X	510
	23	765	725	560	690	435	505	475	1600	585	390
	24	700	645	550	915	835	575	895	870	955	460
6	25	1150	1305	500	1000	850	1030	530	440	-	890
	26	1595	1205	910	1135	565	1180	1410	375	X	335
	27	635	230	830	535	745	885	1445	855	1085	375
	28	1085	925	435	685	260	805	450	1190	X	235
	29	1825	x	290	405	250	410	600	595	1015	430
7	30	250	800	155	700	520	535	435	565	965	1070
	31	580	345	150	715	415	540	445	340	200	535
	32	615	475	205	220	330	870	250	310	955	285
	33	1740	870	70	405	345	390	590	935	495	595
	34	530	135	135	435	165	1960	520	230	460	540
8	35		85	400	740	930	1225	495	445	X	555
	36		1420	1160	895	480	1180	560	1010	460	450
	37		185	905	1305	x	1340	670	1220	535	600
	38		125	1615	890	970	840	1010	395	1170	360
	39		670	1315	1460	810	965	x	445	1600	850
9	40										
	41										
	42										
	43										

ANEXO 2 - Cálculo de lámina de agua de riego por goteo

Para calcular el riego del período de ensayo, definido entre las fases vegetativas de envero y vendimia, se tuvieron en cuenta los resultados de los análisis fisicoquímicos de suelo, características del cultivo y promedios históricos de variables climáticas locales. En función de los resultados de los análisis físicos, se determinó que la altura teórica de agua a reponer fue de 15,1 mm, tabla 1; y la intensidad teórica de precipitación de los góteros del sistema de riego 1,07 mm/hora, ver tabla 2.

El programa de riego se diseñó en función de las variables, ver tabla X: Eto, Kc, Ks, Etaj, EAP, Db y frecuencia; para lograr un tiempo de riego expresado en horas de funcionamiento del equipo de bombeo. La cantidad expresada por quincena se puede observar en la tabla 3, donde a medida que se acerca al periodo estival, la frecuencia de aplicación aumenta.

Tabla 1. Variables de suelo y condiciones de riego para vid.

Datos de suelo y cultivo	
Capacidad de campo Cc (gr%gr)	18.16
Punto marchitez permanente Pm (gr%gr)	9.08
Densidad aparente da (gr/cm3)	1.54
Fracción fácilmente disponible (p)	0.5
Porcentaje piedras del perfil en volumen P (%)	0
Profundidad radical D (m)	0.6
Porcentaje de suelo mojado Psm (%)	36
h ó d: Altura de agua a reponer (mm)	15.1

Tabla 2. Características de la instalación de riego por goteo.

Datos del emisor	
Marca del emisor	Netafim
Caudal (L/h)	2
Distancia Entre hileras (m)	2.5
Distancia Entre plantas (m)	1.4
Espaciamento emisor (m)	0.75
Número de emisores planta	1.88
Número de líneas laterales	1.0
Intensidad teórica de pp (mm/h)	1.07

Tabla 3. Referencias de las variables del programa de riego

Referencias	
Eto	Evapotranspiración de referencia
Kc	Coeficiente de cultivo
Ks	Coeficiente de estrés hídrico
Etaj	Evapotranspiración del cultivo ajustada por estrés
EAP	Eficiencia de aplicación
DB	Demanda Bruta
TR	Tiempo de riego

Tabla 4. Programa quincenal anual para la vid

Programa	Eto	Kc	Etc	Ks	Etaj		LR (Allen)	DB diaria		Fr	Riego
Quincena	(mm /día)	Sin estrés	(m m/d ía)	K de estrés	(m m/d ía)	CU	dec	(mm/ día)	(mm/ 15 días)	días	Horas Op
1-sep	2.9	0.40	1.2	1	1.2	0.9	0.14	1.49	22.3	10	15.7
2-sep	2.9	0.53	1.5	1	1.5	0.9	0.14	1.97	29.6	7.7	15.7
1-oct	4.1	0.65	2.6	1	2.6	0.9	0.14	3.42	53.0	4.4	15.7
2-oct	4.1	0.65	2.6	1	2.6	0.9	0.14	3.42	53.0	4.4	15.7
1-nov	5.1	0.70	3.5	1	3.5	0.9	0.14	4.57	68.5	3.3	15.7
2-nov	5.1	0.70	3.5	1	3.5	0.9	0.14	4.57	68.5	3.3	15.7
1-Dic	5.6	0.70	3.9	1	3.9	0.9	0.14	5.09	78.9	3.0	15.7
2-Dic	5.6	0.70	3.9	1	3.9	0.9	0.14	5.09	78.9	3.0	15.7
1-Ene	5.6	0.70	3.9	1	3.9	0.9	0.14	5.08	76.2	3.0	15.7
2-Ene	5.6	0.70	3.9	1	3.9	0.9	0.14	5.08	76.2	3.0	15.7
1-feb	4.9	0.68	3.3	1	3.3	0.9	0.14	4.28	62.0	3.5	15.7
2-feb	4.9	0.68	3.3	1	3.3	0.9	0.14	4.28	62.0	3.5	15.7
1-mar	3.5	0.60	2.1	1	2.1	0.9	0.14	2.71	41.9	5.6	15.7
2-mar	3.5	0.60	2.1	1	2.1	0.9	0.14	2.71	41.9	5.6	15.7
1-Abr	2.2	0.47	1.0	1	1.0	0.9	0.14	1.33	20.6	11	15.7
2-Abr	2.2	0.47	1.0	1	1.0	0.9	0.14	1.33	20.6	11	15.7

De acuerdo con el diseño experimental, T1 (100% ETc), T2 (80% ETc), T3 (60% ETc) y T4 (40 % ETc); se expresó la lámina de reposición de agua en función de horas semanales de suministro de riego, ver tabla 5. Las jornadas de trabajo en la estación experimental INTA Rama Caída, San Rafael, Mendoza; permitieron realizar la distribución de la totalidad del programa de riego, de lunes a viernes, de 07:00 AM hasta las 15 PM.

Tabla 5. Lámina de agua y horas de riego semanal

Tratamiento	T1		T2		T3		T4	
Meses	Lámina (mm)	Riego (hs)	Lámina (mm)	Riego (hs)	Lámina (mm)	Riego (hs)	Lámina (mm)	Riego (hs)
Enero	35.6	32.8	28.5	26.3	21.3	19.7	14.2	13.1
Febrero	29.9	29.1	24.0	23.3	18.0	17.4	12.0	11.6
Marzo	18.9	17.5	15.2	14.0	11.4	10.5	7.6	7.0

ANEXO 3: Modelos lineales generales y mixtos "Acidez Total"- Resultados InfoStat

Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.003_AT.final_REML<-lme(AT.final~1
+TRATAMIENTO+DDB+TRATAMIENTO:DDB
,random=list(BLOQUE=pdIdent(~1)
,N.de.parcela=pdIdent(~1))
,weights=varComb(varIdent(form=~1|DDB))
,method="REML"
,control=lmeControl(niterEM=150
,msMaxIter=200)
,na.action=na.omit
,data=mlm.modeloR.data03
,keep.data=FALSE)
```

Resultados para el modelo: mlm.modelo.004_AT.final_REML

Variable dependiente: AT.final

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2_0	R2_1
R2_2	160	476,75	621,70	-186,38	1,70	0,99
0,99	0,99					

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	denDF	F-value	p-
value (Intercept)	1	108	7042,86	<0,0001
TRATAMIENTO	3	9	0,61	0,6230
DDB	9	108	1599,59	<0,0001
TRATAMIENTO:DDB	27	108	2,34	0,0011

Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	denDF	F-value	p-
value (Intercept)	1	108	1821,89	<0,0001
TRATAMIENTO	3	9	1,87	0,2052
DDB	9	108	1599,59	<0,0001
TRATAMIENTO:DDB	27	108	2,34	0,0011

Pruebas de hipótesis tipo III - prueba

	Source	numDF	denDF	F-value	p-value
1	TRATAMIENTO	3	9	0,61	0,6230
2	DDB	9	108	1599,59	<0,0001
3	TRATAMIENTO:DDB	27	108	2,34	0,0011

Parámetros de los efectos aleatorios

Modelo de covarianzas de los efectos aleatorios: pdIdent
 Formula: ~1|BLOQUE. Desvíos estándares y correlaciones

(cons
 t) (const)
 7,0E-05

Modelo de covarianzas de los efectos aleatorios: pdIdent
 Formula: ~1|N.de.parcela Dentro BLOQUE

Desvíos estándares y correlaciones

(cons
 t) (const)
 0,62

AT.final - Medias ajustadas y errores estándares para TRATAMIENTO*DDB

LSD Fisher (Alfa=0,05)-Procedimiento de corrección de p-valores: No
 TRATAMIENTO DDB Medias E.E.

T1	107	45,00	0,91	A															
T4	107	43,85	0,91	A															
T3	107	43,70	0,91	A															
T2	107	43,35	0,91	A															
T1	114	33,20	1,49		B														
T3	114	32,95	1,49		B														
T2	114	32,10	1,49		B														
T4	114	30,85	1,49		B														
T3	121	19,30	0,84			C													
T1	121	19,00	0,84			C													
T4	121	18,90	0,84			C													
T2	121	18,70	0,84			C													
T3	128	15,50	0,41				D												
T2	128	15,00	0,41				D	E											
T1	128	14,12	0,41					E											
T4	128	14,12	0,41					E											
T3	135	11,30	0,55						F										
T1	135	11,20	0,55						F										
T2	135	10,75	0,55						F	G									
T4	135	10,60	0,55						F	G									
T1	142	9,65	0,57							G	H								
T4	142	9,36	0,57							G	H	I							
T3	142	9,00	0,57								H	I							
T2	142	8,75	0,57								H	I	J						
T3	149	8,05	0,45									I	J	K					
T1	149	7,50	0,45										J	K	L				
T4	149	7,40	0,45										J	K	L				
T2	149	7,00	0,45											K	L	M			
T1	156	6,55	0,36												L	M	N		
T3	163	6,50	0,31												L	M	N		
T4	163	6,45	0,31												L	M	N		
T3	156	6,45	0,36												L	M	N		
T4	156	6,30	0,36													M	N		
T2	156	6,10	0,36													M	N		
T1	163	5,90	0,31													M	N		
T3	170	5,85	0,44													M	N		
T2	170	5,82	0,44														N		
T1	170	5,62	0,44														N		
T4	170	5,50	0,44														N		
T2	163	5,45	0,31														N		

ANEXO 4. Nutrición foliar: Límites toxicológicos – MLGM

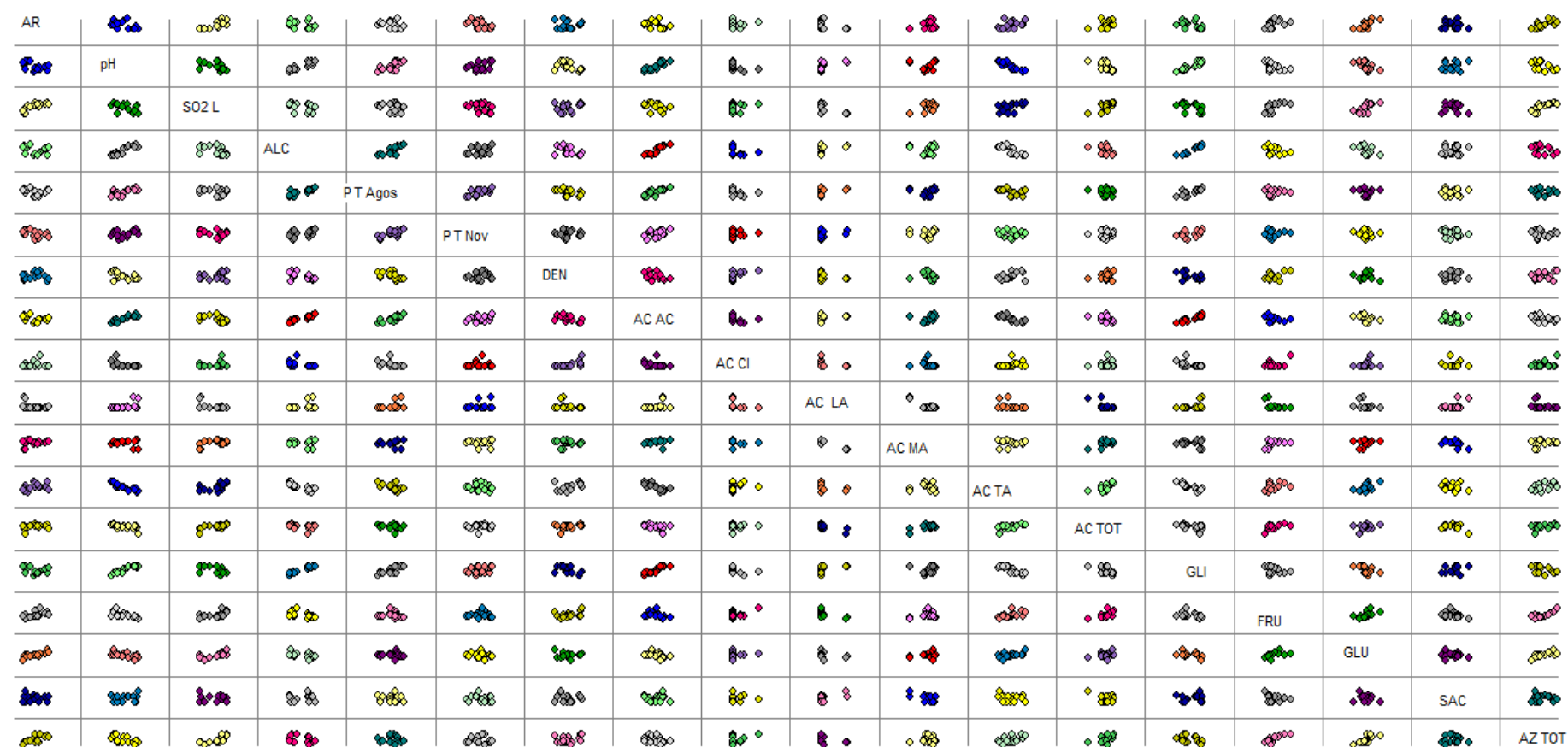
Tabla 1. Valores óptimos indicativos en suelo y en hoja, así como los valores (mg/Kg) a partir de los que se producirían toxicidades (M. Sánchez Ormeño et al., 2021)

Elemento	Suelo	Hoja	Hoja Vid	Toxicidad
Hierro	200	150	130	>500 ^c
Zinc	5	20	30	>200 ^c
Manganeso	110	30	200	>300 ^c
Cobre	2,1	6	50	>20-30, >100
Boro	0,2	30	12	>100

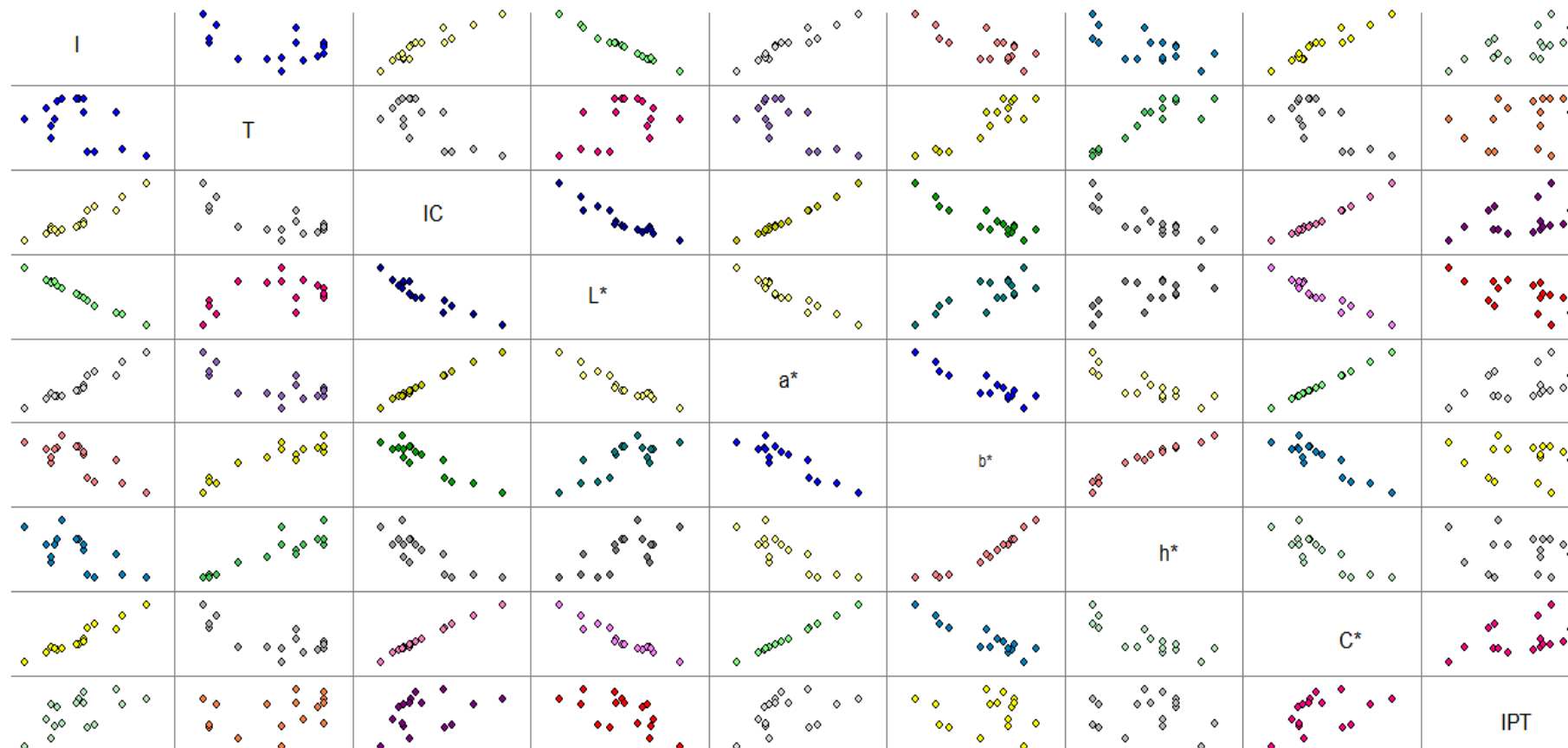
Tabla 2. Medias ajustadas por MLGM para macronutrientes de pecíolo y limbo. (ns, medias no significativamente diferentes donde p-valor > 0,05)

Macronutrientes Pecíolo										
Variable	N_P		P_P		K_P		Ca_P		Mg_P	
Trat	Media	E.E.	Media	E.E.	Media	E.E.	Media	E.E.	Med.	E.E.
T1	0,61	±0,01	0,22	±0,08	1,89	±0,41	3,67	±0,11	0,83	±0,13
T2	0,55	±0,01	0,20	±0,08	1,62	±0,41	3,40	±0,11	0,83	±0,13
T3	0,57	±0,01	0,22	±0,08	1,45	±0,41	3,42	±0,11	0,63	±0,13
T4	0,58	±0,01	0,18	±0,08	1,27	±0,41	3,60	±0,11	0,69	±0,13
p-valor	0,0693 (ns)		0,9561 (ns)		0,5954 (ns)		0,2849 (ns)		0,6415 (ns)	
Macronutrientes Limbo										
Variable	N_L		P_L		K_L		Ca_L		Mg_L	
Trat	Media	E.E.	Media	E.E.	Media	E.E.	Media	E.E.	Med.	E.E.
T1	1,94	±0,05	0,14	±0,01	0,74	±0,06	2,70	±0,09	0,28	±0,02
T2	1,86	±0,05	0,13	±0,01	0,68	±0,06	2,85	±0,09	0,28	±0,02
T3	1,94	±0,05	0,13	±0,01	0,65	±0,06	2,74	±0,09	0,28	±0,02
T4	1,94	±0,05	0,14	±0,01	0,69	±0,06	2,91	±0,09	0,28	±0,02
p-valor	0,4245 (ns)		0,8693 (ns)		0,6558 (ns)		0,2297 (ns)		0,9966 (ns)	
Micronutrientes Pecíolo										
Variable	Fe_P		Cu_P		Zn_P		Mn_P			
Trat	Media	E.E.	Media	E.E.	Media	E.E.	Media	E.E.		
T1	30,75	±4,93	22,50	±5,75	61,25	±7,58	35,50	±5,91		
T2	32,75	±4,93	24,50	±5,75	53,25	±7,58	40,50	±5,91		
T3	31,75	±4,93	16,00	±5,75	54,75	±7,58	51,50	±5,91		
T4	33,00	±4,93	30,75	±5,75	45,50	±7,58	45,25	±5,91		
p-valor	0,9840 (ns)		0,1636 (ns)		0,4555 (ns)		0,3238 (NS)			
Micronutrientes Limbo										
Variable	Fe_L		Cu_L		Zn_L		Mn_L			
Trat	Media	E.E.	Media	E.E.	Media	E.E.	Media	E.E.		
T1	203,25	±14,7	105,0	±29,06	19,00	±1,53	55,50	±4,74		
T2	210,25	±14,7	121,5	±29,06	21,50	±1,53	60,75	±4,74		
T3	207,50	±14,7	77,0	±29,06	21,00	±1,53	63,00	±4,74		
T4	203,75	±14,7	127,0	±29,06	22,00	±1,53	59,00	±4,74		
p-valor	0,9841 (ns)		0,4435 (ns)		0,4458 (ns)		0,3483 (ns)			

Anexo 5. Matriz de diagrama de dispersión para las variables fisicoquímicas y sensoriales de las 16 microvinificaciones



Anexo 6. Matriz de diagrama de dispersión para las variables colorimétricas de las 16 microvinificaciones



ANEXO 7. Tabla de coeficientes de correlación de Pearson, para $\delta^{13}\text{C}$ de bayas - hojas, variables colorimétricas y análisis sensorial de microvinificaciones.

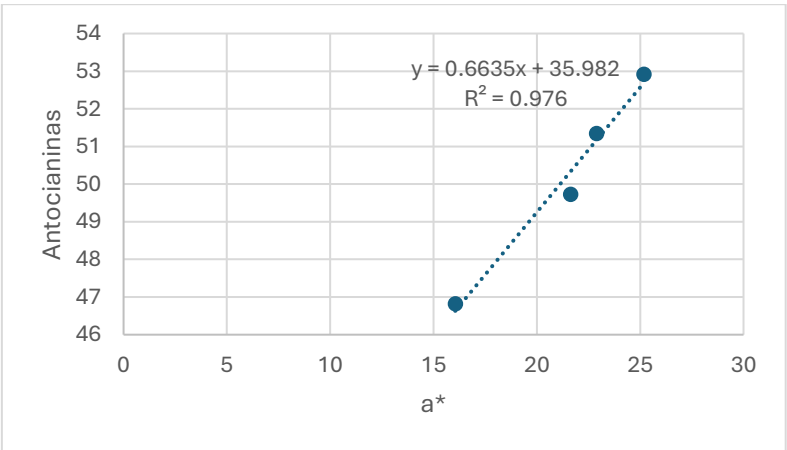
Tabla 1. Coeficientes de correlación de Pearson_Variables colorimétricas

Variables	d13C B	d13C H	I	T	IC	L*	a*	b*	h*	C*	IPT
d13C B	1,00	0,00	0,12	0,00	0,02	0,15	0,03	0,00	0,00	0,03	0,97
d13C H	0,68	1,00	0,04	0,01	0,01	0,05	0,02	0,01	0,00	0,02	0,88
I	0,41	0,52	1,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01
T	-0,71	-0,64	-0,45	1,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,28
IC	0,56	0,61	0,94	-0,71	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,17
L*	-0,38	-0,51	-1,00	0,45	-0,94	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
a*	0,54	0,59	0,96	-0,68	0,99	-0,96	1,00	0,00	0,00	0,00	0,11
b*	-0,69	-0,64	-0,75	0,91	-0,91	0,75	-0,90	1,00	0,00	0,00	0,68
h*	-0,74	-0,67	-0,65	0,89	-0,81	0,67	-0,82	0,96	1,00	0,00	0,72
C*	0,54	0,59	0,96	-0,68	1,00	-0,96	1,00	-0,90	-0,82	1,00	0,11
IPT	-0,01	0,04	0,61	0,29	0,36	-0,61	0,42	-0,11	-0,10	0,41	1,00

Tabla 2. Coeficientes de correlación de Pearson_Variables de análisis sensorial

Variables	d13C B	d13C H	P T Agos/24	P T Nov/24
d13C B	1,00	0,00	0,19	0,67
d13C H	0,68	1,00	0,62	0,22
P T Agos/24	-0,35	-0,13	1,00	0,01
P T Nov/24	0,12	0,33	0,66	1,00

Gráfico 3. Ajuste lineal entre la concentración de antocianos en hollejos y la componente de color rojo en vinos a^*



ANEXO 8. Tabla de coeficientes de correlación de Pearson, para $\delta^{13}\text{C}$ de bayas – hojas y composición fisicoquímicas de microvinificaciones.

Variables	d13C B	d13C H	AR	pH	ASL	ALC	AC AC	ALC B	AC CI	DEN	FRU	GLU	GLI	AC LA	AC MA	pH B	SAC	AC TA	AC TOT	AZ TOT
d13C B	1,00	0,00	0,82	0,00	0,45	0,01	0,02	0,01	0,03	0,01	0,64	0,46	0,01	0,15	1,00	0,00	0,43	0,02	0,05	0,47
d13C H	0,68	1,00	0,90	0,07	0,33	0,10	0,17	0,08	0,21	0,24	0,57	0,18	0,04	0,12	0,54	0,04	0,33	0,04	0,21	0,50
AR	-0,06	-0,04	1,00	0,04	0,00	0,11	0,14	0,14	0,58	0,85	0,01	0,00	0,07	0,10	0,23	0,06	0,82	0,06	0,14	0,00
pH	-0,70	-0,47	-0,52	1,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,07	0,06	0,03	0,01	0,00	0,05	0,74	0,00	0,39	0,00	0,01	0,03
ASL	0,20	0,26	0,80	-0,56	1,00	0,06	0,08	0,09	0,53	0,28	0,04	0,01	0,04	0,01	0,04	0,04	0,77	0,03	0,00	0,00
ALC	-0,61	-0,42	-0,42	0,86	-0,47	1,00	0,00	0,00	0,23	0,04	0,25	0,13	0,00	0,08	0,89	0,00	0,49	0,00	0,10	0,37
AC AC	-0,59	-0,36	-0,39	0,85	-0,45	0,94	1,00	0,00	0,23	0,02	0,33	0,12	0,00	0,13	0,88	0,00	0,97	0,00	0,09	0,32
ALC B	-0,61	-0,46	-0,38	0,90	-0,44	0,97	0,93	1,00	0,13	0,04	0,12	0,09	0,00	0,13	0,94	0,00	0,50	0,00	0,10	0,23
AC CI	0,53	0,33	0,15	-0,46	0,17	-0,32	-0,32	-0,39	1,00	0,01	0,47	0,36	0,07	0,45	0,82	0,05	0,93	0,31	0,53	0,13
DEN	0,61	0,31	0,05	-0,49	0,29	-0,53	-0,57	-0,53	0,64	1,00	0,73	0,93	0,03	0,24	0,82	0,05	0,92	0,14	0,17	0,28
FRU	0,13	0,15	0,60	-0,54	0,52	-0,31	-0,26	-0,41	0,20	-0,09	1,00	0,00	0,10	0,27	0,30	0,05	0,18	0,01	0,04	0,00
GLU	0,20	0,35	0,80	-0,61	0,65	-0,40	-0,40	-0,44	0,25	-0,02	0,73	1,00	0,03	0,18	0,43	0,02	0,61	0,01	0,14	0,00
GLI	-0,62	-0,52	-0,46	0,93	-0,53	0,93	0,91	0,97	-0,47	-0,56	-0,42	-0,55	1,00	0,06	0,79	0,00	0,55	0,00	0,05	0,10
AC LA	-0,37	-0,41	-0,43	0,51	-0,65	0,45	0,40	0,39	-0,20	-0,31	-0,29	-0,35	0,48	1,00	0,00	0,03	0,02	0,16	0,00	0,25
AC MA	0,00	0,17	0,32	-0,09	0,52	-0,04	0,04	0,02	-0,06	-0,06	0,27	0,21	-0,07	-0,86	1,00	0,71	0,01	0,96	0,03	0,48
pH B	-0,73	-0,53	-0,48	0,99	-0,53	0,87	0,84	0,90	-0,49	-0,50	-0,50	-0,58	0,93	0,53	-0,10	1,00	0,31	0,00	0,01	0,06
SAC	-0,21	-0,26	-0,06	0,23	-0,08	0,18	0,01	0,18	-0,03	0,03	-0,36	-0,14	0,16	0,57	-0,61	0,27	1,00	0,37	0,08	0,99
AC TA	0,58	0,52	0,48	-0,90	0,54	-0,77	-0,76	-0,83	0,27	0,39	0,60	0,62	-0,85	-0,37	0,01	-0,89	-0,24	1,00	0,00	0,03
AC TOT	0,50	0,33	0,39	-0,63	0,68	-0,42	-0,44	-0,43	0,17	0,36	0,51	0,38	-0,50	-0,70	0,54	-0,61	-0,45	0,69	1,00	0,04
AZ TOT	0,19	0,18	0,73	-0,54	0,75	-0,24	-0,26	-0,32	0,40	0,29	0,71	0,77	-0,43	-0,31	0,19	-0,49	0,00	0,54	0,52	1,00

ANEXO 9. Distancia euclídea para variables de bayas y vinos.

A) Distancia Euclídea entre tratamientos para las variables fisicoquímicas de bayas en vendimia.

Distancia Euclídea	T1	T2	T3	T4
T1	0,00			
T2	4,64	0,00		
T3	4,66	3,49	0,00	
T4	7,52	4,86	5,69	0,00

B) Distancia Euclídea entre parcelas para las variables fisicoquímicas de bayas en vendimia.

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16
P1	0,00															
P2	4,33	0,00														
P3	4,80	3,68	0,00													
P4	4,41	3,66	2,37	0,00												
P5	7,37	5,59	5,15	6,55	0,00											
P6	7,59	6,50	7,25	7,99	3,48	0,00										
P7	3,57	2,47	3,41	3,12	5,60	6,59	0,00									
P8	6,15	5,02	5,28	6,54	3,53	4,18	5,80	0,00								
P9	6,62	4,90	5,70	6,04	3,79	3,97	4,34	5,28	0,00							
P10	3,74	3,87	3,81	3,65	7,00	8,20	3,05	6,69	6,27	0,00						
P11	4,31	4,52	3,48	2,71	5,94	6,63	3,56	6,20	5,39	4,51	0,00					
P12	3,94	4,23	3,38	3,22	6,59	7,88	2,92	6,80	5,84	1,61	3,66	0,00				
P13	6,86	4,48	5,37	5,70	4,56	4,89	4,98	4,69	3,60	6,10	5,16	5,88	0,00			
P14	7,32	5,14	5,65	6,16	3,68	4,24	5,37	4,47	3,39	7,29	5,42	7,03	3,20	0,00		
P15	8,37	6,28	6,25	7,15	3,86	5,14	5,80	5,98	2,94	7,85	6,76	7,28	4,58	3,78	0,00	
P16	6,90	4,96	5,40	6,25	2,92	3,59	5,15	4,00	3,13	6,21	5,45	6,03	3,19	2,93	4,36	0,00

C) Distancia Euclídea para las variables fisicoquímicas de vinos por tratamiento y parcela

AFQ	T1	T2	T3	T4
T1	0,00			
T2	5,49	0,00		
T3	6,46	5,12	0,00	
T4	6,60	5,02	5,03	0,00

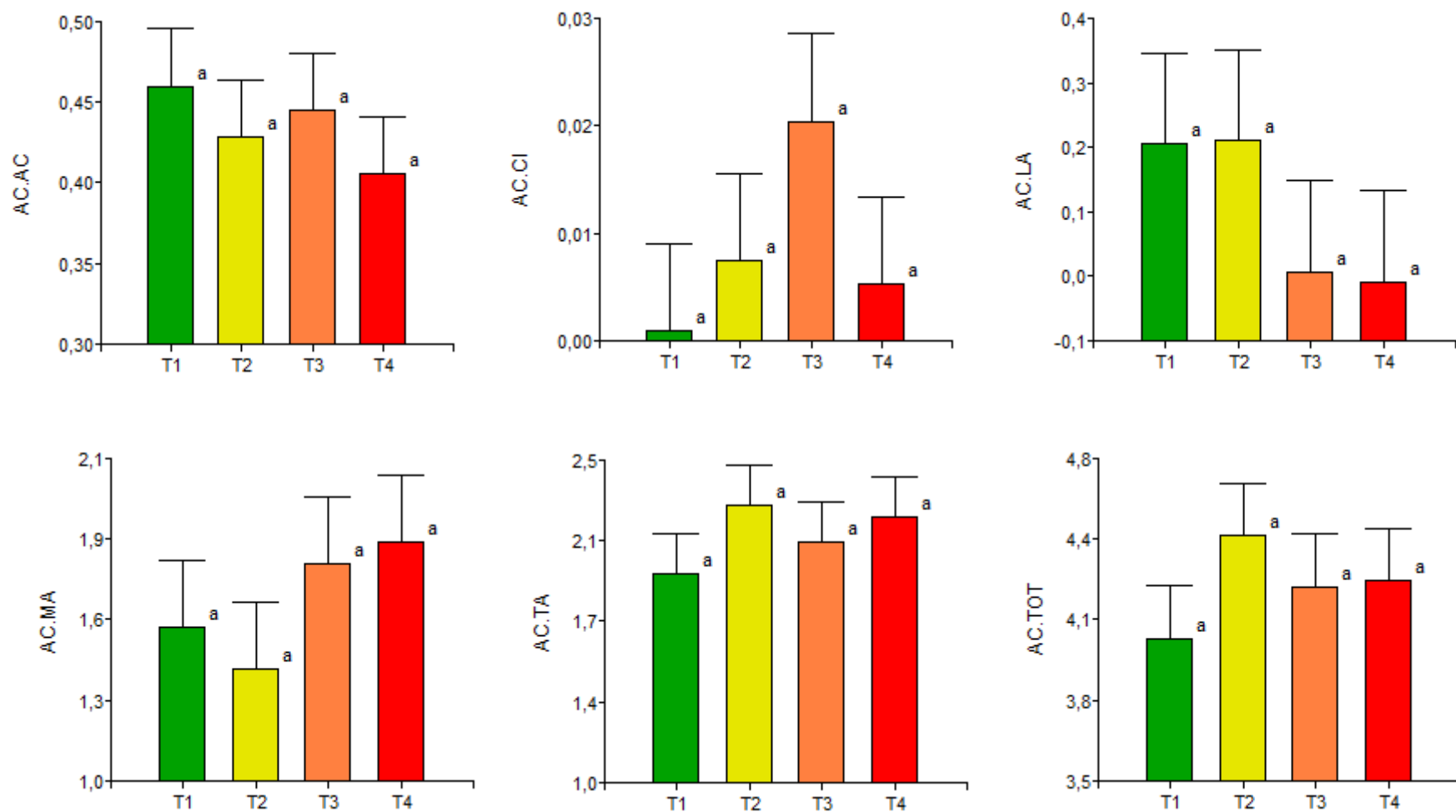
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16
P1	0,00															
P2	5,09	0,00														
P3	6,93	4,50	0,00													
P4	4,60	6,14	6,76	0,00												
P5	5,63	6,01	6,68	4,14	0,00											
P6	7,22	7,43	7,40	4,82	2,63	0,00										
P7	7,64	5,13	6,29	8,22	8,06	8,63	0,00									
P8	5,73	8,09	8,73	4,14	4,60	5,49	10,38	0,00								
P9	8,01	7,63	8,13	5,41	5,30	4,81	8,69	6,79	0,00							
P10	8,88	6,86	7,14	8,40	9,76	10,01	6,30	10,93	7,97	0,00						
P11	8,16	7,86	8,58	6,00	4,87	4,24	8,90	6,80	3,13	8,85	0,00					
P12	2,83	5,71	7,50	3,37	4,44	5,61	8,00	4,40	6,72	8,90	6,50	0,00				
P13	9,35	9,05	9,91	7,63	6,99	6,68	10,01	8,74	4,82	8,94	5,28	7,97	0,00			
P14	9,95	10,94	11,87	8,23	7,87	7,05	11,97	8,12	6,26	11,23	6,55	8,23	4,51	0,00		
P15	9,98	7,81	7,86	7,53	6,76	6,30	8,21	8,97	3,83	7,24	3,82	8,44	5,73	8,43	0,00	
P16	8,51	8,35	9,62	6,06	6,05	6,10	9,58	6,61	3,18	8,72	3,56	6,85	5,35	6,78	4,64	0,00

D) Distancia Euclídea para las variables evaluadas en análisis sensorial de agosto 2024 por tratamiento y parcela

AS	T1	T2	T3	T4
1	0,00			
2	4,22	0,00		
3	5,97	4,14	0,00	
4	4,81	4,67	4,05	0,00

AS	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16
P1	0,00															
P2	5,46	0,00														
P3	6,55	3,58	0,00													
P4	2,97	5,66	6,01	0,00												
P5	5,36	3,26	4,29	4,54	0,00											
P6	6,91	3,30	3,38	5,94	3,19	0,00										
P7	4,83	3,43	3,11	4,70	4,32	4,88	0,00									
P8	3,10	4,45	5,83	4,32	4,16	5,91	4,84	0,00								
P9	6,60	3,74	1,87	5,92	4,22	2,82	3,51	6,12	0,00							
P10	4,63	2,63	4,55	4,50	3,10	3,85	3,40	3,85	4,35	0,00						
P11	6,91	2,96	3,89	6,61	4,83	4,26	4,51	6,53	4,61	4,72	0,00					
P12	3,13	3,26	5,17	4,39	4,62	5,50	3,75	2,81	5,54	3,33	4,93	0,00				
P13	7,98	4,69	3,99	7,26	5,27	3,98	4,68	7,58	2,54	5,34	5,77	6,89	0,00			
P14	5,86	3,64	3,03	5,20	3,81	3,38	3,11	5,77	1,77	3,60	4,79	5,23	2,77	0,00		
P15	8,15	3,54	3,48	7,71	5,01	3,69	4,67	7,33	3,61	4,97	3,80	6,37	3,77	4,26	0,00	
P16	5,87	2,51	2,80	5,73	3,68	3,52	2,98	5,22	2,43	3,35	3,75	4,51	3,55	1,96	3,94	0,00

ANEXO 10. Gráfico de barras: Resultados de MLGM de la composición fisicoquímica de las microvinificaciones expresadas en g/L. Medias ajustadas y errores estándares para tratamiento, LSD Fisher ($\alpha=0,05$)



ANEXO 11. ACP de Análisis sensorial de vinos – Resultados InfoStat: autovalores y autovectores.

- Variables de clasificación: AGOSTO 2024

Tratamiento

Autovalores

Lambda	Valor	Proporción	Prop Acum
1	5,49	0,55	0,55
2	3,17	0,32	0,87
3	1,34	0,13	1,00
4	0,00	0,00	1,00
5	0,00	0,00	1,00
6	0,00	0,00	1,00
7	0,00	0,00	1,00
8	0,00	0,00	1,00
9	0,00	0,00	1,00
10	0,00	0,00	1,00

Autovectores

Variables	e1	e2
FV IC	0,37	0,26
FV T	0,39	-0,21
FO IO	0,40	0,16
FO LO	0,23	-0,47
FO A	0,02	0,05
FG IG	-0,32	0,36
FG LG	0,42	0,05
FG EG	-0,38	-0,20
FG C	0,24	0,41
FG P	-0,09	0,55

- Variables de clasificación: NOVIEMBRE 2024

Tratamiento

Autovalores

Lambda	Valor	Proporción	Prop Acum
1	6,27	0,63	0,63
2	3,18	0,32	0,94
3	0,55	0,06	1,00
4	0,00	0,00	1,00
5	0,00	0,00	1,00
6	0,00	0,00	1,00
7	0,00	0,00	1,00
8	0,00	0,00	1,00
9	0,00	0,00	1,00
10	0,00	0,00	1,00

Autovectores

Variables	e1	e2
FV IC	-0,32	-0,31
FV T	-0,38	0,07
FO IO	-0,37	-0,18
FO LO	-0,18	0,49
FO A	-0,15	0,52
FG IG	-0,35	0,26
FG LG	0,27	-0,32
FG EG	0,38	0,01
FG C	-0,32	-0,34
FG P	-0,35	-0,26

ANEXO 12. Ecuaciones empleadas para el cálculo de I, T, IC, IPT, h* y C*

Ecuaciones de parámetros colorimétricos:

$$I = A_{420} + A_{520} + A_{620} \quad (\text{Intensidad de color})$$

$$T = A_{420}/A_{520} \quad (\text{Tonalidad})$$

$$IC = \frac{I}{T} * 1000 \quad (\text{Índice de color})$$

$$IPT = A_{280} * \text{Dilución (100)} \quad (\text{Índice de polifenoles totales})$$

$$h^* = \arctg \frac{a^*}{b^*} \quad (\text{Tonalidad del color})$$

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (\text{Croma o Pureza del color})$$

ANEXO 13. Puntuación mínima y máxima por parcela de los análisis sensoriales de agosto y noviembre de 2024. Resultados InfoStat

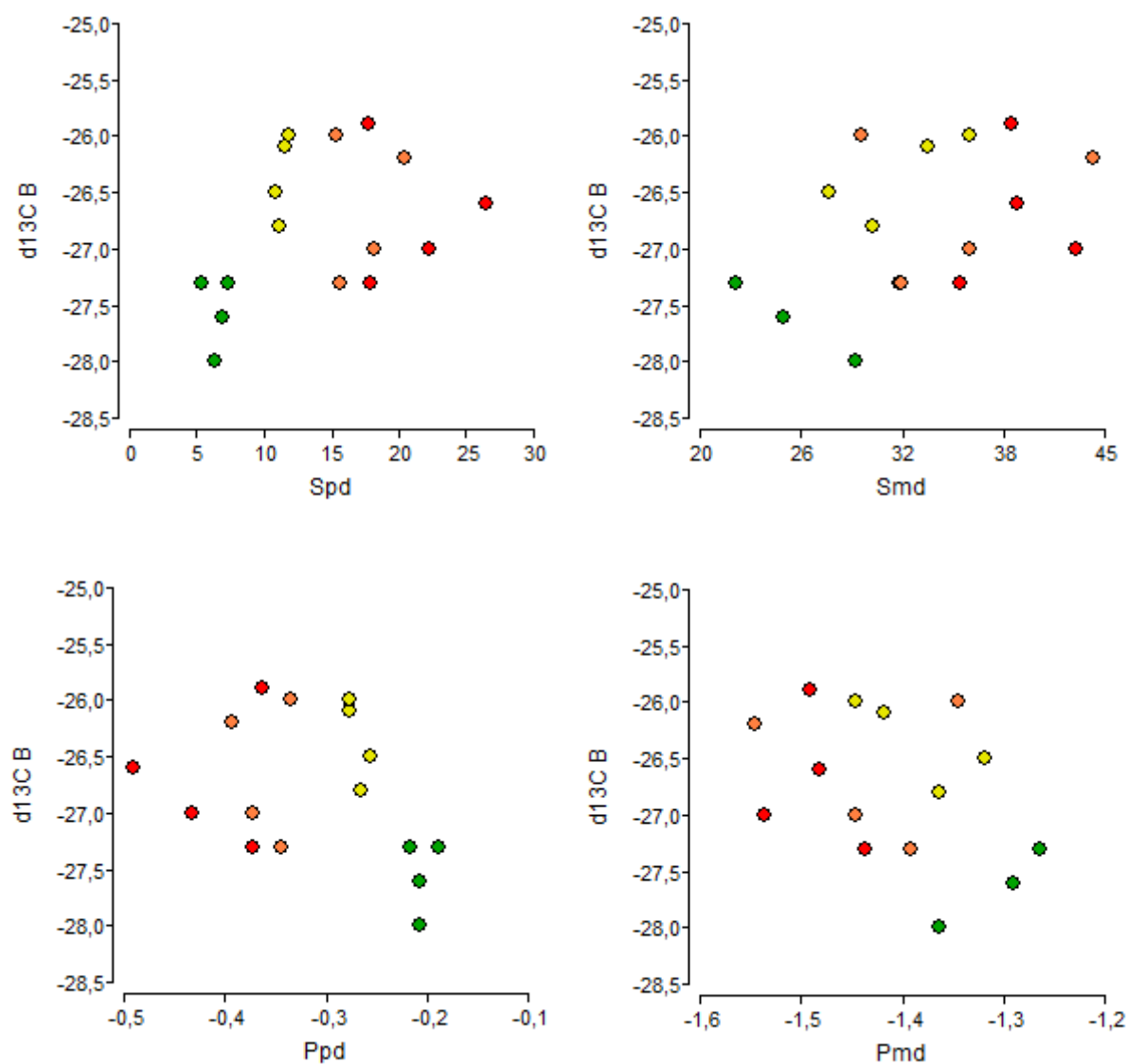
AGOSTO

Parcela	Variable	n	Media	D.E.	Mín	Máx
1	T	7	78,00	6,22	70,00	86,00
2	T	7	85,14	5,87	74,00	92,00
3	T	7	86,57	4,43	80,00	92,00
4	T	7	79,43	5,38	72,00	86,00
5	T	7	83,71	7,52	76,00	94,00
6	T	7	86,86	4,14	80,00	94,00
7	T	7	83,71	6,47	74,00	92,00
8	T	7	79,43	4,28	74,00	86,00
9	T	7	86,86	4,45	80,00	94,00
10	T	7	83,43	9,64	72,00	98,00
11	T	7	86,86	5,40	78,00	96,00
12	T	7	80,57	7,98	70,00	90,00
13	T	7	88,57	5,97	84,00	100,00
14	T	7	85,71	8,28	72,00	98,00
15	T	7	90,00	4,00	86,00	94,00
16	T	7	85,71	6,68	78,00	96,00

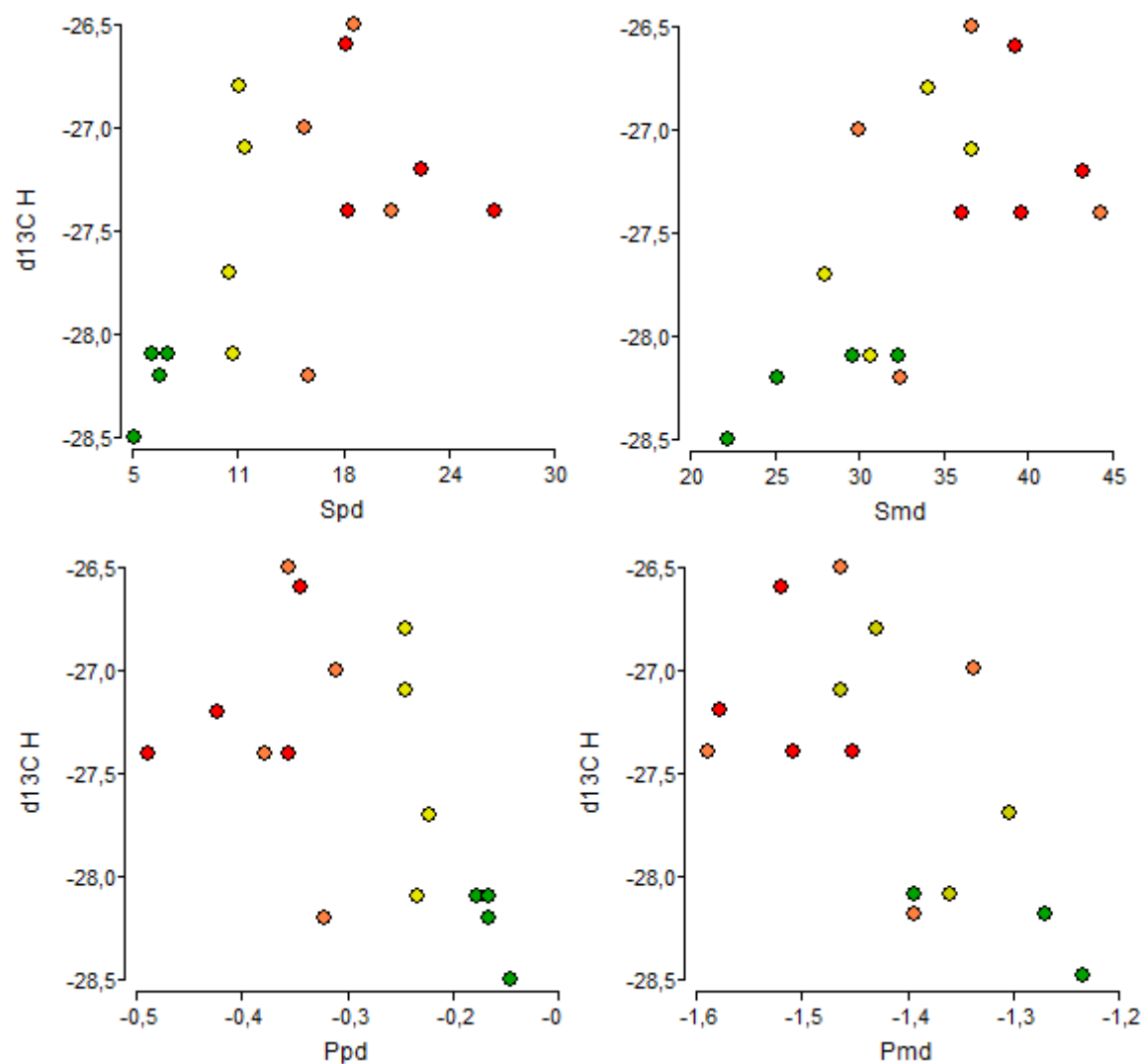
NOVIEMBRE

Parcela	Variable	n	Media	D.E.	Mín	Máx
1	T	7	81,43	4,86	76,00	90,00
2	T	7	85,14	8,63	74,00	96,00
3	T	7	83,43	7,81	70,00	92,00
4	T	7	76,86	6,20	68,00	86,00
5	T	7	82,00	5,03	76,00	88,00
6	T	7	79,14	3,02	76,00	84,00
7	T	7	84,00	7,83	70,00	96,00
8	T	7	78,00	6,73	68,00	86,00
9	T	7	82,00	9,02	70,00	98,00
10	T	7	87,43	3,78	82,00	92,00
11	T	7	87,43	6,70	82,00	98,00
12	T	7	81,14	4,74	76,00	90,00
13	T	7	87,71	5,22	82,00	98,00
14	T	7	82,29	5,94	74,00	88,00
15	T	7	88,57	6,60	80,00	96,00
16	T	7	84,86	7,90	74,00	94,00

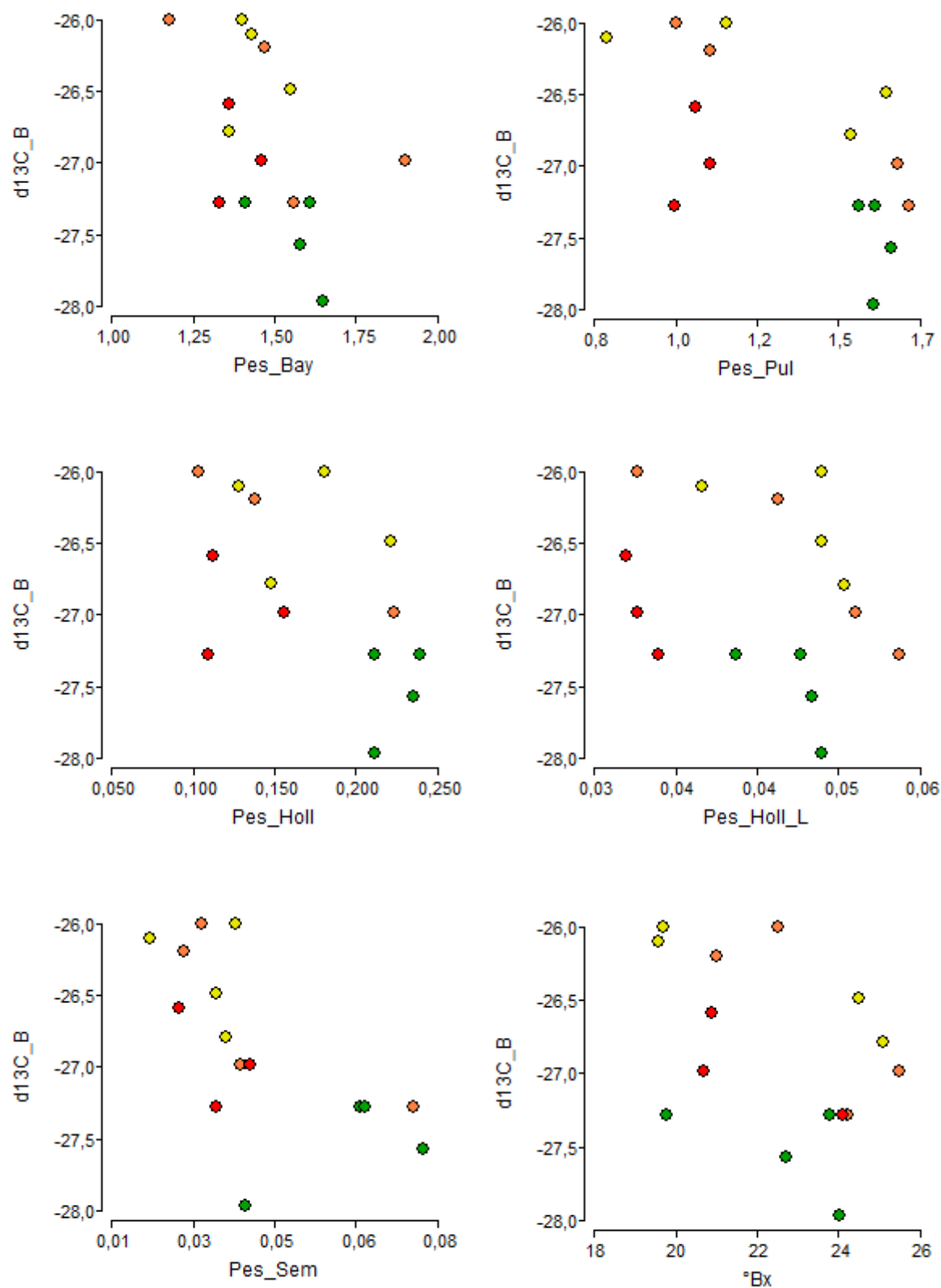
ANEXO 14. Gráficos de dispersión para $\delta^{13}\text{C}$ para bayas respecto de las variables de estado hídrico: Spd (Integral de Myers de preamanecer), Smd (Integral de Myers de mediodía), Ppd (Potencial hídrico foliar de preamanecer) y Pmd (Potencial hídrico foliar de mediodía).



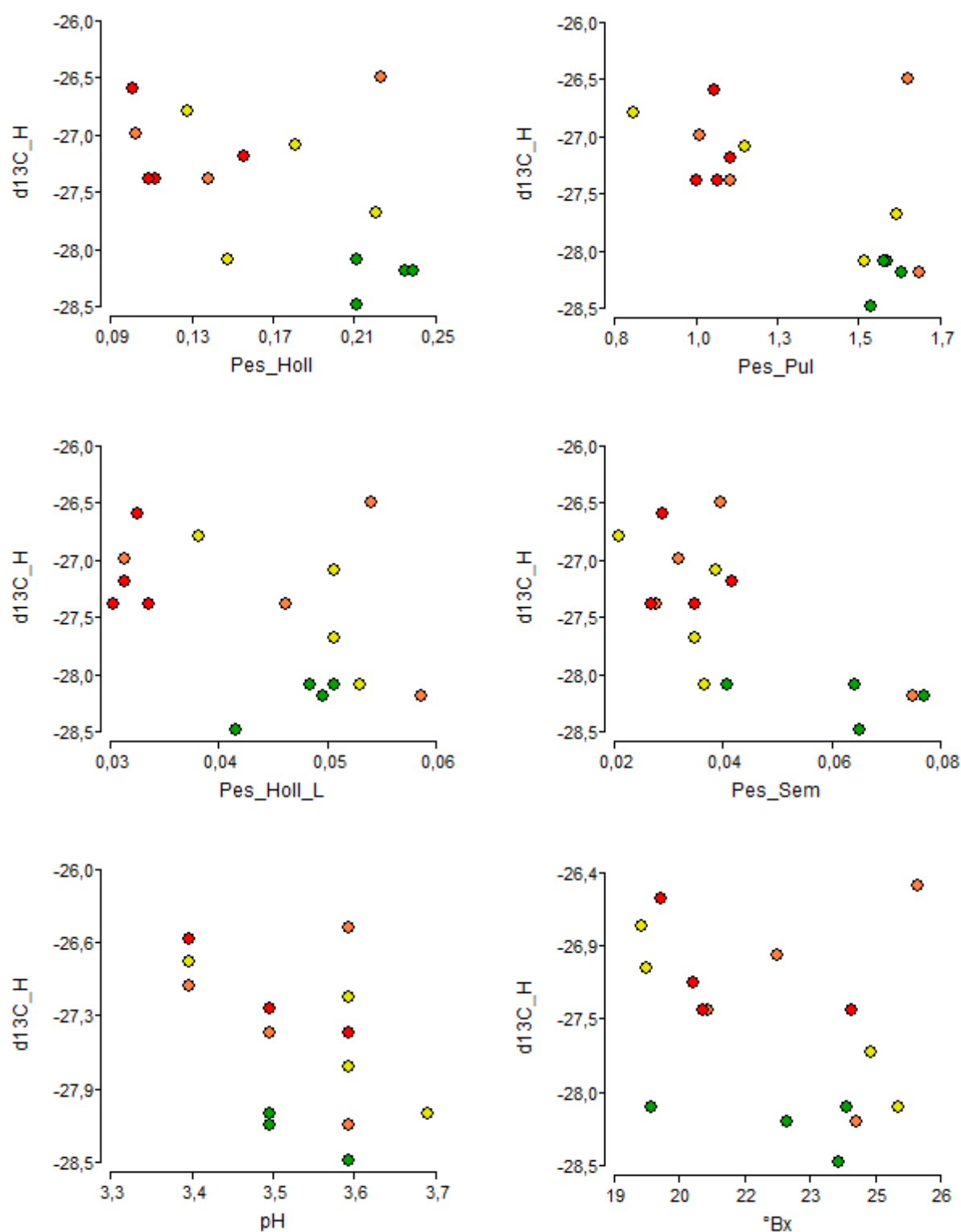
ANEXO 15. Gráficos de dispersión para $\delta^{13}\text{C}$ para hojas respecto de las variables de estado hídrico: Spd (Integral de Myers de preamanecer), Smd (Integral de Myers de mediodía), Ppd (Potencial hídrico foliar de preamanecer) y Pmd (Potencial hídrico foliar de mediodía).



ANEXO 16. Gráficos de dispersión de $\delta^{13}\text{C}$ bayas y parámetros de calidad de materia prima.



ANEXO 17. Gráficos de dispersión de $\delta^{13}\text{C}$ hojas y parámetros de calidad de materia prima.



ANEXO 18. Matriz de correlación $\delta^{13}\text{C}$ para baya y hoja, variables de composición gravimétrica de bayas, parámetros fisicoquímicos y compuestos fenólicos en hollejos

	d13C_B	d13C_H	Pes_Bay	Pes_Holl	Pes_Pul	Pes_Holl_L	N_Sem	Pes_Sem	°Bx	pH	AT	Tan	Ant	Cl_Mod
d13C_B	1,00	0,68	-0,57	-0,62	-0,66	-0,37	-0,20	-0,64	-0,51	-0,55	0,05	-0,21	0,37	-0,67
d13C_H	0,68	1,00	-0,19	-0,55	-0,64	-0,43	-0,43	-0,71	-0,35	-0,51	-0,12	0,02	0,46	-0,67
Pes_Bay	-0,57	-0,19	1,00	0,79	0,68	0,68	0,27	0,35	0,39	0,41	0,01	0,44	-0,17	0,65
Pes_Holl	-0,62	-0,55	0,79	1,00	0,89	0,80	0,59	0,73	0,41	0,43	0,12	0,44	-0,35	0,85
Pes_Pul	-0,66	-0,64	0,68	0,89	1,00	0,79	0,69	0,70	0,62	0,57	-0,02	0,54	-0,31	0,96
Pes_Holl_L	-0,37	-0,43	0,68	0,80	0,79	1,00	0,66	0,47	0,46	0,54	0,22	0,32	-0,32	0,76
N_Sem	-0,20	-0,43	0,27	0,59	0,69	0,66	1,00	0,45	0,38	0,31	0,08	0,25	-0,22	0,73
Pes_Sem	-0,64	-0,71	0,35	0,73	0,70	0,47	0,45	1,00	0,23	0,19	-0,03	0,25	-0,51	0,66
°Bx	-0,51	-0,35	0,39	0,41	0,62	0,46	0,38	0,23	1,00	0,65	0,12	0,69	0,05	0,65
pH	-0,55	-0,51	0,41	0,43	0,57	0,54	0,31	0,19	0,65	1,00	-0,09	0,15	0,05	0,53
AT	0,05	-0,12	0,01	0,12	-0,02	0,22	0,08	-0,03	0,12	-0,09	1,00	-0,04	-0,32	0,06
Tan	-0,21	0,02	0,44	0,44	0,54	0,32	0,25	0,25	0,69	0,15	-0,04	1,00	0,29	0,47
Ant	0,37	0,46	-0,17	-0,35	-0,31	-0,32	-0,22	-0,51	0,05	0,05	-0,32	0,29	1,00	-0,41
Cl_Mod	-0,67	-0,67	0,65	0,85	0,96	0,76	0,73	0,66	0,65	0,53	0,06	0,47	-0,41	1,00