

Modelación de parámetros de calidad de uva vinífera  
con índices satelitales provenientes de imágenes de  
resolución espacial media para el manejo diferenciado  
de viñedos en Chile

**Sandra Fredes Castro**

Directores:

Dr. Luis Ángel Ruiz Fernández

Dr. Jorge Abel Recio Recio

Doctorado en Ingeniería Geomática



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

Junio 2024







UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

---

**Modelación de parámetros de calidad de uva  
vinífera con índices satelitales provenientes de  
imágenes de resolución espacial media para el  
manejo diferenciado de viñedos en Chile**

---

Sandra Fredes Castro

Directores:

Dr. Luis Ángel Ruiz Fernández y Dr. Jorge Abel Recio Recio

Departamento de Ingeniería Cartográfica Geodésica y Fotogrametría

Universitat Politècnica de València, Spain

Doctorado en Ingeniería Geomática

Valencia, junio 2024



## Resumen

La definición de vino por parte de la organización internacional del Vino OIV, establece claramente su origen como resultado de la fermentación alcohólica, total o parcial, de uvas frescas, estrujadas o no, o de mosto de uva. La fermentación de su mosto se produce por la acción metabólica de levaduras, que transforman los azúcares y los ácidos de la uva para convertirlos en alcohol. Sin embargo, la complejidad de la industria del vino, radica en comprender que la producción de vino va más allá de la fermentación del mosto, el vino es la suma de una serie de factores agronómicos y medioambientales, tales como clima, latitud, altitud, horas de luz, temperatura, entre otros. Este proceso implica una combinación única de ciencia, arte y experiencia.

Los enólogos y viticultores van perfeccionando sus métodos a través de una observación meticulosa y el conocimiento acumulado, aunque gran parte de esta experiencia sigue basándose principalmente en acciones artesanales. Por lo tanto, es una industria que requiere soluciones innovadoras para seguir avanzando.

Uno de los principales desafíos de la industria vitivinícola contemporánea, es la optimización de la producción de vino, tener una huella ambiental mínima, reducir los costos de producción, así como mejorar la calidad de vino producido (Cozzolino, 2016). La inclusión de la innovación tecnológica y el desarrollo de herramientas de teledetección en la producción de vino son un factor eficiente y productivo que apoya la producción y mejora la calidad del vino producido. La aplicación de la agricultura de precisión, que incluye el manejo del riego, la evaluación y control del follaje, así como la identificación de los mejores emplazamientos para cada variedad de uva, ha demostrado ser especialmente beneficiosa para la industria vitivinícola.

Uno de los hitos claves en la producción de vino es el seguimiento de la madurez de las bayas de uva, mediante la determinación del contenido de azúcar y la acidez, con lo cual es posible establecer una fecha óptima de vendimia y una vez producido el vino, evaluar su color y el contenido de polifenoles, parámetros indicadores de la calidad del vino.

Las imágenes satelitales son una herramienta clave de la teledetección base de la agricultura de precisión, que permite por ejemplo monitorear la salud de los viñedos o realizar un control de condiciones meteorológicas. En este estudio se utilizaron las imágenes satelitales, con el fin de establecer una relación entre los parámetros de calidad de vino considerados (pre y poscosecha) y los índices y bandas espectrales derivadas de las imágenes Sentinel-2 obtenidas previas a la cosecha.

Durante esta investigación se examinaron las temporadas de vendimia de los años 2017 y 2018, abarcando un área total de 135,8 hectáreas de viñedos de uvas Cabernet Sauvignon situados en la comuna de Marchigüe, dentro del Valle de Colchagua en Chile Central.

La primera etapa consistió en la identificación precisa de los puntos de muestreo distribuidos espacialmente, donde se recolectarían muestras de fruta para seguir el ciclo fenológico de la viña a lo largo de ambos años de estudio. Esta parte del estudio comprende el análisis de los datos recolectados previos a cosecha, obtenidos de manera periódica a lo largo de ambas temporadas. Estos datos incluyen mediciones de °Brix y pH de la fruta, factores críticos para determinar la madurez de la uva y establecer el momento óptimo de vendimia. En la segunda etapa, se procede al análisis de los datos posteriores a la cosecha, obtenidos del vino producido a partir de dicha uva. En este análisis se consideran el índice de color y el contenido de antocianos totales y fenoles totales, elementos clave que influyen en la calidad y características sensoriales del vino final.

La presente investigación tiene como objetivo principal desarrollar modelos que empleen índices y variables espectrales derivados de imágenes satelitales Sentinel-2 para aproximar parámetros de calidad de uva vinífera, como °Brix y pH, así como del vino resultante, índice de color, antocianinas totales y fenoles totales. Se pretende que estos modelos, extrapolados en toda la superficie de trabajo, permitan una gestión diferenciada del cultivo de vid para mejorar la calidad de los vinos producidos, proyectando indicadores precosecha y poscosecha que influyen en las características sensoriales y la diferenciación entre marcas vinícolas. Asimismo, se busca potenciar la gestión de los viñedos al ofrecer información precisa para la vendimia, permitiendo una cosecha selectiva y más eficiente mediante la cartografía y clasificación de áreas homogéneas en las parcelas de vid.

El uso de imágenes Sentinel ofrece claras ventajas en términos de frecuencia y resolución, permitiendo generar índices en distintas partes del espectro electromagnético. Los modelos basados en estos índices y variables espectrales son fundamentales para estimar parámetros de calidad de uva y vino. Proyectados con la misma resolución espacial que las imágenes, estos modelos son herramientas poderosas para mejorar la gestión del viñedo y la calidad de los vinos. A pesar de esta ventaja, no fue posible identificar una tendencia clara en cuanto a cuál de ellos muestra una mejor correlación con las variables.

Se observa que en las variables precosecha, las bandas de onda corta y el índice de vegetación son más frecuentes, mientras que en las variables de poscosecha destacan las bandas de borde rojo, infrarrojo cercano y el índice de humedad. Este resultado sugiere la necesidad de realizar más estudios o explorar con otras especies. Paralelamente, es importante reconocer el valor de las imágenes como herramienta valiosa para mejorar el proceso artesanal y obtener vinos de mejor calidad, de hecho, se distingue una mayor ventaja en la metodología de trabajo que en la

identificación de una banda específica, ya que los modelos pueden adaptarse a las diversas condiciones ambientales que influyen en la calidad del vino. A pesar de que no existe una tendencia clara respecto de un patrón de ocurrencia de bandas o índices en los modelos, sí es posible validar la metodología, ya que se mejora el proceso artesanal existente en el viñedo. Desde esta perspectiva, las imágenes son una herramienta valiosa, ya que son el principal aporte para alimentar los modelos predictivos, que, aunque son universales, permiten adaptarse a las diversas condiciones ambientales que influyen notablemente en el *terroir* y por ende en la calidad del vino.

Uno de los hallazgos más interesante corresponde a la determinación del periodo fisiológico en cual se sugiere realizar el análisis predictivo, determinando como claves la quincena previa a la vendimia, para evaluar el contenido de azúcar y acidez. Este hallazgo es clave ya que acota el periodo propicio, permitiendo una planificación precisa y oportuna del proceso de cosecha y a su vez proporciona datos esenciales para los enólogos, asegurando una gestión agronómica y económica efectiva de los viñedos.

En relación a los coeficientes de determinación obtenidos para °Brix, índice de color y antocianos totales en la primera temporada, los resultados son altamente positivos, con valores entre 65% y 77%, lo que sugiere una predicción fiable y contribuye a la definición de la cosecha selectiva. Sin embargo, otras variables muestran una relación menos concluyente, con coeficientes de determinación entre 42% y 57% en las campañas 2017 y 2018. Estos resultados indican la necesidad de mejorar el estudio en el futuro, posiblemente aumentando el número de muestras o refinando el proceso de muestreo para fortalecer la relación entre los datos obtenidos.

Los resultados positivos de productividad y la disponibilidad de imágenes satelitales ofrecen la oportunidad de identificar áreas para un estudio

detallado y una cosecha diferenciada. La selección precisa de uvas de similares características es crucial para mejorar la calidad y la productividad del vino. Este estudio resalta la viabilidad de la teledetección y la vendimia selectiva como herramientas clave para gestionar la calidad y el estilo del vino, proporcionando nuevas perspectivas en la viticultura.

## Abstract

The definition of wine by the International Wine Organization (OIV) clearly establishes its origin as the result of alcoholic fermentation, total or partial, of fresh grapes, crushed or not, or grape must. The fermentation of its must is produced by the metabolic action of yeasts, which transform grape sugars and acids into alcohol. However, the complexity of the wine industry lies in understanding that wine production goes beyond must fermentation; wine is the sum of a series of agronomic and environmental factors, such as climate, latitude, altitude, hours of light, temperature, among others. This process involves a unique combination of science, art and experience.

Winemakers and viticulturists are perfecting their methods through meticulous observation and accumulated knowledge, although much of this experience is still based primarily on artisanal actions. It is therefore an industry that requires innovative solutions to keep moving forward.

One of the main challenges of the contemporary wine industry, is the optimization of wine production, having a minimal environmental footprint, reducing production costs, as well as improving the quality of wine produced (Cozzolino, 2016).

The inclusion of technological innovation and the development of remote sensing tools in wine production is an efficient and productive factor that supports production and improves the quality of the wine produced. The application of precision agriculture, which includes irrigation management, canopy assessment and control, as well as the identification of the best sites for each grape variety, has proven to be especially beneficial for the wine industry.



One of the key milestones in wine production is the monitoring of grape berry maturity by determining sugar content and acidity, which makes it possible to establish an optimal harvest date and, once the wine has been produced, to evaluate its color and polyphenol content, parameters that are indicators of wine quality.

Satellite images are a key remote sensing tool for precision agriculture, allowing, for example, monitoring the health of vineyards or controlling weather conditions. In this study, satellite images were used to establish a relationship between the wine quality parameters considered (pre and post harvest) and the indices and spectral bands derived from Sentinel-2 images obtained prior to harvest.

During this research, the 2017 and 2018 vintage seasons were examined, covering a total area of 135.8 hectares of Cabernet Sauvignon grape vineyards located in the commune of Marchigüe, within the Colchagua Valley in Central Chile. The first stage consisted of the precise identification of the spatially distributed sampling points where fruit samples would be collected to follow the phenological cycle of the vines throughout both years of the study.

The first stage consisted of the precise identification of the spatially distributed sampling points where fruit samples would be collected to follow the phenological cycle of the vine throughout both years of the study. This part of the study involves the analysis of pre-harvest data collected periodically throughout both seasons. These data include °Brix and pH measurements of the fruit, critical factors for determining grape maturity and establishing the optimum time for harvesting. The second stage involves the analysis of post-harvest data obtained from the wine produced from the grapes. This analysis considers the color index and the content of total anthocyanins and total phenols, key elements that influence the quality and sensory characteristics of the final wine.

The main objective of this research is to develop models that use indexes and spectral variables derived from Sentinel-2 satellite images to approximate quality parameters of wine grapes, such as °Brix and pH, as well as the resulting wine, color index, total anthocyanins and total phenols. It is intended that these models, extrapolated to the entire work area, will allow a differentiated management of vine cultivation to improve the quality of the wines produced, projecting pre-harvest and post-harvest indicators that influence the sensory characteristics and differentiation between wine brands. It also seeks to enhance vineyard management by providing accurate information for the harvest, allowing a selective and more efficient harvest by mapping and classifying homogeneous areas in the vineyard plots.

The use of Sentinel images offers clear advantages in terms of frequency and resolution, allowing the generation of indices in different parts of the electromagnetic spectrum. Models based on these indices and spectral variables are fundamental for estimating grape and wine quality parameters. Projected at the same spatial resolution as the images, these models are powerful tools for improving vineyard management and wine quality. Despite this advantage, it was not possible to identify a clear trend as to which of them shows a better correlation with the variables.

It is observed that in the pre-harvest variables, the shortwave bands and the vegetation index are more frequent, while in the post-harvest variables, the red-edge, near-infrared and moisture index bands stand out. This result suggests the need for further studies or exploration with other species. At the same time, it is important to recognize the value of the images as a valuable tool to improve the artisanal process and obtain better quality wines; in fact, a greater advantage can be seen in the work methodology than in the identification of a specific band, since the models can be adapted to the diverse environmental conditions that influence wine quality. Although there is no clear trend regarding a pattern of occurrence

of bands or indices in the models, it is possible to validate the methodology, since the existing artisanal process in the vineyard is improved. From this perspective, the images are a valuable tool, since they are the main contribution to feed the predictive models, which although not universal, allow adapting to the diverse environmental conditions that have a significant influence on the terroir and therefore on the quality of the wine.

One of the most interesting findings corresponds to the determination of the physiological period in which it is suggested to perform the predictive analysis, determining as key the fortnight prior to the harvest, to evaluate the sugar and acidity content. This finding is key because it delimits the favorable period, allowing an accurate and timely planning of the harvest process and in turn provides essential data for winemakers, ensuring an effective agronomic and economic management of the vineyards.

In relation to the coefficients of determination obtained for °Brix, color index and total anthocyanins in the first season, the results are highly positive, with values between 65% and 77%, suggesting a reliable prediction and contributing to the definition of selective harvesting. However, other variables show a less conclusive relationship, with coefficients of determination between 42% and 57% in the 2017 and 2018 seasons. These results indicate the need to improve the study in the future, possibly by increasing the number of samples or refining the sampling process to strengthen the relationship between the data obtained.

The positive productivity results and the availability of satellite imagery offer the opportunity to identify areas for detailed study and differentiated harvesting. Accurate selection of grapes with similar characteristics is crucial to improve wine quality and productivity. This study highlights the feasibility of remote sensing and selective harvesting as key tools for managing wine quality and style, providing new perspectives in viticulture.

## Resum

La definició de vi per part de l'Organització Internacional del Vi (OIV), estableix clarament el seu origen com a resultat de la fermentació alcohòlica, total o parcial, de raïm fresc, rebregades o no, o de most de raïm. La fermentació del seu most es produïx per l'acció metabòlica de llevats, que transformen els sucres i els àcids del raïm per a convertir-los en alcohol. No obstant això, la complexitat de la indústria del vi, radica a comprendre que la producció de vi va més enllà de la fermentació del most, el vi és la suma d'una sèrie de factors agronòmics i mediambientals, com ara clima, latitud, altitud, hores de llum, temperatura, entre altres. Este procés implica una combinació única de ciència, art i experiència.

Els enòlegs i viticultors van perfeccionant els seus mètodes a través d'una observació meticulosa i el coneixement acumulat, encara que gran part d'esta experiència continua basant-se principalment en accions artesanals. Per tant, és una indústria que requereix solucions innovadores per a continuar avançant.

Un dels principals desafiaments de la indústria vitivinícola contemporània, és l'optimització de la producció de vi, tindre una petjada ambiental mínima, reduir els costos de producció, així com millorar la qualitat de vi produït (Cozzolino, 2016). La inclusió de la innovació tecnològica i el desenvolupament de ferramentes de teledetecció en la producció de vi són un factor eficient i productiu que dona suport a la producció i millora la qualitat del vi produït. L'aplicació de l'agricultura de precisió, que inclou el maneig del reg, l'avaluació i control del fullatge, així com la identificació dels millors emplaçaments per a cada varietat de raïm, ha demostrat ser especialment beneficiosa per a la indústria vitivinícola.

Un de les fites claus en la producció de vi és el seguiment de la maduresa de les baies de raïm, mitjançant la determinació del contingut de sucre i

l'acidesa, amb la qual cosa és possible establir una data òptima de verema i una vegada produït el vi, avaluar el seu color i el contingut de polifenols, paràmetres indicadors de la qualitat del vi. Les imatges satel·litàries són una ferramenta clau de la teledetecció base de l'agricultura de precisió, que permet per exemple monitorar la salut de les vinyes o realitzar un control de condicions meteorològiques. En este estudi es van utilitzar les imatges satel·litàries, amb la finalitat d'establir una relació entre els paràmetres de qualitat de vi considerats (pre i postcollita) i els índexs i bandes espectrals derivades de les imatges Sentinel-2 obtingudes prèvies a la collita.

Durant esta investigació es van examinar les temporades de verema dels anys 2017 i 2018, abastant una àrea total de 135,8 hectàrees de vinyes de raïm Cabernet Sauvignon situats en la comuna de Marchigüe, dins de la Vall de Colchagua a Xile Central.

La primera etapa va consistir en la identificació precisa dels punts de mostreig distribuïts espacialment, on es recol·lectarien mostres de fruita per a seguir el cicle fenològic de la vinya al llarg de tots dos anys d'estudi. Esta part de l'estudi comprén l'anàlisi de les dades recol·lectades prèvies a collita, obtinguts de manera periòdica al llarg de totes dues temporades. Estes dades inclouen mesuraments de °Brix i pH de la fruita, factors crítics per a determinar la maduresa del raïm i establir el moment òptim de verema. En la segona etapa, es procedix a l'anàlisi de les dades posteriors a la collita, obtinguts del vi produït a partir d'este raïm. En esta anàlisi es consideren l'índex de color i el contingut de antocianos totals i fenols totals, elements clau que influïxen en la qualitat i característiques sensorials del vi final.

La present investigació té com a objectiu principal desenvolupar models que empren índexs i variables espectrals derivats d'imatges satel·litàries Sentinel-2 per a aproximar paràmetres de qualitat de raïm vinífer, com °Brix i pH, així com del vi resultant, índex de color, antocianinas totals i fenols

totals. Es pretén que estos models, extrapolats en tota la superfície de treball, permeten una gestió diferenciada del cultiu de vinya per a millorar la qualitat dels vins produïts, projectant indicadors precollita i postcollita que influïxen en les característiques sensorials i la diferenciació entre marques vinícoles. Així mateix, es busca potenciar la gestió de les vinyes en oferir informació precisa per a la verema, permetent una collita selectiva i més eficient mitjançant la cartografia i classificació d'àrees homogènies en les parcel·les de vinya.

L'ús d'imatges Sentinel ofereix clars avantatges en termes de freqüència i resolució, permetent generar índexs en diferents parts de l'espectre electromagnètic. Els models basats en estos índexs i variables espectrals són fonamentals per a estimar paràmetres de qualitat de raïm i vi. Projectats amb la mateixa resolució espacial que les imatges, estos models són ferramentes poderoses per a millorar la gestió de la vinya i la qualitat dels vins. Malgrat este avantatge, no va ser possible identificar una tendència clara quant a quin d'ells mostra una millor correlació amb les variables.

S'observa que en les variables precollita, les bandes d'ona curta i l'índex de vegetació són més freqüents, mentres que en les variables de postcollita destaquen les bandes de vora roja, infraroig pròxim i l'índex d'humitat. Este resultat suggerix la necessitat de realitzar més estudis o explorar amb altres espècies. Paral·lelament, és important reconeix el valor de les imatges com a ferramenta valuosa per a millorar el procés artesanal i obtindre vins de millor qualitat, de fet, es distingix un major avantatge en la metodologia de treball que en la identificació d'una banda específica, ja que els models poden adaptar-se a les diverses condicions ambientals que influïxen en la qualitat del vi. A pesar que no existix una tendència clara respecte d'un patró d'ocurrència de bandes o índexs en els models, sí que és possible validar la metodologia, ja que es millora el procés artesanal existent en la vinya. Des d'esta perspectiva, les imatges són una ferramenta valuosa, ja que són la principal aportació per a alimentar els models predictius, que,

encara que no són universals, permeten adaptar-se a les diverses condicions ambientals que influïxen notablement en el terroir i per tant en la qualitat del vi.

Un de les troballes més interessant, correspon a la determinació del període fisiològic en qual se suggerix realitzar l'anàlisi predictiva, determinant com a claus la quinzena prèvia a la verema, per a avaluar el contingut de sucre i acidesa. Esta troballa és clau ja que delimita el període propici, permetent una planificació precisa i oportuna del procés de collita i al seu torn proporciona dades essencials per als enòlegs, assegurant una gestió agronòmica i econòmica efectiva de les vinyes.

En relació als coeficients de determinació obtinguts per a °Brix, índex de color i antocianos totals en la primera temporada, els resultats són altament positius, amb valors entre 65% i 77%, la qual cosa suggerix una predicció fiable i contribuïx a la definició de la collita selectiva. No obstant això, altres variables mostren una relació menys concloent, amb coeficients de determinació entre 42% i 57% en les campanyes 2017 i 2018. Estos resultats indiquen la necessitat de millorar l'estudi en el futur, possiblement augmentant el nombre de mostres o refinant el procés de mostreig per a enfortir la relació entre les dades obtingudes.

Els resultats positius de productivitat i la disponibilitat d'imatges satel·litàries oferixen l'oportunitat d'identificar àrees per a un estudi detallat i una collita diferenciada. La selecció precisa de raïm de similars característiques és crucial per a millorar la qualitat i la productivitat del vi. Este estudi ressalta la viabilitat de la teledetecció i la verema selectiva com a ferramentes clau per a gestionar la qualitat i l'estil del vi, proporcionant noves perspectives en la viticultura.

## Agradecimientos

Después de muchos años de esfuerzo y dedicación, concluye una etapa que en ocasiones parecía tan lejana de alcanzar. Hoy, quiero expresar mi más profundo y sincero agradecimiento a todos aquellos que han sido parte esencial de este viaje.

A mi querido y adorado esposo, Christian Olivero, por su inquebrantable apoyo, su infinita paciencia y su constante amor. ¡Eres lo mejor que le pasó a mi vida!, te admiró por todo lo que logras, por cómo te paras frente a la vida y, sobre todo, te admiro por ser un hombre maravilloso. Tu presencia ha sido un pilar fundamental en mi vida y en este logro.

A mis hijos, Sebastián, Catalina y Sofía, que siempre han sido y seguirán siendo el motor de muchas de mis acciones. Sus sonrisas y su amor incondicional me han dado la fuerza para seguir adelante en los momentos más difíciles. ¡Me va a faltar vida para amarlos como se merecen!

A mis queridas amigas, de tantos jueves terapéuticos, quienes me alentaron con sus palabras y tenían certeza en que este barco llegaría a buen puerto. Su compañía y apoyo han sido un descanso en el camino. ¡Si ya nos encontramos... no nos soltemos!

A mis hermanos y hermanas, que siempre me han apoyado de diversas formas. Especialmente, quiero agradecer a mis padres, Domingo y Alicia, a quienes debo todo lo que soy. Mi madre, que desde alguna nube estoy segura que me mira, sé que se siente orgullosa de este logro.

Reconozco que después de tantos años, se me quedarán varios colaboradores en el tintero, pero no quiero dejar de nombrar a aquellos que tengo más frescos en mi memoria: Rodrigo Barria, Rodrigo Opazo, Francisco Mate, Sandra Gandolfo, Paulo Aravena, y Waldo Pérez de la



Universidad Mayor y el Centro de Investigación Hemera. ¡Gracias por todo su apoyo y colaboración!

Finalmente, agradecer de manera muy especial a mis profesores tutores, Luis Ángel Ruiz y Jorge Abel Recio, quienes con su paciencia y dedicación se han ganado el cielo. Infinitas gracias por sus consejos, sugerencias y apoyo incondicional a lo largo de este proceso.

After many years of effort and dedication, a stage that at times seemed so far away to reach is coming to an end. Today, I want to express my deepest and most sincere gratitude to all those who have been an essential part of this journey.

To my dear and adored husband, Christian Olivero, for his unwavering support, his infinite patience and constant love. You are the best thing that ever happened to my life! I admire you for everything you achieve, for how you stand in front of life and, above all, I admire you for being a wonderful man. Your presence has been a fundamental pillar in my life and in this achievement.

To my children, Sebastián, Catalina, and Sofía, who have always been and will continue to be the driving force behind many of my actions. Their smiles and unconditional love have given me the strength to keep going through the toughest times. A lifetime will not be enough to love you as much as you deserve!

To my dear friends, from so many therapeutic Thursdays, who encouraged me with their words and were certain that this ship would reach a safe harbor. Your company and support have been a respite along the way. If we have already found each other... let's not let go!

To my brothers and sisters, who have always supported me in various ways. Especially, I want to thank my parents, Domingo and Alicia, to whom I owe everything I am. My mother, who I am sure is watching me from some cloud. I know she feels proud of this achievement.

I recognize that after so many years, I will leave many collaborators behind, but I do not want to forget to mention those who are fresh in my memory: Rodrigo Barria, Rodrigo Opazo, Francisco Mate, Sandra Gandolfo, Paulo Aravena, and Waldo Perez from the Universidad Mayor and the Hemera Research Center. Thank you for all your support and collaboration!

Finally, I would like to give special thanks to my professors Luis Ángel Ruiz and Jorge Abel Recio, whose patience and dedication have earned them the sky. Infinite thanks for their advice, suggestions and unconditional support throughout this process.

## Tabla de contenidos

Resumen.....	V
Abstract.....	X
Resum.....	XIV
Agradecimientos.....	XVIII
Tabla de contenidos.....	XXI
Índice de Figuras.....	XXIV
Índice de Tablas.....	XXX
Capítulo I.....	33
Introducción.....	33
1.1 Contexto de la Viticultura en Chile.....	33
1.2 Factores que influyen en la calidad del vino.....	39
1.3 Importancia de la cosecha diferenciada.....	45
1.4 Uso de la teledetección en la viticultura.....	48
1.5 Justificación de la investigación.....	54
1.6 Esquema de tesis.....	56
1.7 Publicaciones.....	57
Capitulo II.....	60
Hipótesis y Objetivos.....	60
2.1 Hipótesis.....	60
2.2 Objetivos.....	62
2.2.1 Objetivo general:.....	62
2.2.2 Objetivos específicos:.....	63

Capitulo III.....	67
Materiales y Datos.....	67
3.1  Introducción.....	67
3.2  Área de estudio.....	68
3.3  Ciclo de la vid y climatología de la zona .....	71
3.4  Datos.....	78
3.4.1  Imágenes satelitales .....	78
3.4.2  Datos de campo .....	81
Capitulo IV .....	101
Metodología .....	101
4.1  Introducción.....	101
4.2  Índices espectrales .....	103
4.2.1  Caracterización del vigor de la viña .....	106
4.3  Obtención de variables precosecha.....	114
4.4  Obtención de variables poscosecha.....	121
4.4.1  Análisis de compuestos fenólicos e índice de color en vino 126	
4.5  Evaluación Enológica.....	130
4.6  Creación de los modelos.....	138
4.7  Zonificación para una Vendimia Selectiva.....	141
4.7.1  Normalización de los datos.....	143
Capítulo V .....	146
Resultados.....	146
5.1  Introducción.....	146

5.2	Análisis de Variable Precosecha.....	147
5.2.1	Estadísticas Precosecha.....	154
5.2.2	Comparación y selección de modelos.....	159
5.2.3	Modelización de variables.....	162
5.2.4	Análisis espacial de las variables .....	165
5.3	Variables Poscosecha .....	173
5.3.1	Estadísticas poscosecha .....	178
5.3.2	Comparación y selección de modelos.....	181
5.3.3	Modelización de variables.....	186
5.3.4	Análisis espacial de las variables .....	190
5.4	Resultados Zonificación .....	194
	Capítulo VI.....	201
	Discusión y Conclusiones.....	201
6.1	DISCUSIÓN .....	201
6.2	CONCLUSIONES .....	216
	Referencias Bibliográficas.....	224

## Índice de Figuras

- Figura 1. Principales exportadores de vino, según la OIV 2022, en Millones de Hectolitros: España (23.0); Italia (22.2); Francia (14.6); Chile (8.7); Australia (6.3); Sudáfrica (4.8); Alemania (3.7); Argentina (3.3); Estados Unidos (3.3); Portugal (3.3).....34*
- Figura 2. Estado del sector vitivinícola en el mundo. Ranking de los primeros 10 países exportadores (a), en superficie plantada (b) y Volumen de Producción (c). Información entregada por la OIV abril de 2022.....36*
- Figura 3. Producción de vinos en Chile por Región, en millones de litros, de acuerdo al censo realizado por el Servicio Agrícola y Ganadero (SAG), año 2020. ....38*
- Figura 4. Producción de vinos en Chile por Región, en millones de litros, de acuerdo al censo realizado por el Servicio Agrícola y Ganadero (SAG), año 2020. ....39*
- Figura 5. Factores y elementos del Terroir vitivinícola. Fuente: (Jorge Bohm, n.d.) .....40*
- Figura 6. Mapas de ubicación general (izq.) y de emplazamiento de los cuarteles Cabernet Sauvignon (der.); polígonos cian corresponden a plantaciones del año 2007 y polígonos rojos a plantaciones del año 2010. Imagen de Fondo: BaseMap ArcGIS, World Imagery. ....70*
- Figura 7. Ciclo vegetativo de la Vid para el hemisferio sur. Adaptado de Bodegas de La Mancha. Fuente: adaptado de (Bodegas de la Mancha, 2021).....74*
- Figura 8. Precipitación acumulada años 2016 y 2017.....76*

<i>Figura 9. Gráfico de comparación de temperatura del aire vs radiación solar durante las temporadas 2017 y 2018.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 10. Fechas de adquisición de imágenes Sentinel-2 utilizadas para caracterizar el comportamiento vegetativo de la vid en ambas temporadas desde la brotación. ....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 11. Distribución espacial para las muestras físicas de bayas (puntos verdes) realizadas durante el estudio en ambas temporadas. a) polígonos azules: plantación 2007; b) polígonos rojos: plantación 2010. Imagen de fondo distribución gratuita desde la plataforma ArcMap.....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 12. Refractómetro de laboratorio para medir contenido de azúcar en la uva. Fuente: Adaptado de(Kalstein, n.d.).....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 13. Secuencia y descripción del muestreo en campo de °Brix. Fuente: Esquema creado por elaboración propia, imágenes adaptadas desde: (Aprende a Catar Vinos, 2005).....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 14. Esquema de los procesos realizados. Paralelamente a la obtención de datos desde campo, se escogen y procesan las imágenes satelitales Sentinel-2; luego se realiza un análisis descriptivo de las variables dependientes en relación a las independientes (bandas e índices espectrales) con el fin de obtener modelos con variables significativas que puedan determinar las variables pre y poscosecha.....</i>	<i>102</i>
<i>Figura 15. Esquema de representación del ciclo de la vid para el hemisferio sur. Fuente: Adaptado de (“Aprendiendo Juntos de Vino”, 2018) .....</i>	<i>108</i>
<i>Figura 16.Comportamiento evolutivo del follaje durante el ciclo de vida de la vid. Fuente: Adaptado de (Agricotec S.L., 2022).....</i>	<i>109</i>
<i>Figura 17. Serie temporal del NDVI para las dos temporadas de estudio. ....</i>	<i>111</i>

- Figura 18. Comparación de NDVI. (a): Disposición espacial de cuarteles en estudio. Polígonos amarillos, plantaciones 2007. Polígonos rojos, plantación 2010. (b): Temporada 2017 v/s 2018: Comparación promedio de NDVI en todos los cuarteles. (c): Temporada 2017. Promedio de NDVI por cuartel, comparación de cuarteles en plantaciones 2007 y 2010. (d): Temporada 2018. Promedio de NDVI por cuartel, comparación de cuarteles en plantaciones 2007 y 2010..... 113
- Figura 19. Comparación de variables precosecha. (a): Comparación promedio °Brix; (b): Comparación promedio pH..... 120
- Figura 20. Comparación de resultados poscosecha por cuartel. a) Índice de color cosecha 2017 y 2018 (Absorbancia). b) antocianos totales cosecha 2017 y 2018 (mg/l equivalente de Malvidina). c) fenoles totales cosecha 2017 y 2018 (mg/l equivalente de ácido gálico). ..... 124
- Figura 21. Comparación mediante gráficos de dispersión entre índice de color y antocianos totales. a): valores correspondientes a la cosecha de 2017; b): valores correspondientes a la cosecha de 2018..... 129
- Figura 22. Categorización de calidades de vino utilizada en Viña Montes. Limited (LIM); Premium (PRE); Superior (SPR). ..... 131
- Figura 23. Comparación de evaluación enológica. (a): Gráfico que muestra los porcentajes de cambio entre los cuarteles evaluados de la cosecha 2017 en comparación con la cosecha 2018; (b): Comparación de evaluación enológica respecto del NDVI..... 137
- Figura 24. Diagrama de dispersión entre las variables °Brix y las bandas e índices de la imagen Sentinel-2. Fecha de referencia: 03 de abril de 2017. Fuente: Diagrama generado con Statgraphics con datos propios. .... 149



- Figura 25. Visualización Vectorial de datos °Brix. Comparación de temporadas 2017 y temporada 2018. Los colores de los puntos representan valores de °Brix. Fuente: Mapas generados por Orange 3, con datos propios..... 152
- Figura 26. Visualización Vectorial de datos pH. Comparación de temporada 2017 y temporada 2018. Los colores de los puntos representan valores de pH. Fuente: Mapas generados con Orange 3, con datos propios..... 153
- Figura 27. Comparación de los valores de NDVI en el cuartel 7.02, para diferentes fechas. Fuente: Mapa de elaboración propia..... 156
- Figura 28. Comparación temporada 2017 y 2018 de los modelos de regresión múltiple de °Brix. Los gráficos muestran un despliegue de las distintas fechas y del resultado de los valores entre el coeficiente de determinación, respecto de (a) el Error Absoluto Medio; (b) el factor de inflación de varianza y (c) significancia de las variables..... 161
- Figura 29. Comparación temporada 2017 y 2018 de los modelos de regresión múltiple de pH. Los gráficos muestran un despliegue de las distintas fechas y del resultado de los valores entre el coeficiente de determinación, respecto de (a) el Error Medio Absoluto; (b) el factor de inflación de varianza y (c) significancia de las variables..... 162
- Figura 30. Comparación entre NDVI y mapas de °Brix y pH estimados. Primera Temporada, año 2017..... 168
- Figura 31. Comparación entre NDVI y mapas de °Brix y pH estimados. Segunda Temporada, año 2018..... 169
- Figura 32. Visualización vectorial de variables: (a) índice de color, IC; (b) fenoles totales, FT y (c) antocianos totales, AT; durante la temporada de cosecha 2017. Los colores de los puntos

representan valores de IC, FT y AT. Fuente: Mapas generados por Orange 3, con datos propios..... 175

Figura 33. Visualización Vectorial de variables: (a) índice de color, IC; (b) fenoles totales, FT y (c) antocianos totales, AT; durante la temporada de cosecha 2018. Los colores de los puntos representan valores de IC, FT y AT. Fuente: Mapas generados por Orange 3, con datos propios..... 177

Figura 34. Resumen de datos estadísticos básicos de la tabla 13. se muestra la curva de distribución de las variables en estudio AT (Antocianos Totales), FT (Fenoles Totales) e IC (Índice de Color), muestra además los valores. Fuente: Mapas generados por Orange 3, con datos propios. .... 179

Figura 35. Comparación temporadas 2017 y 2018 respecto de los resultados de índice de color. Los gráficos muestran un despliegue de las distintas fechas y del resultado de los valores entre el coeficiente de determinación  $R^2$ , respecto de (a) el error medio absoluto; (b) el factor de inflación de varianza y (c) significancia de las variables..... 183

Figura 36. Comparación temporadas 2017 y 2018 respecto de los resultados de fenoles totales. Los gráficos muestran un despliegue de las distintas fechas y del resultado de los valores entre el coeficiente de determinación  $R^2$ , respecto de (a) el error medio absoluto; (b) el factor de inflación de varianza y (c) significancia de las variables..... 184

Figura 37. Comparación temporadas 2017 y 2018 respecto de los resultados de antocianos totales. Los gráficos muestran un despliegue de las distintas fechas y del resultado de los valores entre el coeficiente de determinación  $R^2$ , respecto de (a) el error medio absoluto; (b) el factor de inflación de varianza y (c) significancia de las variables..... 186

<i>Figura 38. Comparación entre NDVI y mapas de estimación de índice de color, fenoles totales y antocianos totales. Primera temporada, año 2017.....</i>	<i>192</i>
<i>Figura 39. Comparación entre NDVI y mapas de estimación de índice de color, fenoles totales y antocianos totales. Segunda temporada, año 2018.....</i>	<i>193</i>
<i>Figura 40. Mapas de clasificación no supervisada, método K-means, temporada 2017.....</i>	<i>198</i>
<i>Figura 41. Mapas de clasificación no supervisada, método K-means, temporada 2018.....</i>	<i>199</i>

## Índice de Tablas

- Tabla 1. Índices espectrales utilizados en el estudio, obtenidos desde álgebra simple de bandas espectrales de imágenes Sentinel-2. .... 106*
- Tabla 2. Valores de muestreo de °Brix en campo, en las temporadas 2017 y 2018..... 118*
- Tabla 3. Valores de muestreo de pH en campo, en las temporadas 2017 y 2018..... 119*
- Tabla 4. Evaluación de Polifenoles poscosecha realizada en vino. Índice de color (Absorbancia); fenoles totales (mg/l equivalente a ácido gálico) y antocianos totales (mg/l equivalente de Malvidina). 125*
- Tabla 5. Valores promedio de píxel por cuartel. Fecha de adquisición: 20 de marzo de 2017. IC: índice de color; FT: fenoles totales; AT: antocianos totales; B3 a B12: bandas Sentinel-2; índices espectrales: Clorofila, GNDVI, NDMI, NDVI..... 128*
- Tabla 6. Comparación de la evaluación enológica por cuartel en las temporadas de cosecha 2017 y 2018..... 136*
- Tabla 7. Identificación de mapas de clasificación no supervisada K-Means, para buscar zonas de características homogéneas entre las variables pre y poscosecha. Las variables pre cosecha corresponden a °Brix y pH y las poscosecha corresponden a IC (índice de color), AT (antocianos totales) y FT (fenoles totales). .... 142*
- Tabla 8. Funciones lineales de normalización aplicadas a las variables en estudio. Temporada 2017 y 2018 ..... 144*
- Tabla 9. Tabla de datos para el área de interés, correspondiente al 03 de abril de 2017. Muestra el identificador del polígono para cada*

<i>cuartel; el valor promedio de °Brix y pH alrededor de la muestra y el promedio de píxeles dentro del buffer de 15 metros alrededor del punto de muestreo. ....</i>	<i>158</i>
<i>Tabla 10. Cuadro resumen coeficiente de determinación <math>R^2</math> para cada fecha, temporada 2017 y 2018 vs variables incluidas en los modelos. ....</i>	<i>164</i>
<i>Tabla 11. Ecuaciones de los modelos de regresión para °Brix y pH en las temporadas 2017 y 2018.....</i>	<i>165</i>
<i>Tabla 12. Comparación de coeficientes de correlación y coeficientes de determinación entre °Brix y NDVI en las temporadas 2017 y 2018. ....</i>	<i>171</i>
<i>Tabla 13. Tabla de datos correspondiente al 4 de abril de 2018. Muestra el nombre del polígono que identifica el cuartel; el valor índice de color (IC), fenoles totales (FT) y antocianos totales (AT) y el promedio de píxeles dentro del buffer de 15 metros alrededor del punto de muestreo.....</i>	<i>180</i>
<i>Tabla 14. Tabla resumen coeficiente de determinación <math>R^2</math> para cada fecha, temporada 2017 y 2018, versus las variables incluidas en cada modelo.....</i>	<i>188</i>
<i>Tabla 15. Ecuación del modelo de regresión para índice de color, fenoles totales y antocianos totales en las temporadas 2017 y 2018... </i>	<i>189</i>
<i>Tabla 16. Centroides de clases. Comparación de centroides comparados por temporada y variables en estudio. Primera comparación referida a las variables precosecha, segunda comparación referida a variables poscosecha y tercera comparación a la unión de todas las variables.....</i>	<i>195</i>



# Capítulo I

## Introducción

### 1.1 Contexto de la Viticultura en Chile

La historia vitivinícola en Chile se remonta a la llegada de los primeros conquistadores españoles, quienes introdujeron las primeras cepas viníferas en torno a las décadas de 1540 y 1550 (Aguilera, 2015). Estas cepas se adaptaron fácilmente al variado clima chileno (Müller, 2004) y a su diversa geomorfología, la cual influye en la caracterización geográfica del país y determina la diversidad de climas y suelos presentes en sus valles vitivinícolas. Estas condiciones únicas muchas veces irrepetibles son responsables de la riqueza y diversidad de los valles vitivinícolas que existen en la actualidad (Aguilera, 2019).

Desde 1980 hasta la actualidad la industria vitivinícola chilena ha tenido un destacado y continuo progreso. Este desarrollo se ha enfocado en mejorar la calidad del vino para ajustarse a las exigencias de los mercados de

destino. Las principales viñas de Chile han incorporado y adaptado tecnologías más innovadoras y han impulsado una profesionalización integral del proceso productivo para generar vinos de mayor calidad que puedan satisfacer el mercado internacional (Mora, 2019).



Figura 1. Principales exportadores de vino, según la OIV 2022, en Millones de Hectolitros: España (23.0); Italia (22.2); Francia (14.6); Chile (8.7); Australia (6.3); Sudáfrica (4.8); Alemania (3.7); Argentina (3.3); Estados Unidos (3.3); Portugal (3.3). Fuente: Elaboración Propia.

Según los últimos datos en superficie presentados por la Organización Internacional de la Viña y el Vino (OIV) en abril de 2022, la superficie vitícola mundial estaría sobre los 7,3 millones de hectáreas, considerando la superficie de uvas destinada a vinificación, uva de mesa y uvas pasas (Buzzetti, 2018). Actualmente Chile es el primer exportador de vinos de



América y cuarto exportador mundial de vinos (figura 1), siendo superado sólo por países europeos de vasta trayectoria en materias vitivinícolas, como Francia, España e Italia (OIV, 2022).

En cuanto a exportación, superficie plantada y volumen de producción, Chile se mantiene consistentemente en el selecto grupo de los diez principales países, según lo reportado por la OIV. Este posicionamiento destacado se muestra en los gráficos de la figura 2, donde se observa que Chile se mantiene en el rango de los primeros diez lugares en diversas categorías vitivinícolas. En la figura 2a, se destaca que Chile ocupa la cuarta posición a nivel mundial como exportador de vinos, siendo precedido por España en primer lugar, Italia en segundo y Francia en tercero. Entre los países latinoamericanos, Argentina figura en la octava posición. La figura 2b, que representa la superficie de viñedos destinada a la producción de vino, Chile se posiciona en el octavo lugar a nivel global. Asimismo, en el ranking de los principales productores de vino del mundo (figura 2c), Chile se encuentra en el sexto lugar, consolidando su presencia significativa en la industria vitivinícola internacional.

La superficie total de viñas para vinificación ocupa actualmente más de 200.000 hectáreas, las cuales tienen un potencial de producción de vino cercano a los 12 millones de hectolitros. Esta superficie se encuentra principalmente en las regiones del Maule, O'Higgins y Metropolitana, concentrando más del 88,8% del total nacional (figura 3) (SAG, 2021).

Modelación de parámetros de calidad de uva vinífera con índices satelitales provenientes de imágenes de resolución espacial media para el manejo diferenciado de viñedos en Chile

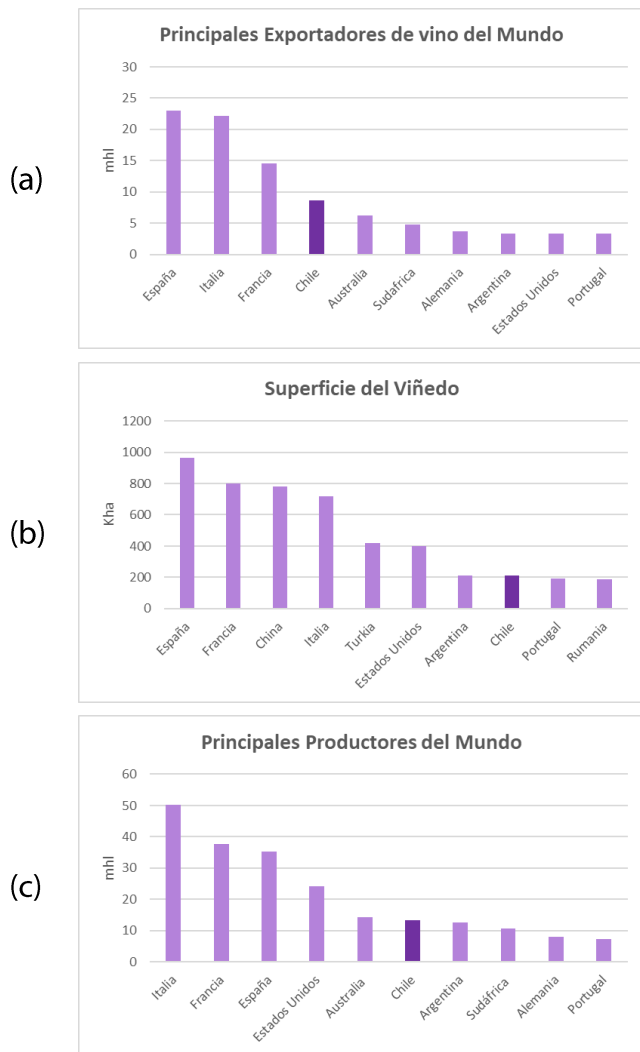


Figura 2. Estado del sector vitivinícola en el mundo. Ranking de los primeros 10 países exportadores (a), en superficie plantada (b) y Volumen de Producción (c). Información entregada por la OIV abril de 2022. Fuente: Elaboración Propia.

Chile se ha consolidado en el mercado internacional del vino. En el año 2019 las exportaciones de vino embotellado chileno alcanzaron una cifra impresionante: 444 millones de litros por un monto total de 1.444,9 millones de dólares. La figura 4, es un ejemplo de estos números, los cuales reflejan un crecimiento total de 228% en volumen y 238% respecto del precio del vino en los últimos 20 años. Es relevante señalar que, aunque el precio promedio de las exportaciones de vinos chilenos no ha tenido una variación particularmente significativa, pese a que el propósito de la industria ha sido exportar cada vez una mayor proporción de vinos de mejor calidad y, por lo tanto, de precio más elevado. En este contexto, cabe mencionar que entre los principales mercados que demandan vinos chilenos se encuentran países de gran relevancia como: Brasil, China, Estados Unidos y Reino Unido (Buzzetti, 2021).

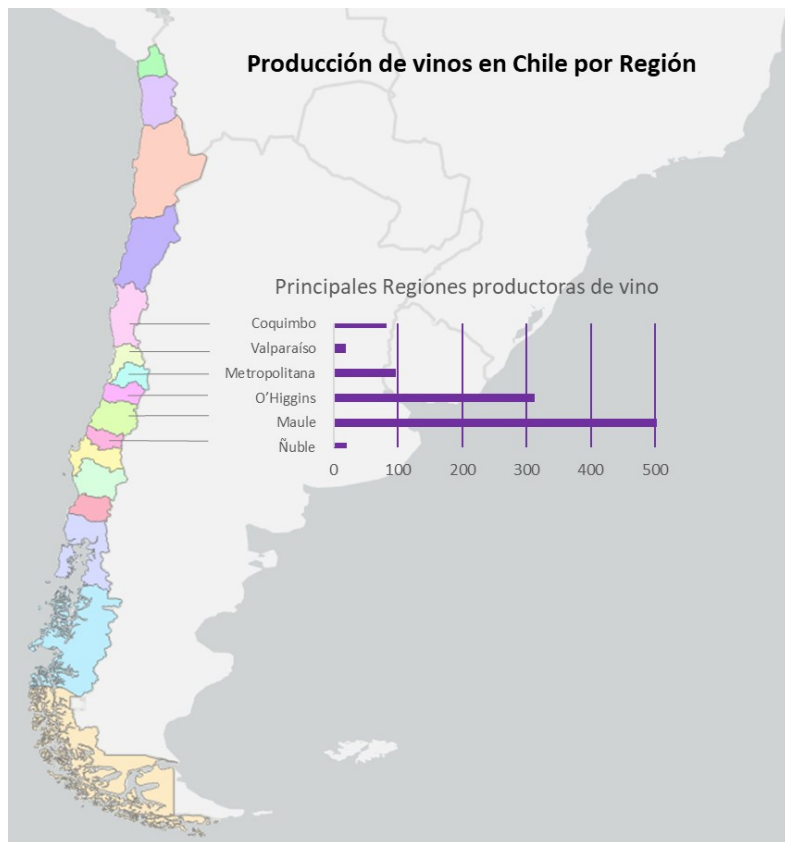


Figura 3. Producción de vinos en Chile por Región, en millones de litros, de acuerdo al censo realizado por el Servicio Agrícola y Ganadero (SAG), año 2020. Fuente: Elaboración Propia.

Según el Boletín de Vino de la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (Odepa) del Ministerio de Agricultura, Chile tiene potencial para producir 1.200 millones de litros en un año con buenas condiciones climáticas. El año 2021, Chile produjo 1.343 millones de litros, mayor en un 29,9 % al año anterior principalmente en las regiones de O'Higgins y del Maule (en el centro del país) (ODEPA, 2021).

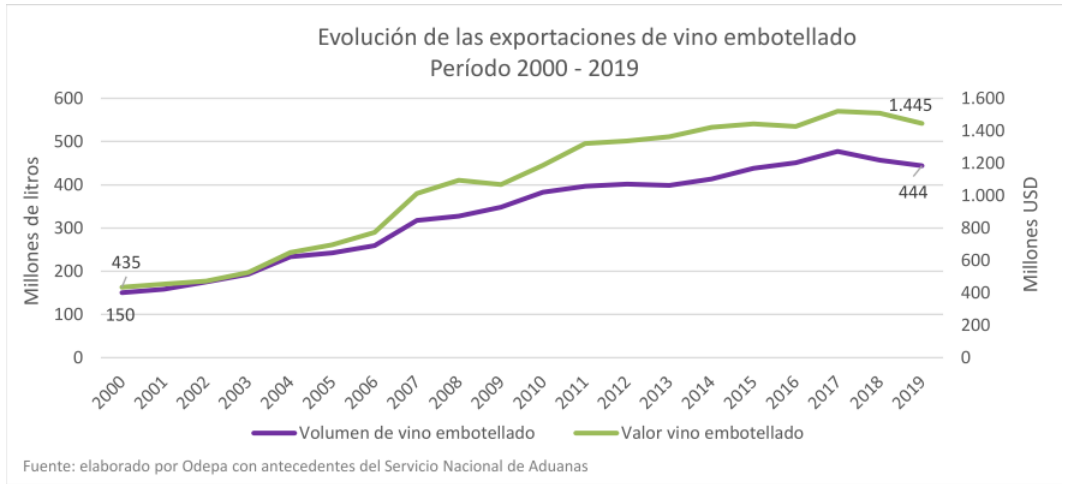


Figura 4. Evolución de las exportaciones chilenas de vino embotellado periodo 2000-2019. Fuente Odepa (Buzzetti, 2021)

## 1.2 Factores que influyen en la calidad del vino

La producción de vinos de calidad requiere una adecuada selección de la fruta que será incorporada al proceso de vinificación (Pérez Quezada, 2006). Las características de las uvas dependen de la variedad y de las condiciones edafoclimáticas (Duran y Trujillo, 2008); uvas cosechadas en distintas zonas del viñedo pueden producir vinos con sabores diferentes, incluso cuando factores biológicos como la variedad, el clon y el portainjerto son idénticos. La calidad de la uva, la madurez y los vinos resultantes están influidos por sutiles diferencias en las características físicas del viñedo, como el tipo de suelo, el microclima, la pendiente, la exposición, la capacidad de retención de agua del suelo y el drenaje (Johnson et al., 2001).

La figura 5 resume los distintos elementos y factores que influyen en la calidad final del vino, y que están integrados en el concepto de *terroir*, término que abarca el clima, el suelo, el paisaje, además de la gestión específica que sigue cada viñedo durante el proceso de elaboración del vino. Por tanto, una forma de expresar el *terroir* vitivinícola, es definirlo como un área geográfica única que abarca tanto los factores naturales como las prácticas vitícolas, este conjunto entrega un sello que influye en la tipicidad y calidad del vino.

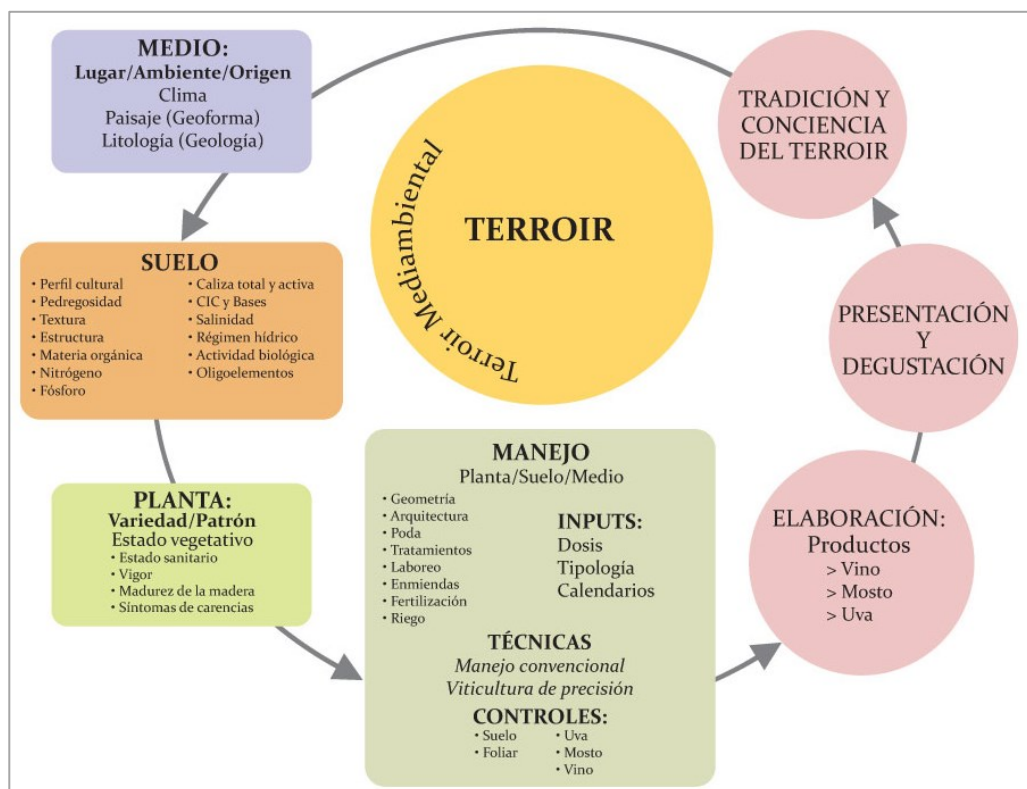


Figura 5. Factores y elementos del Terroir vitivinícola. Fuente: (Jorge Bohm, n.d.)

La Oficina Internacional de la Viña y el Vino (OIV) en su Resolución OIV/VITI 333/2010, define terroir vitivinícola como: “un concepto que se refiere a un espacio sobre el cual se desarrolla un saber colectivo de las interacciones entre un medio físico y biológico identificable y las prácticas vitivinícolas aplicadas, que confieren unas características distintivas a los productos originarios de este espacio. El terroir incluye características específicas del suelo, de la topografía, del clima, del paisaje y de la biodiversidad” (International Organisation of Vine and Wine, 2010).

El aroma y el sabor del vino son el resultado de una serie compleja de factores, entre los cuales el suelo es de gran importancia. No obstante, también son determinantes el clima, la geografía y la topografía, el material vegetal, la bioquímica, la química orgánica y, por supuesto, las prácticas culturales humanas (White, 2015). La figura 5 muestra cómo todos estos factores interactúan, por lo que es imposible considerar el óptimo para cada factor cuando se toman por separado. Así, por ejemplo, no es posible referirse al clima ideal para producción de vino de alta calidad sin tener en cuenta el tipo de suelo local y la variedad (Van Leeuwen, 2010).

Un grupo de investigadores, se propuso jerarquizar los conceptos involucrados en el *terroir* en el desarrollo de la vid y la constitución de las bayas. Se encontró que el efecto del clima fue el más relevante en la mayoría de los parámetros, seguido por el suelo y la variedad (Van Leeuwen et al., 2004). El clima influye sobre el estatus hídrico general, principalmente a través de la precipitación (particularmente en otoño e invierno en el caso de Chile), por otro lado, el suelo influye mediante su capacidad de retención de agua y, posiblemente, a través del acceso que proporciona a las plantas a la napa freática. En el momento de la cosecha, se observó que los niveles de °Brix y pH en la fruta eran más altos en suelos poco profundos. Sin embargo, no se encontró un efecto significativo del tipo de suelo en el rendimiento de la fruta (Trought et al., 2008).

En términos generales, los mejores suelos resultan ser aquellos en los que el déficit hídrico genera una desaceleración de la tasa de crecimiento de brotes, con una reducción en el tamaño de las bayas, y concentraciones altas de azúcar y antocianinas en la uva, lo que aumenta el potencial de calidad de la misma (Best et al., 2013; Van Leeuwen et al., 2004).

El cambio climático también ha contribuido a aumentar el proceso de maduración de las bayas de forma natural. Por lo tanto, los vinos presentan un mayor contenido de alcohol y también hay una tendencia al aumento del pH (Schultz y Jones, 2010). En general, para la mayoría de las regiones productoras de vino, la tendencia al calentamiento de las últimas décadas hasta la fecha ha dado lugar a vinos de mayor calidad, con mayores concentraciones de antocianos y polifenoles (Bonilla et al., 2015).

La evaluación de la calidad del vino se basa en análisis sensoriales y químicos. En la cata sensorial los indicadores de calidad del vino, como el color, la sensación en boca y el sabor, están influidos en gran medida, aunque no exclusivamente, por el perfil fenólico. Por lo tanto, los compuestos fenólicos se utilizan ampliamente para la evaluación de la calidad y la autenticidad del vino (Chira et al., 2011; Heras Roger et al., 2016; Lukić et al., 2019; Merkyte et al., 2020). Uno de los principales factores que afectan a la calidad del vino tinto es el grado de madurez fenólica de las uvas en el momento de la cosecha (Ribereau-Gayon et al., 2006). La mayoría de los atributos sensoriales del vino, como el color, el cuerpo y las sensaciones táctiles y gustativas, como la astringencia y el amargor, están directamente asociados a la composición de antocianinas, la cual está fuertemente relacionada con la madurez (Canals et al., 2005; Kontoudakis et al., 2011).

La madurez de la uva se puede considerar desde dos puntos de vista: madurez fisiológica o tecnológica. La madurez fisiológica ocurre durante el invierno cuando las semillas adquieren su capacidad germinativa. La



madurez tecnológica está relacionada con el tipo de vino. Después de la pinta el contenido de azúcares aumenta y el de ácidos disminuye, lo cual se determina a través de la medición de azúcares (que darán el alcohol probable) y de ácidos. Estos compuestos varían rápidamente a partir de la pinta. A modo de ejemplo, si se desea elaborar un vino con gran contenido de alcohol la madurez óptima se obtendrá cuando las bayas posean una gran riqueza en azúcares (Sotomayor, 1984), en este punto resulta fundamental la temperatura debido a su influencia en la maduración de la uva (Jones et al., 2005). En efecto, la diferencia de temperaturas entre el día y la noche tiene gran influencia en este proceso, incluyendo a los aromas y la coloración (Tonietto y Carbonneau, 2004). El análisis de maduración ha sido un instrumento clásico para determinar la calidad básica de la uva (Martínez de Toda, 2011), la cual considera la concentración de azúcares y de ácidos orgánicos principales, como el pH extraído de la baya (madurez tecnológica). La madurez tecnológica se refiere básicamente a la madurez de la pulpa, pero no considera el hollejo de la baya, la pepita y el raspón, donde se concentran los compuestos fenólicos, elementos que también son considerados claves en la calidad final del vino. El nivel de acumulación y el momento de máxima concentración de dichas sustancias varían en función de diversos factores, como por ejemplo: variedad (diferentes variedades de uvas tienen diferentes perfiles de compuestos fenólicos), clima y *terroir* (juegan un papel importante en la maduración de la uva), año (precipitación acumulada), técnicas de cultivo (como orientación de plantación de las hileras y el manejo agronómico que permite mejoras en el sustrato y en el nivel hídrico), entre otros (Yuste, 2017). Asumiendo que el clima es un factor destacado en la síntesis de compuestos fenólicos, el microclima de la variedad que tenga la uva, será determinante para favorecer o dificultar la síntesis y la acumulación de los mismos, entendiendo que cada sustancia fenólica no tiene por qué responder de la misma manera a la variación de los diversos parámetros componentes del clima, o sea, temperatura, luz, humedad, etc. (Martínez de Toda, 2011).

El clima cumple un rol importante ya que de modificarse las condiciones climáticas de una región se podría alterar el equilibrio con el suelo y la vid (Bindi et al., 1996); situación que ha preocupado a diversos autores que afirman que, de continuar los cambios en el régimen de temperaturas y de precipitaciones, se podrían ocasionar alteraciones no sólo en la fenología de la vid, sino también en los patrones de enfermedades y plagas y en el potencial de maduración afectando, por tanto, al rendimiento de la vid y a la calidad de la uva (Schultz, 2000; Jones et al., 2005; Santos et al., 2013).

Se espera que el cambio climático implique riesgos importantes para la producción vitivinícola, y a su vez, nuevas condiciones climáticas podrían eventualmente favorecer el desarrollo de la vid en zonas donde actualmente no es posible su cultivo, lo que originaría una reconsideración de las áreas vitícolas en el futuro (Ruiz, 2017). Por ello es clave considerar medidas de adaptación – variedades y cambios de ubicación (Malheiro et al., 2010) - como estrategias de protección contra el cambio climático y la inclusión de prácticas enológicas que consideren los avances tecnológicos que pueden tener efectos positivos sobre la calidad del vino (Lobell et al., 2006).

### 1.3 Importancia de la cosecha diferenciada

La gestión vitivinícola moderna se basa en garantizar no solo que la fruta en el viñedo cumpla con ciertas condiciones, sino también que, dentro de una parcela cosechada, toda la fruta cumpla con las especificaciones de los expertos (Bramley et al., 2011), algo que normalmente no ocurre. Por ello, es fundamental una cosecha diferenciada, de acuerdo a variaciones observables en el vigor o desarrollo vegetativo de la planta, el rendimiento, propiedades de los suelos y/o parámetros de calidad de la uva o el mosto (Martínez-Casasnovas et al., 2010).

La búsqueda constante de mejorar el rendimiento de uvas de alta calidad se complica por la naturaleza altamente variable de los viñedos. Son importantes las técnicas que permiten caracterizar las áreas de estudio, ya sea para definir cuál es la zona en la que mejor se adapta un viñedo como para determinar la variabilidad intraparcularia. La variación estacional dada principalmente por el clima y las variaciones meteorológicas, hacen necesaria una zonificación climática vitivinícola para determinar en qué lugares del territorio se tiene la mejor idoneidad para el cultivo de la vid y optimizar la elección de variedades y sistemas de cultivo, enfocado a la calidad de la producción y tipificación de los vinos. Las variables más empleadas son las climáticas y bioclimáticas junto con las edáficas (Morales et al., 2006), ya que el suelo muestra una alta variabilidad espacio-temporal, afectando a la productividad y a la calidad de los cultivos dentro de un campo determinado (Mirás-Avalos et al., 2020). No existe un viñedo uniforme y, por tanto, el vigor de la vid, el rendimiento y la composición de la fruta, también son variables incluso cuando el viñedo está bajo un manejo uniforme convencional (De Bei et al., 2019).

En la viticultura de precisión, la capacidad de geolocalizar información, equipos o personas dentro de los viñedos es fundamental (Tisseyre et al.,

2007) y la teledetección, el sistema de posicionamiento global, los sistemas de información geográfica, el monitoreo y mapeo de rendimiento y el levantamiento de suelos de alta resolución (Yuste, 2013) permiten comprender y manejar mejor esta variabilidad, ya sea para reducir el consumo de insumos y tratamientos o para aprovecharlo a través de estrategias como la cosecha selectiva.

Conocer la variabilidad del viñedo es clave, ya que la producción de vinos de calidad reconoce que las parcelas no son uniformes y por tanto requiere tratamientos fitosanitarios diferenciados (Arnó et al., 2009), lo cual iría en directo beneficio de la calidad de la uva y en la rentabilidad del viñedo (Urretavizcaya et al., 2013). Para ello es fundamental la selección de la fruta que será incorporada al proceso de vinificación (Pérez Quezada, 2006) a partir de diferencias observables en el vigor o desarrollo vegetativo de la planta o parámetros de calidad de la uva o el mosto (Martínez-Casasnovas et al., 2010). Identificar la variabilidad intraparcelaria se hace fundamental durante la cosecha (Sun et al., 2017), debido a que mejora el rendimiento del viñedo y la calidad de la uva, reduciendo costos y el impacto ambiental (Khaliq et al., 2019; Pastonchi et al., 2020).

La productividad también ha sido evaluada de acuerdo a distintos factores: rendimiento (Pringle et al., 2003; Bramley y Hamilton, 2004; Bramley y Hamilton, 2008), vigor (Johnson et al., 2003; Acevedo-Opazo et al., 2008), topografía o factores de suelo (Bramley y Hamilton, 2007; Tisseyre et al., 2007; Trought et al., 2008; Bramley, 2010) y *terroir* (Van Leeuwen et al., 2004). Todos ellos marcados por la variabilidad espacial; de hecho, puede que la clave de la calidad del vino, esté en caracterizar adecuadamente las diferencias entre los vinos derivados de diferentes parcelas o diferentes áreas del mismo viñedo, entendiendo que los vinos finales se ven afectados por las decisiones de gestión implementadas en el viñedo y la comprensión de los efectos de la variación en las características biofísicas del viñedo (por

ejemplo, suelo, topografía) sobre la composición de la uva y el vino (Bramley et al., 2011).

La variabilidad en el viñedo es un problema estudiado ampliamente en Australia, Francia y España (Taylor et al., 2005; Arnó et al., 2005), Chile (Mashalaba et al., 2020), Nueva Zelanda (Trought et al., 2008) y Canadá (Reynolds y Rezaei, 2014), entre otros. Es precisamente la variabilidad intraparcelsaria la que justifica la búsqueda de metodologías que minimicen los tiempos de trabajo en campo y que permitan una predicción temprana de los lugares específicos de muestreo y diferenciación para vendimia. La teledetección ayuda en identificar la magnitud de la variabilidad intraparcelsaria, capturando completamente la variabilidad espacial de las condiciones de madurez (Sun et al., 2017), para justificar un manejo diferenciado agronómico tanto en la uva como en cosecha (Bramley, 2010). Se podría mejorar el rendimiento del viñedo y la calidad de la uva a través de un conocimiento adecuado de la variabilidad que existe en el viñedo para reducir los costos y el impacto ambiental (Khaliq et al., 2019; Pastonchi et al., 2020).

Las tecnologías de agricultura de precisión contribuyen a la consecución de estos objetivos, puesto que permiten un conocimiento más detallado de los sitios de producción, en términos de calidad y rendimiento, además de sus principales limitantes, especialmente edáficas, lo que permite focalizar mejor los manejos productivos y la cosecha, que finalmente se traduce en una mayor eficiencia productiva (Esser y Ortega, 2002).

## 1.4 Uso de la teledetección en la viticultura

En un contexto de creciente competencia en los mercados internacionales, se vuelve de suma importancia lograr mayores estándares de calidad en el viñedo. Esto ha llevado a una renovación de la viticultura, una revisión de las técnicas agrícolas (Matese y Di Gennaro, 2015) y la inclusión de innovación tecnológica (Fernández et al., 2011). En este contexto, desarrollar y utilizar herramientas de teledetección que permitan no solo mejorar la calidad de los productos, sino también aumentar la eficiencia, la productividad y la reducción de insumos es crucial, ya que permitiría obtener información de manera rápida, precisa, objetiva y no destructiva casi en tiempo real (Vélez et al., 2019). Estos conceptos y técnicas nos recuerdan el término Viticultura de Precisión (VP), un término que engloba el uso de una serie de tecnologías de la información que permiten comprender mejor la variabilidad en los sistemas de producción y utilizar este conocimiento para adaptar mejor los insumos a la producción. Bramley et al. (2003) describen la implementación de la viticultura de precisión como un proceso que comienza con la observación de los atributos del viñedo, seguida de la interpretación y evaluación de los datos recopilados, la implementación de un manejo específico (p. ej., riego, fertilización, poda u otro manejo del dosel, e incluso cosecha) y, finalmente, evaluación de la gestión implementada (Bramley et al., 2003).

Como muy bien plantean Tardaguila et al. (2021) el interés por publicaciones relacionadas con las prácticas vitivinícolas inteligentes lleva más de dos décadas y ha ido en constante aumento (Giovos et al., 2021). Se han publicado soluciones y metodologías para modernizar la viticultura con el uso de distintas herramientas y actuales tecnologías y plataformas terrestres y aéreas, aplicadas tanto a la salud y estado fenológico de la vid, como del *terroir* y las condiciones medioambientales (Tardaguila et al., 2021).

La revolución digital está transformando la agricultura mediante el uso de maquinaria, herramientas y tecnologías de la información y la comunicación (TICs) para mejorar la toma de decisiones y la productividad. El uso de GPS, teledetección, *big data*, inteligencia artificial, aprendizaje automático, robótica y el Internet de las Cosas (IoT), permiten el aumento del rendimiento, una reducción de costos y un menor impacto medioambiental. Las soluciones basadas en los datos están liberando el potencial de producción agrícola de forma sostenible y con eficiencia de recursos (Fountas et al., 2020). Se espera que la suma de estas nuevas técnicas tenga un efecto positivo en la calidad del vino, como apoyo a las dos etapas principales de su elaboración: en primera instancia definir una adecuada fecha de vendimia, que asegure acumulación de azúcar y acidez requeridas y, en segunda instancia, establecer una cosecha diferenciada de acuerdo a los diversos estados de madurez presentes en una parcela.

La teledetección cumple un rol fundamental también en la posibilidad de monitorear continuamente el impacto a largo plazo de las prácticas agrícolas y su huella ambiental en la viticultura. Esto es particularmente relevante para la industria del vino, ya que los viticultores enfrentan desafíos disruptivos causados por el cambio climático, la escasez de mano de obra y el aumento de los costos de producción. En los últimos años ha habido un considerable desarrollo y prueba de tecnologías digitales no invasivas, algunas de las cuales ya han demostrado una mejora en la forma en que se cultivan, gestionan y cosechan las uvas para producir vinos de calidad de manera respetuosa con el medio ambiente y económicamente sostenible (Tardaguila et al., 2021).

La teledetección cobra un rol interesante en la conservación del suelo y el agua en el viñedo, ya que es la principal fuente de obtención de un Modelo Digital de Elevaciones (MDE), el cual permite generar diversos productos para definir y simular parámetros como la pendiente, la orientación y el flujo de agua a través de la superficie del viñedo, el cual es el principal

impulsor de la erosión del suelo, así como también establecer la variabilidad espacial de la radiación solar, dependiente de la pendiente y la orientación (Bois et al., 2008).

Los MDE con alta resolución espacial ( $<1$  m/píxel) y alta precisión ( $<0,05$  m/píxel) se utilizan para comprender y explicar la variabilidad espacial de parámetros como el rendimiento, el vigor y el estado hídrico de la vid (Santesteban et al., 2011), los cuales proporcionan información básica para las investigaciones de delimitación de las zonas óptimas de maduración (Olsen et al., 2011) y de erosión del suelo (Martínez-Casasnovas y Sánchez-Bosch, 2000) producto de la topografía. Los levantamientos con drones (también conocidos como RPAS o sistemas de aeronaves pilotadas a distancia) y los levantamientos con escaneo láser, se pueden utilizar para capturar la morfología del terreno MDE en 2D o 3D. Sassu et al. (2021) distinguen cinco áreas de aplicación de las imágenes captadas desde Sistemas Aéreos no tripulados (RPAS) para la viticultura de precisión: técnicas de segmentación de hileras y detección de características del cultivo; monitoreo de la variabilidad del viñedo; estimación de la superficie y el volumen de las hileras; detección de enfermedades; creación de mapas de vigor y prescripción (Sassu et al., 2021).

Las tecnologías de teledetección, como satélites y vehículos aéreos no tripulados, se han utilizado ampliamente para revisar, evaluar y gestionar distintas zonas en los viñedos con el fin de mejorar la calidad del vino (Johnson et al., 2001; Martínez-Casasnovas et al., 2012; Ammoniacci et al., 2021). Esta gestión se enfoca en la variabilidad intraparcelaria, utilizada tanto en la determinación de madurez como en la estimación de compuestos fenólicos y color de las bayas en el momento de la cosecha (Lamb et al., 2004), mediante diversos factores buscados en la respuesta espectral del follaje.



Dentro de los índices más utilizados destaca el Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada (NDVI), el cual se ha relacionado linealmente con el área foliar (Johnson et al., 2003; Hall et al., 2003; Ballesteros et al., 2015; Kalisperakis et al., 2015), así como con la maduración de fruto (Martínez-Casasnovas et al., 2012), infestación y enfermedades (Mahlein et al., 2019), estatus hídrico (Cogato et al., 2019), características de fruta y calidad de vino (Cortell et al., 2005). Además, se ha utilizado en la gestión de modelos para estimación de rendimiento (Cunha et al., 2010; Sun et al., 2017; Di Gennaro et al., 2017; Di Gennaro et al., 2019), y como información base de maquinarias vendimiadoras (Martínez-Casasnovas et al., 2010). Recientemente se estudió el uso de imágenes Sentinel-2 para la evaluación del daño causado por heladas tardías y su tiempo de recuperación (Cogato et al., 2020), además de la comparación de NDVI desde imágenes Sentinel-2 respecto de las obtenidas para una misma área con equipos UAV (Di Gennaro et al., 2019), así como también la comparación de varios índices de vegetación, entre ellos el NDVI, proveniente de dos cámaras UAV, una multiespectral y otra hiperespectral (Filippo et al., 2022).

Sin embargo, en la revisión bibliográfica no se encontraron estudios que analizaran la relación entre el follaje y variables como la Composición Polifenólica (CP) y la Intensidad de Color (IC) medidos en vino. Los estudios observados, a diferencia de lo realizado en este estudio, se enfocan en mediciones realizadas en uva o mosto, en los cuales se ha relacionado el NDVI con diversos factores como: el contenido de antocianinas de las bayas (Hall et al., 2003); contenido de taninos (Cortell et al., 2005); estrés hídrico (Tsioukas et al., 2017); pH, polifenoles y color (Martínez-Casasnovas et al., 2010); algunos se centraron especialmente en la cosecha diferenciada o selectiva y su relación con diversos factores de calidad de vino (Johnson et al., 2003; Cunha et al., Silva 2010; Martínez-Casasnovas et al., 2010; 2012b; Sun et al. 2017), así como el contenido fenólico y color en uvas maduras (Lamb et al. 2004); otros estudios se enfocaron en los efectos del *terroir*, en

la maduración y composición de la baya (Edo-Roca et al., 2013) y las temperaturas en relación a la síntesis de antocianinas y flavonoles (Martínez-Gil et al., 2018). La utilización de imágenes satelitales para analizar variables claves en la calidad del vino, como acidez, contenido de azúcar y la concentración de polifenoles es un enfoque que, hasta ahora, no se ha abordado de forma exclusiva.

En los últimos años, la disponibilidad de datos gratuitos de satélites como los Sentinel-2 ha generado un mayor interés en su uso potencial en la viticultura (Atzberger, 2013; Khaliq et al., 2019; Sozzi et al., 2020), convirtiéndose en una solución atractiva para el monitoreo espacio temporal de muchos cultivos (Borgogno-Mondino et al., 2018), entregando información oportuna, sinóptica, rentable y repetitiva (Atzberger, 2013) y en el potencial que tiene su uso en operaciones de manejo de la vid, como el deshierbe y la poda (Devaux et al., 2019), visibilizando principalmente la variabilidad intraparcularia, la cual ha sido uno de los focos de la viticultura de precisión, debido a que las prácticas agrícolas se aplicaban tradicionalmente de manera uniforme (Bramley, 2010), con la misma intensidad o dosis en operaciones como poda, fertilización, riego o tratamientos fitosanitarios (Arnó et al., 2009).

El conocimiento del estado vegetativo de la vid dentro de un viñedo juega un papel clave en el manejo del dosel para lograr un equilibrio correcto de la vid y alcanzar el rendimiento y calidad final deseados (Di Gennaro y Matese, 2020). Por tanto, el desarrollo de sensores satelitales y la disponibilidad de imágenes de alta resolución espacial ha sido fundamental, permitiendo visibilizar la heterogeneidad intraparcularia tanto en el desarrollo de la vid como en el rendimiento, la cual influye en la calidad de la uva y en la rentabilidad (Urretavizcaya et al., 2013). Por ello, la identificación y la caracterización espacial de dicha variabilidad, la interpretación de su significado enológico, así como la posibilidad del manejo diferencial de dicha variabilidad, constituyen los principales

objetivos de la Viticultura de Precisión (Matese et al., 2015; Pastonchi et al., 2020).

La teledetección, en conjunto con prácticas clásicas, aún tiene mucho para aportar y potenciar en la viticultura. La determinación de la variabilidad de diversos parámetros de la viña es necesaria para comprender, monitorear e identificar zonas homogéneas para el manejo específico, como la aplicación de fertilizantes y riego a tasa variable o la cosecha selectiva, tareas que promueven una amplia reducción en consumo productos fitosanitarios y aumentan la calidad y rendimiento del viñedo.

## **1.5 Justificación de la investigación**

El vino constituye un elemento fundamental de la identidad cultural chilena (Biblioteca Nacional de Chile, 2015). La Biblioteca Nacional de Chile encargada de preservar y difundir el patrimonio bibliográfico y documental del país, cuenta con información relevante acerca de la historia del vino y su cultura. A través de seminarios y otras iniciativas, se promueve un espacio de reflexión en torno a este patrimonio, mientras que diversas entidades privadas se dedican activamente al desarrollo de la industria vitivinícola, buscando posicionar los vinos chilenos como líderes tanto en el mercado nacional como internacional. El gobierno también impulsa dicho objetivo a través de diversos organismos de estado, como por ejemplo el Ministerio de Agricultura a través de la Oficina de estudios y Políticas Agrarias (Odepa), creó la comisión Nacional de la Vitivinicultura, como una instancia de coordinación de agentes públicos y privados, cuyo fin es apoyar la innovación y fomentar la diferenciación de la industria del vino y mejorar su valor en el mercado con un enfoque hacia la pequeña agricultura y el Servicio Agrícola y Ganadero (SAG) a través de la Oficina Internacional de la Viña y el Vino (OIV), contribuye a este esfuerzo.

El creciente proceso de apertura comercial en Chile presenta al país el desafío de incorporarse de manera cada vez más intensa a las corrientes internacionales del conocimiento, el desarrollo de ciencia y tecnología, la transferencia tecnológica y la innovación (Conicyt, 2007). Actualmente, Chile cuenta con más de 20 centros de investigación que desarrollan líneas de trabajo en vitivinicultura, radicados en universidades e institutos de investigación públicos o privados. En este contexto, se enfoca el apoyo recibido por el Centro de Observación de la Tierra, Hemera, de la Universidad Mayor cuya línea de investigación "Seguridad Alimentaria y Agricultura de Precisión" tenía hasta hoy un espacio sin explorar en el manejo de cosecha diferenciada en el viñedo.

Mediante esta investigación se buscó aprovechar la ventaja de la periodicidad de adquisición de las imágenes y la disponibilidad de datos para encontrar relaciones en bandas e índices del espectro electromagnético a partir de imágenes satelitales gratuitas y que pudieran estimar variables asociadas a la calidad de vino, como indicadores clave de la madurez y del vino producido. Este enfoque permitiría aproximarse hacia una vendimia selectiva, acerca la tecnología a productores de distintas categorías y promueve la adopción de prácticas innovadoras en el sector vitivinícola chileno.

## **1.6 Esquema de tesis**

Esta investigación está organizada en 6 capítulos que trazan un recorrido desde la introducción hasta las conclusiones. El Capítulo I establece el contexto de la viticultura en Chile, además de examinar detalladamente los factores determinantes para la calidad del vino, poniendo especial énfasis en la cosecha diferenciada y el papel crucial que desempeña en este proceso. Asimismo, se introduce de manera significativa el uso de la teledetección en la viticultura, sentando las bases para comprender su relevancia en la investigación. La hipótesis y los objetivos se describen en el capítulo II, los cuales sientan sus bases en el contexto detallado en el capítulo previo. El tercer capítulo se dedica al análisis exhaustivo de los materiales y datos utilizados, profundizando en el ciclo de la vid, la climatología específica de la región de estudio y la recolección de datos tanto previos como posteriores a la microvinificación. Por su parte, el Capítulo IV detalla meticulosamente la metodología empleada, destacando la caracterización del vigor de la vegetación mediante el análisis espectral de las imágenes Sentinel 2, así como la obtención de variables precosecha y poscosecha. Los hallazgos obtenidos se presentan en el Capítulo V, donde se analizan en profundidad las relaciones entre las variables de calidad y los índices espectrales, culminando en la obtención de modelos finales significativos para el estudio. Finalmente, el Capítulo VI no solo resume las contribuciones destacadas de la investigación, conservando un apartado destinado a discusión y conclusiones, sino que también identifica posibles direcciones futuras para la exploración en el campo de la viticultura y la teledetección. En este último capítulo, se incluye el ítem correspondiente a las referencias bibliográficas que apoyan este estudio.

## 1.7 Publicaciones

Este trabajo de investigación es la suma de acciones que se resumen en el siguiente apartado:

Entre los años 2017 y 2018, se produce la primera etapa correspondiente a la obtención de los datos de campo. Fue necesario de forma previa la labor de establecer contacto con una viña interesada en el estudio, la alianza se realizó con Viña Montes, quien facilitó la realización de los ensayos y obtención de datos de campo previos y poscosecha.

El total de datos de campo, obtenidos de la Viña se dividieron en dos partes, por una parte, la información, análisis y relaciones que se puede obtener con dos temporadas de información adquirida previo a la cosecha y por otra, lo obtenido en dos temporadas con la información poscosecha obtenida desde el vino producido.

Fredes, S., Ruiz, L.A., Recio, J.A. 2019. Modeling of Polyphenols and Color Index of Grape by Satellite Images, Colchagua Valley, VI Region, Chile. II Congreso en Ingeniería Geomática, 26-27 Jun., Madrid.

DOI: <https://doi.org/10.3390/proceedings2019019021>

Con la recopilación y resultados parciales de los datos precosecha, se participó en el Tercer Congreso de Ingeniería Geomática en julio del 2021. La publicación tuvo como título: "Modelación de °Brix y pH en uva vinífera mediante imágenes satelitales. Valle de Colchagua, Chile", cuya publicación electrónica se encuentra identificada como:

DOI: <https://dx.doi.org/10.4995/CiGeo2021.2021.12734>

Paralelamente en el mismo periodo fue publicado el artículo "Modeling °Brix and pH in Wine Grapes from Satellite Images in Colchagua Valley,

Chile” en la revista ***Agriculture***, revista científica internacional de acceso abierto, revisada por pares, publicada mensualmente en línea por MDPI e indexada en el primer cuartil (Q1) del JCR, en la categoría “Agronomy”. La identificación de este artículo corresponde a:

DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture11080697>

En diciembre 2021, se publicó el artículo correspondiente a los resultados parciales de los datos poscosecha obtenidos en 2 temporadas: “Modeling Phenols, Anthocyanins and Color Intensity of Wine Using Pre-Harvest Sentinel-2 Images”, en la revista ***Remote Sensing***, revista científica internacional de acceso abierto sobre la ciencia y la aplicación de la tecnología de teledetección, revisada por pares, publicada quincenalmente en línea por MDPI e indexada en el primer cuartil (Q1) del JCR, en la categoría “Geosciences, Multidisciplinary”. La identificación de este artículo corresponde a:

DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13234951>





# Capítulo II

## Hipótesis y Objetivos

### 2.1 Hipótesis

Partimos de dos premisas fundamentales de las cuales hay absoluta certeza i) la calidad del vino está estrechamente relacionada con la calidad del fruto y ii) el follaje del cultivo está relacionado con la interacción del suelo, el clima, las condiciones hídricas y las prácticas agronómicas, factores que impactan directamente en la calidad del fruto. Por lo tanto, parece lógico inferir que el estado del follaje puede proporcionarnos un indicador indirecto, pero fiable de la calidad que finalmente tendrá el vino.

Esta hipótesis sugiere que el uso de índices espectrales derivados de imágenes Sentinel-2 puede proporcionar información indirecta sobre dos aspectos cruciales: i) las variables que se miden directamente en la fruta, como el contenido de azúcar y el pH, y ii) la composición polifenólica y la intensidad de color que tendrá el vino producido.

Los modelos o aproximaciones que se puedan desarrollar a partir de las imágenes y que puedan predecir el comportamiento de la fruta y su calidad en función del estado del follaje, serían de gran beneficio en dos etapas del ciclo fenológico principalmente:

- a) **Post-envero**, para determinar la madurez del cultivo mediante el monitoreo continuo de la concentración de azúcar en la baya (°Brix) y su acidez (pH). Esto proporcionaría ventajas significativas al conocer la distribución espacial y cartografiar la variabilidad del cultivo de la vid, lo cual potencia la vendimia selectiva y permite determinar el momento óptimo de cosecha de los distintos cuarteles.
  
- b) **Vendimia**, permite identificar la variabilidad de la parcela y las posibles zonas de maduración. Esto supondría una mejora significativa en la producción y calidad del vino al evitar la mezcla de diferentes calidades de fruta y permitir una vinificación más específica y adecuada según las características de cada zona.

## **2.2 Objetivos**

### **2.2.1 OBJETIVO GENERAL:**

El objetivo general de esta tesis es la obtención de modelos que permitan aproximar ciertos parámetros de calidad de uva vinífera, como son °Brix y pH, y del vino generado a partir de esa uva, como son el índice de color, el contenido de antocianinos totales y de fenoles totales, mediante el análisis de índices y variables espectrales derivados de imágenes satelitales Sentinel-2 obtenidas previas a la cosecha. Se espera que estos modelos, extrapolados en toda la superficie de trabajo a la misma resolución espacial que las propias imágenes, permitan realizar una gestión diferenciada del cultivo de vid con el fin de mejorar la calidad de los vinos producidos.

Se aspira a que, con base en estas imágenes, sea factible proyectar indicadores precosecha, como la acumulación de azúcar (medida en grados °Brix) y el pH, así como parámetros poscosecha, como los compuestos fenólicos, que son cruciales para determinar las características sensoriales y la diferenciación entre marcas vinícolas. A través de esta metodología, se busca potenciar la gestión de los viñedos, ofreciendo información precisa para la vendimia, permitiendo una cosecha selectiva y más eficiente.

---

### 2.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

1. Identificar las variables espectrales (bandas o índices entre bandas) derivadas de imágenes Sentinel-2 que mejor responden a la predicción de las variables precosecha en el cultivo de la vid, en concreto °Brix y pH de los frutos, en el área de estudio.
2. Determinar los momentos óptimos en la adquisición y el análisis de las imágenes satelitales Sentinel-2 para realizar la estimación de las variables precosecha, °Brix y pH, en el cultivo de la vid.
3. Desarrollar y evaluar modelos que permitan aproximar las variables precosecha que proporcionan información sobre la calidad de la uva vinífera, °Brix y pH, a partir de los indicadores espectrales seleccionados.
4. Identificar las variables espectrales (bandas o índices entre bandas) derivadas de imágenes Sentinel-2 que mejor responden a la predicción de las variables poscosecha en el vino, como son el índice de color y las concentraciones de antocianos y polifenoles, relativas al área de trabajo.
5. Determinar los momentos óptimos en la adquisición y el análisis de las imágenes satelitales Sentinel-2 para realizar la estimación de las variables poscosecha en el vino, i.e., índice de color y concentraciones de antocianos totales y fenoles totales.
6. Desarrollar y evaluar modelos que permitan aproximar las variables poscosecha en el vino, i.e., índice de color y concentraciones de antocianos y polifenoles, a partir de los indicadores espectrales seleccionados.
7. Cartografiar y clasificar áreas, dentro de las parcelas de vid, con propiedades homogéneas en cuanto a las variables

analizadas, de forma que faciliten una vendimia selectiva y tratarse de forma distinta en la gestión del cultivo.

Para conseguir estos objetivos específicos, se han establecido una serie de acciones que se detallan a continuación:

- Monitoreo de madurez: determinar ubicaciones estratégicas para realizar muestreos de campo periódicos, centrados particularmente en el contenido de azúcar y su acidez, con el fin de determinar con exactitud la madurez de las uvas.
- Análisis satelital continuo: procesar las imágenes Sentinel-2 en momentos cercanos a las fechas de muestreo, con el objetivo de representar fielmente el estado y vigor del follaje del viñedo durante ambas temporadas de estudio.
- Análisis estadístico: desarrollar modelos que relacionen los índices espectrales, derivados de las imágenes Sentinel-2, con las variables de calidad del vino definidas por °Brix y pH, y los compuestos fenólicos derivados de la microvinificación.
- Análisis de fechas claves: analizar los datos para determinar la existencia de patrones repetitivos que permitan definir cuál es la etapa fenológica de la vid más propicia para la implementación de los modelos desarrollados. Esto permitiría que la predicción de las variables de calidad del vino se realice en momentos estratégicos, optimizando así la confiabilidad de los resultados.
- Modelización avanzada: explorar la viabilidad de establecer modelos consistentes y reproducibles que predigan las variables de calidad del vino, tanto en términos de madurez (azúcar y acidez) como de características organolépticas (polifenoles).

- Gestión agrícola: proporcionar a los viticultores herramientas basadas en la teledetección que les permitan realizar decisiones informadas sobre la gestión de sus viñedos, especialmente en el momento de la vendimia.

En esencia, este estudio pretende convertirse en un puente entre la teledetección y las prácticas tradicionales de vinificación, potenciando la calidad y eficiencia en la producción del vino.





# Capítulo III

## Materiales y Datos

### 3.1 Introducción

En este estudio, se analizaron datos de campo recolectados durante dos temporadas de cosecha de uva vinífera: 2017 y 2018. Los datos corresponden específicamente a la variedad de uva Cabernet Sauvignon, cultivada en dos lotes particulares, que se definen como grupos de cuarteles. A lo largo de ambas temporadas, se llevaron a cabo muestreos de campo de manera periódica, lo que permitió realizar un seguimiento exhaustivo del desarrollo de la vid, desde sus fases iniciales hasta la cosecha y el posterior proceso de vinificación.

Las actividades se centraron en dos lotes específicos, que corresponden a plantaciones maduras establecidas en los años 2007 y 2010. La elección de

estos dos lotes se realizó bajo la supervisión del agrónomo de la empresa Viña Montes, con el objetivo de garantizar la representatividad de la variedad Cabernet Sauvignon en base a las muestras analizadas. Además, se realizaron microvinificaciones, con el fin de determinar las características del vino producido, entender la evolución del viñedo y capturar la variabilidad del follaje en diferentes momentos del ciclo de la vid.

### **3.2 Área de estudio**

Viña Montes se extiende sobre una superficie de 720 hectáreas dedicadas al cultivo de la vid. La plantación objeto de este estudio, denominada Arcángel, se encuentra ubicada en Marchigüe, en el valle de Colchagua, Santa Cruz, VI región de Chile (ver figura 6). Arcángel abarca una extensión total de 499 hectáreas, con diversos lotes que incluyen diversas cepas, entre ellas Cabernet Sauvignon, Syrah, Carmenere, entre otras, además de distintas categorías de calidad.

La zona específica de interés para este estudio comprende 23 cuarteles, siendo cada cuartel un polígono que encierra un conjunto de hileras de una misma variedad vinífera. Estos cuarteles se dividen en dos conjuntos distintos: el primero consta de 12 cuarteles distribuidos en 13 polígonos, abarcando una superficie total de 64.8 hectáreas. El segundo conjunto comprende 11 cuarteles distribuidos en 12 polígonos, con una extensión de 71 hectáreas.

En la Figura 6, se presenta la ubicación general del área de estudio mediante tres cuadros informativos. A la izquierda, el cuadro superior ilustra la posición del área en América del Sur, mientras que el cuadro

inferior muestra su ubicación relativa, respecto a las divisiones político-administrativas de Chile. En el lado derecho, destaca el cuadro principal, que proporciona un detalle preciso de los cuarteles que conforman el área de interés. Aquí, se pueden identificar dos conjuntos distintos de polígonos, correspondientes a plantaciones establecidas en los años 2007 y 2010.

Los polígonos asociados a la plantación del año 2007 se representan en la figura 6 en color azul, ubicándose en el norte, mientras que el segundo grupo de cuarteles, correspondiente a la plantación del año 2010, se sitúa en el sur y se presenta en la figura en tono rojo. Ambos conjuntos de polígonos conforman la totalidad de los lotes, siendo cultivados exclusivamente con la variedad de uva Cabernet Sauvignon de la categoría Alfa. Esta categoría, considerada de calidad intermedia, representa la principal producción de Viña Montes.

La disposición de los lotes sigue un patrón de plantación de 2x1, que contribuye a optimizar la distribución de las plantas y facilitar las labores agrícolas. Este diseño organizado garantiza una gestión eficiente del viñedo, promoviendo condiciones propicias para el desarrollo saludable de las vides y la obtención de uvas de alta calidad.

Modelación de parámetros de calidad de uva vinífera con índices satelitales provenientes de imágenes de resolución espacial media para el manejo diferenciado de viñedos en Chile

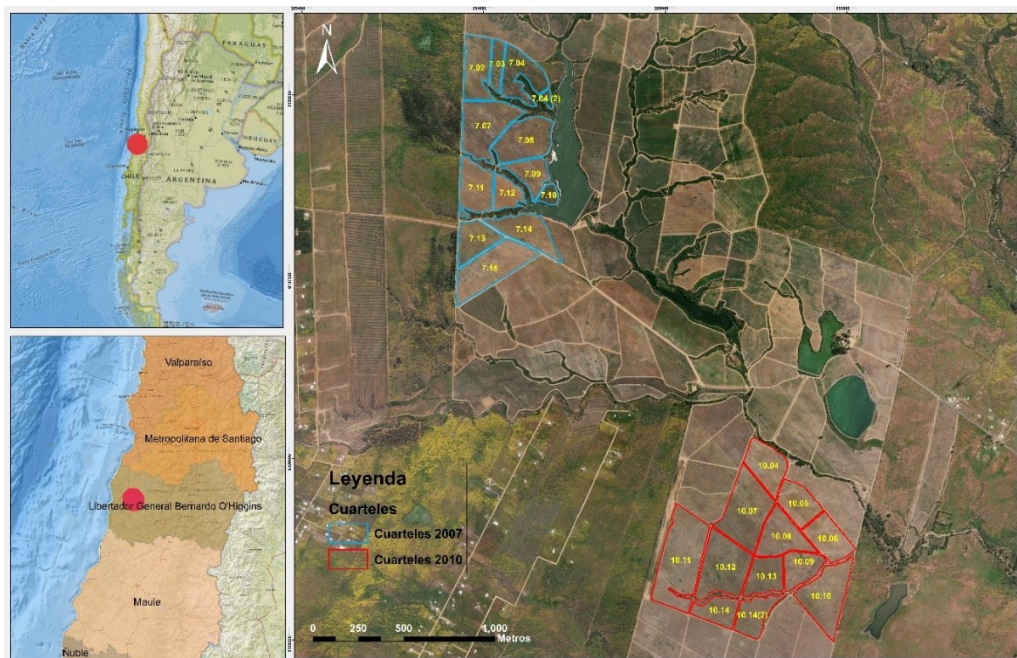


Figura 6. Mapas de ubicación general (izq.) y de emplazamiento de los cuarteles Cabernet Sauvignon (der.); polígonos cyan corresponden a plantaciones del año 2007 y polígonos rojos a plantaciones del año 2010. Imagen de Fondo: BaseMap ArcGIS, World Imagery. Fuente: Elaboración propia.

Las coordenadas en Proyección UTM, WGS 84 Huso 19S, que hacen referencia al centro de cada uno de los lotes son: Plantación 2007: ESTE: 254096,003m; NORTE: 6197606,610m; Plantación 2010: ESTE: 255503,426m; NORTE: 6195483,135m.

### 3.3 Ciclo de la vid y climatología de la zona

La vid es una planta perenne y leñosa, de hoja caduca que puede llegar a vivir entre treinta y cuarenta años, se desarrolla experimentando un ciclo vegetativo interanual y un ciclo anual propio, altamente influenciado por su entorno natural (Ezquerro, 2016). Los ciclos anuales están interconectados, ya que las condiciones de vegetación a lo largo de un ciclo, originadas tanto por el entorno natural como por la intervención humana, ejercen influencias significativas en los ciclos vegetativos subsiguientes.

El entorno, conocido como *terroir* es un concepto muy importante en viticultura ya que vincula los atributos sensoriales del vino con las condiciones ambientales en las que crece la uva. El *terroir* juega un papel determinante en la calidad y el estilo del vino, sin embargo, su estudio presenta un muy complejo desafío ya que involucra muchos factores: el suelo, las variedades de vid y las prácticas humanas como las técnicas vitícolas y enológicas, además del clima (Leeuwen et al., 2006).

Schultz et al. (2010) plantean que la vid es un cultivo extremadamente sensible al clima, siendo este un factor decisivo respecto de la idoneidad geográfica de su cultivo. De hecho, gran parte de la producción vitivinícola en el mundo, se desarrolla en climas de tipo mediterráneo, caracterizado por altas temperaturas en la época estival, una alta intensidad luminosa y niveles de humedad ambiente que disminuyen fuertemente a lo largo del día (Chaves et al., 1987), condiciones que coinciden en la zona de estudio, donde predomina un clima mediterráneo cálido (Uribe y Catalán, 2016) con una estación seca de seis meses y un invierno lluvioso con una precipitación total anual entre 400 y 600 mm. Sin embargo, es relevante señalar que las variables climáticas no son objeto de análisis en este estudio.

El ciclo vegetativo de la vid pasa por diferentes fases de orden relativamente constante. Se inicia cuando los brotes entran en crecimiento a principio de primavera (usualmente septiembre u octubre) y termina entre abril y mayo generalmente, tal como se muestra en la figura 7.

El ciclo de la vid comprende una serie de etapas que se describen a continuación:

- Brotación: Esta etapa marca el comienzo del ciclo anual de la vid. Bajo condiciones adecuadas de temperatura, las yemas de la vid comienzan a hincharse y finalmente se rompen, emergiendo los primeros brotes verdes. Este es un periodo crítico ya que las heladas tardías pueden dañar estos brotes tiernos.
- Desarrollo de hojas: Una vez que los brotes han emergido, las hojas comienzan a desplegarse y a crecer. Las hojas son esenciales para la fotosíntesis, que proporciona a la planta la energía necesaria para el crecimiento y desarrollo.
- Floración: Cuando la vid ha desarrollado suficientes hojas, comienza la floración. Las flores, que eventualmente se convertirán en uvas, aparecen en pequeños racimos. Esta etapa también es sensible a las condiciones climáticas, ya que el frío, el viento o la lluvia pueden afectar la polinización.
- Cuajado: Después de la polinización, las flores fertilizadas comienzan a desarrollarse en pequeñas bayas. Es el momento en el que la flor se transforma en fruto.
- Crecimiento de bayas: Durante esta fase, las bayas crecen en tamaño y comienzan a acumular agua, ácidos y azúcares. La vid requiere de suficiente agua y nutrición para un crecimiento saludable de las uvas.
- Envero: Es la etapa donde las uvas cambian de color y suavizan su textura. Las variedades tintas cambian de verde a rojo o púrpura, mientras que las blancas adoptan un tono amarillo o dorado. Las

uvas también comienzan a acumular más azúcares, mientras que la concentración de ácidos disminuye.

- **Maduración:** En este periodo, las uvas alcanzan su tamaño máximo y continúan acumulando azúcares. Los niveles de ácido disminuyen aún más y los compuestos fenólicos, que influyen en el color, sabor y capacidad de envejecimiento del vino, se desarrollan.
- **Cosecha:** Una vez que las uvas han madurado completamente, están listas para ser cosechadas. El momento exacto de la cosecha dependerá del tipo de vino que se quiera producir y de las condiciones climáticas específicas del año.
- **Agostamiento o dormancia:** Después de la cosecha, las hojas de la vid comienzan a caer y la planta entra en un estado de reposo o dormancia durante los meses más fríos. Durante este tiempo, la vid conserva sus recursos y se prepara para el próximo ciclo.

Cada una de estas etapas está influenciada por factores ambientales como la temperatura, el agua y la luz, y las decisiones tomadas por los viticultores en cada etapa pueden tener un impacto significativo en la calidad del vino producido.

El ciclo puede tener algunas variaciones que se ven influenciadas por diferencias en las condiciones de temperatura y precipitaciones (Pardo, 2016). Un aumento significativo en las temperaturas, sumado a una disminución en las precipitaciones, provocaría un mayor estrés hídrico en las plantas. Por otro lado, un incremento de las temperaturas promedio y la reducción de la oscilación térmica, influye en el aroma de los varietales y el color de los vinos. Así mismo, los otoños cada vez más secos y las lluvias ocasionales asociadas a eventos intensos, implicarían mayores requerimientos de riego para los viñedos (Giraldo, 2017).



Figura 7. Ciclo vegetativo de la Vid para el hemisferio sur. Adaptado de Bodegas de La Mancha. Fuente: adaptado de (Bodegas de la Mancha, 2021)

Las diferencias estacionales en las condiciones climáticas causan una marcada variación en el rendimiento de la vid (Zhu et al., 2020). Junto con la temperatura, el estado hídrico de las plantas es generalmente uno de los factores más críticos que afectan el equilibrio de crecimiento de la vid (Hunter y Bonnardot, 2002). El estudio de una larga serie de producción de vino (1932-2010) realizado por Santos et al. (2013), arrojó que altas precipitaciones y bajas temperaturas durante la brotación (octubre -



noviembre) y altas temperaturas durante la floración y el desarrollo de las bayas (diciembre) son generalmente favorables a una alta producción.

En Chile, el desarrollo de la vid, desde la brotación en octubre hasta la cosecha en abril, requiere una cuidadosa atención en las precipitaciones y su influencia en el ciclo fenológico de la vid. La figura 8 ilustra cómo la acumulación de agua caída en el año anterior puede afectar este ciclo. Al analizar la precipitación acumulada de mayo a octubre, los meses cruciales previos al desarrollo de la vid, se observa que en el año 2016 (cosecha 2017) se registraron 293,31 mm de precipitación, mientras que en el año 2017 (cosecha 2018) esta cifra se elevó a 639,84 mm. La segunda temporada de estudio experimentó una duplicación en la cantidad de precipitación acumulada con respecto al año anterior, resultado de un fenómeno climático natural en el océano Pacífico ecuatorial central conocido como El Niño Oscilación del Sur (ENOS).

El fenómeno de El Niño se manifiesta principalmente a través de un aumento en la Temperatura Superficial del Mar (TSM) y una disminución de los vientos alisios en el lado este del océano Pacífico. Estas condiciones anómalas generan precipitaciones intensas y cambios notables en el clima y las pesquerías, no solo en los países ribereños del Pacífico sudoriental, sino también en otras partes del mundo. Por otro lado, la fase inversa o fría de ENOS, conocida como La Niña, se caracteriza por TSM más frías de lo normal, una intensificación de los vientos alisios en el este del océano Pacífico y períodos de sequía (Maturana et al., 2004). Este análisis revela cómo las variaciones en los patrones climáticos, específicamente asociadas a ENOS, pueden tener un impacto significativo en las condiciones hídricas previas al desarrollo de la vid y, por ende, en su ciclo fenológico.

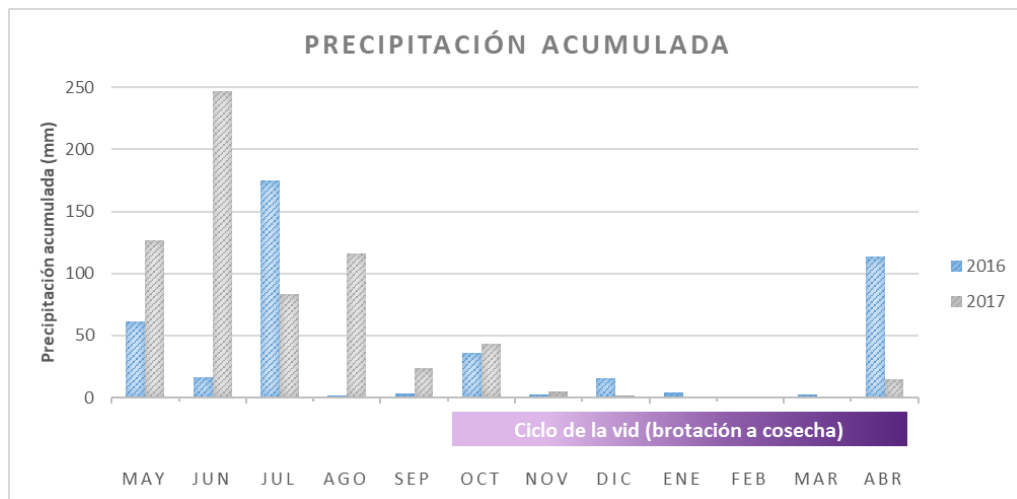


Figura 8. Precipitación acumulada años 2016 y 2017. Fuente: Elaboración propia.

Zhu et al. (2019) determinaron la influencia de la temperatura en la brotación, así como en el número y el peso de la baya. Además, identificaron la influencia de la radiación, la temperatura y la lluvia para explicar la variación en el rendimiento (Zhu et al., 2020). Actualmente existe una creciente preocupación por la relación entre región, clima y cultivo la cual se identifica con un rango óptimo de temperatura dentro del cual se pueden producir vinos de alta calidad que tienen aceptación comercial (Keller, 2010). Van Leeuwen et al. (2019) plantean que a medida que los climas regionales salen de estos rangos óptimos, la calidad del vino disminuiría. Para evitarlo, la única opción sería adaptarse, cambiando las estrategias de manejo agronómico para mantener la calidad de la fruta y el vino, o bien cambiando los cultivares a aquellos que se adapten mejor a una nueva norma climática más cálida (Van Leeuwen et al., 2019), ya que una redistribución de las regiones vitivinícolas sería catastrófica para numerosas economías regionales, no solo por el costo, sino también

porque se perdería el carácter distintivo que le otorga la identidad de una región al vino (Kurtural y Gambetta, 2021).

Las temperaturas desempeñan un papel importante en el desarrollo de la vid, y su impacto es notable, especialmente durante el verano del año de estudio, que abarca de enero a abril. La figura 9 muestra claramente cómo las temperaturas presentaron diferencias significativas entre las temporadas 2017 y 2018, con temperaturas más elevadas en la primera y un promedio de casi 2 °C más bajo en la segunda. Además, se observa que la radiación solar durante el año 2018 fue un 5% más baja en comparación con el año anterior.

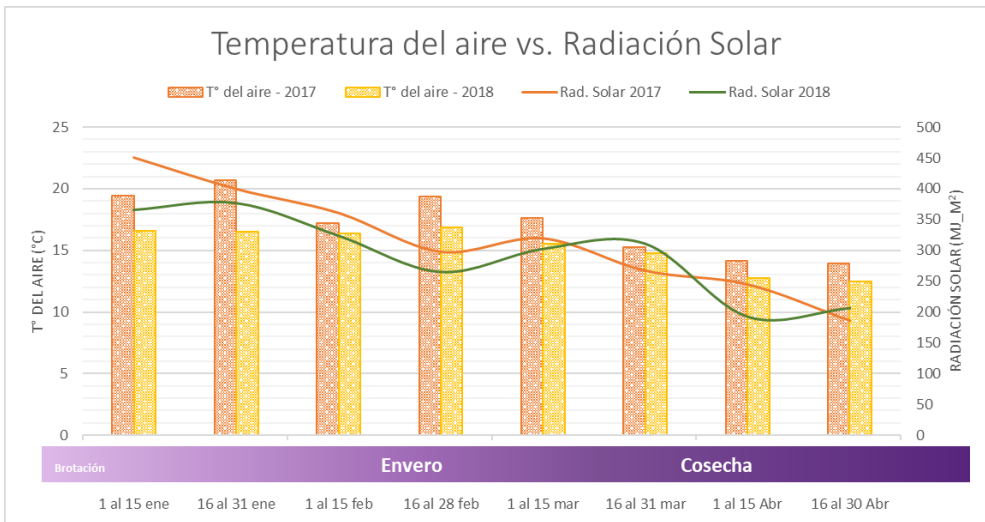


Figura 9. Gráfico de comparación de temperatura del aire vs. radiación solar durante las temporadas 2017 y 2018. Fuente: Elaboración propia.

## **3.4 Datos**

### 3.4.1 IMÁGENES SATELITALES

Durante las últimas décadas, el sector agrícola ha experimentado notables avances gracias a la utilización de imágenes satelitales con variadas resoluciones espaciales en una amplia gama de aplicaciones como el seguimiento del desarrollo fenológico del cultivo (Pantaleoni Reluyet al., 2022). El sector agrícola utiliza diversas tecnologías de teledetección, desde sensores en aeronaves no tripuladas de alta resolución a las imágenes de satélite, que proporcionan información para hacer frente a las incertidumbres derivadas de las variaciones de las condiciones meteorológicas y las estrategias de gestión del viñedo (Fountas et al., 2020).

La constelación Sentinel-2 está formada por 2 satélites de órbita heliosíncrona cuya resolución temporal es de 10 días por satélite o 5 en conjunto. Ambos satélites llevan un sensor de imágenes multispectrales (MSI) capaz de adquirir imágenes en 13 bandas espectrales, desde 433 nm hasta 2280 nm; con una resolución espacial que varía de 10 a 60 m. A pesar de ello muchas investigaciones se han enfocado en determinar los beneficios de estas imágenes frente a las imágenes de alta resolución espacial como las obtenidas desde aeronaves no tripuladas (Sozzi et al., 2020; Khaliq et al., 2019; Di Gennaro et al., 2019; Pastonchi et al., 2020)

La banda del rojo (665 nm) y del infrarrojo cercano (842 nm) son de particular interés para la aplicación agrícola, ya que permiten la generación de varios índices de vegetación a 10 m de resolución espacial (Sozzi et al., 2020).

La reciente disponibilidad de imágenes de Sentinel-2 podría verse como una oportunidad interesante para brindar un servicio asequible para monitorear el crecimiento de la vid a lo largo del tiempo. De hecho, los dos

satélites (2A y 2B) tienen características particularmente valiosas (ESA, 2015) como el período de revisita de 5 días que podría permitir la observación de cambios significativos en el crecimiento y monitoreo del dosel (Weiss et al., 2020); además de una difusión libre de imágenes, con múltiples niveles de corrección (atmosférica, ortorrectificación, máscaras de nubes, etc.) (Devaux et al., 2019). A pesar de las dificultades que presenta para diferenciar las hileras en el viñedo (Sozzi et al., 2020), la combinación de su resolución espacial, espectral y temporal lo convierte en una herramienta muy interesante para monitorear viñedos a gran escala (Devaux et al., 2019). La ventaja final de Sentinel-2 para el servicio operativo futuro es que podría ser de bajo costo ya que el acceso a las imágenes adquiridas es gratuito y abierto (Laroche-Pinel et al., 2021).

La teledetección desde imágenes ópticas puede proporcionar información de alta resolución espacial sobre la variabilidad del rendimiento de la vid (A Hall et al., 2002), la cual se puede identificar mediante índices de vegetación, entre ellos el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada), uno de los índices más utilizado en viticultura desde el año 2000 en adelante (Giovos et al., 2021), el cual ha sido ampliamente utilizado para evaluar las características del dosel, ya que se correlaciona bien con propiedades como el contenido de clorofila, la biomasa y el área foliar (Hansen y Schjoerring, 2003), así como el impacto de las series temporales del NDVI en las operaciones de gestión del viñedo, como el deshierbe y la poda (Tardaguila et al., 2021).

Se utilizó una serie de imágenes satelitales para caracterizar el comportamiento fenológico de la vid en las dos temporadas. Las imágenes satelitales se utilizaron con tres objetivos. El primero de ellos es caracterizar el comportamiento de la vegetación desde el inicio de la brotación de la vid (septiembre – octubre) hasta el final de la maduración de la uva en abril del año siguiente. Para ello se utilizó un conjunto de 16 imágenes de los años en estudio. El segundo objetivo es diferenciar las distintas etapas en las que

se tomaron las muestras de uva y con ellas generar la estimación de °Brix y pH. Finalmente, utilizar las bandas e índices espectrales para determinar modelos que permitan relacionar la concentración de polifenoles en vino producido con las imágenes satelitales.

Las imágenes utilizadas fueron obtenidas desde las plataformas Sentinel 2A y Sentinel 2B y se descargaron directamente desde la plataforma Copernicus Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>) con nivel de procesamiento 1C, las cuales fueron corregidas atmosféricamente para obtener reflectividades en superficie, mediante la aplicación Sen2cor en el entorno de SNAP.

La figura 10 muestra las fechas de adquisición de las imágenes Sentinel que se utilizaron en todo el estudio, durante las dos temporadas. Se marcan dos de los eventos del ciclo de la vid más relevantes, la brotación y el envero. El primero de ellos debido a que marca el inicio del periodo de crecimiento activo de la planta, saliendo de su fase de reposo invernal y volviéndose más susceptible a las heladas, lo cual podría tener implicaciones en la cosecha. El envero, por otro lado, tiene lugar en pleno verano, marcando el momento en que las uvas inician su cambio de color, siendo crucial monitorear su estado de maduración.

En ambas temporadas se utilizó un conjunto de imágenes que dieran cuenta del ciclo completo de la vid. Los puntos azules representan las imágenes de la primera temporada y los puntos naranjas los utilizados en la segunda temporada. La cuadrícula que identifica las imágenes utilizadas es: T19HBC, Proyección UTM WGS 84.

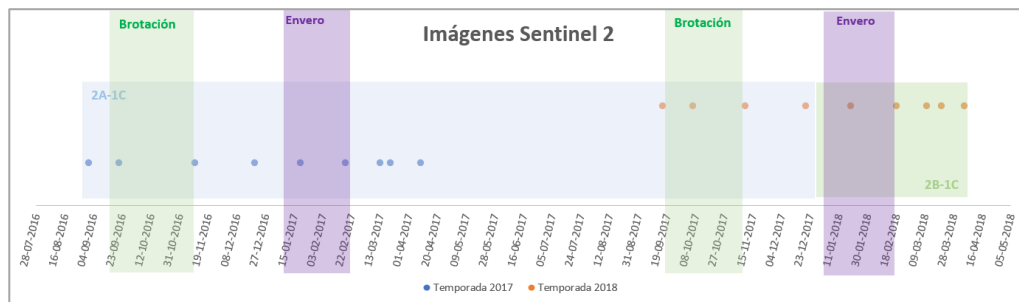


Figura 10. Fechas de adquisición de imágenes Sentinel-2 utilizadas para caracterizar el comportamiento vegetativo de la vid en ambas temporadas desde la brotación. Fuente: Elaboración propia.

### 3.4.2 DATOS DE CAMPO

La toma de decisiones respecto de qué actividades agronómicas es conveniente implementar en el campo tiene ciertas variaciones entre una viña y otra, por consideración administrativa más que agronómica, debido al costo adicional que tienen los estudios y análisis de suelo o foliar. En el caso de Chile, el Instituto de Investigaciones Agropecuarias establece un protocolo e identifica un manejo óptimo de acuerdo a la ubicación geográfica de la viña, basados en el manejo de suelo, control de malezas, nutrición, drenaje, riego, control de enfermedades, entre otras (Sotomayor et al., 2000).

Sin embargo, es importante señalar que Viña Montes tiene un protocolo agronómico que difiere de lo convencional. El análisis químico y físico del suelo no se realiza anualmente de manera sistemática, sino que se lleva a cabo cada dos años. Por ejemplo, mientras que la temporada 2017 incluyó un análisis de suelo, la temporada 2018, prescindió de este procedimiento. Esta práctica se fundamenta en que las condiciones nutricionales y de

materia orgánica tienden a mantenerse de forma relativamente constantes de un año a otro.

En contraste, el análisis foliar se realiza anualmente durante la fase de envero. El análisis foliar o químico de la planta es un método de diagnóstico esencial para evaluar el estado nutricional del cultivo e indirectamente también es un indicador de la fertilidad o estado óptimo del suelo. Esto implica que, ya sea que el suelo presente condiciones nutricionales adecuadas o se encuentre deficiente nutricionalmente, tales condiciones se verán reflejadas en el follaje. En otras palabras, el análisis foliar reflejará la salud y vigor del cultivo, ya sea con hojas robustas y sanas en suelos nutridos o en hojas menos vigorosas en suelos con deficiencia en nutrientes. En esta premisa se basa la estrecha relación que se establece entre la salud de la planta y la respuesta espectral que se obtiene de una imagen satelital multiespectral, en que la respuesta espectral del follaje es un indicador directo de la correlación existente entre la disponibilidad de nutrientes en el suelo y su concentración en las hojas de la planta (de Mello y Caione, 2012). De esta manera, la evaluación del estado nutricional del cultivo se traduce visualmente a partir de la información obtenida de las imágenes satelitales.

El envero marca un hito de máxima relevancia en el ámbito enológico, ya que, para el enólogo, es el punto de partida de la fase de maduración. Su duración es variable y puede ir de 20 a 50 días según la región, la variedad y el momento ideal de cosecha. A partir de este momento, el agua, los azúcares y los compuestos nitrogenados son transportados al grano. Las bayas comienzan a aumentar el peso y el tamaño, por acumulación de sustancias nutritivas (principalmente azúcares) y agua, alcanzando su tamaño máximo. Al fin de la etapa la semilla está apta para germinar, se le llama también madurez fisiológica (Catania y Avagnina, 2007).



En el protocolo establecido por Viña Montes, se lleva a cabo un análisis de uva semanal desde la fase de envero hasta justo antes de la cosecha. Aunque se sigue este régimen de forma consistente, no hay una ubicación fija para la toma de muestras y tampoco un patrón de revisión predefinido; de hecho, es el agrónomo quien, basándose en su experiencia e intuición, decide cuándo y dónde se recolectarán las muestras que son representativas de cada cuartel.

Es esencial destacar que la elección del lugar de muestreo se basa en criterios intuitivos y organolépticos, siendo una decisión guiada por la percepción sensorial y experiencia del agrónomo. Sin embargo, para los propósitos específicos de este estudio, se optó por una metodología más sistemática y controlada, implementando la toma de muestras de manera periódica y en una ubicación fija, tal como se describe detalladamente en la figura 11. Este enfoque ofrece una base más estructurada para la recopilación de datos, permitiendo una evaluación más precisa y comparativa de las variables en estudio.

En la figura 11, se presentan dos conjuntos de cuarteles que se distinguen por los años de su plantación. Las letras amarillas que aparecen dentro de cada polígono corresponden a los nombres o identificadores de cada cuartel, mientras que los puntos verdes indican la ubicación específica desde la cual se llevó a cabo el muestreo de campo. En detalle, la figura 11a muestra polígonos en tono azul, los cuales se sitúan más hacia el norte, mientras que la figura 11b muestra polígonos en color rojo, localizados más al sur.

Previo a cosecha se realizan los análisis de fruta, que varían alrededor de 2 meses antes de cosecha. El análisis o monitoreo se realiza de forma manual, esto quiere decir que se va directo a campo y se recolecta un determinado número de bayas, con el fin de conocer el estado de madurez de la fruta y el grado alcohólico probable, las variables que se analizan son: °Brix, pH,

Acidez Total y gasto NaOH. Sin embargo, este estudio solo considera la caracterización y estimación de °Brix y pH.

Definir cuándo y qué cuarteles serán cosechados se basa únicamente en la evaluación organoléptica que se realiza en terreno diariamente, tarea que toma entre 10 y 30 minutos por lugar de muestreo. Por tanto, en cada visita solo se toma una muestra que se espera sea representativa de la parcela completa. (Bramley, 2010).

Tal como se indicó previamente, la elección de la ubicación geográfica de las muestras de uva se basó en el conocimiento y la identificación de zonas históricamente críticas y homogéneas en términos de calidad de producción vinícola. Para lograr esto, se recurrió al conocimiento del técnico agrónomo de Viña Montes. Para determinar la ubicación precisa de las muestras se utilizó el NDVI histórico del mes de diciembre y el Modelo Digital de Elevaciones de la zona (MDE). Se establecieron zonas que compartieran características comunes respecto de la topografía y del vigor de follaje. Posteriormente, las muestras se distribuyeron de forma homogénea en el área de interés. De esta categorización se obtuvo la posición específica en la cual se ubicarían 15 muestras en 14 cuarteles. Cabe destacar que en el caso del cuartel 7.08 se tomaron dos posiciones de muestreo, cuyos valores fueron promediados, resultando con un total de 14 muestras para toda la zona.

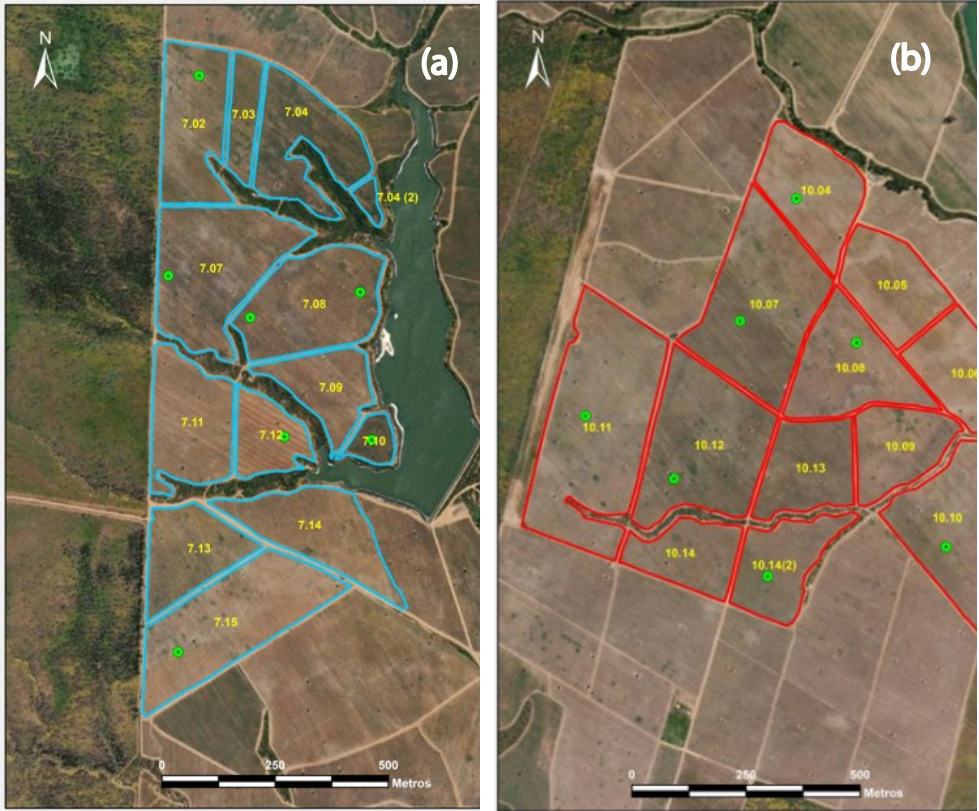


Figura 11. Distribución espacial para las muestras físicas de bayas (puntos verdes) realizadas durante el estudio en ambas temporadas. a) polígonos azules: plantación 2007; b) polígonos rojos: plantación 2010. Imagen de fondo distribución gratuita desde la plataforma ArcMap. Fuente: Elaboración propia.

Utilizando un GPS manual, se demarcó el punto central de cada sitio de muestreo en la viña. A partir de este punto de referencia central, se definió un radio específico de 15 metros, dentro del cual se llevaría a cabo la recolección sistemática de las bayas para su posterior análisis. Dicho procedimiento se utilizó consistentemente durante las dos temporadas de estudio. En cada sitio seleccionado, se asegura la recolección de un

promedio de 300 bayas por punto de muestreo, garantizando la representatividad y consistencia de las muestras en toda el área de estudio.

Durante el proceso de muestreo, se consideró un método sistemático que asegurara una recolección homogénea y representativa de bayas. Para lograrlo, se seleccionaron cinco bayas de cada racimo: tres bayas provenían de los hombros del racimo, es decir de la parte superior y más expuesta al sol; una baya desde el centro del racimo y otra de la parte inferior. Esta selección se realizó con el propósito de que la muestra sea representativa de las variaciones naturales inherentes a un racimo. Esta metodología considera las posibles variaciones en madurez y exposición solar capturando la diversidad de condiciones presentes en la vid, asegurando la validez y fiabilidad de los datos recopilados durante el proceso de muestreo.

---

#### 3.4.2.1 DATOS PREVIOS A COSECHA: °BRIX Y PH

El análisis de la fruta tiene como fin determinar la madurez fenólica de la uva. El contenido de azúcar, al igual que la acidez, es altamente utilizado por los enólogos como índice de cosecha (Castro, 2005). El análisis de la fruta es fundamental, pero no es lo único determinante en la calidad del vino. Es posible encontrar vendimias con una relación azúcar/acidez total aceptable, pero que generan vinos con carácter vegetal, astringentes y diluidos (Jofré, 2004).

La madurez óptima es aquella que permite obtener el mejor vino posible de un cuartel determinado. Por lo tanto, la madurez con que se coseche la uva es un factor fundamental que determinará la calidad del vino. Sin embargo, la madurez no es un estado fisiológico preciso, por ejemplo, las

semillas alcanzan la madurez fisiológica en pre-envero, cuando las antocianas están siendo biosintetizadas (Jofré, 2004).

Los °Brix se definen como la medida de sólidos solubles (principalmente azúcares, incluyendo pigmentos, glicerol, pectinas, taninos, ácidos y sus sales) por 100 g de mosto. Considerando que en la uva los azúcares representan cerca del 98% de los sólidos solubles, esta medida indica además la madurez de la fruta y su potencial de producción de alcohol (Jofré, 2004).

El color de las uvas tintas comienza a cambiar cuando la baya inicia su maduración, simultáneamente con la acumulación de azúcares (Peña, 2005), la cual aumenta en forma continua a medida que avanza la madurez. La acumulación fisiológica de azúcar en la uva generalmente se detiene al alcanzar niveles de 25-26 °Brix. Cualquier incremento posterior se atribuye a la pérdida de agua en la baya durante la sobremadurez (Jofré, 2004). Es por esta razón que el muestreo de la fruta se realiza después de la etapa de envero.

La concentración de azúcares determina el potencial grado alcohólico que se puede derivar de la fruta. Por lo tanto, bajo condiciones ideales de vinificación, altas concentraciones de azúcar se traducen en un vino con mayor contenido alcohólico, por ejemplo, para obtener vinos con 13 grados de alcohol aproximadamente es necesario que las bayas alcancen de 23 a 24 grados Brix (Programa Territorial Integrado, 2010). Este balance entre azúcares y acidez es fundamental en el proceso vitivinícola. Conforme progresa la maduración, los niveles de azúcares se elevan significativamente, mientras que la acidez tiende a decrecer, siendo este cambio atribuido a la degradación de los ácidos presentes (Coombe et al., 2000).

Para cuantificar la concentración de azúcar, se utilizó un refractómetro con compensación automática de temperatura, rango 0-32% °Brix, con el cual

se prensa una baya sobre el visor del refractómetro, tal como se muestra en la figura 12. El refractómetro es una herramienta muy fácil de llevar a terreno, que contiene en su interior un prisma que permite medir el índice de refracción de un fluido, teniendo en cuenta que, a mayor densidad del líquido, mayor será su refracción. El refractómetro está graduado en su interior con una escala convertida a grados Brix. En este caso, a partir del índice de refracción podemos conocer la concentración de azúcar (medida en grados Brix) de la muestra, ya que un índice de refracción de 1,3403° equivale a un 5% de azúcar.

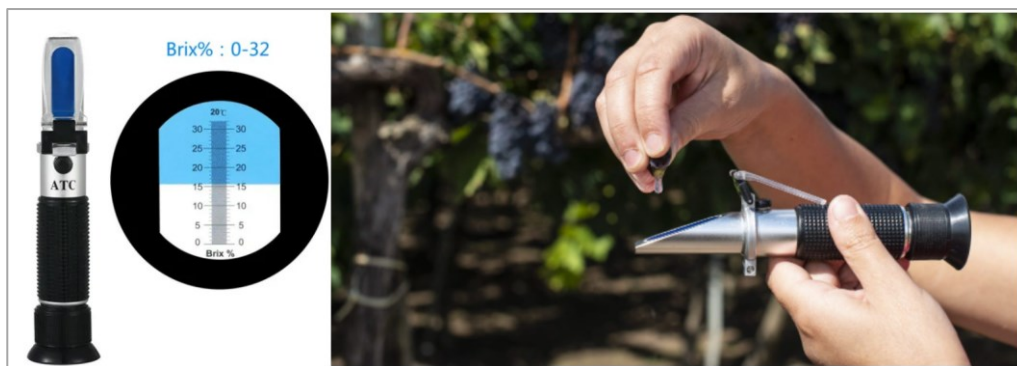


Figura 12. Refractómetro de laboratorio para medir contenido de azúcar en la uva. Fuente: Adaptado de (Kalstein, n.d.)

Para garantizar la representatividad del muestreo, es esencial seleccionar bayas de diversas zonas dentro del área de muestreo. Para un correcto procedimiento, es necesario limpiar cuidadosamente la superficie del visor antes de realizar la siguiente muestra, con el fin de asegurar que las mediciones sean fiables.

La interpretación final de los resultados se deduce del promedio obtenido de todas las muestras recolectadas. En la figura 13, se aprecia un esquema de los pasos detallados del proceso de muestreo de °Brix en campo, descrito a continuación:

1. **Selección de uvas.** Se utilizan bayas de distintos racimos dentro del radio de muestreo, que sean representativas de todas las condiciones visibles de madurez.
2. **Evaluación del mosto.** Se presan las uvas seleccionadas y se coloca una muestra del mosto. También es posible realizar diversas mediciones en el área a evaluar, se considera el promedio de las muestras
3. **Refracción del mosto.** Se coloca el mosto en la superficie del prisma, se cierra la tapa formando una capa uniforme que cubra toda la superficie, se mira a través del refractómetro con la luz de sol de frente
4. **Limpieza del refractómetro.** Se realiza con agua destilada para limpiar el zumo y papel absorbente para secar el visor entre cada muestra.

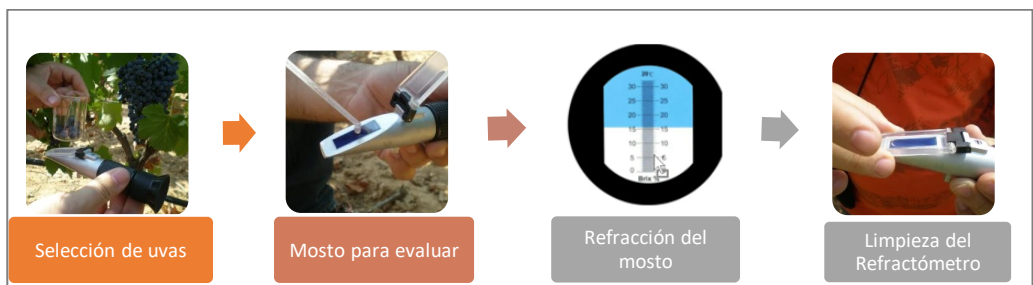


Figura 13. Secuencia y descripción del muestreo en campo de °Brix. Fuente: Esquema creado por elaboración propia, imágenes adaptadas desde: (Aprende a Catar Vinos, 2005)

El pH refleja la concentración de iones hidrógeno libres y se emplea como indicador de la acidez (Castro, 2005). Este parámetro es esencial en los análisis enológicos básicos debido a su notable impacto en diversas características del vino, ya que ejerce influencia sobre la presencia de microorganismos, el matiz del vino, el sabor, el potencial redox, sobre la razón sulfuroso libre/ sulfuroso combinado, sobre la susceptibilidad del fosfato de hierro a enturbiar, entre otros (Jofré, 2004).

El manejo adecuado de la acidez y el pH es de importancia fundamental, ya que en última instancia determina la calidad de los vinos (Forino et al., 2020). El pH de un vino está estrictamente entrelazado con el producto microbiológico y estabilidad fisicoquímica, ya que afecta la selección de microorganismos, así como algunas reacciones químicas cruciales, que incluyen el equilibrio del dióxido de azufre (Comuzzo y Battistutta, 2018). También, la acidez y el pH juegan un papel importante en las propiedades sensoriales y equilibrio de los vinos (Picariello et al., 2019). En los últimos años, los cambios climáticos y la búsqueda de un estilo de vino caracterizado por taninos “dulces” y estabilidad de color (para cumplir con las expectativas del consumidor), determinaron el aumento promedio del pH de los vinos tintos con respecto a los valores normalmente detectados hace algunas décadas (Comuzzo y Battistutta, 2018).

El pH es una medida esencial en enología, proporcionando una perspectiva clara sobre el grado de acidez o de alcalinidad de una disolución, en una escala que va desde el 0 hasta el 14. Un pH de 7, representa el equilibrio y se denomina neutro. Los valores más cercanos a 0 indican una acidez más pronunciada y los más cercanos a 14 indican que esa solución es más alcalina o básica. Pequeñas variaciones del pH influyen las características sensoriales del vino, impregnando a ciertos vinos de una característica única. Para la medición de la acidez total, se utiliza un método basado en la neutralización de los ácidos del mosto, para lo cual se utiliza un pH-metro.



El grado de acidez total influye en las características organolépticas del vino. En el contexto de vinos tintos, esta acidez no solo influye en su perfil sensorial, sino que también desempeña un rol importante en la determinación de su coloración, ya que, a pH más ácidos, las antocianinas, compuesto fenólico responsable entre otras, de la pigmentación del vino tinto, se manifiestan en sus matices más rojizos (Programa Territorial Integrado, 2010); es importante subrayar que el pigmento de las uvas tintas está afectado no solo por la acidez, sino que también por el pH de las uvas. De hecho, las bayas que presenten una acidez moderada a alta serán de color rojizo y brillante. En contraste, bayas que se presentan con baja acidez y alto pH tenderán a ser azuladas y oscuras (Castro, 2005).

---

### 3.4.2.2 DATOS POSCOSECHA: ANTOCIANOS TOTALES, FENOLES TOTALES E ÍNDICE DE COLOR

Viña Montes realiza un proceso mixto de cosecha. De forma manual se realiza la cosecha de aquellos cuarteles que son identificados históricamente como de mejor calidad. En cambio, los cuarteles identificados de menor calidad se cosechan de forma mecanizada. Pero esta diferenciación no es estricta y puede contar con algunas modificaciones, por tanto, se define como artesanal ya que se decide en el transcurso del proceso. Las zonificaciones predefinidas de un cuartel son evaluadas semanalmente tras el envero, periodo de desarrollo en que las uvas cambian de color y comienza la maduración, con el fin de medir el contenido de azúcar y pH, los parámetros más comunes en los que los viticultores se basan para determinar la madurez, lo que permite aproximar cuándo realizar la vendimia (Lima, 2015). El proceso de maduración es clave para disminuir la acidez, aumentar la concentración de azúcar y

metabolizar compuestos que producen color, sabor, aroma y sensación en boca.

Los datos obtenidos para este estudio provienen de la micro vinificación de los cuarteles identificados en la figura 11. La micro vinificación permite producir vino a pequeña escala. Aproximadamente 1000 kg de uva por cada micro vinificación, los cuales son molidos y unificados, para ingresar al proceso de fermentación alcohólica. Durante la fermentación los azúcares se transforman en alcohol y el hollejo tiñe el mosto de rojo. El proceso de fermentación genera calor por la gran actividad que desarrollan las levaduras mientras transforman el azúcar en alcohol, por lo que es importante mantener una temperatura estable, para que puedan actuar las levaduras. Cuanto más azúcar contenga el mosto, más calor se producirá en la fermentación. El gas carbónico que se genera durante la fermentación empuja los hollejos hacia arriba formando en la superficie del depósito el sombrero (pasta de hollejos y pepitas). El mosto almacenado en contenedores se "pisonea". El pisoneo tiene como fin llevar el sombrero hasta el fondo del contenedor con el fin de que pueda fomentar la extracción de compuestos fenólicos del vino. Este procedimiento se realiza 3 veces al día, sin revolver, solo se hunde hasta el fondo del contenedor, lo cual mejora el proceso de fermentación ya que permite homogeneizar el azúcar, levaduras y temperaturas (más altas arriba, más bajas al fondo del contenedor). El proceso de fermentación termina cuando se alcanzan 2 gramos de azúcar por litro. Luego se pasan a barricas, idealmente deben ser de acero inoxidable, si son de roble, se utilizan barricas de cuarto uso, para tener una menor intervención (menor aporte de aromas y compuestos fenólicos).

Luego pasa a la fermentación maloláctica, la cual se realiza en un lugar calefaccionado, para aumentar la rapidez de la fermentación. Este proceso es provocado por bacterias (no por levaduras) y durante la cual el ácido málico del vino se transforma en ácido láctico (más suave, untuoso y fino).

Posteriormente se inicia el sulfitado, este proceso consiste en añadir anhídrido sulfuroso al vino. Este es el encargado de impedir que el vino se oxide, tiene un papel bactericida y cuida el envejecimiento del vino en el tiempo. Luego se realiza el análisis de compuestos fenólicos.

La evaluación de la calidad del vino se basa en análisis sensoriales y químicos. En la cata sensorial, los compuestos fenólicos poseen un papel crítico debido a su contribución a la calidad organoléptica del vino como el color, la astringencia y el amargor (Hornedo-Ortega et al., 2020). Por lo tanto, los compuestos fenólicos se utilizan ampliamente para evaluar la calidad y la autenticidad del vino (Heras Roger et al., 2016; Chira et al., 2011). La comprensión de la relación entre la calidad de un determinado vino y su composición fenólica sigue siendo uno de los principales retos de la investigación enológica, por ejemplo, la concentración de antocianinas fue propuesta por Picarello et al. (2012) como una herramienta analítica para la certificación de autenticidad. El vino es por tanto un elemento complejo, debido a la variabilidad polifenólica que puede presentar la uva, influida por factores de maduración, genéticos o ambientales, entre otros. La mayoría de los componentes fenólicos que se encuentran en el vino proceden de la uva (Gabrielyan y Kazumyan, 2018), es por ello que es importante enfocarse en tener uva de calidad. Sin embargo, la estabilidad y concentración de polifenoles se ve afectada durante el proceso de vinificación (fermentación alcohólica y maloláctica) y el envejecimiento del vino con o sin contacto con la madera produce un sinnúmero de reacciones que dan lugar a complejas transformaciones de los polifenoles (Hornedo-Ortega et al., 2020).

En el vino tinto, los taninos y las antocianinas son las clases fenólicas más importantes. Los taninos contribuyen a la sensación en boca de los vinos, pero también forman polímeros pigmentados en asociación con las antocianinas para proporcionar los pigmentos estables necesarios para dar al vino tinto su estabilidad de color a largo plazo (Vidal et al., 2004; Wrolstad

et al., 2005). Los antocianos son los responsables directos del color rojo azulado de la piel de las uvas tintas y naturalmente del color del vino tinto. Los fenoles son responsables del color, la astringencia y el amargor del vino tinto, contribuyen al perfil olfativo, sirven como importantes depósitos de oxígeno y como sustratos para reacciones de pardeamiento (Zoecklein et al., 2013). Dado que las antocianinas se localizan en el tejido de la piel de la mayoría de los cultivares de uva, la fermentación y la maceración (procesos en los cuales se utiliza la piel) tienen un efecto importante en la cantidad de antocianina presente en el vino final (Kennedy, 2008).

La concentración de fenoles de la uva aumenta durante el desarrollo de la baya y los taninos aumentan hasta el envero (Downey et al., 2003). A partir del envero, las antocianinas se acumulan en la baya y aumentan durante la maduración del fruto. Existe evidencia que sugiere que las antocianinas pueden disminuir al final del desarrollo de las bayas (Kennedy, 2002).

Como antecedente adicional y tangente al estudio, es interesante mencionar que los polifenoles ejercen efectos favorables sobre la salud humana, como la inhibición de la aterosclerosis (Gabrielyan y Kazumyan, 2018), además de propiedades antioxidantes y anticancerígenas (Chen et al., 2016; Amararathna et al., 2016). Los flavonoides parecen abordar la acción neuroprotectora en enfermedades neurodegenerativas mediante diferentes mecanismos de acción, mejorando y promoviendo la memoria, el aprendizaje y las funciones cognitivas (Zbarsky et al., 2005).

En los vinos tintos, el color es uno de los principales parámetros cualitativos. Por un lado, representa el primer factor organoléptico que percibe el degustador, y por otro, se han determinado altas correlaciones positivas entre el color y la calidad global del vino (Jackson et al., 1978; Casassa y Sari, 2006). Las principales fuentes de color rojo en los vinos provienen de las antocianinas o de sus derivados adicionales que se extraen o forman durante el proceso de vinificación (Wrolstad et al., 2005; Busse-Valverde et

al., 2011; Gabrielyan y Kazumyan, 2018). El color del vino no solo provee información sobre posibles defectos, el tipo o el estado de evolución de éste, sino que tiene una importante influencia en la aceptabilidad (Casassa y Sari, 2006); incluso el precio del vino se asigna no solo por su grado alcohólico como antes, sino también por la intensidad de su color, por tanto, es de interés el conocimiento y posible control de los factores que inciden en este parámetro (Esparza et al., 2006).

Debido a la amplia diversidad química de los compuestos fenólicos, los fenoles totales en el mosto y los vinos generalmente se presentan en unidades arbitrarias de un estándar fenólico, como la cantidad de ácido gálico necesaria para producir la misma respuesta analítica o equivalentes de ácido gálico (Zoecklein et al., 2013), tal como se realizó en este caso. Al medir compuestos fenólicos con espectrofotómetros no se miden compuestos específicos, sino que se miden compuestos totales, los cuales se expresan en base a los compuestos específicos que más se repiten entre los fenoles y los antocianos. Se utilizó un espectrofotómetro Unicam Helios Gamma 9423 1000E para medir tanto índice de color como los compuestos fenólicos en general.

El método utilizado para medir fenoles totales se basa en la medición de absorbancia a 280 nm (realizando una curva de calibración con ácido gálico). El procedimiento es el siguiente:

Preparación de la solución de ácido gálico:

- Pesar 25 mg de ácido gálico
- Agregar un par gotas de ácido fosfórico (para mejor disolución)
- Llenar hasta 100 ml con agua destilada

- De esa solución tomar 10 ml y diluir hasta 25 ml con agua destilada

#### Procedimiento de medición

- Preparar un blanco usando solo agua
- Diluir 1 ml de muestra de vino en 50 ml de agua destilada
- Medir la absorbancia de la muestra y del blanco a 280 nm, utilizando las cubetas de cuarzo

#### Construcción de la curva de calibrado

- Preparar las siguientes diluciones de ácido gálico en agua destilada:

<b>H2O (ml)</b>	<b>Ácido gálico (ml)</b>	<b>Concentración Ácido gálico (mg/ml)</b>
5,0	0	0
4,8	0,2	0,004
4,6	0,4	0,008
4,4	0,6	0,012
4,2	0,8	0,016
4,0	1,0	0,020
3,8	1,2	0,024

- Medir absorbancia de cada dilución a 280 nm, usando cubetas de cuarzo.
- Graficar la concentración de ácido gálico vs. absorbancias para obtener ecuación de la recta.

El protocolo para medir antocianos totales utiliza un método basado en la decoloración y posterior medición de absorbancia a 520 nm. El procedimiento es el siguiente:

Preparación de los reactivos:

- HCL 2%: Mezclar 38 ml de HCl al 37% y llenar hasta 1 litro con agua destilada.
- Alcohol ácido: Combinar 4,4 ml de HCl 2% y 95 ml de alcohol. Luego, completar hasta 100 ml con agua destilada.
- Metabisulfito 15%: Pesar 15 gramos y añadir a 100 ml de agua destilada.

Procedimiento de medición:

- En un vaso precipitado, combinar 1 ml de muestra, 1 ml de alcohol ácido y 20 ml de HCl al 2%. Agitar para mezclar bien.

Llenar dos tubos de ensayo:

- Blanco: Añadir 10 ml de la solución preparada anteriormente + 4 ml de agua.
- Tratamiento: Añadir 10 ml de la solución preparada anteriormente + 4 ml de metabisulfito.
- Dejar reposar durante 20 minutos.
- Medir la absorbancia a 520 nm para ambos tubos.

Cálculo:

- Utilizar la fórmula:

$$AT \text{ (malvidina)} = (A - A_0) * 865 \text{ (mg/l)}$$

donde A es la absorbancia del tubo de tratamiento y A0 es la absorbancia del blanco.

El valor resultante se expresa en mg/l equivalentes de malvidina (EM).

### Protocolo Índice de Color

Las "características cromáticas" de un vino son su luminosidad y su cromaticidad. La luminosidad depende de la transmitancia y varía inversamente con la intensidad de color del vino. La cromaticidad depende de la longitud de onda dominante (que distingue la tonalidad) y la pureza.

Convencionalmente, y por comodidad, las características cromáticas de vinos tintos y rosados se describen mediante la intensidad del color y la tonalidad, de acuerdo con el procedimiento adoptado como método de trabajo (OIV, 2021).

El método para medir índice de color es mediante el método Glories el cual corresponde a la suma de sus absorbancias en varias longitudes de onda el cual se especifica en el compendio internacional de métodos de análisis de Vino (OIV, 2021):

### Principio del método

- Este método espectrofotométrico es aplicable a vinos tintos y rosados y permite determinar sus características cromáticas de la siguiente manera:
- Intensidad de color: Se calcula a partir de la suma de las absorbancias (o densidades ópticas) en las longitudes de onda de 420, 520 y 620 nm, utilizando un camino óptico de 1 cm.

### Procedimiento de medición

- Espectrofotómetro capaz de realizar mediciones en el rango de 300 a 700 nm.



- Cubetas de vidrio (pares emparejados) con caminos ópticos de 0,1, 0,2, 0,5, 1 y 2 cm.

#### Preparación de la muestra

- Si el vino presenta turbidez, es necesario clarificarlo mediante centrifugación.
- En el caso de vinos jóvenes o espumosos, se debe eliminar la mayor cantidad de anhídrido carbónico agitándolo al vacío.

#### Método de medición

- Elegir el camino óptico  $b$  de la cubeta de vidrio de manera que la absorbancia se encuentre entre 0,3 y 0,7.
- Utilizar agua destilada como líquido de referencia. Con una cubeta del mismo paso óptico  $b$ , ajustar el espectrofotómetro a cero en las longitudes de onda de 420, 520 y 620 nm.
- Luego, usando el camino óptico  $b$  adecuado, medir las absorbancias del vino en estas tres longitudes de onda.

#### Cálculos

- Para obtener las absorbancias con un camino óptico de 1 cm en las tres longitudes de onda mencionadas, dividir las absorbancias encontradas ( $A_{420}$ ,  $A_{520}$  y  $A_{620}$ ) por  $b$  (en cm).

#### Expresión de resultados

- La Intensidad de Color (IC) se calcula mediante la fórmula:

$$IC = A_{420} + A_{520} + A_{620}$$



# Capítulo IV

# Metodología

## 4.1 Introducción

Este capítulo se enfoca en el análisis de las variables precosecha y poscosecha y en cómo se relacionan con la información derivada de las imágenes satelitales considerando las bandas y los índices espectrales utilizados. La figura 14, ilustra este proceso integral, desde la recopilación de los datos de campo hasta el procesamiento de las imágenes satelitales, y el posterior análisis estadístico, en el cual se realiza el cruce de la información.

Modelación de parámetros de calidad de uva vinífera con índices satelitales provenientes de imágenes de resolución espacial media para el manejo diferenciado de viñedos en Chile

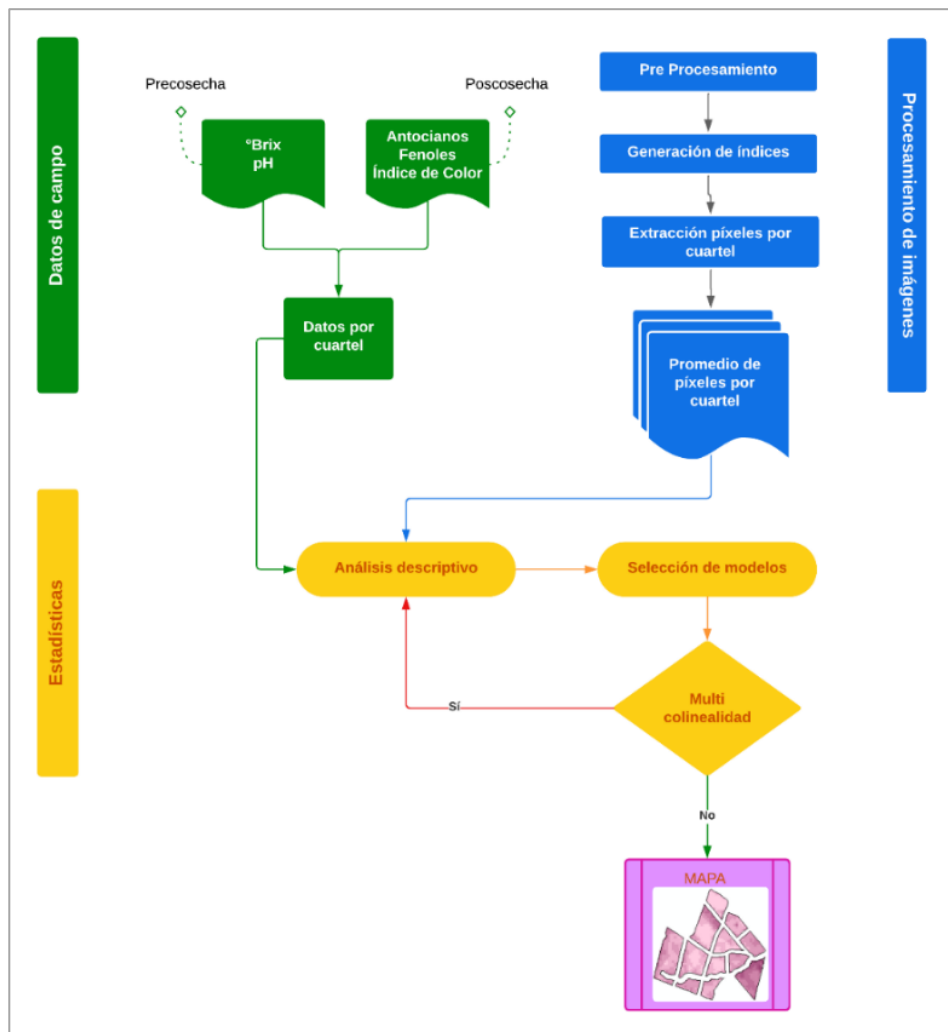


Figura 14. Esquema de los procesos realizados. Paralelamente a la obtención de datos desde campo, se escogen y procesan las imágenes satelitales Sentinel-2; luego se realiza un análisis descriptivo de las variables dependientes en relación a las independientes (bandas e índices espectrales) con el fin de obtener modelos con variables significativas que puedan determinar las variables pre y poscosecha. Fuente: Elaboración propia.

## 4.2 Índices espectrales

Los índices de vegetación se basan en la reflectancia que presenta un objeto frente a diferentes longitudes de onda. Para su cálculo se pueden utilizar imágenes de sensores activos o pasivos (Xue y Su, 2017). Los índices se generan al aplicar una ecuación matemática a las bandas de una imagen multispectral. Estos índices permiten analizar múltiples características de la capa superficial terrestre, siendo la vegetación uno de los aspectos destacados. Para evaluar estos índices es necesario combinar dos o más bandas espectrales mediante fórmulas matemáticas específicas, lo que da lugar al cálculo de un índice de vegetación (IV). Hoy día, la creciente disponibilidad de plataformas, tanto en términos de resolución como de bandas espectrales disponibles, ha aumentado el interés por la representatividad de los diferentes índices de vegetación (Romero et al., 2018).

La diferente longitud de onda de cada banda capta las propiedades reflectivas de la vegetación y con las combinaciones de bandas estas diferencias se hacen más intensas. La mayor diferencia en la reflectancia de la vegetación se da en el visible y el infrarrojo cercano (NIR). Por ello, un mayor número de IV utilizan combinaciones de bandas del visible e infrarrojo como el borde rojo o el infrarrojo cercano (Giovos et al., 2021) y proporcionan información sobre la biomasa, el área foliar y la salud de la planta, basándose en cálculos de diferentes bandas del espectro electromagnético (Hatfield et al., 2019).

Las aplicaciones de los IV en viticultura se extienden a muchos campos para estimar diversos parámetros de la viña, como la absorción de clorofila de las hojas (Gil-Pérez et al., 2010), indicador de salud y fenología (Cogato et al., 2019), pigmentos de las hojas o enfermedades específicas (Jiménez-Brenes et al., 2019).

Se utilizaron 8 de las 12 bandas de Sentinel-2, las que corresponden a:

- B3 (banda Verde – 0,560  $\mu\text{m}$ )
- B4 (banda Rojo – 0,665  $\mu\text{m}$ )
- B5 (banda Red Edge – 0,705  $\mu\text{m}$ )
- B6 (banda Red Edge – 0,740  $\mu\text{m}$ )
- B7 (banda Red Edge – 0,783  $\mu\text{m}$ )
- B8 (banda NIR – 0,842  $\mu\text{m}$ )
- B11 (banda SWIR 1 – 1,610  $\mu\text{m}$ )
- B12 (banda SWIR 2 – 2,190  $\mu\text{m}$ )

Las imágenes fueron corregidas geométrica y radiométricamente y corregistradas entre sí mediante puntos de control de terreno. En el proceso de corrección geométrica se realizó el remuestreo con el método del vecino más cercano y se conservó el tamaño original de píxel.

Si consideramos que la reflectancia en un píxel de 10 metros o más estará influenciada por el follaje, el suelo y, en un bajo porcentaje por las bayas, será necesario poner nuestro objeto de interés en las principales variaciones espectrales que pueda presentar el follaje. Con este objetivo se escogieron 4 índices espectrales, los cuales se calculan a partir de la reflectancia registrada en las diferentes bandas del sensor. Estos índices son de amplio uso en diversas aplicaciones agrícolas: Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Normalized Difference Moisture Index (NDMI), y Clorofila.

- **NDVI**, presentado en 1973 (Rouse et al., 1973) utiliza las bandas del rojo e infrarrojo cercano (NIR). El NIR es conocido por mostrar una alta reflectividad en vegetación sana debido a la estructura celular de las hojas; el rojo, destaca por la absorción o baja reflectancia que presenta debido a los

pigmentos de la hoja, principalmente la clorofila. Es uno de los IV más utilizados hasta hoy (Giovos et al., 2021).

- **GNDVI** es una variante del NDVI, que intercambia la banda del rojo por la del verde, es más sensible a la variación de clorofila al final del ciclo del cultivo (Gitelson y Merzlyak, 1996).
- **Clorofila**, este índice utiliza las bandas del visible, ya que este rango espectral está dominado por las propiedades ópticas de los pigmentos fotosintéticos de las hojas (Hallik et al., 2017).
- **NDMI**, utiliza las bandas NIR y SWIR1 (Sentinel-2), para determinar el contenido de humedad en el dosel (Herrera y Chuvieco, 2014). Se utiliza la banda SWIR1, correspondiente a la longitud de onda comparativamente más parecida a la banda de onda corta de Landsat, base del indicador (Gao, 1996; Wang et al., 2011; Wang et al., 2013; Brom et al., 2012).

Con el propósito de ofrecer una comprensión clara de los índices espectrales que han sido incorporados en nuestro estudio, se ha elaborado la tabla 1. En ella se detalla la fórmula con la que se han calculado, haciendo referencia también a los autores que propusieron o definieron dichas fórmulas.

Tabla 1. Índices espectrales utilizados en el estudio, obtenidos desde álgebra simple de bandas espectrales de imágenes Sentinel-2. Fuente: Elaboración propia.

Ítem	Fórmula	Autor
GNDVI	$GNDVI = \frac{Nir - Verde}{Nir + Verde}$	Gitelson (1996)
NDVI	$NDVI = \frac{Nir - Rojo}{Nir + Rojo}$	Rouse <i>et al.</i> (1973)
Clorofila	$Clorofila = \frac{Rojo - Azul}{Verde}$	-----
NDMI	$NDMI = \frac{Nir - Swir1}{Nir + Swir1}$	Clevers (1988)

#### 4.2.1 CARACTERIZACIÓN DEL VIGOR DE LA VIÑA

Los índices de vegetación más comúnmente utilizados se basan en el análisis de las bandas del infrarrojo cercano (NIR) y el rojo. Estos índices proporcionan una ventana única para observar el comportamiento y evolución que tiene el viñedo, lo que brinda una visión integral, tanto del estado de los distintos cuarteles como del desarrollo de la vid en ambas temporadas. Por esta razón se utilizará el NDVI, ya que es considerado un indicador para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación (Hernández et al., 2014), otorgando una perspectiva valiosa para la gestión agrícola.

El máximo potencial de expresión vegetativa, representado por el NDVI, se alcanza en verano y generalmente es posterior al envero, momento en el cual el follaje alcanza su plenitud antes de iniciar su fase de declive, caracterizada por la pérdida gradual de hojas. El ciclo de desarrollo de la vid se inicia con la poda en invierno y concluye después de pasada la vendimia, cuando empiezan los fríos y comienza la caída de las hojas; esta



secuencia, que se detalla en la figura 15, marca el ciclo anual de la viña, cuyos cambios estacionales ejercen una influencia significativa en su dinámica de desarrollo.

El follaje es importante, ya que todo aquello que afecte al rendimiento de la vid se refleja en él. Con los años, la importancia de la gestión del follaje ha ido aumentando, pasando de ser una práctica utilizada inicialmente para controlar el crecimiento, obtener rendimientos sostenibles y controlar las enfermedades, a convertirse en una práctica integral, absolutamente esencial en viticultura y enología de cara a la obtención y mejora de la calidad de la uva y el vino (Hunter, 2000). A pesar de que en la actualidad se considera que el control de enfermedades a través de la gestión del follaje es una práctica secundaria, es una consecuencia importante que contribuye definitivamente a la calidad de la uva, para lo cual se debería conseguir una vid equilibrada, con un follaje eficiente desde el punto de vista fotosintético (Hunter y Volschenk, 2001; Nadal y Lampreave, 2004). Un sistema vertical (de tipo espaldera) facilita el manejo y mecanización de la vendimia; y permite mayor equilibrio en la exposición al sol de hojas y racimos, cosa que favorece una maduración uniforme de las bayas (Volschenk y Hunter, 2001).



nuevamente ya que decae la vigorosidad. En la figura 17 se aprecia la evolución del follaje desde brotación a cosecha en ambas temporadas.

Para interpretar adecuadamente lo que se representa en la figura 17, es esencial considerar el ciclo de vida y evolución teórica del follaje de la vid. Este ciclo puede visualizarse en la figura 16. En el hemisferio sur, el desarrollo comienza en primavera, específicamente entre agosto y septiembre. Durante el invierno, se efectúa la poda; de esos cortes brota savia que circula a través de los conductos de la planta, dando lugar a los brotes. Entre octubre y noviembre se marca un punto significativo con la floración de estos brotes, y de la floración se pasa al cuajado, etapa en que la flor se transforma en fruto. El período entre diciembre y febrero (dependiendo de la zona geográfica y de la variedad) corresponde al inicio del envero, que es el momento en el que las uvas comienzan a adoptar los colores característicos de su variedad. En esta etapa, se deshojan parcialmente las plantas para asegurar una exposición solar óptima de los racimos y se ajusta el número de racimos por planta mediante el raleo. Desde el envero hasta la vendimia, las uvas maduran, y simultáneamente, comienza la caída estacional de las hojas de la vid.

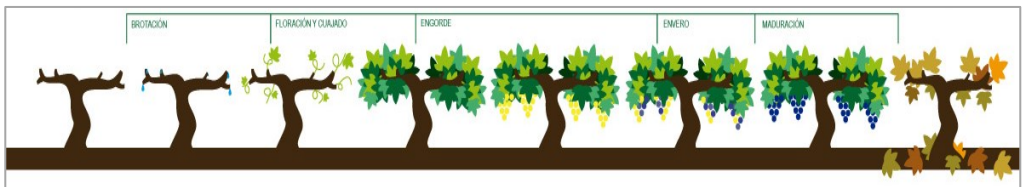


Figura 16. Comportamiento evolutivo del follaje durante el ciclo de vida de la vid. Fuente: Adaptado de: Agricotec S.L., (2022)

La figura 17 presenta los mapas de NDVI con una escala dividida en 10 rangos. Los cuarteles situados a la izquierda corresponden a la plantación del año 2007, mientras que los cuarteles de la derecha pertenecen a una plantación establecida el año 2010.

Geográficamente la plantación del año 2007 está situada al Norte y está compuesta por 12 cuarteles (ver figura 18a), mientras que la plantación 2010, situada al Sur, está compuesta por 11 cuarteles (ver figura 18a). Para calcular el NDVI promedio de cada cuartel, se ajustó la superficie efectiva de cada cuartel, con el fin de minimizar el efecto borde en los píxeles de la imagen. Esto se logró aplicando un buffer de 15 metros hacia el interior de cada cuartel.

La figura 17 ofrece una visión clara para comparar la expresión vegetativa del follaje entre las dos temporadas. Es especialmente valioso que las imágenes se presentan en una escala homogénea, facilitando así una comparativa en condiciones similares. La primera imagen de comparación es de noviembre, época en que finaliza la floración y se inicia el cuajado. Durante esta fase, el follaje es escaso y tal como se observa en la figura 17, debería reflejarse en un porcentaje de suelo visible alto y por tanto un indicador de NDVI bajo. Sin embargo, es común que, durante este periodo, la presencia de malezas entre las hileras pueda incrementar el índice de vegetación. De diciembre a febrero, se espera que la planta muestre un follaje pleno y densificado. Esta característica es evidente en las imágenes de ambas temporadas. Aun así, cabe destacar que en la temporada de cosecha 2018, el NDVI es superior al de su ciclo anterior, una tendencia observada en todos los cuarteles. Los meses entre febrero a abril, corresponden a la fase de maduración y debería comenzar un descenso gradual del índice de vegetación, lo cual es evidente, sobre todo, en la segunda temporada. Con la vendimia y el final de la maduración de los frutos, el cambio estacional dará paso a la caída de las hojas, la vid se prepara de nuevo para el reposo invernal.

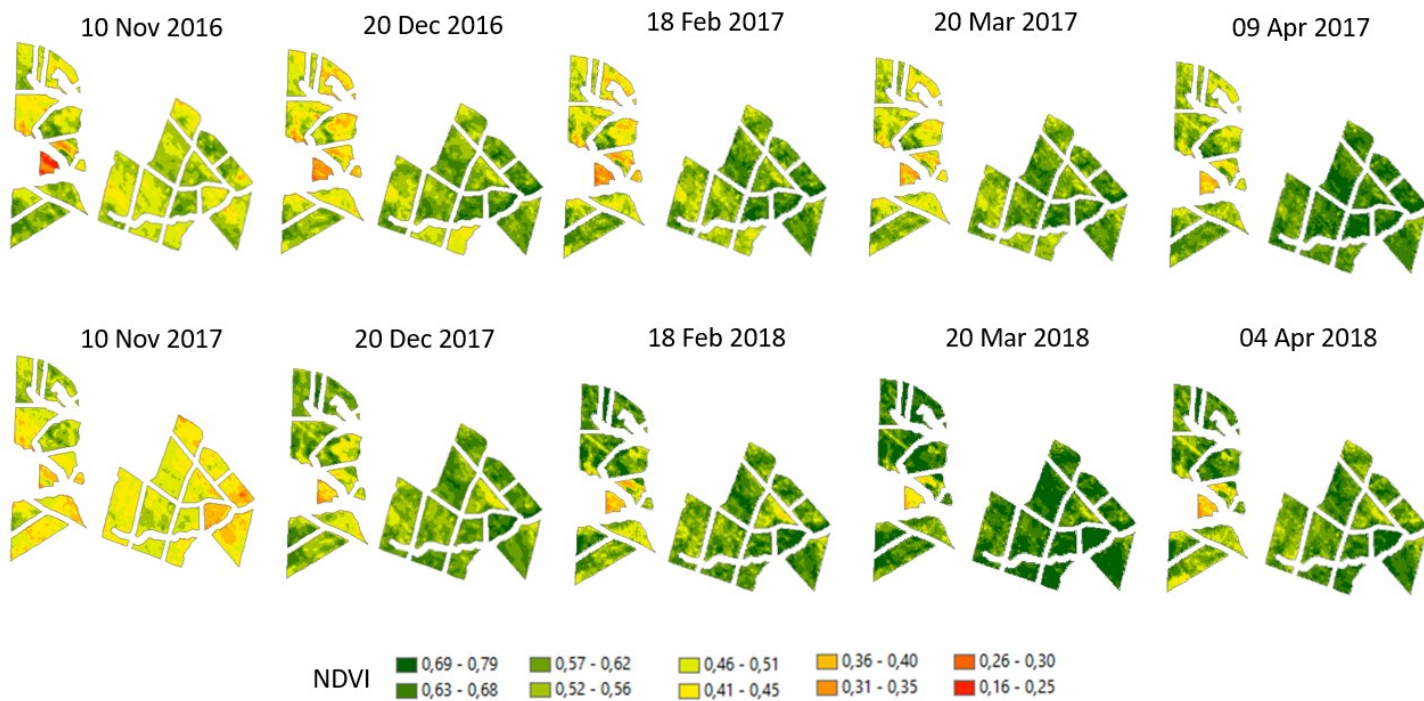


Figura 17. Serie temporal del NDVI para las dos temporadas de estudio. Fuente: Elaboración propia.

La figura 18, muestra la comparación de las tasas de NDVI alcanzadas en ambas temporadas agrupadas por cuarteles de acuerdo al año de plantación. Se divide en 4 sub-figuras, el grupo a) corresponde a la disposición geográfica de los cuarteles, los polígonos azules situados más al norte corresponden a la plantación 2007 y los polígonos rojos situados más al sur, corresponden a la plantación del 2010; mientras que las figuras 18c y 18d muestran el promedio de NDVI en la temporada 2017 y 2018 respectivamente, los gráficos muestran en naranja los cuarteles sur, plantación 2010 y en azul los cuarteles norte, plantación 2007. Los gráficos c y d muestran el promedio de NDVI y es claro que los cuarteles sur (2010) alcanzan mayores tasas de NDVI en ambas temporadas. El gráfico 18b muestra la comparación de ambas temporadas, del que se desprende que la temporada 2018 presentó un mayor valor de NDVI, promedio superior en todos los cuarteles. Estos resultados concuerdan con la apreciación visual que se obtiene en las imágenes de NDVI de la figura 17. Destaca marzo de 2018 en donde el NDVI refleja particularmente un mayor vigor en la vegetación que en marzo de 2017.



Figura 18. Comparación de NDVI. (a): Disposición espacial de cuarteles en estudio. Polígonos amarillos, plantaciones 2007. Polígonos rojos, plantación 2010. (b): Temporada 2017 v/s 2018: Comparación promedio de NDVI en todos los cuarteles. (c): Temporada 2017. Promedio de NDVI por cuartel, comparación de cuarteles en plantaciones 2007 y 2010. (d): Temporada 2018. Promedio de NDVI por cuartel, comparación de cuarteles en plantaciones 2007 y 2010. Fuente: Elaboración propia.

### **4.3 Obtención de variables precosecha**

Antes de la cosecha se realizaron los análisis de fruta, que se efectuaron de manera regular durante un periodo de dos meses previos a la cosecha. Este proceso de análisis o monitoreo se llevó a cabo de forma manual y se basó principalmente en las visitas periódicas realizadas por el agrónomo en el campo, quien identificaba visualmente la evolución de la madurez en el cuartel. Para asegurar la representatividad de las muestras, se recorrió toda el área a cosechar, prestando especial atención en las zonas de calidad conocida y en las que se encontraban en zonas con diferencias topográficas, de textura de suelo o riego.

Definir cuándo y qué cuarteles serán cosechados se basa únicamente en la evaluación organoléptica que se realiza en terreno diariamente, tarea que toma entre 10 y 30 minutos por lugar de muestreo, lo que hace inviable obtener un número tal de muestras que sean totalmente representativas. Por tanto, en cada visita solo se toma un número limitado de muestras y se escogen aquellos cuarteles en los cuales es necesario cuidar la calidad de la fruta, producto de su vigor, rendimiento o estado sanitario y establecer en ellos adecuadamente el estado de madurez, lo cual debe ser controlado periódicamente mediante el °Brix y el pH, variables que ayudan a controlar los procesos de cosecha de la uva y elaboración del vino y, por tanto, satisfacer las demandas de los enólogos (Bramley, 2010).

La muestra recolectada debe ser representativa del cuartel a cosechar, proporcionando los mismos resultados analíticos, es decir, que considere la variación intraparcelsaria y que pueda representarla proporcionalmente. Lo común es que la muestra se realice en todo el cuartel de forma aleatoria y con muestras en diferentes posiciones de la planta. Un examen visual permite comprobar que las bayas cambian de color en función de la posición del racimo, producto de la exposición del sol. Para este estudio, la



recolección de frutas no fue aleatoria dentro de la parcela y se realizó en dos etapas:

1. Antes del envero, se definieron puntos críticos en el viñedo que representaban zonas de respuesta homogénea. Estos puntos se seleccionaron para ser muestreados de forma sistemática en las dos temporadas. Con la ayuda de equipamiento GPS, se determinó y marcó en la viña la posición central de cada muestra.
2. Alrededor de cada punto de muestreo, se estableció un radio de 15 metros desde la posición central, zona en la cual se realizó el muestreo aleatorio de un total de 300 bayas.

Durante la recolección de las bayas para el muestreo, se buscó una muestra representativa y confiable.

No se consideraron las plantas ubicadas en los extremos, debido a que los píxeles que representan el borde de cada cuartel presentan información mixta producto de la resolución espacial de las imágenes y agronómicamente las plantas de los extremos de la hilera reciben mejores condiciones de luminosidad, aireación y riego, por tanto, sus bayas no son del todo representativas del cuartel.

La recolección de bayas tiene como fin conocer el estado de madurez de la fruta y el grado alcohólico probable, las variables que se analizan son: °Brix, pH y Acidez Total y gasto NaOH, sin embargo, este estudio solo consideró la caracterización y estimación de °Brix y pH, repitiéndose 4 veces en ambas temporadas.

Para cuantificar la concentración de azúcar, se utilizó un refractómetro con compensación automática de temperatura y un rango 0-32% °Brix. Este procedimiento se puede realizar de dos formas: se prensa una baya sobre el visor del refractómetro o bien se colocan un par de gotas del jugo de todas las bayas recolectadas. En este caso se utilizó una muestra del jugo

de las bayas recolectadas. Dado que las bayas provenían de distintos sectores dentro del área de muestreo, el resultado se traduce como el promedio de la muestra. La tabla 2, muestra los valores de °Brix obtenidos en cada posición.

El pH mide el grado de acidez o de alcalinidad cuya medición se efectúa en diferentes medios, en términos generales indica la concentración de iones de hidrógenos presentes en una sustancia. Utiliza una escala de 0 a 14, donde 7 es neutro.

El pH del mosto no puede separarse de las variables del entorno y está ligado a diversos aspectos de la viña como tipo de suelo, clima, variedad, madurez. Cuando un vino tiene un pH ácido adecuado muchas de sus propiedades mejoran, además de permitir que el vino sea un producto saludable y sin ningún problema de bacterias y virus. En los vinos el pH oscila entre los valores 2,8 y 4 generalmente. En general cuando un vino tiene un pH por encima de 3,4 su capacidad de envejecimiento mejora, los taninos y antocianos se unen de manera más estable y dan colores rojos brillantes. Además, muchas de las sustancias volátiles se mantienen mucho más estables y se conservan mayor número de aromas de la variedad.

Para la medición de la acidez total, se utiliza un método basado en la neutralización de los ácidos del mosto, para lo cual se utiliza un pHmetro. La tabla 3, muestra el valor de pH en ambas temporadas. En ella se muestra el nombre identificador del cuartel o parcela, la fecha de medición en campo y los estadísticos acumulados por fecha, correspondientes a: mínimo, máximo, promedio y desviación estándar.

Las fechas indicadas en las tablas 2 y 3 se corresponden con la fecha de toma de muestra más cercana a la fecha de adquisición del dato de campo, ya que en un mismo día no se alcanza a adquirir toda la información. El 100% de las muestras de cuarteles se adquirió en un intervalo de +/- 1 día respecto de la fecha indicada en la tabla.

En la figura 19 se realiza un análisis comparativo detallado de las muestras de °Brix y pH a través del tiempo. El gráfico 19(a) ilustra la evolución de la variable °Brix para dos temporadas específicas: la temporada 2017, cuyos datos se representan mediante una línea azul, y la temporada 2018, identificada con una línea naranja. Cabe notar que, desde la segunda fecha en adelante, los valores correspondientes a 2018 superan de forma sostenida a los de 2017. En lo que respecta al pH, figura 19(b), se utilizan los mismos colores: línea azul para 2017 y naranja para 2018. En este gráfico la variación de pH se mantiene constante en todo el periodo comparado, salvo en la última fecha de estudio, en donde los valores de acidez se invierten, quedando la temporada 2018 con un valor más alto que su antecesor. Es interesante observar que, en este caso, los valores de pH de 2017 son superiores a los de 2018. Al interpretar conjuntamente ambos gráficos, se concluye que las muestras correspondientes al año 2018 son característicamente más dulces y ácidas en comparación con las de 2017.

Tabla 2. Valores de muestreo de °Brix en campo, en las temporadas 2017 y 2018. Fuente: Elaboración propia.

°BRIX- 2017					°BRIX- 2018				
Cuartel	13-03	19-03	27-03	03-04	Cuartel	13-03	19-03	27-03	03-04
10.10	23,8	22,8	24,0	23,4	10.10	22,8	23,8	23,4	24,0
10.13	24,6	23,6	23,6	24,6	10.13	23,6	23,6	23,6	24,6
10.12	22,6	22,2	24,0	24,6	10.12	22,0	22,2	24,2	24,6
10.06	22,0	22,2	22,4	25,2	10.06	22,0	22,2	22,4	25,2
10.11	23,0	22,4	23,6	25,4	10.11	22,4	23,6	25,4	25,0
10.08	22,2	21,4	24,0	24,4	10.08	22,2	22,4	24,0	24,4
10.07	23,2	21,8	22,8	24,2	10.07	23,2	23,8	23,8	24,2
10.04	23,4	23,8	22,6	25,0	10.04	23,4	23,8	24,6	25,0
7.15	23,8	22,2	25,6	26,0	7.15	21,8	23,8	25,6	26,0
7.10	23,4	23,4	24,6	25,2	7.10	23,4	23,4	24,6	25,2
7.12	23,4	24,2	25,0	22,2	7.12	23,4	24,2	24,8	25,0
7.08	21,9	22,9	24,1	24,8	7.08	21,9	22,9	24,1	24,8
7.07	21,2	22,2	23,8	23,2	7.07	21,2	22,2	23,8	23,2
7.02	22,2	22,4	24,2	25,4	7.02	22,2	22,4	24,2	25,4
Min	21,2	21,4	22,4	22,2	Min	21,2	22,2	22,4	23,2
Max	24,6	24,2	25,6	26,0	Max	23,6	24,2	25,6	26,0
Promedio	22,9	22,7	23,9	24,5	Promedio	22,5	23,2	24,2	24,8
ST Dev.	0,9	0,8	0,9	1,0	ST Dev.	0,8	0,7	0,8	0,7

Tabla 3. Valores de muestreo de pH en campo, en las temporadas 2017 y 2018. Fuente: Elaboración propia.

pH- 2017					pH- 2018				
Cuartel	13-03	19-03	27-03	03-04	Cuartel	13-03	19-03	27-03	03-04
10.10	3,5	3,6	3,8	3,6	10.10	3,6	3,6	3,7	3,8
10.13	3,6	3,6	3,6	3,7	10.13	3,5	3,5	3,6	3,8
10.12	3,6	3,6	3,8	3,8	10.12	3,6	3,7	3,7	3,7
10.06	3,5	3,8	3,6	4,0	10.06	3,5	3,8	3,9	3,9
10.11	3,6	3,7	3,6	3,7	10.11	3,6	3,6	3,7	3,7
10.08	3,7	3,8	3,9	3,6	10.08	3,6	3,7	3,8	3,8
10.07	3,7	3,7	4,0	4,0	10.07	3,4	3,7	3,8	3,6
10.04	3,6	3,8	4,0	3,6	10.04	3,5	3,5	3,9	3,9
7.15	3,4	3,5	3,9	3,9	7.15	3,4	3,6	3,6	3,6
7.10	3,6	3,7	3,9	3,9	7.10	3,8	3,6	3,8	4,0
7.12	3,7	3,8	3,8	3,8	7.12	3,3	3,3	3,6	3,6
7.08	3,6	3,6	3,8	3,9	7.08	3,6	3,7	3,9	4,0
7.07	3,5	3,7	3,8	3,9	7.07	3,4	3,3	3,7	3,9
7.02	3,7	3,7	3,7	3,7	7.02	3,7	3,8	3,8	4,2
Min	3,4	3,5	3,6	3,6	Min	3,3	3,3	3,6	3,6
Max	3,7	3,8	4,0	4,0	Max	3,8	3,8	3,9	4,2
Promedio	3,6	3,7	3,8	3,8	Promedio	3,5	3,6	3,7	3,8
ST Dev.	0,1	0,1	0,1	0,1	ST Dev.	0,1	0,2	0,1	0,2

Con el objetivo de compilar la información y realizar posteriores análisis, se consolidó toda la información de cada fecha de muestreo en tablas específicas. En total, se elaboraron cuatro tablas por temporada. Cada una de estas tablas desglosa la información base: identifica el cuartel donde se tomó la muestra, correspondiente al promedio de los valores de °Brix y pH de las bayas recolectadas en un radio de 15 metros alrededor del punto central de muestreo. Así mismo se especifican los valores correspondientes a las ocho bandas Sentinel-2 utilizadas, desde B3 hasta B12. Además de los valores correspondientes a cuatro índices espectrales: Clorofila, GNDVI, NDMI y NDVI.

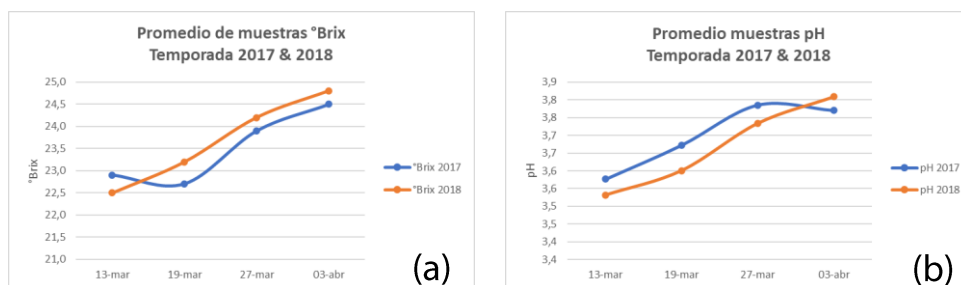


Figura 19. Comparación de variables precosecha. (a): Comparación promedio °Brix; (b): Comparación promedio pH. Fuente: Elaboración propia.

La metodología utilizada para obtener el valor representativo de los píxeles que representan el muestreo de campo, tanto en las bandas como en los índices, se basó en el siguiente desglose: inicialmente, se creó una capa vectorial de puntos basada en las coordenadas del punto de muestreo. Alrededor de estos puntos, se definió un área de influencia con un radio de 15 metros, que posteriormente se utilizó como área de interés para la extracción de información de píxeles en las imágenes. La herramienta "Zonal Statistics by table" de ArcGIS se empleó de manera efectiva para

extraer los valores promedio de los píxeles dentro de este buffer, abarcando las mencionadas ocho bandas e índices. Esta herramienta, proporciona un resumen de las estadísticas de una zona específicamente, basándose en los valores de píxeles de las imágenes.

Toda la información obtenida de las imágenes permite hacerse una idea de las características del follaje y su estado en el momento de la captura de las imágenes. Esta información se transforma en las variables independientes del análisis estadístico cuyo objetivo es determinar si, a partir de estas 12 variables independientes, se puede establecer una correlación significativa entre los patrones espectrales y el contenido tanto de azúcar como de pH en las bayas.

#### **4.4 Obtención de variables poscosecha**

Debido a la amplia diversidad química de los compuestos fenólicos, los fenoles totales en el mosto y en los vinos generalmente se presentan en unidades arbitrarias de un estándar fenólico, como la cantidad de ácido gálico necesaria para producir la misma respuesta analítica o equivalentes de ácido gálico (Zoecklein et al., 2013), tal como se realizó en el presente estudio. En el análisis de compuestos fenólicos mediante espectrofotometría, no se detectan compuestos individuales de manera directa, sino que se cuantifican los compuestos totales, los cuales se expresan en función de los componentes específicos más prevalentes dentro de los fenoles y antocianos. Para la medición de índice de color y compuestos fenólicos en general, se empleó un espectrofotómetro Unicam Helios Gamma 9423 1000E. Los resultados obtenidos durante las cosechas

2017 y 2018, incluyendo los valores de antocianos totales, fenoles totales e índice de color por cuartel, se detallan en la tabla 4.

La vinificación requiere de una precisa cuantificación de los compuestos que influyen en la calidad, color y sabor del vino. Por lo tanto, conocer y aunar los resultados de los valores de polifenoles e índice de color, es información que se transforma en relevante.

Una vez realizadas las muestras de campo, es necesario revisar los valores obtenidos, los cuales no solo entregan una instantánea de la calidad actual de la uva, sino que también permiten estimar su evolución y potencial enológico. La tabla 4 presenta esta información resumida. En ella, se muestra la columna que identifica el cuartel donde se efectuó cada muestreo. Se indica la fecha de cosecha de cada uno de los cuarteles, además del resultado de valores de polifenoles obtenidos a través de micro vinificación: los niveles de antocianos totales, que son indicativos de la intensidad colorante y potencial antioxidante; los fenoles totales, que influyen en características como el cuerpo, sabor y estabilidad antioxidante del vino; y finalmente, el índice de color, que es un predictor clave del aspecto visual y la percepción sensorial del vino en cuestión.

A partir de la tabla 4 y con el fin de facilitar la comprensión y comparación de los datos recopilados, en la figura 20, se presentan gráficos comparativos que reflejan las mediciones de antocianos, fenoles totales e índice de color en las muestras analizadas. Este conjunto de gráficos permite una visualización directa de las concentraciones y variaciones entre las muestras, además expone la relación y las concentraciones específicas en cada uno de los cuarteles analizados, permitiendo revisar la evolución de estos compuestos en ambas temporadas.

La Figura 20 consta de tres gráficos distintos, proporcionando una comparación detallada del índice de color, los antocianos totales y los fenoles totales (a, b y c). Este desglose gráfico posibilita observar que la



temporada 2018 exhibe valores notablemente más altos en el índice de color en todos los cuarteles. En cuatro de ellos, el valor de la intensidad de color casi se duplica en comparación con la temporada anterior. Lo mismo se refleja en los antocianos totales, donde el 100% de los cuarteles muestra una mayor acumulación de antocianos durante la temporada 2018. Sin embargo, este patrón no se mantiene uniforme en el caso de los fenoles totales, de hecho, en esta categoría, la temporada 2017 presenta en algunos casos una concentración superior del compuesto, en comparación con la temporada 2018. A excepción del cuartel 10.10, que es duplicado en la temporada 2018, los demás cuarteles muestran un incremento bastante moderado en la temporada 2018 respecto de la 2017. En resumen, al comparar los niveles de fenoles totales en ambas temporadas, se observa una diferencia más sutil entre una y otra. Este fenómeno podría atribuirse a diversos factores o variaciones específicas en la composición del suelo en el cuartel 10.10, generando una respuesta única en la acumulación de fenoles en la temporada 2018.

Modelación de parámetros de calidad de uva vinífera con índices satelitales provenientes de imágenes de resolución espacial media para el manejo diferenciado de viñedos en Chile



Figura 20. Comparación de resultados poscosecha por cuartel. a) Índice de color cosecha 2017 y 2018 (Absorbancia). b) antocianos totales cosecha 2017 y 2018 (mg/l equivalente de Malvidina). c) fenoles totales cosecha 2017 y 2018 (mg/l equivalente de ácido gálico). Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4. Evaluación de Polifenoles poscosecha realizada en vino. Índice de color (Absorbancia); fenoles totales (mg/l equivalente a ácido gálico) y antocianos totales (mg/l equivalente de Malvidina). Fuente: Elaboración propia.

Cosecha 2017					Cosecha 2018					
Cuartel	Cosecha 2017	Índice color	Fenoles Totales	Antocianos Totales	Cuartel	Cosecha 2018	Índice color	Fenoles Totales	Antocianos Totales	
	7.02	06 ABR	13,8	1132	442,8	7.02	17 ABR	21,0	893	787,5
	7.07	11 ABR	15,4	1210	489,7	7.07	25 ABR	19,8	944	971,3
	7.08	22 ABR	18,4	1491	559,9	7.08	20 ABR	24,0	1180	840,0
	7.10	18 ABR	14,8	1117	532,9	7.10	20 ABR	27,5	1220	1070,1
	7.12	05 ABR	20,5	1349	566,3	7.12	06 ABR	23,8	1265	1074,2
	7.15	05 ABR	15,4	1153	533,3	7.15	06 ABR	16,8	1070	704,4
	10.04	13 ABR	12,2	1197	372,9	10.04	13 ABR	13,6	1184	727,1
	10.06	13 ABR	12,2	923	419,4	10.06	18 ABR	20,2	1113	840,0
	10.07	11 ABR	11,3	1107	437,9	10.07	07 ABR	28,2	1138	986,1
	10.08	13 ABR	10,7	918	379,7	10.08	13 ABR	17,6	1154	739,0
	10.10	06 ABR	16,6	426	499,3	10.10	07 ABR	23,8	978	885,5
	10.11	05 ABR	12,3	1101	426,1	10.11	07 ABR	27,3	1245	959,9
	10.12	20 ABR	10,9	1019	360,1	10.12	17 ABR	22,6	1184	926,6
	10.13	18 ABR	11,7	908	406,7	10.13	20 ABR	14,7	1194	831,3

---

#### 4.4.1 ANÁLISIS DE COMPUESTOS FENÓLICOS E ÍNDICE DE COLOR EN VINO

Al igual que lo indicado para las variables precosecha, se creó una tabla de información por cada fecha disponible de imágenes en los meses de enero, febrero, marzo y abril. En cada una de las imágenes, tanto en las bandas como en los índices se utilizó la posición central de las muestras y se consideraron los mismos polígonos buffer. Se generaron cuatro tablas en total en cada temporada. Un ejemplo de estas se aprecia en la tabla 5, en ella aparece el código referido a la identificación del cuartel desde donde provenía la uva para la micro vinificación, el valor de la muestra correspondiente al contenido de antocianos totales, fenoles totales e índice de color y el valor correspondiente al promedio de los valores de las bandas espectrales en los píxeles alrededor de la muestra.

De acuerdo a lo explicado en el apartado anterior, el valor de píxel en cada fecha fue obtenido mediante la herramienta Zonal Statistics by table de ArcGIS, que entrega el valor promedio de los valores de píxel dentro de cada polígono. Calcula un único valor de salida el cual es entregado como una tabla dbf, la cual permitirá comparar el comportamiento espectral del follaje a lo largo del periodo entre el envero y la cosecha, respecto de la concentración final de antocianos, fenoles e índice de color del vino producido.

En total se obtuvieron 12 variables independientes para determinar si existe una combinación que espectralmente pueda predecir previo a cosecha, los compuestos fenólicos finales en vino y su índice de color.

La obtención de los valores de polifenoles de micro vinificación permite una primera aproximación respecto de la calidad de vino y sobre si el manejo agronómico realizado hasta la cosecha fue el adecuado, en base a las condiciones ambientales y fisiológicas de cada temporada. Si ya se

estableció que conocer los antocianos permite estimar su potencial antioxidante, así como su intensidad de color, es factible suponer que debería existir una relación directa entre los valores obtenidos en índice de color y antocianos, los resultados de esta comparación pueden apreciarse en los gráficos de dispersión de la figura 21.

Tabla 5. Valores promedio de píxel por cuartel. Fecha de adquisición: 20 de marzo de 2017. IC: índice de color; FT: fenoles totales; AT: antocianos totales; B3 a B12: bandas Sentinel-2; índices espectrales: Clorofila, GNDVI, NDMI, NDVI. Fuente: Elaboración propia.

CUARTEL	IC	FT	AT	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B11	B12	Clorofila	GNDVI	NDMI	NDVI
10.10	16,6	426,4	499,3	551,1	628,0	1055,0	1979,6	2369,7	2533,0	1935,5	1190,4	-0,54	0,64	0,13	0,60
10.13	11,7	907,8	406,7	473,1	514,7	931,6	1922,9	2336,7	2498,1	1643,4	962,6	-0,51	0,68	0,21	0,66
10.12	10,9	1018,8	360,1	541,2	605,7	1023,3	1878,6	2225,0	2389,9	1876,5	1135,8	-0,51	0,63	0,12	0,60
10.06	12,2	923,0	419,4	549,4	589,9	1056,7	2094,0	2505,2	2674,1	1819,5	1080,9	-0,50	0,66	0,19	0,64
10.11	12,3	1101,1	426,1	634,8	711,6	1167,7	1972,2	2290,8	2449,4	2021,8	1277,2	-0,50	0,59	0,10	0,55
10.08	10,7	917,9	379,7	585,6	680,0	1121,5	1952,4	2294,6	2447,9	1939,9	1210,4	-0,56	0,61	0,12	0,57
10.07	11,3	1106,7	437,9	533,8	575,8	1003,8	1914,0	2274,2	2430,2	1785,0	1070,9	-0,48	0,64	0,15	0,62
10.04	12,2	1196,6	372,9	637,8	703,2	1163,8	2068,6	2407,4	2536,8	1756,0	1135,1	-0,50	0,60	0,18	0,57
7.15	15,4	1152,6	533,3	618,8	703,9	1153,2	2002,9	2344,7	2511,9	2129,8	1288,2	-0,52	0,60	0,08	0,56
7.10	14,8	1117,4	532,9	796,1	1025,0	1488,1	2194,2	2483,9	2625,2	2585,4	1709,5	-0,66	0,53	0,01	0,44
7.12	20,5	1349,5	566,3	915,6	1224,4	1633,5	2242,9	2517,8	2664,4	3042,5	2129,2	-0,70	0,49	-0,07	0,37
7.08	18,4	1490,8	559,9	639,1	806,3	1199,5	1922,6	2245,1	2430,6	2543,0	1574,0	-0,62	0,59	-0,02	0,51
7.07	15,4	1209,7	489,7	622,9	785,4	1170,3	1862,3	2158,4	2313,2	2289,3	1488,5	-0,66	0,58	0,01	0,49
7.02	13,8	1132,0	442,8	615,8	765,4	1170,6	1918,3	2244,4	2419,2	2434,9	1525,0	-0,63	0,59	0,00	0,52

En la comparación de ambos gráficos, se observa que, en la cosecha de 2018, existe una concentración significativamente mayor de antocianos en conjunto con valores más elevados en el índice de color. El gráfico refleja una relación positiva entre ambas variables, aunque esta no alcanza el mismo grado de robustez que en la cosecha de 2017. En esta última, se aprecian valores más equilibrados tanto en el índice de color como en la concentración de antocianos totales, destacando una correlación más marcada entre ambas propiedades.

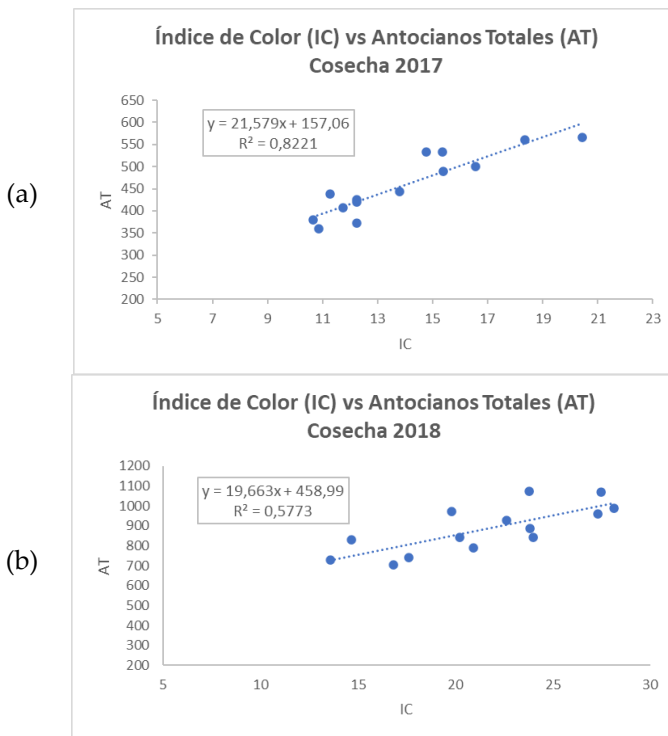


Figura 21. Comparación mediante gráficos de dispersión entre índice de color y antocianos totales. a): valores correspondientes a la cosecha de 2017; b): valores correspondientes a la cosecha de 2018. Fuente: Elaboración propia.


## **4.5 Evaluación Enológica**

Lo que los consumidores prueban en el vino es la culminación de las prácticas de manejo desde el viñedo hasta la copa. Es importante comprender cómo las prácticas de producción afectan la química del vino. Debido a que los compuestos fenólicos son importantes en la calidad general del vino, son objeto de una intensa investigación en todo el mundo (Kennedy, 2008) ya que proporcionan características sensoriales como sabor, aroma, color y astringencia, entre otras (Duran y Trujillo, 2008). Shepherd (2015) ilustra un análisis de cómo el cerebro crea el sabor del vino, el cual incluye la fase cefálica inicial, análisis visual, ingestión, formación de la imagen perceptiva del vino, formación del objeto perceptivo del vino, deglución y efectos postingestivos. Este enfoque combinado de percepción y mecanismo cerebral se manifiesta en la apreciación que se puede tener del vino.

Los mecanismos fisiológicos implicados en el proceso de la cata parecen simples si los contemplamos desde la perspectiva de nuestros sentidos: la visión, el olfato y el gusto son los principales responsables. Sin embargo, pueden ser enormes las diferencias entre las distintas evaluaciones a un mismo vino, ya que depende de la sensibilidad sensorial de cada enólogo para su clasificación. Viña Montes evalúa los vinos (figura 22) en tres categorías: Limited (LIM), Premium (PRE) y Superior (SPR). Cada una de ellas tiene tres variantes con una categoría menor (-) y una mayor (+), que indican que un catador puede evaluar un vino como Premium, pero bajo o sobre el promedio de esta categoría. Se asignó un número a cada categoría con el fin de graficarlo posteriormente. El tipo de evaluación sensorial que seguirá cada enólogo depende principalmente del objetivo que persigue la viña en cada categoría.



La evaluación sensorial de vinos que realiza Viña Montes es periódica en cada temporada con el fin de estudiar cuál es el efecto que tanto variables de tipo enológico (levaduras, enzimas, temperaturas de fermentación, etc.) como variables de tipo agronómicas (clones, riego, portainjertos, poda, deshoje, etc.) tienen sobre el vino final.



LIM-	LIM	LIM+	PRE-	PRE	PRE+	SPR-	SPR	SPR+
1	2	3	4	5	6	7	8	9

Figura 22. Categorización de calidades de vino utilizada en Viña Montes. Limited (LIM); Premium (PRE); Superior (SPR). Fuente: Elaboración propia.

La evaluación sensorial también se utiliza para analizar vinos procedentes del departamento de control de calidad. En dicho caso, se evalúa el efecto que pueda tener en el producto final, determinadas variables como el tipo de corcho, la exposición a la luz y la posición de las botellas durante el almacenamiento.

Los factores que se usan para evaluar los vinos son:

- **Factores visuales:** asociados principalmente al color y por lo tanto predominarán antocianinas y tendrán a su vez un mayor índice de color. Se observa la limpidez: turbio, claro, limpio, brillante, etc., lo cual se encuentra asociado a la estabilidad fisicoquímica y por lo general no depende de una mejor o peor calidad de uva. El color también es un buen indicador de la maduración de la uva, ya que un vino con poco color puede ser pobre en azúcar, de bajo contenido alcohólico y poco cuerpo, es por ello que muchos estudios

se han centrado en la extracción y la estabilización química del color. Algunas técnicas propuestas buscan romper las barreras celulares e incrementar la extracción de los antocianos mediante la aplicación de campos de pulsos eléctricos (López et al., 2008), favoreciendo sus interacciones con otros constituyentes del vino (Piccardo et al., 2019), como el efecto de microoxigenación para favorecer la condensación entre taninos y antocianos para la estabilización del color (Bautista et al., 2008).

- **Intensidad en el color:** presenta variaciones intrínsecas vinculadas a la variedad de la uva, su densidad y acidez. La intensidad colorimétrica puede variar entre: rojo, rojo intenso, rojo rubí, violeta, violeta intenso, etc.; puede ir desde tonalidades rosadas y violáceas hasta opacos y casi negros. La acidez es uno de los factores influyente en la intensidad de color, además de mantener y ayudar en que los vinos puedan conservarse en perfectas condiciones durante años. La intensidad de color también habla de la edad del vino, un vino joven presenta generalmente poca intensidad.

Para determinar la intensidad en el color, lo ideal es hacerlo en una habitación bien iluminada, para ello se inclina la copa en 45° con un fondo blanco y se observa tanto el ribete, correspondiente a la parte con menor profundidad, más próxima al borde, como el centro de la copa, zona denominada cuerpo.

- **Factores olfativos:** asociados a propiedades volátiles. Lo que se busca en nariz principalmente es que no se presente ningún aroma extraño, desagradable, o que no esté relacionado al vino, esto indicaría defectos, aromas que entreguen elegancia y complejidad como madera, vainilla,

frutas (rojas, negras, *berries*, tropicales, etc.), cuero, tabaco, chocolates entre otros. Sin agitar la copa acercar la nariz hasta el borde de la copa realizando varias inhalaciones cortas para evaluar la intensidad de olor global. Todos los descriptores aromáticos son amplios, pero a mayor número de descriptores (principalmente frutas) y complejidad aumenta la clasificación de un vino. El olor a fruta del vino joven va a estar influenciado por múltiples factores: la composición del suelo, la variedad de la uva, el estado sanitario de la uva, el grado de maduración, el proceso de vinificación, las levaduras utilizadas en la fermentación, las temperaturas de fermentación, entre otros. El olor a especias corresponderá al aporte de la barrica: tipo de madera, grado de tostado y número de usos.

- **Factores de sabor:** En este punto destacan los taninos, compuestos que se encuentran en la piel y semillas de las bayas, los cuales producen la sensación de astringencia. Deben ser buenos, pero no agresivos o rústicos, de modo que no solo se busca una mayor concentración de taninos, estos deben ser de buena calidad sensorial. En conjunto con el alcohol generan la sensación de estructura y cuerpo, un vino con más cuerpo y mejor estructura clasifica a calidad superior. La lengua es la principal responsable de la percepción de sabores. El dulzor se percibe principalmente en la punta de la lengua, y especialmente en los primeros momentos una vez que el vino se introduce en la boca. La acidez se percibe principalmente en los laterales de la lengua e incluso en su parte inferior. Es una sensación que también se percibe prontamente una vez introducido el vino en la boca y perdura durante más tiempo que el sabor dulce. El

amargor es percibido por las papilas situadas en la parte posterior de la lengua, por lo que hasta que el vino no llega a esa zona la sensación amarga no es percibida. Habitualmente es la sensación que más tiempo necesita para manifestarse, pero es, asimismo, la que mayor tiempo se mantiene.

- **Final de un vino:** Indica mayor o menor categoría; el final es la persistencia de un vino en la boca luego de haberlo bebido o escupido; un vino con un final persistente, largo, medio o corto es también un factor asociado a las distintas categorías.

La evaluación de cada vino se realizó por 4 enólogos que asignaron una categoría de forma individual y luego se “promedió” otorgándole una categoría final a cada muestra. La tabla 6 muestra el resultado final de cada cuartel, en relación con la categoría enológica y la vigorosidad del follaje representada por el NDVI.

La tabla 6 muestra la comparación entre las evaluaciones enológicas de la temporada 2017 y 2018. Esta tabla también presenta la fecha de cosecha del cuartel, el valor promedio de NDVI por cuartel en abril y el NDVI promedio de la temporada a lo largo del verano, desde diciembre hasta abril y la evaluación recibida por los enólogos.

Como ya sabemos durante la temporada 2018, se registró una mejora en los valores de fenoles totales, antocianos totales e índice de color. Sin embargo, esta tendencia ascendente no se refleja en todos los casos analizados en la evaluación enológica. Lo que se puede apreciar en el gráfico de la figura 23, en el cual se destaca el porcentaje de cambio en las evaluaciones enológicas entre ambas temporadas, revelando que en el 29% de los cuarteles la categoría de calidad se mantuvo constante en ambas temporadas. Con relación a la evaluación respecto del follaje, no se

refleja una tendencia que permita generar alguna asociación clara. El NDVI alcanzó mejores tasas en casi todos los cuarteles, a excepción del cuartel 7.15 en el cual se mantuvo el mismo valor promedio de NDVI en ambas temporadas. Los 13 cuarteles restantes, se comportan de la siguiente forma: 10 cuarteles presentaron una mejora en NDVI, y los tres restantes una disminución de NDVI que en promedio fue de -0,02. Respecto de la categoría del vino, 8 de los 14 cuarteles mejoraron su evaluación y los 6 restantes mantuvieron su categoría.

Tabla 6. Comparación de la evaluación enológica por cuartel en las temporadas de cosecha 2017 y 2018. Fuente: Elaboración propia.

COSECHA 2017					COSECHA 2018				
CUARTEL	COSECHA	NDVI ABRIL	NDVI PROM. T 2017	DEGUSTAC. 2017	CUARTEL	COSECHA	NDVI ABRIL	NDVI PROM. T 2018	DEGUSTAC. 2018
7.02	06 abril	0,51	0,47	PRE	7.02	17 abril	0,55	0,56	PRE+
7.07	11 abril	0,51	0,46	PRE+	7.07	25 abril	0,57	0,57	PRE+
7.08	22 abril	0,54	0,49	PRE+	7.08	20 abril	0,60	0,58	PRE+
7.10	18 abril	0,42	0,37	LIM+	7.10	20 abril	0,49	0,49	SPR-
7.12	05 abril	0,35	0,32	PRE+	7.12	06 abril	0,35	0,35	PRE+
7.15	05 abril	0,57	0,54	PRE	7.15	06 abril	0,53	0,54	PRE
10.04	13 abril	0,61	0,53	PRE	10.04	13 abril	0,55	0,57	PRE
10.06	13 abril	0,67	0,62	PRE-	10.06	18 abril	0,59	0,6	PRE+
10.07	11 abril	0,64	0,58	LIM-	10.07	07 abril	0,62	0,62	SPR
10.08	13 abril	0,62	0,55	LIM+	10.08	13 abril	0,55	0,53	SPR+
10.10	06 abril	0,60	0,57	PRE-	10.10	07 abril	0,61	0,60	PRE+
10.11	05 abril	0,59	0,53	PRE	10.11	07 abril	0,55	0,55	SPR-
10.12	20 abril	0,63	0,56	LIM	10.12	17 abril	0,58	0,58	SPR-
10.13	18 abril	0,69	0,62	PRE	10.13	20 abril	0,61	0,61	PRE

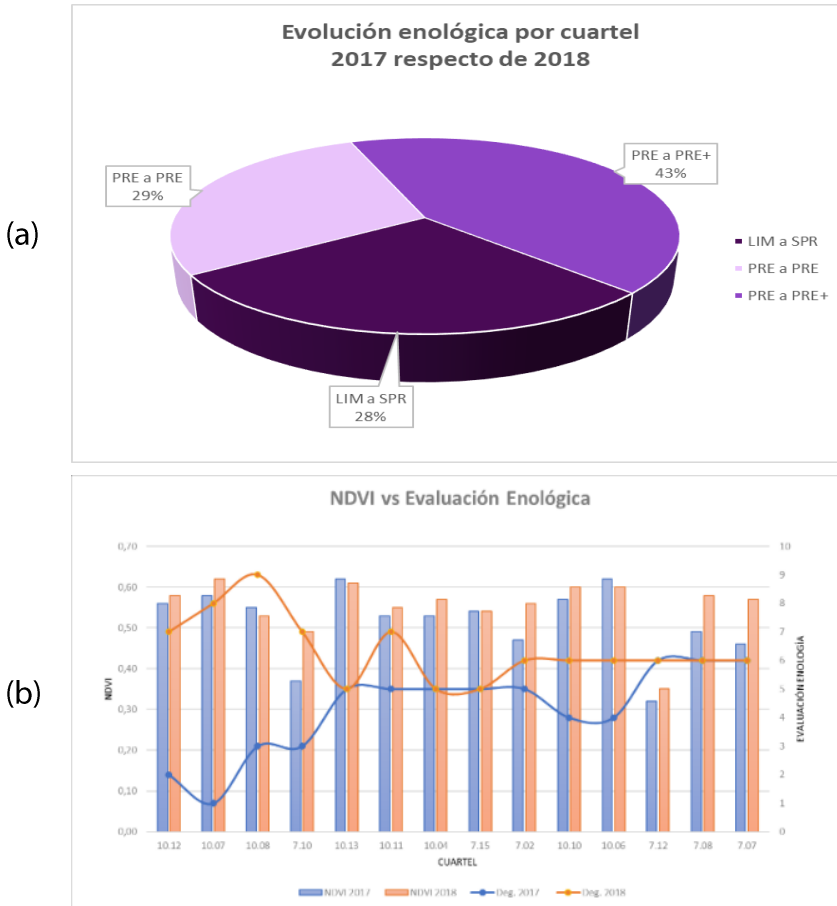


Figura 23. Comparación de evaluación enológica. (a): Gráfico que muestra los porcentajes de cambio entre los cuarteles evaluados de la cosecha 2017 en comparación con la cosecha 2018; (b): Comparación de evaluación enológica respecto del NDVI. El gráfico muestra datos de NDVI en barras en el eje principal y en el eje secundario degustación en líneas con marcadores, numerado según lo indicado en la figura 22. Fuente: Elaboración propia.

## **4.6 Creación de los modelos**

Una vez recopilados los datos de terreno y la información extraída de las imágenes Sentinel-2, el proceso metodológico para la creación de modelos de regresión múltiple se inicia con una fase descriptiva que implica el análisis de todas las variables involucradas. Es importante señalar que el número de muestras recopiladas en terreno es limitado, con un total de 14 muestras en total en toda el área. Por lo tanto, es necesario evaluar la multicolinealidad y la significancia de las variables en el modelo antes de determinar cuáles de ellas son las más apropiadas para el análisis.

La generación de modelos se inicia con la consolidación de tablas, agrupando, según las fechas de estudio, las mediciones de °Brix y pH obtenidas en terreno, con los valores de píxeles derivados de las bandas e índices espectrales de las imágenes Sentinel-2, los cuales proporcionan una representación espacial de la ubicación de las muestras de campo. Posteriormente, se procede a la unificación de datos correspondientes a las mediciones de índice de color y polifenoles, los cuales son recolectados durante el proceso de micro vinificación poscosecha. Estos datos también son relacionados con los valores de los píxeles de las bandas e índices espectrales extraídos de las imágenes Sentinel-2.

En el caso de las mediciones precosecha, centradas en °Brix y pH, se consideran cuatro fechas de muestreo entre los meses de marzo y abril. Este período se elige estratégicamente, ya que estos indicadores solo son medibles después del envero y justo antes de la cosecha, momentos cruciales en la maduración de la uva.



En cuanto a los modelos poscosecha, que se enfocan en las variables de calidad del vino, como los polifenoles y el índice de color, se evalúan a lo largo de cuatro fechas de imágenes correspondientes a los meses de enero a abril. Se opta por capturar una imagen mensual, iniciando en pleno verano, cuando el follaje alcanza su máxima exuberancia vegetativa, y culminando en la época de la cosecha, cuando el inicio de la caída de hojas comienza a manifestarse. Esta elección temporal persigue la identificación de posibles relaciones en diferentes etapas de desarrollo de la vid durante este periodo crítico.

El objetivo de esta metodología es explorar las interacciones y posibles tendencias entre las variables clave del proceso de producción de vino y las imágenes satelitales; aprovechar sus capacidades para comprender la evolución de las vides a lo largo del ciclo de crecimiento.

Aunque el proceso de regresión múltiple posibilita la incorporación de numerosas variables en los modelos, se limitó la selección a tan solo dos variables, con el fin de evitar colinealidad y generar modelos más robustos, que puedan ser extrapolados.

El proceso de generación de modelos sigue una secuencia que se detalla a continuación:

1. Para cada fecha de muestreo, se parte de una tabla de datos y se obtiene un modelo de regresión lineal múltiple, considerando todas las variables explicativas que sean estadísticamente significativas. En el primer paso de esta secuencia, se evalúa una combinación de todas las variables independientes, bandas e índices, en relación con las variables dependientes (factores de calidad de fruta y vino medidos en campo). Este sistema considera 14 casos por cada fecha de estudio y genera varios modelos ajustados. Proporciona datos y gráficos informativos, incluyendo una

tabla que resalta los modelos con los valores más altos de R-cuadrado ajustada, así como las variables incluidas en dichos modelos.

2. La siguiente etapa implica la elección de las dos variables independientes que mejor se ajusten al modelo. Una vez identificadas las dos variables que ofrecen el mejor R-cuadrado a través de la relación de varios factores, se lleva a cabo la regresión múltiple. Este proceso no solo entrega la ecuación del modelo ajustado, sino que también genera una serie de valores estadísticos. Estos valores permiten identificar las condiciones óptimas en términos de correlación, error absoluto medio (MAE), factor de inflación de varianza (VIF) y significancia de las variables (*p-value*).
3. Se procede a revisar y comparar los criterios de información y la selección de variables en los modelos de regresión lineal múltiple, con el objetivo de encontrar la configuración más adecuada.
4. Por último, se revisa la multicolinealidad de las variables seleccionadas en el modelo. Esta revisión proporciona intervalos de confianza y mide la precisión con la que se estiman los coeficientes dada la cantidad de datos disponibles. De especial relevancia es la tabla que muestra los factores de inflación de varianza (VIF), los cuales sirven para evaluar el grado de correlación entre las variables predictoras (VIFs por encima de 10 indican una mayor multicolinealidad).

## 4.7 Zonificación para una Vendimia Selectiva

La cosecha selectiva es un método de producción de vino que consiste en recoger uvas en diferentes estados de madurez para crear diferentes tipos de vino del mismo viñedo. Las uvas se cosechan en diferentes momentos según su madurez, lo que contribuye a la calidad y complejidad del vino. Los diferentes niveles de madurez también crean diferentes sabores y características (Rendulic et al., 2022). En esta línea, se define una metodología que permita potenciar la gestión del viñedo, ofreciendo información precisa para la vendimia, permitiendo una cosecha selectiva y más eficiente.

Se utilizó el algoritmo de clasificación no supervisada *k-means*, para determinar zonas que presentaran características homogéneas en los mapas estimados de las variables pre y poscosecha. Para cada temporada se crearon tres mapas, el primero a partir de los dos mapas de variables precosecha obtenidos, el segundo a partir de los tres mapas de las variables poscosecha obtenidas y el último considerando los mapas de las cinco variables obtenidas.

La Tabla 7 muestra las combinaciones que se desarrollaron a partir de los modelos obtenidos en pre y poscosecha, con el fin de definir zonas de manejo diferenciado de cosecha en las parcelas. Para ello se propuso la realización de 6 mapas, los mapas 1 y 4, incluyen las 2 variables precosecha °Brix y pH, el mapa 1 corresponde a la temporada 2017 y el mapa 4 a la temporada 2018. Siguiendo este mismo esquema, los mapas 2 y 5, corresponden a las variables poscosecha, correspondientes a índice de color (IC), antocianos totales (AT) y fenoles totales (FT), temporadas 2017 y

2018 respectivamente. Finalmente, los mapas 3 y 6, corresponde a la unión de todas las variables tanto pre como poscosecha.

*Tabla 7. Identificación de mapas de clasificación no supervisada K-Means, para buscar zonas de características homogéneas entre las variables pre y poscosecha. Las variables pre cosecha corresponden a °Brix y pH y las poscosecha corresponden a IC (índice de color), AT (antocianos totales) y FT (fenoles totales). Fuente: Elaboración propia.*

<b>Temporada</b>	<b>°Brix, pH</b>	<b>IC, AT, FT</b>	<b>°Brix, pH, IC, AT, FT</b>
2017	Mapa 1	Mapa 2	Mapa 3
2018	Mapa 4	Mapa 5	Mapa 6

Para la clasificación no supervisada, se utilizó el método *k-means*. El cual es un método de agrupamiento que divide un conjunto de datos en *k* grupos o *clusters*. Los datos se agrupan de tal manera que los puntos en el mismo *cluster* sean más similares entre sí que los puntos en otros *clusters*. Cada grupo está representado por su centro o centroide, que corresponde a la media aritmética de los puntos de datos asignados al grupo. De esta manera, el algoritmo funciona a través de un proceso iterativo hasta que cada punto de datos está más cerca del centroide de su propio grupo que de los centroides de otros grupos (Sinaga y Yang, 2020). En este caso se determinaron 4 clases, para cada uno de los 6 mapas creados.

El proceso de clusterización que se realiza con la clasificación no supervisada permite obtener regiones con determinadas propiedades de °Brix y pH, al igual que con las variables poscosecha.

---

#### 4.7.1 NORMALIZACIÓN DE LOS DATOS

Si consideramos que las variables °Brix, pH, polifenoles, e índice de color tienen diversos valores muy distintos entre sí, parece necesario normalizar los datos de modo que la clusterización facilite la interpretación de los datos y permita utilizar una escala común, debido a que todas las variables tienen la misma influencia en el análisis y evita que las diferencias en las unidades de medida y las escalas de los datos afecten los resultados.

Para la normalización de los datos se utilizará la técnica de escalamiento Min-Max, también conocido como Normalización Min-Max, es una técnica de transformación de datos utilizada en el análisis de datos y el aprendizaje automático. Esta técnica permite ajustar los datos a un rango específico, generalmente entre 0 y 1, lo que facilita la comparación y la interpretación de las variables.

Al aplicar el Escalamiento Min-Max, normalizamos todos los valores de las diferentes variables a un rango único entre 0 y 1. Para ello, se generó una función lineal para cada una de las variables, pre y poscosecha, en la cual se asignó el valor mínimo de los datos al valor cero y el valor máximo a 1. Con esto se obtuvo una determinada fórmula, que permitió la transformación o escala de cada uno de los datos.

En la tabla 8, se puede observar la función de normalización que se aplicó en cada uno de los casos. En la tabla se aprecian las columnas correspondientes a las variables. Por ser funciones de escalamiento, todas las pendientes son positivas y cortan el eje de las abscisas bajo cero.

Tabla 8. Funciones lineales de normalización aplicadas a las variables en estudio. Temporada 2017 y 2018. Fuente: Elaboración propia.

<b>Variable</b>	<b>Función de Normalización</b>	<b>Variable</b>	<b>Función de Normalización</b>
Brix 2017	$y = 0,2956x - 6,6238$	Brix 2018	$y = 0,2676x - 5,8927$
pH 2017	$y = 2,0438x - 6,9989$	pH 2018	$y = 1,0738x - 3,6784$
IC 2017	$y = 0,0817x - 0,8023$	IC 2018	$y = 0,0227x - 0,0838$
FT 2017	$y = 0,0007x - 0,1487$	FT 2018	$y = 0,0011x - 0,7352$
AT 2017	$y = 0,0034x - 1,1453$	AT 2018	$y = 0,0011x - 1,0419$



# Capítulo V

## Resultados

### 5.1 Introducción

El presente capítulo muestra un resumen de la recopilación e interpretación de los datos recolectados en terreno, así como su análisis y resultados. Por una parte, están los principales indicadores que dan cuenta de la madurez de la uva que se recolectan previos a cosecha °Brix y pH y los obtenidos posteriores a cosecha y que se obtuvieron durante la microvinificación: antocianos totales, fenoles totales e índice de color, con los cuales se obtiene una panorámica del estado y potencial enológico del fruto.

Este capítulo permite revisar y explorar la relación de los datos y cómo interactúan con la información extraída de las imágenes en diferentes fechas. Esta integración permitirá mostrar los resultados estadísticos de los



modelos seleccionados, otorgando una visión de los resultados de este estudio.

## 5.2 Análisis de Variable Precosecha

Para entender cómo se relacionan los datos °Brix y pH espacialmente respecto de las variables extraídas de las imágenes satelitales, usamos dos tipos de gráficos. El primero (figura 24) es un gráfico de dispersión, se visualiza como un mapa de puntos que nos muestra cómo dos conjuntos de datos se comparan entre sí, intentando ver si uno afecta al otro. El segundo análisis (figura 25 y 26) corresponde a una visualización vectorial, y corresponde a un gráfico el cual toma en cuenta de forma simultáneamente tanto las bandas como los índices extraídos desde las imágenes satelitales y nos muestra cómo se relacionan todos ellos con respecto a cada uno de los datos en estudio: °Brix y pH.

En muchas ocasiones, es frecuente encontrar una fuerte correlación entre los datos de dos bandas adyacentes en el espectro electromagnético, ya que bandas de longitudes de onda similar presentan una respuesta similar frente a un mismo material. Este fenómeno se muestra claramente en la figura 24 donde se destaca una alta correlación, por ejemplo, entre las bandas B3, B4 en la región visible del espectro; entre las bandas B7 y B8 en el Infrarrojo cercano y B11 y B12 en las bandas de infrarrojo de onda corta. Este análisis es importante para entender las relaciones existentes entre los datos disponibles.

En la figura 24, se destaca no solo la notable correlación entre las bandas adyacentes, sino también la baja asociación entre la variable °Brix y las

distintas bandas e índices, una tendencia que se repite al analizar la variable pH. Esta observación es respaldada por la revisión del diagrama de dispersión, la cual se lleva a cabo en todas las fechas en estudio.

Estos resultados sugieren que no existe una banda específica que pueda explicar la variabilidad de °Brix o pH, indicando más bien que la respuesta se encuentra en la combinación precisa de un conjunto de bandas o índices.

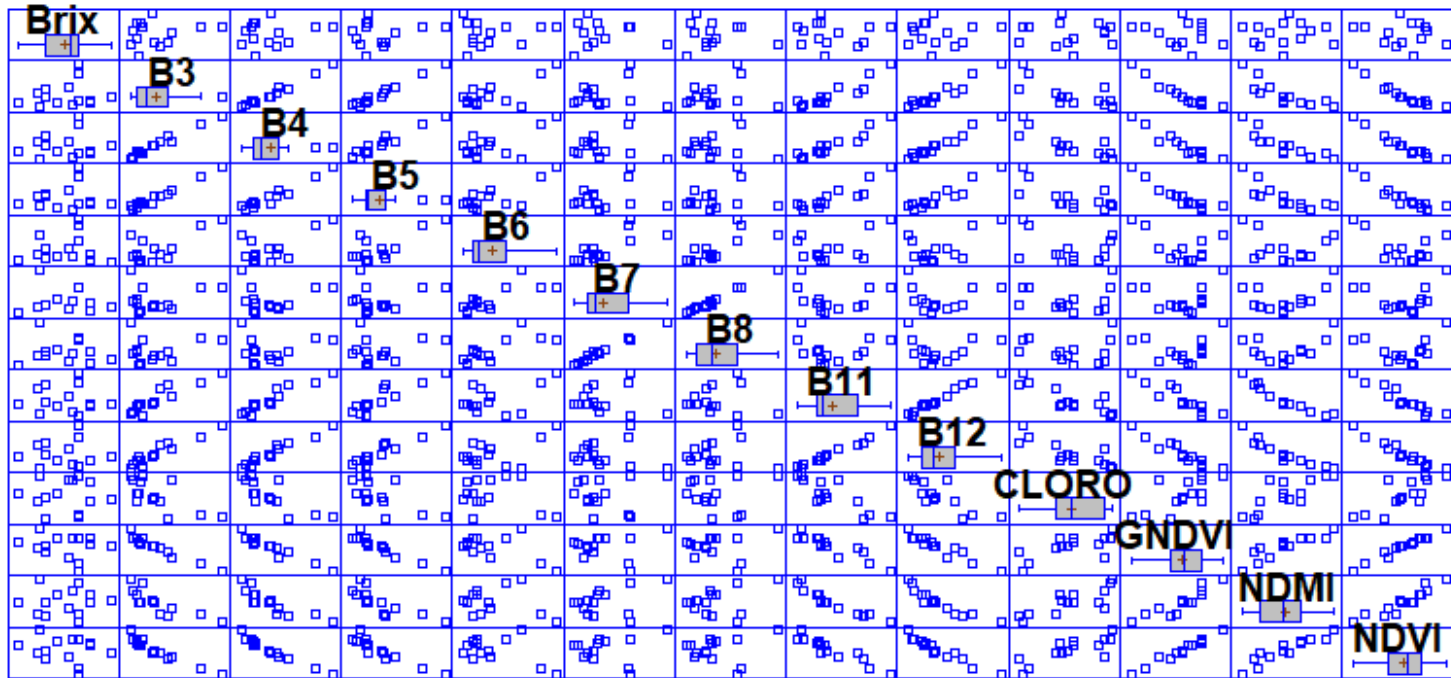


Figura 24. Diagrama de dispersión entre las variables °Brix y las bandas e índices de la imagen Sentinel-2. Fecha de referencia: 03 de abril de 2017. Fuente: Diagrama generado con Statgraphics con datos propios.

Previo a profundizar en el análisis del gráfico vectorial presentado en la figura 25, es relevante destacar que el estudio ha contemplado diversas revisiones y análisis con el objetivo de validar la relación entre las variables en estudio y las bandas e índices espectrales. Estas evaluaciones previas proporcionan un contexto esencial para comprender la complejidad de las interacciones entre las variables de interés y los datos espectrales recopilados a lo largo de las distintas fechas y temporadas.

El análisis de un gráfico vectorial, como el mostrado en la figura 25 muestra la respuesta espectral del follaje en la imagen Sentinel-2 en las cuatro fechas durante las dos temporadas analizadas. La figura 25 corresponde a la variable °Brix. Cada punto en el gráfico simboliza un valor de °Brix, obtenido directamente desde el campo, el valor de la muestra varía dependiendo de la escala colorimétrica indicada: valores bajos de °Brix se representan en azules y valores altos en rojos.

Desde un punto central, emergen líneas vectoriales que representan las bandas e índices espectrales de la imagen Sentinel-2. El centro del pivote indica valores bajos de píxel en la imagen, mientras que los valores altos de píxel se encuentran más alejados del centro vectorial. Esta representación visual proporciona valiosas percepciones sobre la distribución espectral de la variable °Brix en diferentes momentos temporales y destaca la compleja relación entre dicha variable y las características espectrales de la imagen Sentinel-2.

Estas observaciones se enmarcan en el contexto de los estudios previos realizados para validar las conexiones entre las variables en estudio y los datos espectrales.

La representación radial adoptada proporciona una visión integral y comprensiva de la disposición de todas las muestras recopiladas en el terreno, siendo particularmente valiosa cuando se busca identificar tendencias en los valores de cada banda. En los ejemplos a continuación,

no se observa una tendencia clara en el comportamiento de los datos, corroborando así los hallazgos de los gráficos de dispersión. Esta falta de patrón coherente refuerza la conclusión de que no existe una banda específica ni un índice espectral único que pueda explicar la variabilidad observada en los niveles de °Brix o pH. Este análisis exhaustivo y multidimensional subraya la complejidad de las relaciones entre las variables estudiadas y destaca la necesidad de considerar combinaciones precisas de bandas e índices para comprender plenamente la variación en los niveles de interés.

La figura 26 representa los valores de pH obtenidos. Al igual que en la figura 25, no es clara una tendencia recurrente respecto de la posición de los valores de pH en relación con las bandas o índices de la imagen Sentinel-2.

En ambos gráficos es posible destacar que las escalas van aumentando en el transcurso del tiempo, permite ver que no hay un patrón claro de las gráficas que se preserve en el tiempo, salvo el hecho de que consecutivamente en el tiempo va aumentando el contenido de azúcar medido y la acidez de la muestra.

Modelación de parámetros de calidad de uva vinífera con índices satelitales provenientes de imágenes de resolución espacial media para el manejo diferenciado de viñedos en Chile

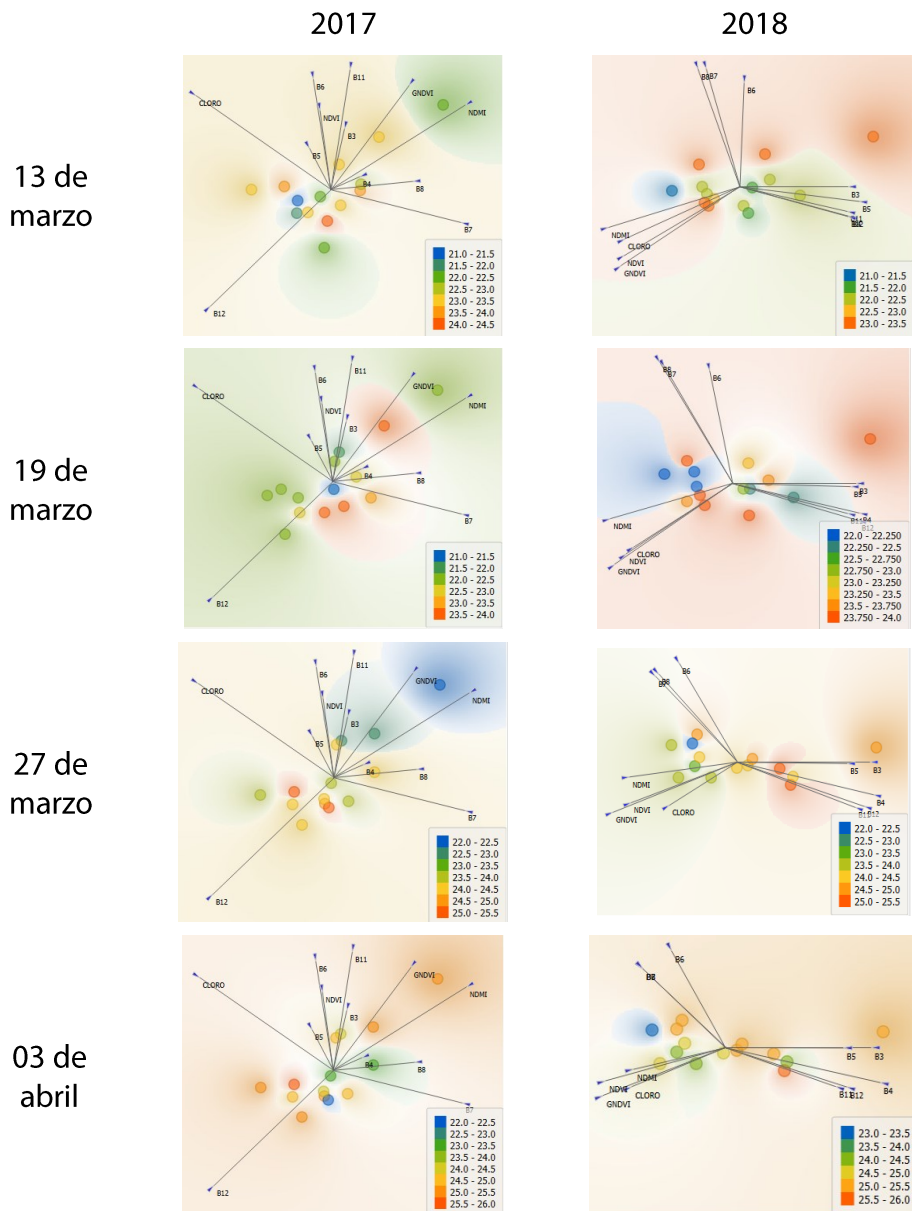


Figura 25. Visualización vectorial de datos °Brix. Comparación de temporadas 2017 y temporada 2018. Los colores de los puntos representan valores de °Brix. Fuente: Mapas generados con Orange 3, con datos propios

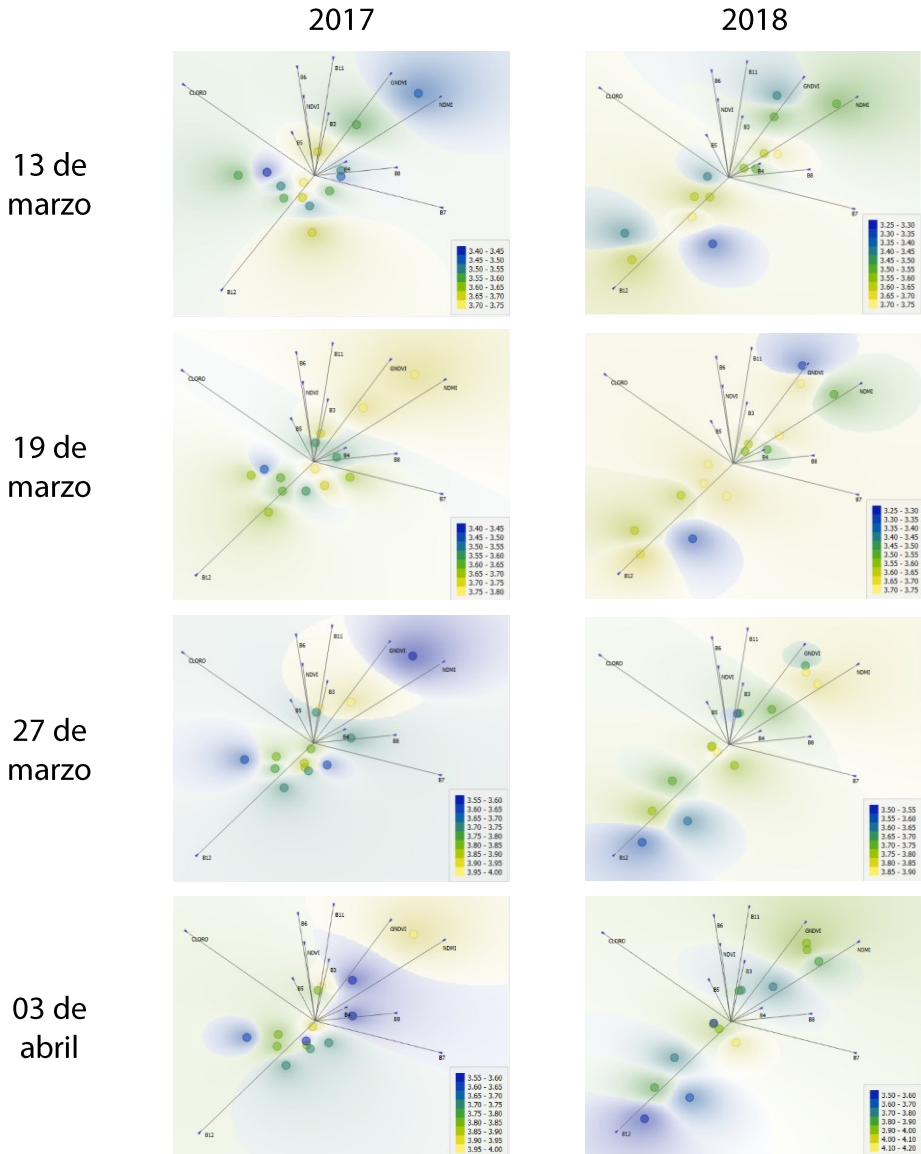


Figura 26. Visualización Vectorial de datos pH. Comparación de temporada 2017 y temporada 2018. Los colores de los puntos representan valores de pH. Fuente: Mapas generados con Orange 3, con datos propios.

Esta forma de visualización libre, basada en la física de partículas, considera que los puntos de una misma clase o categoría se atraen y los de distinta categoría se repelen. Los puntos son proyectados en el espacio multidimensional que forman las bandas e índices espectrales y muestran una escala de igual número de rangos, cada rango está dado por los valores medidos de °Brix y pH obtenidos en cada fecha.

Si los puntos medidos tuvieran un patrón de comportamiento estable, podríamos ver una tendencia más clara respecto si la acumulación de azúcar se correlaciona mejor con una banda o si existen valores constantes que se alcanzan en una cierta banda o indicador. Lo mismo ocurre con la figura 26, que representa la visualización de los datos en pH, la cual no muestra una armonía respecto de cuándo o en qué bandas hay una tendencia para determinados valores de pH. Esta baja tendencia para factores únicos indica que será necesario considerar más de un factor para construir un modelo estadístico que describa el impacto de dos o más factores en nuestras variables.

---

### 5.2.1 ESTADÍSTICAS PRECOSECHA

Los datos que forman nuestro universo estadístico corresponden por una parte a los datos medidos en terreno y, por otra, a los obtenidos desde la imagen y que están relacionados con el estado del follaje en ese momento.

Es importante verificar que existe un corregistro espacial adecuado entre todas las imágenes y respecto de la posición en terreno desde donde se tomaron las muestras. Para verificar esta concordancia respecto de la georreferenciación de las imágenes, se realizó una verificación visual y estadística. Un ejemplo de ello es lo mostrado en la figura 27, donde se



comparan las imágenes respecto del valor de NDVI en el cuartel 7.02, en ella se aprecia el número de píxeles dentro del área; los valores mínimos, máximos y la media de NDVI de las distintas fechas. La columna *count*, correspondiente al conteo de píxeles dentro del cuartel, permite verificar que existe la misma cantidad de píxeles, independientes de la fecha que se esté revisando: 479 píxeles en cada una de las fechas en estudio. Comparando visualmente la superficie representada en las 4 fechas se puede afirmar que el área representada es siempre la misma ya que los elementos distinguibles en el interior de la parcela siempre están en la misma localización respecto al perímetro de la parcela.

La figura 27 presenta un análisis de una porción específica de terreno en todas las imágenes utilizadas. En esta representación, se observa la progresión temporal de enero a abril. La tabla de valores asociada muestra consistentemente la misma superficie y número de píxeles a lo largo del tiempo. Se destaca una variación en los valores que representa el píxel, en este caso el valor de NDVI para el cuartel identificado como 7.02.

Además, se incluyen seis estadísticas básicas: MIN y MAX, que indican el valor de píxel más bajo y más alto, respectivamente, dentro del polígono en la fecha proporcionada. La estadística RANGE representa la diferencia entre el valor MAX y MIN en el polígono. La estadística MEAN representa el promedio de los valores de píxeles de NDVI dentro del polígono. También se incluyen STD y SUM, que corresponden a la desviación estándar y la suma de los valores de píxeles, respectivamente.

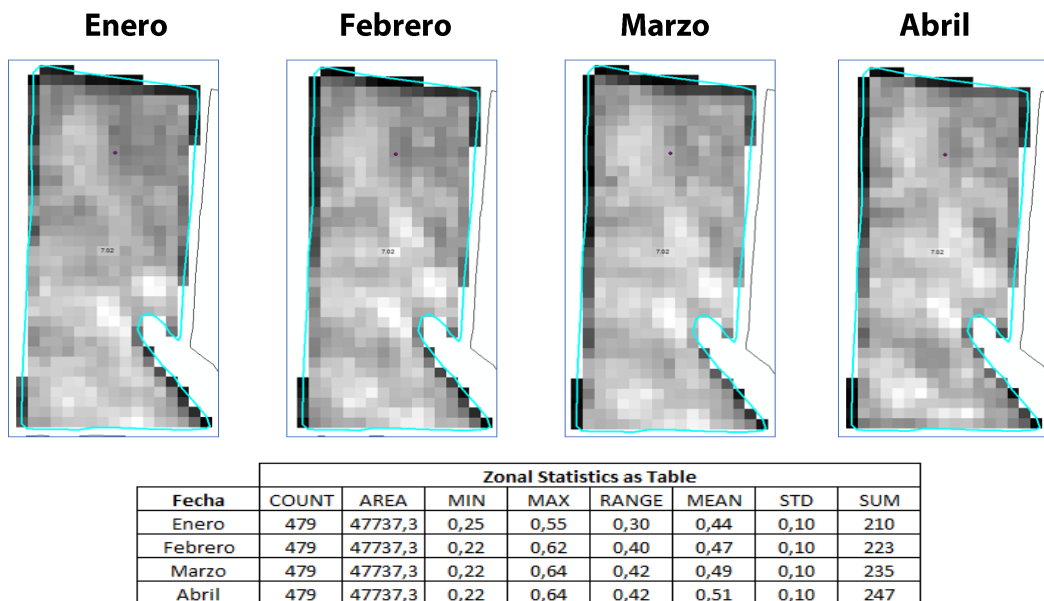


Figura 27. Comparación de los valores de NDVI en el cuartel 7.02, para diferentes fechas. Fuente: Mapa de elaboración propia.

Para facilitar el análisis y comprensión de los datos, se elaboraron tablas de información en función de cada fecha de muestreo, sumando un total de cuatro tablas por cada temporada analizada. Estas tablas contenían tres componentes clave: el identificador único de cada cuartel, el valor promedio de °Brix y pH de las muestras recolectadas y el valor promedio de píxeles de las bandas e índices. El valor promedio de las muestras de °Brix y pH, se obtuvo en un radio de 15 metros alrededor de la ubicación central de muestreo.

Para obtener los valores correspondientes a los píxeles de las imágenes, se utilizó una capa vectorial de puntos. Alrededor de cada punto, se creó un buffer de 15 metros que se utilizó como un nuevo polígono. Desde este polígono, obtuvimos el valor promedio de los píxeles en las ocho bandas

utilizadas, así como de los cuatro índices espectrales. En conjunto, se reunieron un total de 12 variables distintas, tal como se detalla en la tabla 9.

Las tablas de información son el eje central del análisis posterior, ya que permiten ordenar los datos recopilados. A través de estas tablas se ejecutará un procedimiento de regresión múltiple, procedimiento que permite explorar en profundidad el impacto de dos o más factores cuantitativos, en este caso, nuestras bandas e índices espectrales sobre las variables dependientes: °Brix y pH obtenidas en campo.

Tabla 9. Tabla de datos para el área de interés, correspondiente al 03 de abril de 2017. Muestra el identificador del polígono para cada cuartel; el valor promedio de °Brix y pH alrededor de la muestra y el promedio de píxeles dentro del buffer de 15 metros alrededor del punto de muestreo. Fuente: Elaboración propia.

<b>Cuartel</b>	<b>°Brix</b>	<b>pH</b>	<b>B3 Green</b>	<b>B4 Red</b>	<b>B5 Red Edge</b>	<b>B6 Red Edge</b>	<b>B7 Red Edge</b>	<b>B8 NIR</b>	<b>B11 SWIR 1</b>	<b>B12 SWIR 2</b>	<b>COLORO</b>	<b>NDMI</b>	<b>NDVI</b>	<b>GNDVI</b>
7.02	25,4	3,7	588	758	1178	1878	2192	2423	2466	1524	-0,708	-0,009	0,523	0,609
7.07	23,2	3,9	487	560	1041	1887	2201	2449	1953	1175	-0,632	0,112	0,627	0,668
7.08	24,8	3,9	515	624	1037	1827	2162	2369	2233	1352	-0,626	0,034	0,591	0,647
7.10	25,2	3,9	680	854	1297	2023	2315	2491	2296	1461	-0,685	0,040	0,491	0,575
7.12	22,2	3,8	859	1173	1627	2214	2459	2634	2850	1996	-0,757	-0,037	0,401	0,521
7.15	26,0	3,9	504	569	1026	1842	2144	2367	1972	1151	-0,584	0,080	0,594	0,639
10.04	25,0	3,6	427	417	917	1922	2285	2482	1378	786	-0,531	0,276	0,711	0,710
10.06	25,2	4,0	428	414	956	2146	2567	2804	1551	829	-0,513	0,289	0,758	0,747
10.07	24,2	4,0	400	376	850	1862	2218	2413	1467	810	-0,499	0,235	0,717	0,709
10.08	24,4	3,6	473	555	1010	1806	2122	2322	1739	1021	-0,641	0,137	0,610	0,659
10.10	23,4	3,6	479	569	1040	1945	2333	2572	1987	1188	-0,652	0,137	0,644	0,691
10.11	25,4	3,7	557	630	1096	1817	2101	2289	1935	1210	-0,534	0,079	0,564	0,605
10.12	24,6	3,8	423	439	902	1857	2242	2456	1687	937	-0,504	0,194	0,700	0,708
10.13	24,6	3,7	462	559	953	1801	2182	2381	1715	1052	-0,655	0,160	0,619	0,674

---

## 5.2.2 COMPARACIÓN Y SELECCIÓN DE MODELOS

La determinación de los modelos de °Brix y pH se inicia con la obtención de múltiples modelos a partir de la regresión múltiple, considerando 12 variables por cada fecha de muestreo. Una vez generados todos los modelos para las fechas en estudio, se puede seleccionar el mejor de ellos.

Para la selección del mejor modelo de regresión a partir de la relación de múltiples variables, lo primero es la comparación de los resultados obtenidos en las 4 fechas y evaluar cuál de ellas cumple con las mejores condiciones en términos de valores estadísticos identificados como clave, como el error absoluto medio (MAE), Factor de inflación de varianza (VIF) y significancia de las variables (*p-value*).

Las figuras 28 y 29 presentan un cuadro resumen del comportamiento, el error, la multicolinealidad, la significancia y el coeficiente de determinación  $R^2$ , de las dos mejores variables independientes para cada fecha. Este cuadro proporciona una visión completa de los resultados y facilita la elección del par de variables más representativo de las condiciones de la fruta antes de la cosecha, así como la fecha o periodo más adecuado para establecer variables predictivas de °Brix y pH en el caso de las variables previas a cosecha.

La figura 28, muestra los resultados de distintos modelos de regresión ajustados entre °Brix y las bandas e índices. Permite observar simultáneamente los resultados obtenidos en ambas temporadas, y los gráficos resultantes se dividen en tres grupos de acuerdo a los valores estadísticos considerados relevantes, en la fila superior (a) se presentan los resultados del coeficiente de determinación  $R^2$ , obtenido en cada fecha en relación al error absoluto medio en ambas temporadas. La siguiente fila (b) muestra los resultados del coeficiente de determinación en relación al factor de inflación de varianza o multicolinealidad en ambas temporadas.

Finalmente, la última fila (c) muestra los resultados del coeficiente de determinación  $R^2$  en relación a la significancia ( $p$ -value) de las variables en ambas temporadas. Este mismo enfoque se repite en la figura 29, referida a los resultados de regresión obtenidos entre pH y las variables independientes (bandas e índices).

Si se centra la atención en la primera fila de la figura 28, notamos que el 27 de marzo en ambas temporadas presenta el mayor  $R^2$  y el más bajo error absoluto medio (MAE aproximadamente de 0.4 en ambas temporadas), además corresponde al valor más bajo de VIF y  $p$ -value. Si continuamos a la segunda fila, también coincide el mayor  $R^2$  y el más bajo factor de colinealidad el 27 de marzo (VIF menor que 10 en ambas temporadas), finalmente en la tercera fila tenemos que de igual forma que las anteriores, el 27 de marzo corresponde a la fecha de mejor  $R^2$  y menor  $p$ -value (menor a 0.01 en ambas temporadas) para las variables. Por tanto, en el caso de °Brix, es concluyente que el mejor resultado predecible de °Brix es el 27 de marzo en ambas temporadas.

En el caso de pH de las 4 fechas analizadas, destaca el 19 de marzo en la temporada 2017 y el 03 de abril en la temporada 2018. Si analizamos la primera fila de la figura 29, referida al error absoluto medio la selección nos lleva al 19 de marzo en la primera temporada en donde se presenta el menor error absoluto medio y en la temporada 2018 la selección se presenta el 03 de abril. Si continuamos a la segunda fila, es precisamente el 19 de marzo donde se presenta la multicolinealidad más baja, al igual que el 03 de abril en el caso de la temporada 2018, finalmente en la tercera fila tenemos una significancia de las variables con un  $p$ -value de 0.05 en el caso de la temporada 2017 y un  $p$ -value de 0,02 para el modelo, en las variables seleccionadas el 03 de abril de 2018. Por tanto, en el caso de pH, al igual que el caso de °Brix, los mejores resultados se dan cuando la fruta se presenta técnicamente más madura y está cercano a la fecha de cosecha.

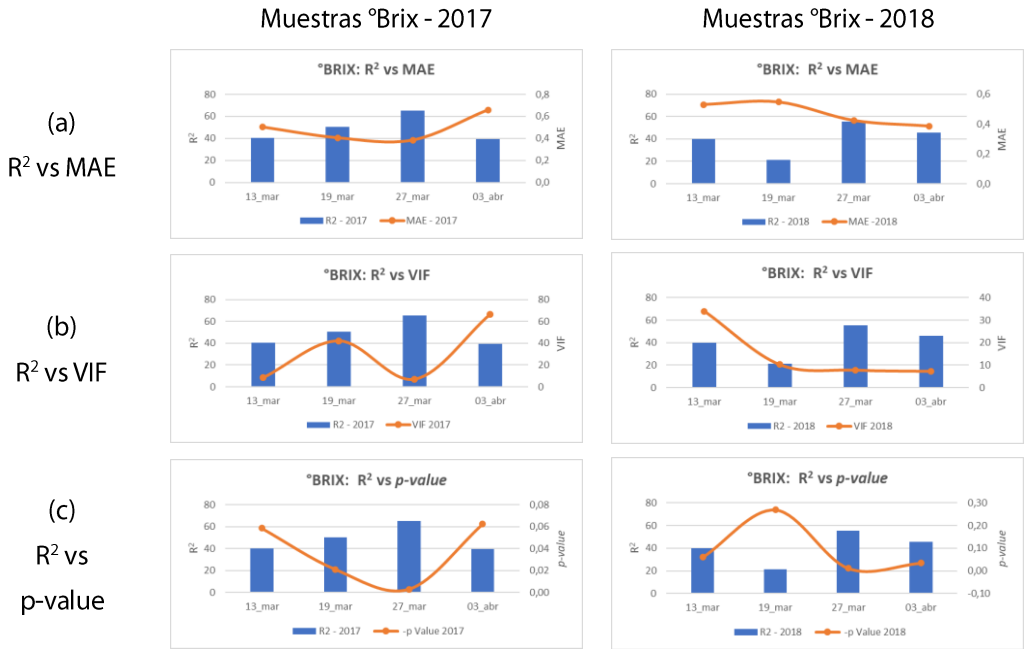


Figura 28. Comparación temporada 2017 y 2018 de los modelos de regresión múltiple de °Brix. Los gráficos muestran un despliegue de las distintas fechas y del resultado de los valores entre el coeficiente de determinación, respecto de (a) el Error Absoluto Medio; (b) el factor de inflación de varianza y (c) significancia de las variables. Fuente: Elaboración propia.

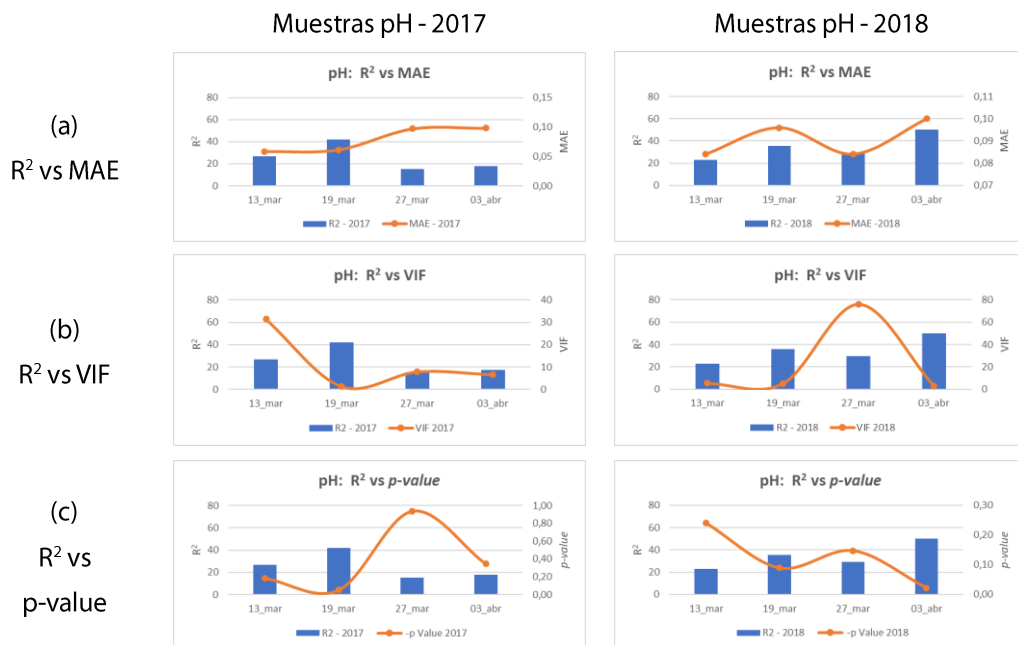


Figura 29. Comparación temporada 2017 y 2018 de los modelos de regresión múltiple de pH. Los gráficos muestran un despliegue de las distintas fechas y del resultado de los valores entre el coeficiente de determinación, respecto de (a) el Error Medio Absoluto; (b) el factor de inflación de varianza y (c) significancia de las variables. Fuente: Elaboración propia.

### 5.2.3 MODELIZACIÓN DE VARIABLES

Según se desprende de la información resumen entregada en el apartado anterior, la elección del mejor modelo se basa en la fecha con mayor coeficiente de correlación y que además coincida con presentar significancia en sus variables, con una baja correlación entre sí y un bajo error de sus residuos. Con estas condiciones, se obtiene la selección de la fecha más adecuada a la variable en estudio.



De acuerdo a lo mostrado en la tabla 10, en el caso de °Brix, en las temporadas 2017 y 2018, coinciden las mejores condiciones el 27 de marzo. En el caso de la temporada 2017, destacan una mayor ocurrencia de las bandas B11 y B12 correspondientes a bandas de infrarrojo de onda corta y en el año 2018 destacan las bandas B4 (rojo) y B12. Las bandas involucradas en los modelos del 27 de marzo son: la banda B12 (SWIR) y el indicador de humedad NDMI para la temporada 2017; B4 (rojo) y NDVI para la temporada 2018.

En el caso del pH, las mejores condiciones se dan el 19 de marzo 2017 y el 3 de abril 2018. En la primera fecha las bandas involucradas son B6 y B11 y en la segunda temporada B11 y NDVI.

La tabla 10, se centra en 3 parámetros clave: el coeficiente de determinación  $R^2$  obtenido en cada fecha, el factor de significancia (*p-value*) y las variables incorporadas en el modelo. Al analizar los resultados para el parámetro °Brix, se puede observar un cierto patrón de ocurrencia del resultado de  $R^2$  en ambas temporadas, que muestra una curva ascendente hasta el 27 de marzo seguida de un declive. Este patrón sugiere que cualquier modelo predictivo para este parámetro requiere que la fruta alcance su punto de madurez óptimo para la cosecha. No se aprecia una tendencia clara en las variables independientes que conforman el modelo, es destacable que en las dos fechas con el coeficiente de determinación más alto se utilizan una banda y un índice.

En cuanto al pH, no se evidencia una regularidad en el comportamiento de las variables independientes que pueda observarse en las fechas de ambas temporadas. De hecho, en la primera temporada el mejor resultado se registra el 19 de marzo a diferencia de la segunda temporada, donde el mejor resultado se alcanza al finalizar el ciclo de la vid, poco antes de que comience la caída de la hoja. Esta dinámica sugiere que la dinámica del pH esta influenciada por factores específicos de cada temporada, destacando

la importancia de considerar la variabilidad estacional al interpretar estos resultados.

Tabla 10. Cuadro resumen coeficiente de determinación  $R^2$  para cada fecha, temporada 2017 y 2018 vs variables incluidas en los modelos. Fuente: Elaboración propia.

<b>°BRIX - 2017</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>P-Value</b>	<b>Variables</b>	<b>°BRIX - 2018</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>P-Value</b>	<b>Variables</b>
13_mar	40,3	0,06	B11 - NDVI	13_mar	40,0	0,06	B4 - B12
19_mar	50,4	0,02	B11 - B12	19_mar	21,3	0,27	B4 - B11
27_mar	65,3	0,00	B12 - NDMI	27_mar	55,3	0,01	B4 - NDVI
03_abr	39,6	0,06	B3 - B5	03_abr	45,9	0,03	B12 - CLORO

<b>pH - 2017</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>P-Value</b>	<b>Variables</b>	<b>pH - 2018</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>P-Value</b>	<b>Variables</b>
13_mar	26,7	0,18	B11 - B12	13_mar	22,8	0,24	B12 - CLORO
19_mar	41,8	0,05	B6 - B11	19_mar	35,6	0,09	B12 - CLORO
27_mar	15,4	0,93	NDMI - NDVI	27_mar	29,4	0,15	B7 - B8
03_abr	17,6	0,34	B11 - NDVI	03_abr	50,1	0,02	B11 - NDVI

Las ecuaciones correspondientes a cada modelo seleccionado se detallan en la tabla 11, la cual presenta la fecha seleccionada, las variables independientes implicadas y el coeficiente de determinación  $R^2$ . Además, proporciona la ecuación derivada del proceso de regresión múltiple, mostrando la fórmula predictiva basada en dos variables.

Dado que no se observa un patrón de comportamiento único y repetitivo en ambas temporadas, se optó por desarrollar una ecuación única y diferenciada para cada parámetro, este enfoque sugiere que la estimación de °Brix es estacional y no necesariamente pueda replicarse en la misma fecha en futuros análisis. Sin embargo, esta variabilidad nos permite

estudiar la metodología de aplicación de la estimación de ambos parámetros y comprender cuál es el periodo óptimo durante el ciclo de vida de la vid para realizar su análisis.

Tabla 11. Ecuaciones de los modelos de regresión para °Brix y pH en las temporadas 2017 y 2018. Fuente: Elaboración propia.

°BRIX	VARIABLES	R <sup>2</sup>	Modelo
27-03-2017	B12 - NDMI	65,3	°Brix = 26,0033 - 0,000815084*B12 - 9,4415*NDMI
27-03-2018	B4 - NDVI	55,3	°Brix = 36,8659 - 0,00474808*B4 - 15,909*NDVI
pH	VARIABLES	R <sup>2</sup>	Modelo
19-03-2017	B6 - B11	41,8	pH = 2,65104 + 0,000634084*B6 - 0,000110674*B11
03-04-2018	B11 - NDVI	50,1	pH = 1,24389 + 0,000526029*B11 + 2,59256*NDVI

#### 5.2.4 ANÁLISIS ESPACIAL DE LAS VARIABLES

La implementación de modelos de regresión lineal múltiple utilizando dos variables específicas ha sido una herramienta esencial en el análisis, permitiendo la generación de mapas representativos del estado de °Brix y pH en una fecha concreta. Estos mapas no solo muestran la variabilidad intrínseca en cada parcela, sino que también ofrecen una visión respecto del potencial de maduración del fruto.

La función que se obtiene del análisis de regresión múltiple, detallada en la tabla 11, proporciona una fórmula predictiva que, aplicada al conjunto de datos, genera un ráster representativo de toda la parcela con valores estimados de °Brix y pH, el cual es muy útil, en las áreas en las que no se ha

llevado a cabo un muestreo directo, producto del limitado número de muestras de campo que se utilizan para determinar la maduración de la fruta. Esta metodología se transforma en una herramienta ventajosa, que proporciona una información espacial detallada sobre el estado de maduración de la uva.

En las figuras 30 y 31 se presenta la comparación entre el mapa de NDVI y los mapas resultantes de °Brix y pH que se obtienen al aplicar los modelos tras los análisis de regresión múltiple. La figura 30, representa la comparación de la primera temporada, año 2017, y la figura 31 la segunda temporada, año 2018.

La leyenda de los mapas de NDVI se define mediante una escala única de 10 intervalos que transitan desde tonalidades de rojo a verde. En esta gradación, la categoría más baja, identificada por el color rojo, representa áreas de suelo desnudo o con escasa presencia de vegetación. Contrariamente, la categoría más elevada, en tono verde, simboliza una vegetación más abundante, con hojas sanas y verdes, así como una mayor cobertura del suelo. La escala de NDVI se despliega en 10 rangos equidistantes entre sí, con intervalos de 0,05. La parte central de la escala corresponde al tono amarillo, abarcando desde 0,4 hasta 0,45. Este intervalo constituye la base desde la cual se percibe que la vegetación está más vigorosa y saludable, extendiéndose hasta alcanzar su potencial máximo, superando un factor de 0,7. Esta escala proporciona una visión detallada de la salud y vitalidad de la vegetación en la parcela.

La leyenda de los mapas de °Brix, se configura en una escala única compuesta por 9 intervalos. La elección de esta cantidad de rangos específica responde a la estrecha diferencia de solo 2 grados Brix entre los datos mapeados. Esta selección de rangos facilita la visualización precisa de las pequeñas variaciones en la acumulación de °Brix a lo largo de la parcela. En esta leyenda, se asigna el color verde al valor más bajo, mientras que el

color púrpura oscuro representa el extremo superior. Estas tonalidades se seleccionan estratégicamente para establecer una asociación visual entre las áreas más dulces y aquellas que poseen una menor concentración de azúcares. Es crucial tener presente que la modelación de los datos de °Brix se basa en la información recopilada durante el muestreo del 27 de marzo, momento en el cual las uvas se encuentran en un estado avanzado de maduración. Este enfoque temporal específico añade un matiz adicional a la interpretación de los resultados, capturando la riqueza de la información en el punto óptimo de desarrollo de las uvas.

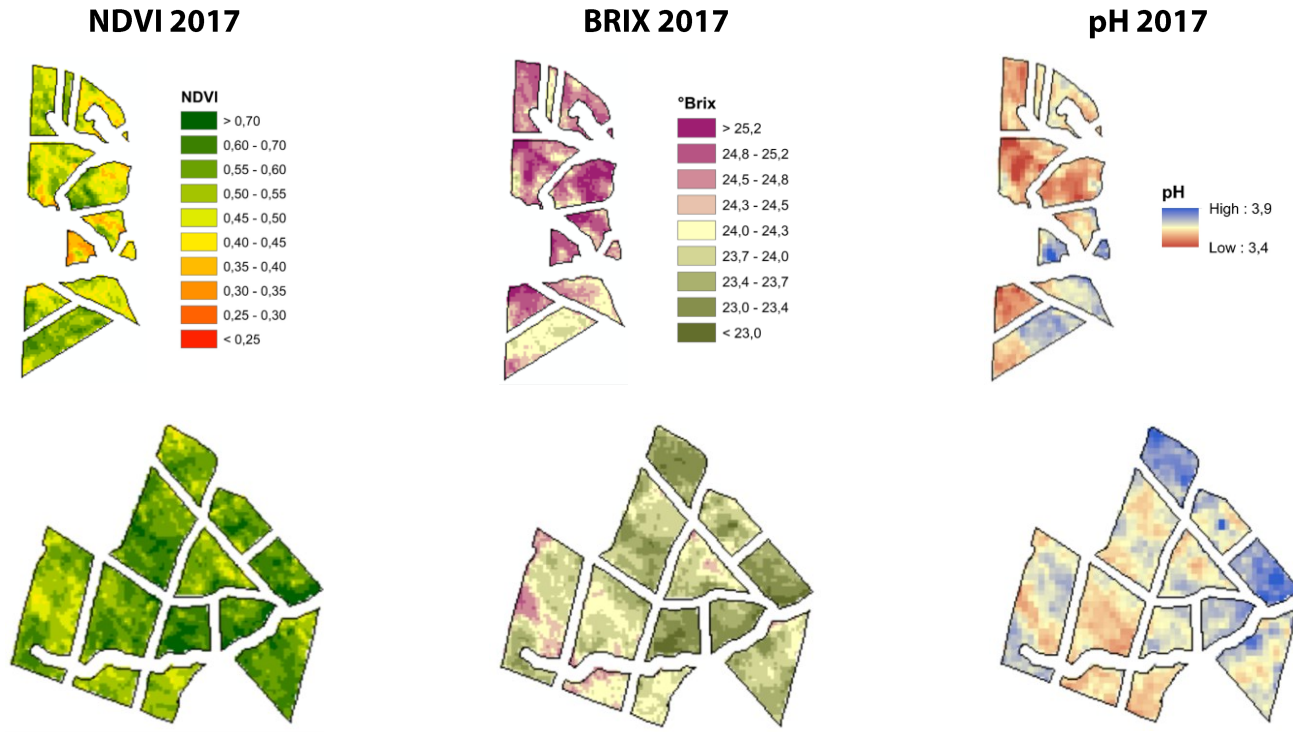


Figura 30. Comparación entre NDVI y mapas de °Brix y pH estimados. Primera Temporada, año 2017. Fuente: Elaboración propia.



Figura 31. Comparación entre NDVI y mapas de °Brix y pH estimados. Segunda Temporada, año 2018. Fuente: Elaboración propia.

Los mapas de pH se presentan de manera continua en lugar de ser divididos en intervalos, una elección que responde a la considerable variación en la distribución de datos en ambas temporadas. Esta variabilidad se atribuye a la naturaleza logarítmica del pH, que representa el logaritmo negativo de la concentración de iones de hidrógeno. Este enfoque exponencial del pH significa que pequeñas variaciones, como 0,1, reflejan cambios significativos en las propiedades ácidas o alcalinas del vino. Para fundamentar este punto, una solución con un pH 6,0 contiene diez veces menos iones de hidrogeno ( $H^+$ ) que una solución con un pH 7,0. De manera similar, un mosto con un pH de 5,2 contiene casi cuatro veces más iones de hidrogeno ( $H^+$ ) que un mosto con un pH de 5,8 (Lewis et. al 2006), lo que implica que variaciones tan pequeñas como 0,1 reflejan variaciones muy importantes en las características ácidas o alcalinas del vino. En este principio se basa la razón de mantener la leyenda de pH continua y no categorizada en intervalos.

Según se detalla en la tabla 11, los mapas fueron generados utilizando las bandas específicas indicadas en la fórmula correspondiente. Para la generación del mapa correspondiente a °Brix 2017 se utiliza la banda B12 y el índice NDMI, para la generación del mapa pH 2017 se utilizaron dos bandas: B6 y B11. Para la temporada 2018, la generación de mapa de °Brix incluye la banda B4 y el índice NDVI y para el mapa pH se utilizó el índice NDVI y la banda B11.

Si se considera al NDVI como un indicador clave del estado del follaje y reconocemos que la variabilidad de NDVI en una parcela refleja el momento específico en que se captura la imagen, este se convierte en un elemento esencial para realizar comparaciones espaciales de la variabilidad presente en los mapas estimados de °Brix y pH. Este enfoque no solo permite una evaluación más profunda de la distribución espacial tanto de la maduración como de la acidez de las uvas, sino que también destaca la



utilidad estratégica del NDVI como una herramienta valiosa en el análisis vitivinícola.

Estadísticamente también es posible identificar una relación inversa entre NDVI y °Brix, según es posible corroborar en la tabla 12, donde se aprecia el coeficiente de correlación y el coeficiente de determinación entre NDVI y °Brix para las fechas en estudio en ambas temporadas. Los modelos predictivos seleccionados, durante las temporadas 2017 y 2018, coinciden en que presentan un índice mayor a fines de marzo.

*Tabla 12. Comparación de coeficientes de correlación y coeficientes de determinación entre °Brix y NDVI en las temporadas 2017 y 2018. Fuente: Elaboración propia.*

<b>Fecha</b>	<b>Coef. Correlación R</b>	<b>Coef. Determinación R<sup>2</sup></b>
13-03-2017	-0,17	0,03
19-03-2017	-0,46	0,21
27-03-2017	-0,74	0,55
03-04-2017	0,25	0,06
13-03-2018	-0,28	0,08
19-03-2018	-0,37	0,13
27-03-2018	-0,65	0,42
03-04-2018	-0,51	0,26

La imagen de °Brix en ambas temporadas presenta una variabilidad intraparcelaria que guarda paralelismo con lo mostrado por el índice de vegetación NDVI, estableciendo una relación inversa entre la vigorosidad del follaje y los sólidos solubles. En otras palabras, las áreas con un índice

de vegetación más bajo presentan valores más elevados de °Brix, mientras que las zonas con un potencial vegetativo mayor y un follaje más abundante coinciden con valores más bajos de °Brix. Si bien el índice NDVI es parte del insumo en la segunda temporada (ráster creado a partir del índice NDVI y la banda roja), no está presente en la primera temporada (banda SWIR2 y el índice de humedad NDMI), por tanto, no sería factible asociar la inclusión de NDVI en la función como responsable de la variabilidad que se muestra en el mapa °Brix dentro de la parcela.

Es esencial destacar que, como variable individual, el NDVI no presenta una correlación significativa para la estimación directa de los valores de °Brix o pH. Sin embargo, visualmente, se aprecia una relación en el comportamiento y la variabilidad que presenta °Brix, pH y NDVI. Es posible apreciar detalles de ello en la figura 30, correspondiente a la temporada 2017, así como en la figura 31 que representa la temporada 2018. Estas representaciones visuales ilustran de manera clara la interrelación dinámica entre el estado de maduración, la acidez y la vitalidad del follaje, destacando la complejidad de los factores que influyen en la calidad de la uva y, por ende, en la elaboración de vinos de excelencia.

Si realizamos una comparación visual de los mapas de °Brix y pH presentados en las figuras 30 y 31, podemos observar interesantes patrones espaciales. Comenzando con la evaluación del NDVI, se destaca que durante la temporada 2018 hay un mayor número de cuarteles con un follaje más abundante. Este hecho se refleja en el mapa de °Brix, donde predominan tonalidades más verdes en comparación con la temporada 2017. Además, se observa una mayor variabilidad extrema en esta temporada, evidenciada por valores concentrados entre 23 y 25 °Brix, con pocos puntos amarillos en la parte central de la escala, indicando zonas alrededor de los 24 °Brix aproximadamente.

En cuanto a la temporada 2017, se distingue que los cuarteles del lado norte (2007) muestran tonalidades más rosadas, y la mayoría de ellos se sitúan en rangos de amarillo a púrpura, sugiriendo niveles de alrededor de 24° Brix. Por otro lado, los cuarteles del lado sur (2010) presentan tonalidades predominantemente verdosas, en una gama que va de amarillo a verde, y se ubican por debajo de los 24° Brix.

La visualización de los pH también revela notables diferencias entre ambas temporadas. Durante la primera temporada, en consonancia con los niveles de °Brix, los cuarteles del lado norte exhiben valores más ácidos, oscilando entre 3,7 y 3,4. En la temporada 2018, son los cuarteles del lado sur (2010) los que muestran niveles de acidez más pronunciados, transitando desde la parte central de la escala en amarillo hasta tonalidades más ácidas en rojo, con una base de 3,4.

### 5.3 Variables Poscosecha

Para estudiar el comportamiento de las variables poscosecha, se amplió el alcance del estudio con el objetivo de obtener una perspectiva más completa del estado del follaje. Este enfoque abarcó desde el inicio de la etapa de pinta en enero hasta el momento crítico de la cosecha en abril, proporcionando así una visión integral de la evolución de las variables a lo largo de este crucial periodo.

Las figuras 32 y 33 muestran la respuesta espectral del follaje capturada por la imagen Sentinel-2, en cuatro fechas durante las temporadas 2017 y 2018, respectivamente. Los valores en la imagen se distribuyen desde niveles bajos hasta altos, dispuestos de manera radial con respecto al centro del

pivote, posición desde donde nacen los valores más bajos y desde este punto emergen todos los vectores que representan las bandas e índices de la imagen.

Esta representación tiene como objetivo principal dos aspectos fundamentales. En primer lugar, busca identificar tendencias en los valores registrados en cada banda, permitiendo así comprender la variación espectral a lo largo del periodo analizado. En segundo lugar, pretende revelar tendencias en la posición de cada muestra en relación con diversas escalas, como el índice de color, fenoles totales y antocianos totales. Este enfoque dual posibilita la identificación de patrones significativos entre dos conjuntos de variables: la respuesta espectral del follaje en bandas e índices desde la etapa inicial de la pinta hasta el momento de la cosecha, y los resultados de la vinificación, expresados a través del índice de color, fenoles totales y antocianos totales.

El análisis de estos gráficos durante la primera fase del estudio centrada en los datos precosecha no reveló una tendencia clara. Sin embargo, resultaba imperativo investigar si existía algún patrón repetitivo entre los datos poscosecha de esta etapa, que pudiera indicar una relación más sólida entre los datos y las bandas e índices. La inclusión de gráficos multidimensionales en este proceso no solo amplía la comprensión de la interrelación dinámica entre las variables en estudio, sino que también ofrece una visión más profunda de cómo las condiciones del follaje inciden en los resultados finales de la vinificación.

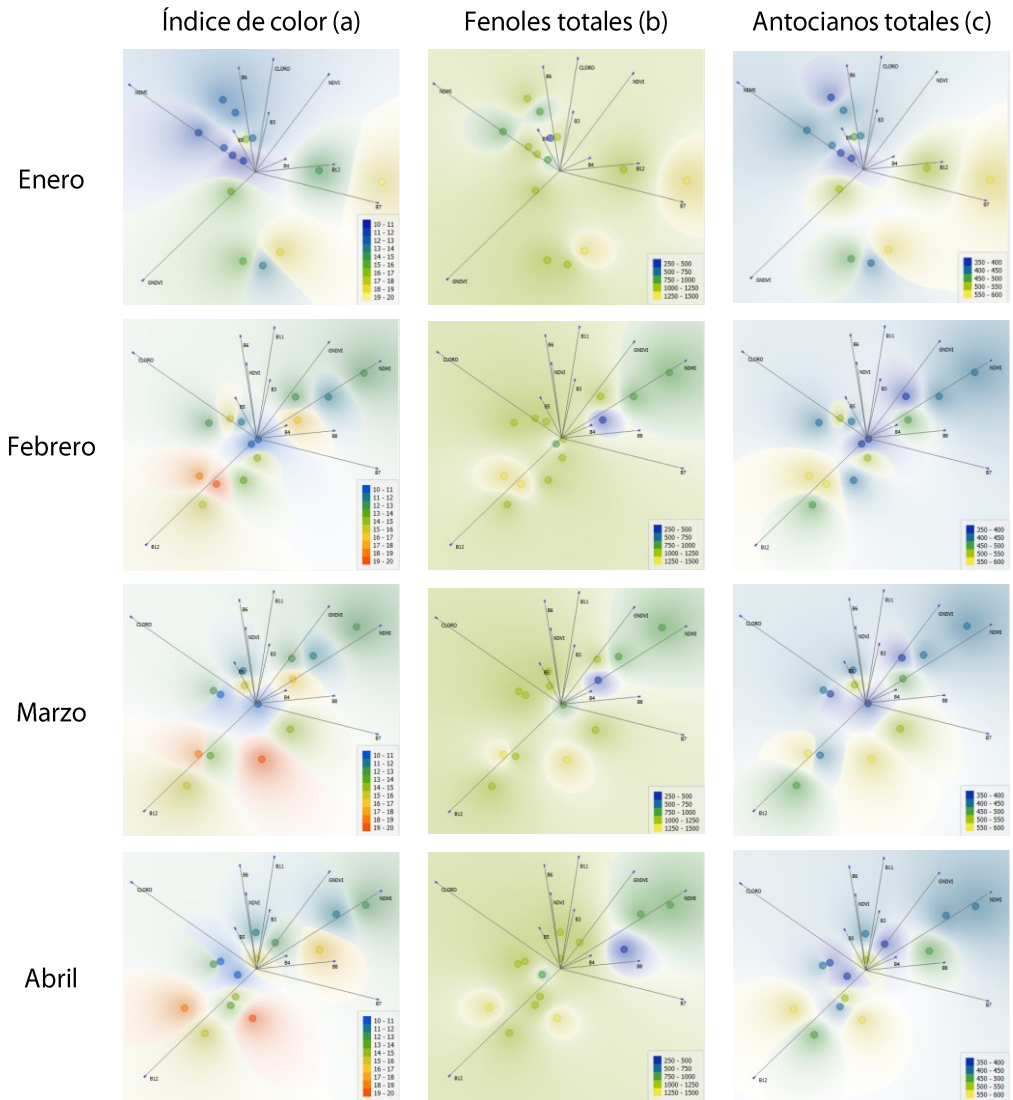


Figura 32. Visualización vectorial de variables: (a) índice de color, IC; (b) fenoles totales, FT y (c) antocianos totales, AT; durante la temporada de cosecha 2017. Los colores de los puntos representan valores de IC, FT y AT. Fuente: Mapas generados con Orange 3, con datos propios

Es importante destacar que, de manera consistente con la primera parte del estudio, no se identificó una banda o índice único que pudiera explicar la variabilidad de nuestras variables en estudio. Por lo tanto, resulta esencial encontrar el set de bandas o índices que puedan responder de manera coordinada, facilitando así la creación de modelos futuros.

La representación gráfica mediante un gráfico vectorial, que tiene como base el valor mínimo de las imágenes en el centro de cada pivote muestra los resultados de los índices de color (IC), fenoles totales (FT) y antocianos totales (AT) obtenidos de las muestras durante las temporadas 2017 y 2018 (figuras 32 y 33, respectivamente). Sin embargo, al observar estos gráficos, no se percibe un patrón claro o repetitivo que se mantenga a lo largo del tiempo o que se manifieste de manera consistente en cada fecha de muestreo. La única tendencia evidente es el aumento progresivo del índice de color a lo largo de las fechas.

Es importante destacar que esta forma de visualización sigue el principio de que los puntos de una misma categoría tienden a atraerse, mientras que los de categorías distintas tienden a repelerse. Estos puntos se proyectan en un espacio multidimensional compuesto por las bandas e índices, mostrando una escala con igual número de rangos. Cada rango está definido por los valores medidos de índice de color, fenoles y antocianos totales obtenidos en cada fecha de muestreo. A pesar de esta representación visual, la falta de un patrón claro en los gráficos sugiere que esta metodología podría no ser la más efectiva para comprender el comportamiento de las variables a lo largo del tiempo.

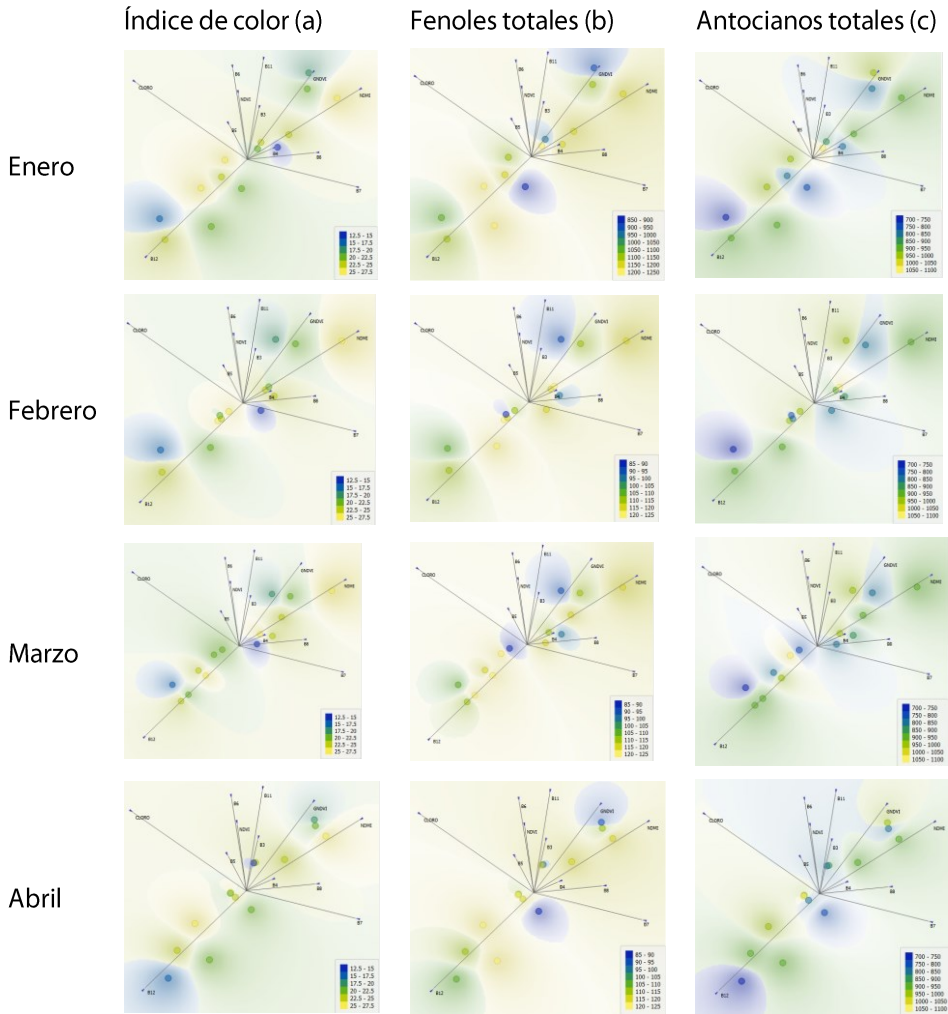


Figura 33. Visualización Vectorial de variables: (a) índice de color, IC; (b) fenoles totales, FT y (c) antocianos totales, AT; durante la temporada de cosecha 2018. Los colores de los puntos representan valores de IC, FT y AT. Fuente: Mapas generados por Orange 3, con datos propios

### 5.3.1 ESTADÍSTICAS POSCOSECHA

Los datos recopilados tras cada cosecha se presentan en la tabla 13, los cuales se encuentran organizados en tablas de información por cada fecha de imágenes. En total, se generaron cuatro tablas en cada temporada. Cada tabla, contenía datos únicos obtenidos después de la cosecha, como el índice de color, antocianos y fenoles totales. Estos datos se asociaron con cuatro fechas distintas con el objetivo de identificar el instante más adecuado para establecer correlaciones significativas entre las variables.

En cada tabla se incluyen el identificador único de cada cuartel, el valor de la muestra poscosecha y los datos derivados de las imágenes, detallados en la tabla 13. Esta estructuración de la información permitió revisar las relaciones entre los datos obtenidos en terreno y la información extraída de las imágenes en diferentes momentos del ciclo vegetativo.

Las tablas de información permiten ordenar los datos y realizar un procedimiento de regresión múltiple, con el cual descubrir el impacto de dos o más factores cuantitativos (bandas Sentinel-2 e índices obtenidos) sobre las variables dependientes en este caso: índice de color, antocianos y fenoles totales obtenidas en la micro vinificación.

La tabla 13, muestra una recopilación de datos correspondiente al 4 de abril de 2018, los datos se muestran agrupados iniciando con los cuarteles de plantación 2010, identificados con el prefijo "10.xx", donde xx va diferenciando los cuarteles, de igual manera aplica para los cuarteles con el prefijo "7.xx". Las columnas IC, FT y AT, corresponden a índice de color, fenoles totales y antocianos totales, respectivamente.

Los valores obtenidos en las variables IC y AT presentan una distribución normal, a diferencia de FT que presenta un sesgo hacia la derecha, según puede apreciarse en la figura 34, creada como complemento de la tabla 13. En el caso de IC, el valor más bajo y el más alto pertenecen a cuarteles de la



plantación 2010, y en el caso de AT el valor mínimo y máximo corresponden a cuarteles de plantación 2007. En el caso de fenoles totales el valor más bajo se presenta en la plantación 2007 y el más alto en la plantación 2010.

La figura 34, muestra varias columnas de información en las que se aprecia: Name: correspondiente al nombre de la variable mostrada, Distribution: corresponde un gráfico que representa la distribución los datos en dicha variable, Mean: corresponde al promedio de los datos, Mode, Median, Dispersion, Min., Max., Missing: corresponden a la moda, mediana, dispersión, valor mínimo, valor máximo y al % de datos que no se incluyó en el gráfico de dispersión, respectivamente.




	Name	Distribution	Mean	Mode	Median	Dispersion	Min.	Max.	Missing
N	AT		900.079	704.4	921.450	0.100	704.4	1070.1	0 (0 %)
N	FT		111.864	89.3	114.8	0.094	89.3	124.5	0 (0 %)
N	IC		22.1664	14.65	22.47	0.1623	14.65	28.17	0 (0 %)

Figura 34. Resumen de datos estadísticos básicos de la tabla 13. se muestra la curva de distribución de las variables en estudio AT (Antocianos Totales), FT (Fenoles Totales) e IC (Índice de Color), muestra además los valores. Fuente: Mapas generados por Orange 3, con datos propios.

Tabla 13. Tabla de datos correspondiente al 4 de abril de 2018. Muestra el nombre del polígono que identifica el cuartel; el valor índice de color (IC), fenoles totales (FT) y antocianos totales (AT) y el promedio de píxeles dentro del buffer de 15 metros alrededor del punto de muestreo. Fuente: Elaboración propia.

<b>CUARTEL</b>	<b>IC</b>	<b>FT</b>	<b>AT</b>	<b>B3</b>	<b>B4</b>	<b>B5</b>	<b>B6</b>	<b>B7</b>	<b>B8</b>	<b>B11</b>	<b>B12</b>	<b>COLORO</b>	<b>GNDVI</b>	<b>NDMI</b>	<b>NDVI</b>
10.10	23,84	97,8	885,5	603	549	1019	2113	2496	2648	1718	995	-0,171	0,633	0,215	0,661
10.13	14,65	119,4	831,3	552	485	971	2012	2382	2539	1460	801	-0,150	0,643	0,272	0,681
10.12	22,64	118,4	926,6	624	597	1124	2169	2534	2715	1710	974	-0,239	0,627	0,232	0,642
10.06	20,22	111,3	840,0	665	618	1227	2303	2663	2846	1760	981	-0,232	0,632	0,246	0,657
10.11	27,33	124,5	959,9	767	773	1300	2080	2354	2510	1888	1131	-0,287	0,528	0,137	0,527
10.08	23,90	113,5	916,3	728	772	1265	2009	2304	2471	2076	1294	-0,344	0,546	0,080	0,522
10.07	28,17	113,8	986,1	583	541	1086	2004	2317	2492	1568	866	-0,229	0,611	0,221	0,630
10.04	25,60	115,8	936,9	679	632	1240	2340	2721	2926	1790	1018	-0,259	0,618	0,228	0,631
7.15	16,84	107,0	704,4	652	707	1193	1915	2219	2386	2035	1207	-0,394	0,555	0,054	0,511
7.10	20,47	122,0	1070,1	714	709	1223	2176	2500	2655	2068	1204	-0,283	0,577	0,120	0,581
7.12	22,30	121,3	945,6	938	1191	1652	2279	2562	2720	2837	1872	-0,547	0,493	-0,020	0,401
7.08	23,60	117,6	839,6	626	629	1128	2101	2461	2649	2121	1229	-0,303	0,619	0,114	0,621
7.07	19,82	94,4	971,3	585	501	1141	2289	2684	2888	1843	1006	-0,209	0,663	0,221	0,705
7.02	20,95	89,3	787,5	625	674	1201	2102	2453	2669	2170	1254	-0,396	0,621	0,104	0,598

---

### 5.3.2 COMPARACIÓN Y SELECCIÓN DE MODELOS

La determinación de los modelos para el índice de color, antocianos y fenoles totales se inicia con la selección del mejor modelo de regresión, considerando la relación entre múltiples variables. Para esto, se realizó una comparación de los resultados obtenidos en cuatro fechas distintas, de enero a abril, analizando la contribución de las variables en cada caso.

Las figuras 35, 36 y 37 muestran un cuadro resumen de los modelos de regresión múltiple obtenidos en cada fecha con los factores de calidad obtenidos. La figura 35 muestra el comportamiento de la variable índice de color en ambas temporadas, en la primera fila se aprecia el coeficiente de determinación  $R^2$  respecto del error absoluto medio (MAE), la segunda fila muestra el coeficiente de determinación  $R^2$  respecto del factor de inflación de varianza y la tercera fila muestra el coeficiente de determinación  $R^2$  respecto de la significancia de las variables en ambas temporadas. Siguiendo la misma línea aparece la figura 36 mostrando el comportamiento de la variable fenoles totales en ambas temporadas y la figura 37 muestra el resultado de antocianos totales.

La figura 35 representa el índice de color, contrastando ambos años de estudio en las columnas derecha e izquierda, mientras que las filas representan los indicadores estadísticos que ayudan a determinar la fecha óptima que cumple con las condiciones para establecer una mejor relación entre las variables y factores de calidad. Al examinar la primera fila de la figura, se destaca que, durante la temporada de 2017 el mejor coeficiente de determinación  $R^2$  coincide con el error absoluto medio (MAE) más bajo, en abril de 2017. Al descender a la segunda fila y revisar el factor de inflación de varianza (VIF), se observa que el VIF más bajo se presenta también en abril, junto con un *p-value* igualmente bajo. Esto sugiere que, en el caso de

la primera temporada, los valores estadísticos más favorables se encuentran al final del ciclo de la vid, poco antes de la cosecha.

Sin embargo, esta tendencia cambia en la segunda temporada, donde el escenario es menos favorable que en 2017. En este caso, la elección de la mejor fecha o combinación de factores en el análisis de regresión múltiple se da en enero. En cuanto al índice de color, la segunda temporada no muestra resultados auspiciosos, ya que se presentan bajos coeficientes de determinación a lo largo de todo el ciclo. El error medio de residuos (MAE) se duplica en comparación con 2017, manteniendo VIF bajos en cualquier época, pero con una significancia menos destacada, especialmente cerca de 0,1, y esto ocurre al inicio del ciclo en enero, es decir, al comienzo del envero. Esta variación en los resultados entre temporadas resalta la importancia de considerar la estacionalidad y las condiciones específicas de cada año para obtener conclusiones más precisas.

Al comparar los resultados entre ambas temporadas, encontramos que el coeficiente de determinación obtenido en 2017 duplica los valores obtenidos el 2018, donde el máximo se da en abril con un  $R^2$  de 77% y el más alto del 2018 es 36% en enero. Este fenómeno se repite al comparar los valores de MAE, donde la segunda temporada también duplica los valores obtenidos el 2017. Respecto de los valores VIF, podemos indicar que la comparación es un poco más parecida, considerando que ambas temporadas tienen un promedio similar de 9 y 8 respectivamente. Finalmente, la comparación respecto de la significancia de las variables también se presenta mejor en la temporada 2017, ya que *p-value* crece un 20% más en la temporada 2018.

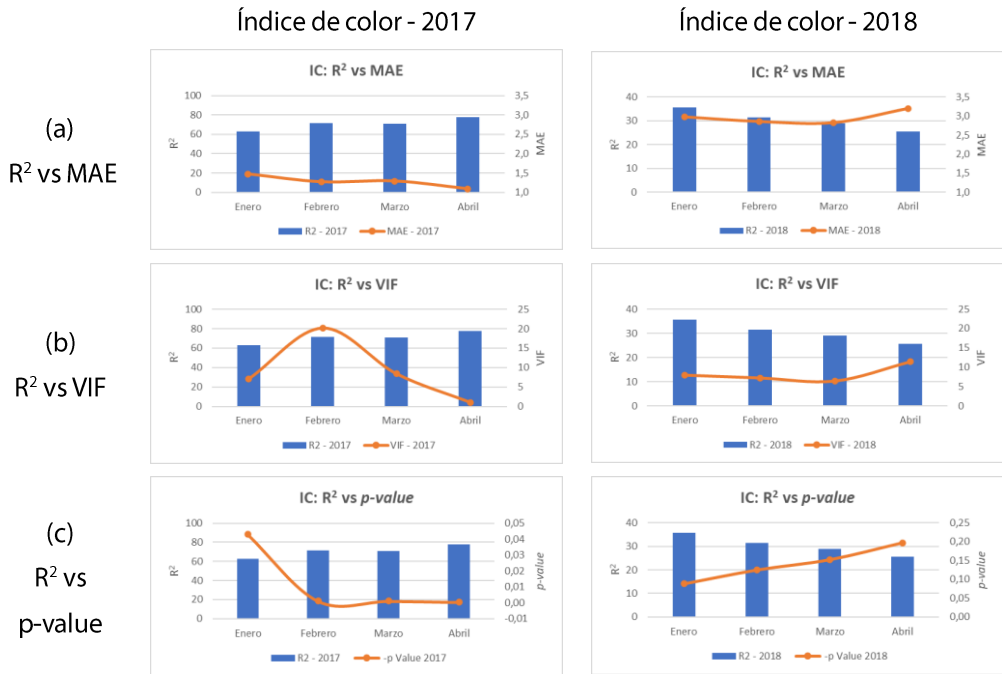


Figura 35. Comparación temporadas 2017 y 2018 respecto de los resultados de índice de color. Los gráficos muestran un despliegue de las distintas fechas y del resultado de los valores entre el coeficiente de determinación  $R^2$ , respecto de (a) el error medio absoluto; (b) el factor de inflación de varianzas y (c) significancia de las variables. Fuente: Elaboración propia.

El análisis de los fenoles totales se presenta detalladamente en la figura 36, donde se aprecian los resultados entre ambas temporadas. En la temporada 2017, los coeficientes de determinación alcanzan su punto máximo en enero y abril, siendo este último el de mejor desempeño. A lo largo del ciclo, el error absoluto medio va disminuyendo de enero a abril y se presenta más o menos homogéneo en la segunda temporada, siendo el más bajo el mes de febrero, además, durante la temporada 2018, dicho error disminuye a la mitad en comparación con la temporada anterior, evidenciando una mejora sustancial.

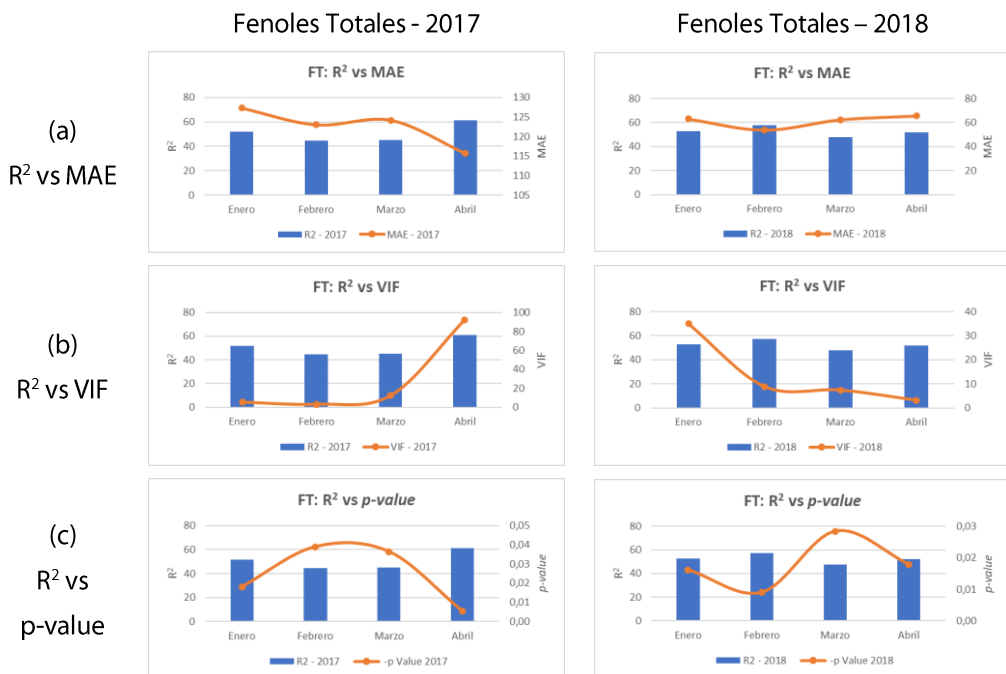


Figura 36. Comparación temporadas 2017 y 2018 respecto de los resultados de fenoles totales. Los gráficos muestran un despliegue de las distintas fechas y del resultado de los valores entre el coeficiente de determinación  $R^2$ , respecto de (a) el error medio absoluto; (b) el factor de inflación de varianza y (c) significancia de las variables. Fuente: Elaboración propia.

Dada la complejidad de los resultados, resulta difícil determinar el momento óptimo para llevar a cabo el estudio de fenoles totales, ya que tanto al inicio del ciclo de la vid específicamente durante la etapa de envero, como antes de la cosecha, se obtuvieron resultados similares. Ambos períodos se asemejan proporcionando resultados más consistentes y menos sujetos a variaciones, estableciéndose en ambas una posible ventana temporal para obtener información sobre los fenoles totales en las uvas. Esta disponibilidad de dos momentos dentro del ciclo puede considerarse una ventaja significativa, ya que permite una planificación

estratégica más flexible para realizar el análisis de compuestos fenólicos, maximizando así la utilidad de los resultados en la planificación y toma de decisiones en el ámbito vitivinícola.

El análisis detallado de los antocianos totales, presentado de manera concisa en la figura 37, muestra una notoria disparidad entre ambas temporadas. En la temporada 2017, el coeficiente de determinación muestra niveles significativamente elevados a lo largo de todo el ciclo, alcanzando su punto máximo en abril. En contraste, en la temporada 2018, este pico se observa en enero. A pesar de que el error absoluto medio mantiene una tendencia relativamente uniforme en ambas temporadas, en 2018 experimenta una duplicación en magnitud en comparación con la temporada anterior, señalando una variabilidad más pronunciada en los resultados.

En relación a la colinealidad, se evidencian patrones diferentes. En la temporada 2017, los valores más bajos se registran al inicio y al final del ciclo, siendo abril el mes con el VIF más bajo. Esta dinámica contrasta con lo observado en 2018, donde el VIF presenta una curva ascendente de enero a abril. En cuanto a la significancia, el *p-value* muestra una curva descendente de enero a abril en 2017, mientras que en 2018 muestra una tendencia ascendente de enero a marzo para descender nuevamente en abril.

A partir de estos resultados, se llega a la conclusión de que no existe un patrón concluyente que indique la mejor época para realizar el análisis de antocianos totales. En 2017, la mejor combinación de factores estadísticos se presenta en abril, mientras que en 2018 se observa en enero. Esta variabilidad entre las temporadas sugiere la importancia de considerar cuidadosamente el periodo específico de análisis, resaltando la necesidad de adaptar la planificación en función de las características únicas de cada temporada vitivinícola.

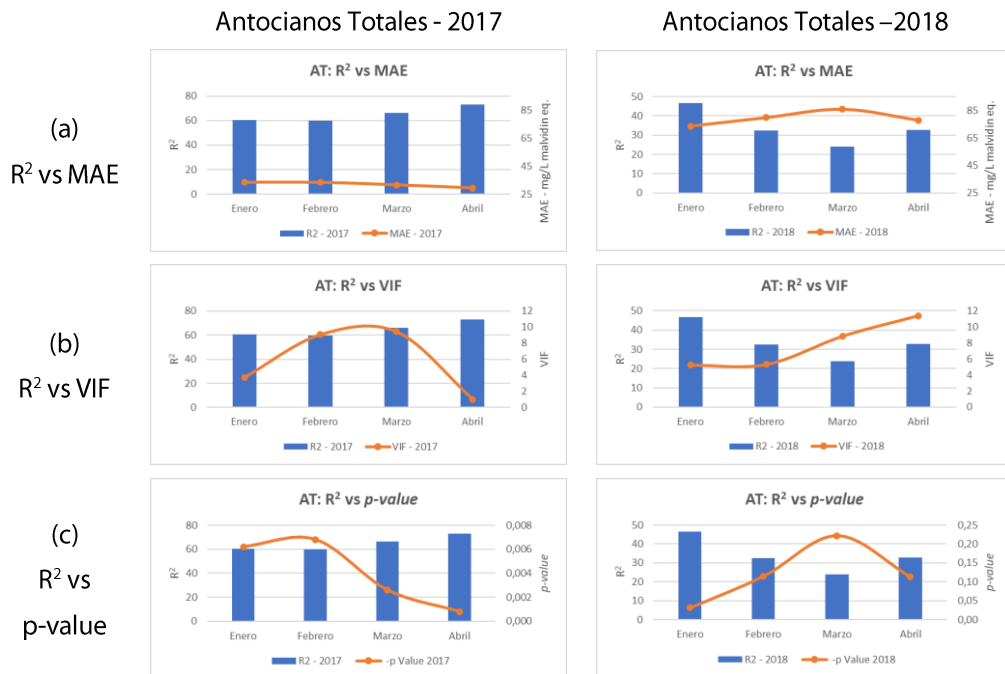


Figura 37. Comparación temporadas 2017 y 2018 respecto de los resultados de antocianos totales. Los gráficos muestran un despliegue de las distintas fechas y del resultado de los valores entre el coeficiente de determinación  $R^2$ , respecto de (a) el error medio absoluto; (b) el factor de inflación de varianza y (c) significancia de las variables. Fuente: Elaboración propia.

### 5.3.3 MODELIZACIÓN DE VARIABLES

Según se desprende en la información resumen entregada en el apartado anterior, la elección del mejor modelo se basa en la fecha con mayor coeficiente de determinación  $R^2$  y que además coincida con presentar significancia en sus variables, con una baja correlación entre sí y un bajo error de sus residuos. Con estas condiciones, se obtiene la selección de la fecha más adecuada a la variable en estudio.



De acuerdo a lo mostrado en la tabla 14, en el caso del índice de color, las temporadas 2017 y 2018 son muy diferentes entre sí. A diferencia de la segunda temporada, en la primera temporada se obtuvieron altos valores de  $R^2$ . En el caso de la temporada 2017, destaca una mayor ocurrencia de la banda B12 y del GNDVI y en el año 2018 se repiten en todas las fechas las bandas B6 y B8. En el caso de fenoles totales, el mejor  $R^2$  se produce en abril y considera las bandas B3 y B5. En la temporada 2018 no hay mucha diferencia entre los  $R^2$ , pero el mayor de ellos se presenta en febrero y considera dos índices: NDMI y NDVI.

Los resultados para antocianos totales son similares a los obtenidos con índice de color, donde se obtienen altos valores de  $R^2$  durante toda la temporada 2017, pero el más alto se produce en abril y considera la banda B7 y el índice NDMI y destaca que durante el mes de febrero en ambas temporadas coinciden las bandas B11 y el indicador NDMI.

A través del ajuste de mínimos cuadrados, se extrae la información del modelo de regresión múltiple, desde el cual obtenemos tanto los valores estadísticos de validación del modelo como la ecuación ajustada para cada caso. Los modelos de regresión lineal múltiple describen la relación entre nuestras variables dependientes: índice de color, fenoles totales y antocianos totales, y las bandas e índices obtenidos de las imágenes satelitales, set desde el cual se extraen las 2 variables independientes que recoge el modelo y que muestran una relación estadísticamente significativa con un nivel de confianza del 95% en cada instancia.

Las ecuaciones correspondientes a cada modelo se presentan en la tabla 15, detallando la fecha seleccionada, las variables independientes involucradas y el coeficiente de determinación  $R^2$ .

Tabla 14. Tabla resumen coeficiente de determinación  $R^2$  para cada fecha, temporada 2017 y 2018, versus las variables incluidas en cada modelo. Fuente: Elaboración propia.

<b>IC - 2017</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>P-Value</b>	<b>Variables</b>
Enero	62,8	0,04	B12 - GNDVI
Febrero	71,3	0,00	B12 - NDVI
Marzo	70,9	0,00	B12 - GNDVI
Abril	77,5	0,00	B7 - B11

<b>FT - 2017</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>P-Value</b>	<b>Variables</b>
Enero	51,8	0,02	B6 - B8
Febrero	44,6	0,04	CL - NDMI
Marzo	45,2	0,04	B5 - GNDVI
Abril	61,2	0,01	B3 - B5

<b>AT - 2017</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>P-Value</b>	<b>Variables</b>
Enero	60,3	0,01	B11 - GNDVI
Febrero	59,7	0,01	B11 - NDVI
Marzo	66,2	0,00	B11 - NDVI
Abril	72,9	0,00	B7 - NDMI

<b>IC - 2018</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>P-Value</b>	<b>Variables</b>
Enero	35,7	0,09	B6 - B8
Febrero	31,5	0,12	B6 - B8
Marzo	29,0	0,15	B6 - B8
Abril	25,6	0,20	B6 - B8

<b>FT - 2018</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>P-Value</b>	<b>Variables</b>
Enero	52,7	0,02	B3 - B5
Febrero	57,5	0,01	NDMI - NDVI
Marzo	47,7	0,03	B4 - B11
Abril	51,9	0,02	GNDVI - NDMI

<b>AT - 2018</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>P-Value</b>	<b>Variables</b>
Enero	46,6	0,03	B12 - CLORO
Febrero	32,5	0,11	B11 - NDMI
Marzo	23,9	0,22	B3 - NDVI
Abril	32,7	0,11	B6 - B8

Tabla 15. Ecuación del modelo de regresión para índice de color, fenoles totales y antocianos totales en las temporadas 2017 y 2018. Fuente: Elaboración propia.

<b>2017</b>	<b>Fecha</b>	<b>Variables</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>Modelo</b>
<b>I. de color</b>	Abril	B7 - B11	77,5	$IC = -8,31046 + 0,00456586*B7 + 0,00601088*B11$
<b>Fenoles T.</b>	Enero	B6 - B8	51,8	$FT = 3304,18 + 1,47853*B6 - 1,93887*B8$
<b>Antocianos T.</b>	Abril	B7 - NDMI	72,9	$AT = 9,04861 + 0,228838*B7 - 586,016*NDMI$
<b>2018</b>	<b>Fecha</b>	<b>Variables</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>Modelo</b>
<b>I. de color</b>	Enero	B6 -B8	35,7	$IC = 51,1583 + 0,0533397*B6 - 0,0516027*B8$
<b>Fenoles T.</b>	Febrero	NDMI - NDVI	57,5	$FT = 2375,67 + 2462,84*NDMI - 2558,81*NDVI$
<b>Antocianos T.</b>	Enero	B12 - Cloro	46,6	$AT = 703,191 + 0,676615*B12 + 1362,32*CLORO$

---

#### 5.3.4 ANÁLISIS ESPACIAL DE LAS VARIABLES

La aplicación de modelos de estimación de compuestos fenólicos e intensidad de color abre la posibilidad de generar mapas representativos del estado de calidad en una fecha determinada. Estos mapas muestran la variabilidad del potencial de maduración en cada parcela, representado por el dosel. Esto permite que mediante el uso de un número limitado de muestras de campo e imágenes Sentinel-2, sea factible estimar estas variables en la totalidad de la parcela. La identificación de la variabilidad en la madurez y la zonificación para determinar una cosecha diferenciada resulta valiosa a lo largo de todo el ciclo y adquiere aún más relevancia a medida que se acerca el momento de cosecha.

Las figuras 38 y 39 muestran la comparación entre el mapa de NDVI, los polifenoles estudiados y el índice de color. Según la propuesta de Cortell et al. (2007) existe una relación inversa entre el NDVI y antocianinas, determinando que las vides de bajo vigor muestran niveles más altos de antocianina. Si realizamos la comparación visual, logramos identificar sutiles variaciones entre ellas, pero no tan concluyentes. Es claro que en algunos cuarteles que aparecen con un NDVI más bajo presentan notoriamente valores más altos de antocianinas. Lo mismo ocurre con las otras variables, en donde valores de follaje más verde y vigoroso presentan un índice de color y valores de fenoles totales menores.

La comparación visual de los mapas de estimación obtenidos que incluyen el índice de color, fenoles totales y antocianos totales, junto con el índice NDVI, parece mostrar una relación inversa en todos los casos analizados, tal como se puede apreciar en detalle en las figuras 38 y 39. Un aspecto que requiere especial atención es que, a pesar de que el NDVI se integra únicamente como parte del insumo en la segunda temporada para fenoles totales (NDMI & NDVI), la presencia de una relación inversa en todos los casos señala que esta asociación no puede atribuirse exclusivamente al

NDVI. En este contexto, es esencial resaltar que, de los 6 mapas estimados, solo uno incorpora el índice NDVI en el modelo, lo que subraya de manera contundente que la influencia observada no es simplemente un producto de esta variable específica.

Este hallazgo apunta a una relación más compleja entre la vegetación y los compuestos fenólicos e índice de color, donde la influencia del NDVI, aunque presente, no es determinante en el conjunto de factores que inciden en la estimación de índices de color, fenoles totales y antocianos totales. La observación de esta relación inversa en todas las variables estudiadas, incluso en aquellas donde el NDVI no fue un componente crítico del modelo, sugiere la existencia de dinámicas más complejas y multifacéticas en la influencia que tiene la vegetación sobre la composición de los compuestos fenólicos e índice de color, durante el ciclo de crecimiento de la vid. Este análisis, destaca la necesidad de abordar e incluir otras variables o consideraciones más holísticas y diversificadas al evaluar la relación entre variables en estudios similares.

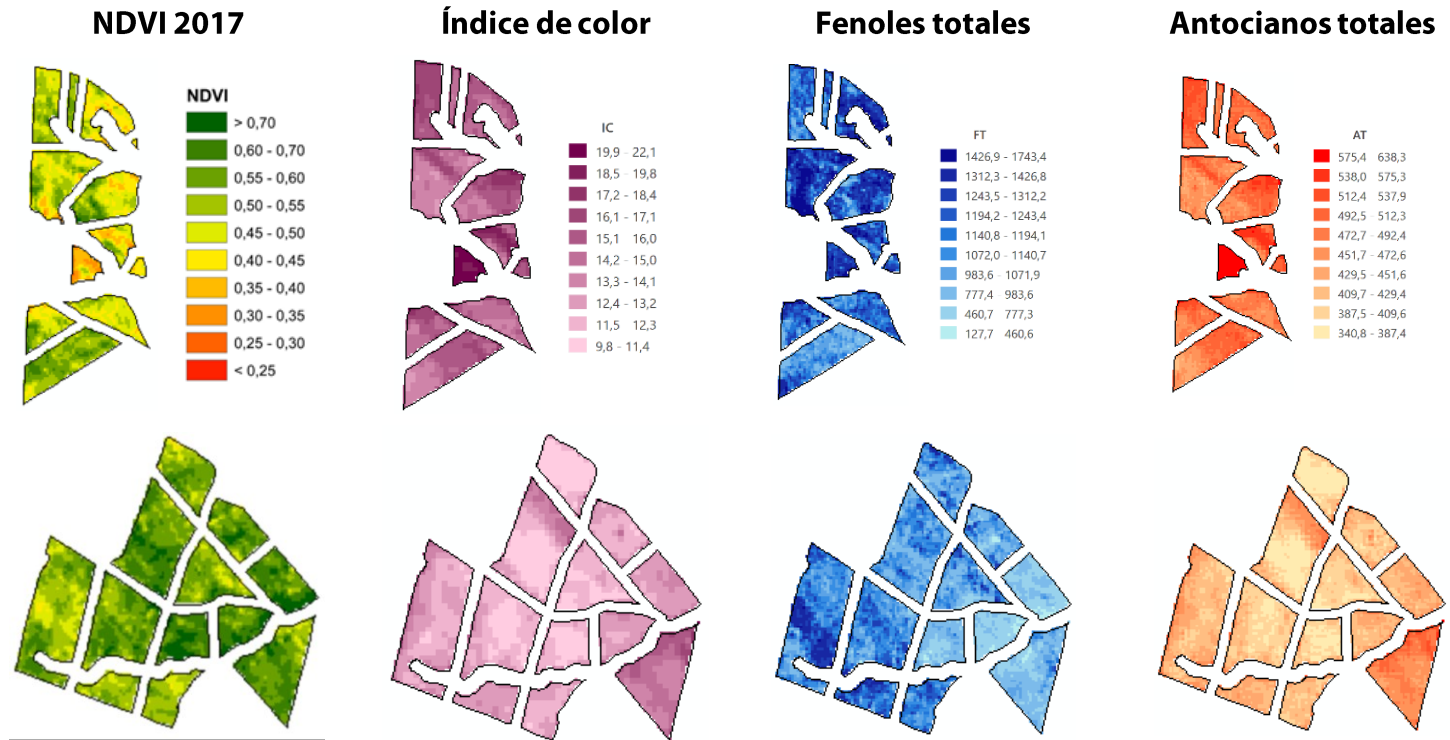


Figura 38. Comparación entre NDVI y mapas de estimación de índice de color, fenoles totales y antocianos totales. Primera temporada, año 2017. Fuente: Elaboración propia.

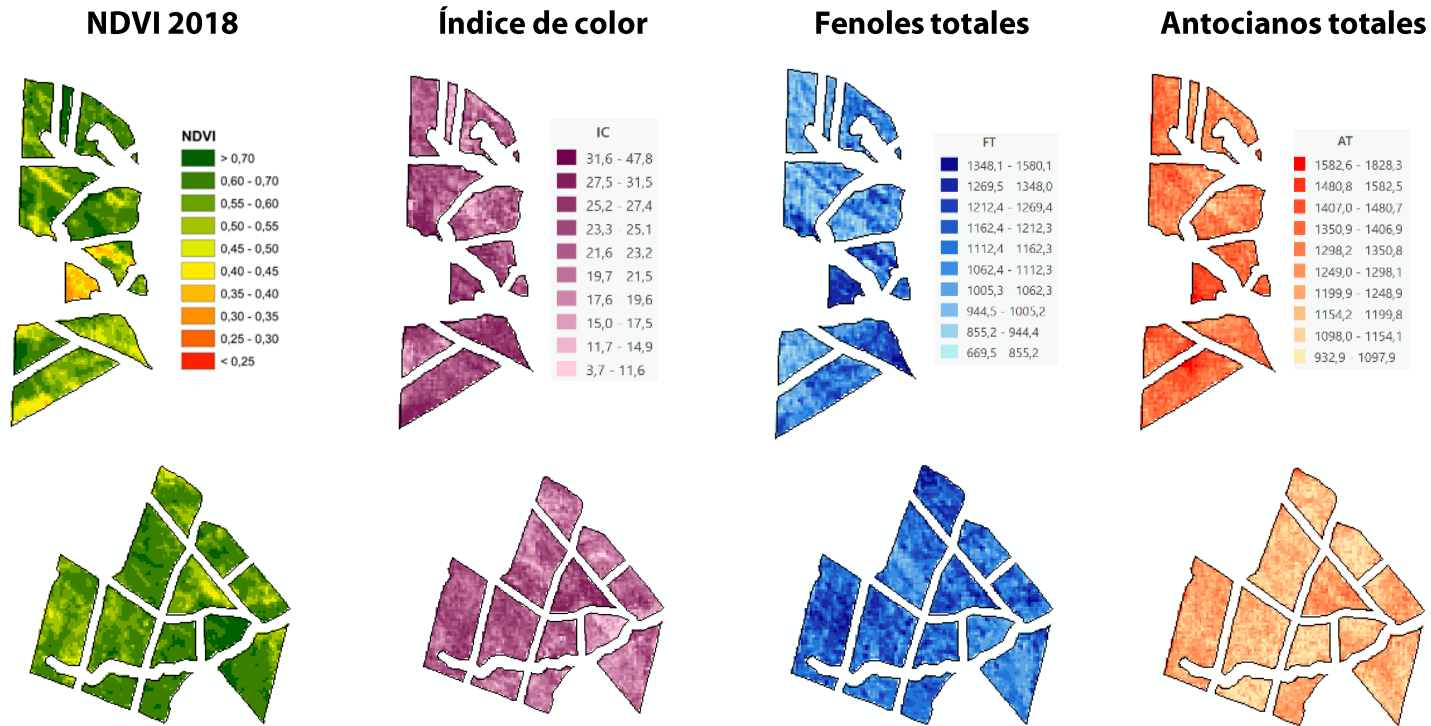


Figura 39. Comparación entre NDVI y mapas de estimación de índice de color, fenoles totales y antocianos totales. Segunda temporada, año 2018. Fuente: Elaboración propia.

## 5.4 Resultados Zonificación

Los mapas de estimación de variables de calidad adquiridos pre y poscosecha, °Brix, pH, índice de color, antocianos y fenoles muestran ciertas coincidencias entre unos y otros, en relación a zonas con bajas concentraciones o intensidades y viceversa; como consecuencia y en directa relación con los objetivos planteados, se utilizó el algoritmo de clasificación no supervisada *k-means*, para determinar zonas que presentaran características homogéneas en los mapas estimados de las variables pre y poscosecha.

El algoritmo *k-means* se basa en las características de cada variable y agrupa las áreas de acuerdo a la distancia de los centroides de cada grupo. Cada grupo o clase está representado por la media aritmética de los datos asignados al grupo. La tabla 16, muestra el resultado de estos centroides. La comparación de los resultados para el mapa 1 (2017) y el mapa 4 (2018) de las variables precosecha como °Brix y pH, muestran una clara relación inversa entre ambas variables, donde los valores normalizados más bajos de °Brix se corresponden con los más altos normalizados de pH.

Los valores normalizados para las variables poscosecha son muy regulares en la primera temporada, donde los valores más bajos se presentan todos en el cluster 1 y los más altos todos en el cluster 4. Si bien este comportamiento no es tan regular en la temporada 2018 (mapa 5), si muestran la misma tendencia, donde los valores bajos aparecen en los cluster 1 y 2 y los altos en los cluster 3 y 4.

En el caso de la comparación de los centroides correspondientes a los mapas 3 y 6, se presenta una relación equivalente, el cluster 1 tiene valores bajos de °Brix y de las variables poscosecha IC, AT y FT, mientras que un valor alto en pH. Cabe destacar que al igual que el resto de los mapas originales previos a la normalización y generación de los cluster, los



resultados de la temporada 2017 son más homogéneos y más coherentes en comportamiento, en cambio en la temporada 2018 los mapas presentan un efecto “sal y pimienta” y no hay una separación espacial tan notoria entre un cluster y otro.

*Tabla 16. Centroides de clases. Comparación de centroides por temporada y variables de estudio. Primera comparación referida a las variables pre cosecha, segunda comparación referida a variables pos cosecha y tercera comparación a la unión de todas las variables. Fuente: Elaboración propia.*

Mapa 1 - 2017				Mapa 4 - 2018			
Clase	Brix	pH	Dist.	Clase	Brix	pH	Dist.
C_1	0,31	0,62	0,0010	C_1	0,27	0,61	0,0026
C_2	0,47	0,45	0,0014	C_2	0,44	0,39	0,0013
C_3	0,73	0,33	0,0001	C_3	0,68	0,28	0,0015
C_4	0,57	0,60	0,0027	C_4	0,54	0,57	0,0048

Mapa 2 - 2017					Mapa 5 - 2018				
Clase	IC	AT	FT	Dist.	Clase	AT	FT	IC	Dist.
C_1	0,14	0,21	0,57	0,00366	C_1	0,33	0,29	0,43	0,0047
C_2	0,28	0,37	0,60	0,00678	C_2	0,41	0,24	0,57	0,0034
C_3	0,46	0,54	0,65	0,00310	C_3	0,48	0,42	0,60	0,0026
C_4	0,75	0,79	0,72	0,00000	C_4	0,44	0,46	0,36	0,0021

Mapa 3 - 2017							Mapa 6 - 2018						
Clase	Brix	pH	IC	AT	FT	Dist.	Clase	Brix	pH	IC	AT	FT	Dist.
C_1	0,29	0,63	0,19	0,26	0,49	0,003	C_1	0,26	0,61	0,31	0,33	0,39	0,001
C_2	0,46	0,46	0,20	0,28	0,62	0,004	C_2	0,44	0,39	0,40	0,26	0,52	0,001
C_3	0,62	0,43	0,42	0,51	0,66	0,004	C_3	0,68	0,27	0,48	0,37	0,61	0,001
C_4	0,77	0,48	0,70	0,75	0,72	0,013	C_4	0,54	0,54	0,45	0,46	0,39	0,003

La clusterización de variables según zonas de características homogéneas es una herramienta útil para la realización de una cosecha selectiva, facilitando el análisis de mapas específicos. Las Figuras 40 y 41 proporcionan una comparación entre las temporadas 2017 y 2018, respectivamente. Los mapas se dividen en 4 clases. En el mapa 1, que aborda únicamente las variables precosecha, se visualiza en rojo la clase 1, en naranja la clase 2, en verde claro la clase 3 y en verde oscuro la clase 4.

Al comparar los mapas 1, 2 y 3, se observa cierta correspondencia visual, especialmente en las plantaciones del año 2007, donde los cuarteles con tonalidades verdes en el mapa 1 (precosecha) muestran también tonalidades verdes en el mapa 2 (poscosecha). Esta situación se repite de manera más o menos regular en las plantaciones del año 2010, donde la mayoría de los cuarteles muestran correspondencia de clase. En general podemos decir que los 3 mapas correspondientes a la temporada 2017 son bastante similares entre sí.

En cuanto a la comparación de los mapas 4, 5 y 6 correspondientes a la temporada 2018, no se observa la misma similitud que en la temporada anterior. El mapa 4, con variables precosecha, muestra zonas intraparceldarias distintivas, a diferencia de los mapas 5 y 6, donde es posible encontrar las 4 clases en un mismo cuartel, con excepción de un par de ellos que permanecen con una única clase. En ambas temporadas, se ha observado que los mapas 3 y 6 no ofrecen una diferencia significativa respecto a los mapas generados con menos variables.

Si consideramos que las áreas asignadas a las clases 3 y 4, representadas con tonalidades verdes, indican una mayor concentración de sustancias y una actividad metabólica más propicia para el proceso de maduración esperado, podríamos inferir que los cuarteles que exhiben tonalidades verde oscuro y verde claro serían los primeros candidatos para la cosecha,

mientras que aquellos en tonos rojos y naranjas serían los últimos en considerarse. Esta suposición podría guiar de manera efectiva la planificación de la cosecha, optimizando así la calidad de la producción vinícola.

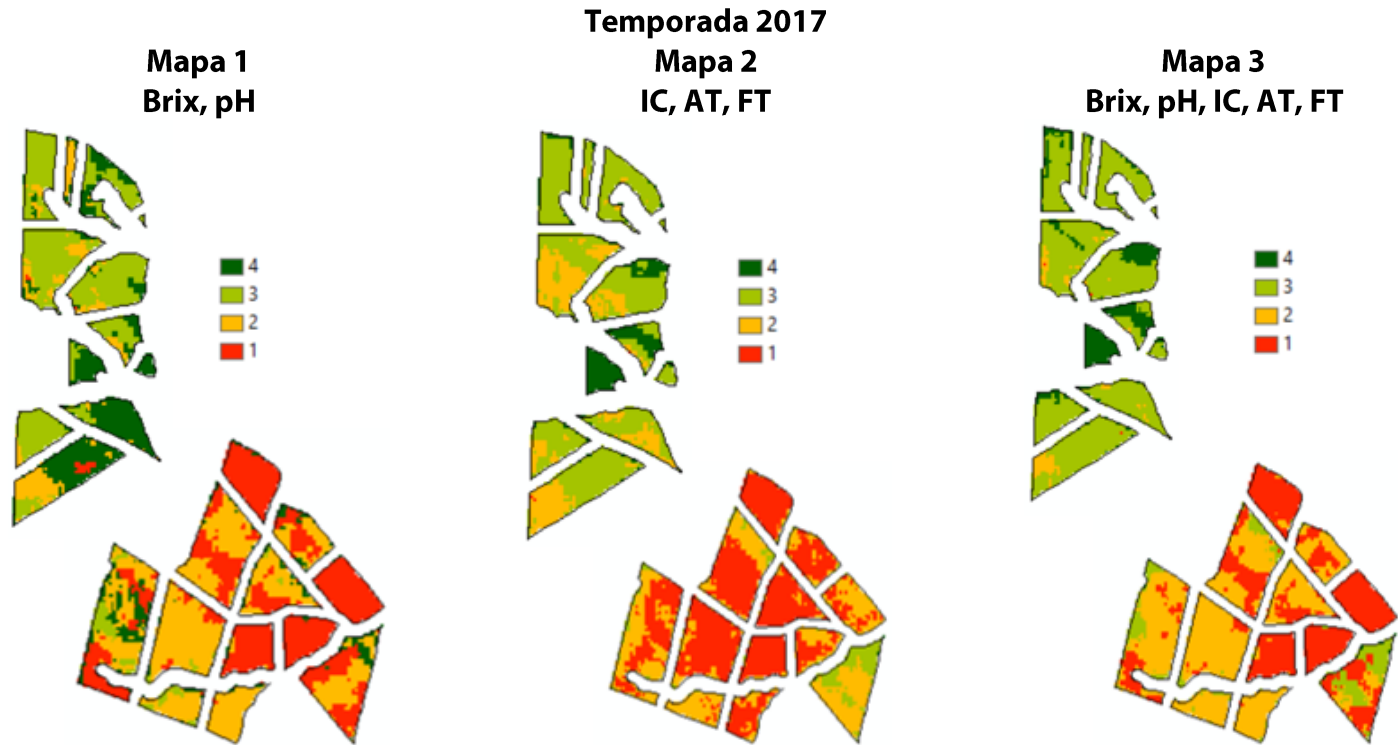


Figura 40. Mapas de clasificación no supervisada, método K-means, temporada 2017. Fuente: Elaboración propia.

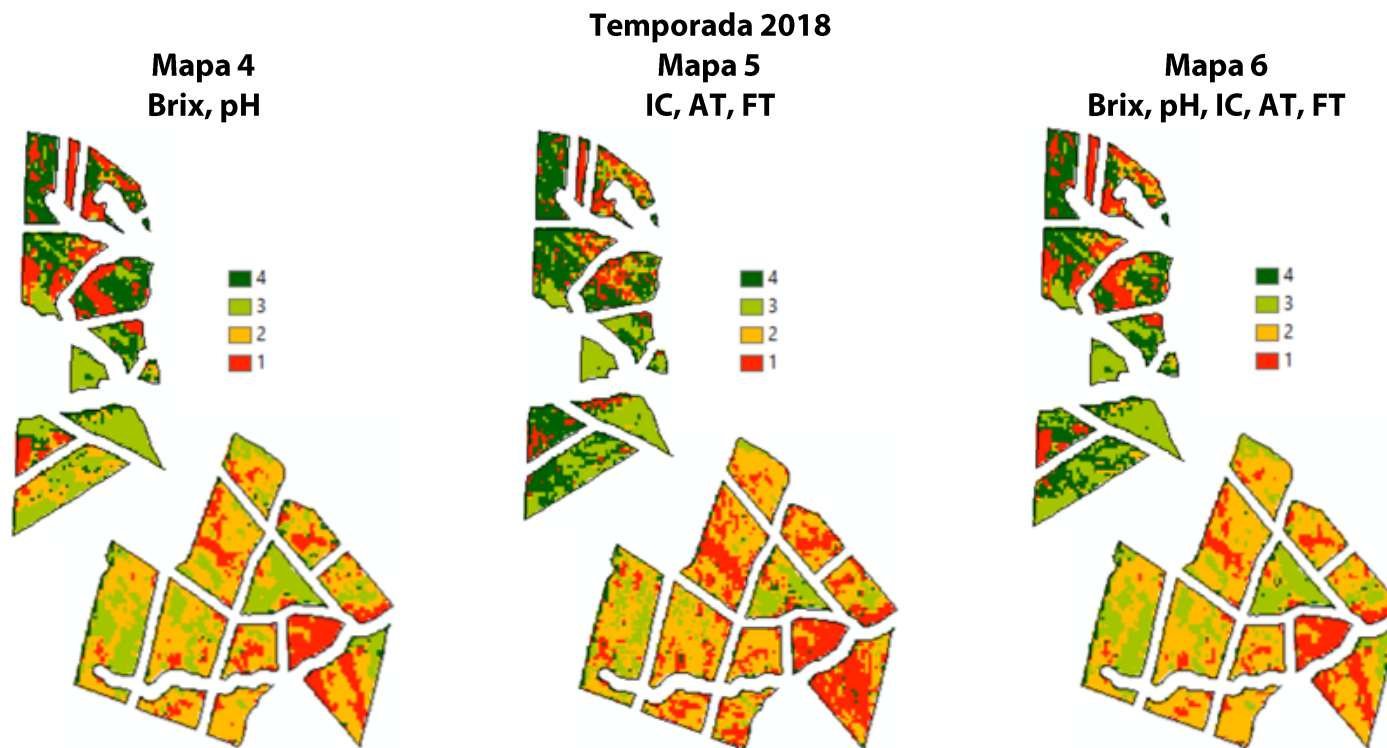


Figura 41. Mapas de clasificación no supervisada, método K-means, temporada 2018. Fuente: Elaboración propia.



# Capítulo VI

## Discusión y Conclusiones

### 6.1 **Discusión**

La definición de la calidad del vino es relativa y abarca diversos aspectos que contribuyen a su percepción y apreciación. Entre estos aspectos destacan la madurez tecnológica, que se caracteriza por una mayor acumulación de azúcar y baja acidez; la madurez fenólica identificada como la responsable del color de las bayas (Peña, 2005); y las características sensoriales que se asocian al vino, como el color, la astringencia y el amargor; además de la capacidad de envejecimiento del vino.

Es crucial considerar la variabilidad intrínseca dentro de una parcela en relación con estos factores, ya que esta diversidad puede tener un impacto

significativo en la percepción global de la calidad del vino (Jaffré et al., 2009). La mezcla de uvas con diferentes indicadores de calidad, como los compuestos fenólicos inmaduros o los aromas herbáceos, puede influir de manera notable en la calidad final del vino, incluso si solo una pequeña proporción de uvas posee estas características (Kontoudakis et al., 2011).

Todas estas consideraciones son claves en la calidad del vino, permitiendo un mejor aprovechamiento de los recursos desde el punto de vista medioambiental y de seguridad alimentaria (Gebbers y Adamchuk, 2010). La optimización de la producción de uva para vino exige comprender los factores que inciden en su variabilidad espacial y temporal, que van desde las condiciones del suelo y clima hasta la fisiología de la planta y las prácticas agrícolas.

Es común encontrar una diversidad considerable dentro de un mismo viñedo, con zonas que presentan distintas composiciones y estructuras de suelo, niveles de humedad variables y microclimas diversos. Estas diferencias tienen un impacto directo en la vid, que responde de manera diferenciada mediante expresiones fisiológicas diversas (Priori et al., 2019). Por lo tanto, comprender y gestionar esta variabilidad resulta fundamental para la toma de decisiones agronómicas eficaces, como la selección de la ubicación para plantar variedades específicas o la implementación de estrategias para corregir deficiencias en el viñedo.

La combinación de estos factores fisiológicos se manifiesta en el crecimiento vegetativo de la vid, reflejado en su vigor, el cual puede ser evaluado espectralmente mediante el NDVI, ampliamente utilizado en percepción remota y en viticultura de precisión (Pastonchi et al., 2020). El NDVI se basa en la relación entre la reflectancia en el espectro visible (rojo) y el infrarrojo cercano (NIR), siendo indicativo de las características vegetativas y productivas del cultivo (Khaliq et al., 2019).



En este estudio, el NDVI se empleó no solo para monitorear el desarrollo del cultivo, sino también para investigar la variabilidad intraparcelaria de las variables analizadas, como la acumulación de azúcar en el fruto, el pH estimado, los compuestos fenólicos y el índice de color.

En nuestra área de estudio, el NDVI mostró variaciones significativas entre ambas temporadas. La media general del NDVI fue más baja en la temporada 2017 en comparación con la temporada 2018, año en el que las precipitaciones acumuladas se duplicaron. El NDVI promedio en todas las parcelas alcanzó un valor de 0,62 en la temporada 2017 y 0,65 en la temporada 2018. Sin embargo, estos valores se presentaron más temprano durante 2018 (a finales de febrero) en comparación con 2017 (a finales de marzo). Por ejemplo, en el mes de diciembre, durante la campaña 2017, las parcelas de la plantación 2007 mostraron un NDVI medio de 0,45, mientras que en la plantación 2010 se alcanzó un NDVI de alrededor de 0,55. En contraste, durante la campaña 2018, la plantación 2007 registró un NDVI medio de aproximadamente 0,55 y la plantación 2010 alcanzó un NDVI de 0,57. Esta tendencia se mantuvo en febrero, cuando la uva alcanzó su plena madurez. Estos resultados nos permiten relacionar la pluviometría acumulada con el vigor temprano de la segunda temporada. De hecho, como afirman Hall et al. (2022), los efectos relacionados con el suelo en un campo determinado variarán de una temporada a otra y pueden invertirse completamente en condiciones de precipitaciones diferentes.

Aunque las variables meteorológicas se abordaron en este estudio como un precedente para la zona y no como una variable en los modelos, hubo diferencias de temperatura de hasta 4° en la primera quincena de enero de 2017 y la precipitación acumulada se duplicó en comparación con la anterior en la temporada de 2018. Trought et al. (2008) sugirieron que pequeñas diferencias de temperatura pueden influir en la fenología de la vid, lo cual comprobaron en su estudio con el aumento de pH en vendimia y alcanzando el objetivo de sólidos solubles 11 días antes de lo esperado.

Este hecho contrasta en parte con lo observado en nuestro estudio, ya que, si bien notamos diferentes resultados en ambas temporadas, los mejores índices se presentaron en la temporada más fresca (2018), lo que podría deberse según lo planteado por los autores a las diferencias de temperatura y precipitaciones acumuladas en ambos años.

Durante el año 2018, en términos generales se alcanzaron mejores índices en todas las variables estudiadas. Respecto de las variables precosecha: °Brix y pH, se registraron valores más altos de °Brix, ya que su valor medio aumentó ligeramente durante 2018. De igual forma, los valores de pH que se registraron fueron un poco más ácidos que la temporada anterior. También mejoraron respecto de la temporada 2017 las variables poscosecha: índice de color y polifenoles.

El 2018 fue un año más fresco y con menor radiación que su predecesor en los meses de verano previos a la vendimia. Aunque se podría anticipar que temperaturas más altas y una mayor radiación solar facilitarían la acumulación de azúcar, investigaciones como las de Abeyasinghe et al. (2019) en Australia han demostrado que otros factores pueden influir. Por ejemplo, observaron que el crecimiento de las bayas se retrasaba debido a la sombra generada por las hojas de la vid, pero esto no afectaba la tasa de acumulación de azúcar. La relación entre las precipitaciones acumuladas y el proceso de maduración es, por tanto, cuestionable, lo que sería interesante explorar y comparar con observaciones de otras estaciones o regiones.

Otros autores también estudiaron la alteración que sufre el vino debido a las variaciones en la temperatura y los cambios en las precipitaciones estacionales (Mira de Orduña 2010; Schultz y Stoll, 2015), por tanto, no es de extrañar que los resultados de ambas temporadas sean diferentes. Cabe destacar que en este estudio no fueron consideradas las prácticas vitivinícolas, que también han sido ampliamente revisadas, demostrando

que tienen una alta influencia en la concentración de antocianinas en las bayas y en los compuestos fenólicos, así como también en la fisiología, crecimiento, desarrollo y acumulación de azúcar en la vid (Downey et al., 2006; He et al., 2010).

Al analizar en los resultados estadísticos obtenidos, podemos notar que los mejores coeficientes de determinación  $R^2$  obtenidos en la modelización de las variables precosecha estudiadas, °Brix y pH, se observaron más cercanos a la cosecha, específicamente desde mediados de marzo hasta principios de abril. En cuanto a los resultados poscosecha, se evidencia que en la temporada 2017, los coeficientes de determinación de los modelos mejoraron a partir del mes de abril para antocianos e índice de color, y en abril para fenoles, un comportamiento similar al observado en la temporada 2018, donde todas las variables estudiadas presentaron mejores coeficientes de determinación al inicio del envero, entre enero y febrero. Los resultados obtenidos no permiten establecer un patrón común de comportamiento en ambas campañas. Esta diferencia se aprecia en la comparación de los valores obtenidos en la micro vinificación; en el caso de los antocianos, en algunos lotes el contenido prácticamente se duplica, condición no muy extraña si tenemos en cuenta que las concentraciones típicas de antocianos libres en vinos tintos jóvenes con cuerpo se sitúan en torno a los 500 mg/l, pero en algunos casos pueden superar los 2000 mg/l (Mulinacci et al., 2008; Nikfardjam et al., 2006; He et al., 2012; Teixeira et al., 2013).

El estudio de dos temporadas de cosechas, permitió analizar los datos para determinar una tendencia de patrones repetitivos que definieran la etapa fenológica exacta en la cual implementar los modelos desarrollados. La primera coincidencia, permite establecer que la etapa fenológica más adecuada para implementar los modelos desarrollados de °Brix y pH, deben ser obtenidos más cercanos a cosecha desde mediados de marzo a principios de abril. Tendencia que se repite en ambas temporadas con

coeficientes de determinación entre 40 y 50% en el caso de pH y de 55 y 65% en el caso de °Brix. Este hallazgo es crucial para la eficiencia y gestión del tiempo, identificando las zonas que alcanzaron la maduración objetivo y que pueden ser objeto de aplicar una cosecha diferenciada.

Varios estudios han establecido que los antocianos comienzan a producirse con mayor intensidad a partir del envero (Teixeira et al., 2013), pero el proceso es complejo ya que se ve afectado por múltiples factores que podrían afectar a la composición de la baya y a la acumulación de antocianos, como las condiciones medioambientales (Bucchetti et al., 2011) y la gestión agrícola (Kyraleou et al., 2016). Estos factores pueden influir significativamente en el contenido de antocianinas de las uvas (Theodorou et al., 2019). Por ejemplo, se ha demostrado que el déficit hídrico tiene un efecto positivo en la acumulación de antocianos durante la maduración (Zarrouk et al., 2012; Arrizabalaga et al., 2018) y otros han demostrado que la limitación hídrica tiene efectos negativos (Bucchetti et al., 2011; Mori et al., 2007).

En el análisis de las antocianinas totales, se observan varios aspectos de interés. En primer lugar, es notable que el coeficiente de determinación  $R^2$  más alto se presente más cercano a cosecha y al comparar con la segunda temporada, destaca que la acumulación del compuesto se duplica durante el 2018, este fenómeno podría explicarse por estudio previos como el de Mori et al. (2007), quienes demostraron que las altas temperaturas reducían el contenido total de antocianinas a menos de la mitad de lo esperado (Mori et al., 2007). Otros estudios coinciden en que la temperatura es una variable crítica en la cantidad final de antocianos presentes en el vino (Kennedy 2008; Coombe y Mccarthy 2000; Del Valle et al., 2005).

Al analizar las microvinificaciones de ambas temporadas, se observan valores de absorbancia más altos tanto para la intensidad del color como para los compuestos fenólicos en la temporada 2018. Este hallazgo

concuera con estudios anteriores que han encontrado mejores resultados con temperaturas más frescas (Del Valle et al., 2005). Parece ser que la temperatura desempeña un papel importante en este aspecto (Mira de Orduña ,2010), ya que tanto el crecimiento vegetativo como la síntesis de compuestos fenólicos se ven afectados por las variaciones térmicas (Serrano et al., 2012). El fenómeno del calentamiento global agrava la brecha entre la madurez tecnológica, correspondiente a la etapa de mayor acumulación de azúcares y baja acidez (que se adelanta) y la madurez fenólica y aromática (que se retrasa) (Mozell y Thachn 2014; Palliotti et al., 2014) lo que es ratificado por los resultados obtenidos en este estudio, donde las mejores correlaciones para antocianos se dan en abril la primera temporada (más cálida). Estos trabajos sugieren la conveniencia de incluir variables de temperatura en los modelos, lo que eventualmente podría mejorar los resultados obtenidos.

En resumen, los complejos procesos de maduración, generación de azúcares y ajuste de la acidez están influenciados por una serie de variables interrelacionadas y difíciles de caracterizar en su totalidad. Sin embargo, esta complejidad es un desafío que puede ser abordado mediante un enfoque estratégico. Definir un intervalo de fechas óptimo para supervisar estos procesos es fundamental, y aquí es donde las imágenes satelitales y los índices espectrales brindan un apoyo único. Al aprovechar estas tecnologías avanzadas, podemos mejorar significativamente la precisión y eficiencia de los muestreos en el campo. Además, nos permiten obtener una visión más detallada de la maduración dentro de la parcela, lo que facilita la identificación de las variaciones intraparcelarias. En última instancia, esta capacidad de mapeo preciso nos brinda una ventaja para tomar decisiones informadas sobre el momento óptimo para la cosecha y la gestión que puede requerir el viñedo.

Las imágenes proporcionadas por Sentinel-2 representan una valiosa oportunidad para proporcionar un servicio asequible de seguimiento del

crecimiento de la vid a lo largo de toda una temporada (Devaux et al., 2019), ya que garantizan una alta disponibilidad temporal, muy deseada teniendo en cuenta el corto periodo que transcurre desde el final del invierno hasta la maduración tecnológica o fisiológica deseada; aunque la resolución espacial puede ser limitante para registrar información relevante en campos pequeños (Khaliq et al., 2019) su utilidad sigue siendo notable.

El principal reto que plantea el uso de información espectral de resolución media, como en el caso de las imágenes Sentinel-2, para analizar cultivos en hileras, radica en la naturaleza mixta que tendrán los píxeles debido a la presencia de suelo desnudo o en algunos casos malezas entre hileras, ello afectaría a los valores de los índices de vegetación y, por tanto, a la evaluación del estado del cultivo (Khaliq et al., 2019). Sin embargo, hay pruebas de una notable coherencia con correlaciones estadísticamente significativas entre el NDVI obtenido con imágenes de resolución media y su comparación con imágenes de alta resolución espacial (Borgogno-Mondino et al., 2018; Cogato et al., 2019), lo que da pie para confiar en el uso y utilidad de imágenes Sentinel-2 en este ámbito. Ahora bien, así como con cualquier otro sensor óptico, también puede haber limitaciones producto de la alta nubosidad dependiendo de la ubicación de las regiones vitivinícolas. Sin embargo, en general, estas imágenes permiten la recopilación eficiente de una cantidad significativa de datos en un corto periodo de tiempo, lo que mejora tanto el rendimiento como el monitoreo del estado del cultivo de manera sustancial.

En relación a las bandas e índices espectrales presentes en los modelos, no fue posible establecer una coincidencia de ellas entre ambas temporadas, ya que en cada vendimia se presentaron diferentes combinaciones para °Brix y pH. En la primera temporada tanto para °Brix como pH, aparecen las bandas B11 y B12, ambas ubicadas en la porción de los infrarrojos de onda corta; en el visible e infrarrojo cercano, tienen ocurrencia las bandas 4 y 6, correspondientes a rojo y borde rojo respectivamente, en relación a los

índices se presentan dos: NDMI y NDVI. En términos generales, las bandas del visible en especial la banda roja y el índice de vegetación NDVI han sido ampliamente citados en diversos textos ya mencionados en esta investigación y que dan cuenta de relaciones estrechas entre °Brix y pH y las bandas rojo y el índice NDVI. En relación a las bandas de onda corta, existen diversos estudios que han dado cuenta de buenos resultados para determinar relaciones en la porción de onda corta del espectro electromagnético en diversas frutas, como por ejemplo el realizado en ciruela Marian, donde se determinó que la reflectancia de la banda de onda corta (SWIR), obtenido con espectrofotómetro, estaba relacionada con la fotosíntesis y contenido de °Brix, especialmente cuando se combina con el algoritmo de regresión de mínimos cuadrados parciales, el cual era más preciso que un espectrómetro de rango visible e infrarrojo cercano (Posom et al., 2020) y en uva para vino se encontró que las regiones visible e infrarroja cercana (VNIR) e infrarroja de onda corta (SWIR) son de gran interés y pueden utilizarse tanto para el seguimiento de la fruta como para el control de calidad en todas las etapas de madurez (Kalopesa et al. 2023).

De igual forma ocurre con las bandas seleccionadas en los modelos desarrollados para las variables poscosecha que revelan patrones de ocurrencia distintos entre las temporadas analizadas. Por ejemplo, al examinar el índice de color, se observa la presencia de una banda borde rojo en ambas temporadas, identificada como B7 y B6. Sin embargo, en la primera temporada se incorpora la banda 11, que corresponde a la porción de onda corta del espectro electromagnético, mientras que en la segunda temporada se utiliza la banda 8, asociada al infrarrojo cercano. En cuanto a los fenoles totales, se aprecia que en la primera temporada se emplean las bandas borde rojo e infrarrojo cercano, mientras que en la segunda temporada la combinación de índices que presenta un mayor coeficiente de determinación corresponde a los índices espectrales de humedad y vegetación. Finalmente, para antocianos totales, la primera temporada

utiliza una banda borde rojo (B7) y el índice de humedad y la segunda temporada una banda de onda corta (B12) y el índice de clorofila.

Al analizar la variación presente en los mapas generados, se destaca la notable variación intraparcular que se muestra en las imágenes de NDVI, tanto en la campaña 2017 como en la 2018. Es particularmente interesante comparar los mapas de °Brix y NDVI, ya que se observa una relación inversa entre los valores más bajos de NDVI y los valores más altos de °Brix estimados, y viceversa. Este fenómeno sugiere una asociación significativa entre el vigor de las plantas y la calidad de la uva, un aspecto respaldado por la investigación de Bonilla et al., 2015 quienes indican que la mayoría de los estudios relacionados con el vigor y la calidad de la uva reflejan que las plantas vigorosas tienen menor contenido de antocianos que las plantas de bajo vigor, condición que toma fuerza considerando que, según Peña (2005), los antocianos son compuestos glucosidados, por lo que es imprescindible la presencia de azúcares para la formación de antocianos (Liu et al. 2018).

En este estudio, corroborando lo establecido de manera visual, se muestra una clara tendencia que refleja una relación negativa entre °Brix y NDVI, según se comprueba en la tabla 12 la relación inversa entre ambas variables, con un coeficiente de correlación -0,74 y -0,65, en las temporadas 2017 y 2018, respectivamente. Esta correlación vuelve a sugerir la complejidad de los factores que influyen en la calidad de la uva y resalta la importancia de considerar el vigor del follaje de la viña al evaluar la madurez alcanzada por la fruta y la calidad potencial del vino.

En general, las zonas con bajo índice de vegetación se presentan con valores más adecuados de las variables en estudio. En las variables precosecha se presentan valores más altos de °Brix y valores más ácidos de pH. Respecto de esta última es importante recordar que los valores de pH en vino son más ácidos con valores más bajos y más alcalinos con valores



muy altos, lo ideal es buscar valores intermedios sobre 3,4 y por debajo de 3,9. En el caso de las variables poscosecha, todas se presentan más altas en las zonas con menor índice de vegetación.

Es interesante que, independientemente de que el NDVI forme o no parte de los insumos que se utilizan para obtener las ecuaciones de los modelos de regresión múltiple, existe una notoria similitud entre la variabilidad del estado del dosel y la variabilidad que se presenta en los mapas generados correspondientes a las variables precosecha: °Brix y pH y poscosecha: índice de color y polifenoles.

Es probable que en los casos donde la variabilidad natural del viñedo mostrada en el NDVI, no se refleje de manera evidente en los mapas obtenidos, se deba a que la función obtenida para generarlos presentaba un bajo coeficiente de determinación  $R^2$ , estos factores pueden no ser tan representativos de la variación intraparcelsaria. La correspondencia entre °Brix y NDVI puede deberse a la alta relación entre NIR y °Brix (Arana et al., 2005; Santamaria, 2010; Jarén et al., 2011), que se refleja de forma natural en los mapas de NDVI. Estos autores realizaron estudios basados en las respuestas NIR obtenidas mediante espectrofotómetros de laboratorio, y las aplicaron a diversas muestras para comparar sólidos solubles y compuestos fenólicos, encontrando coeficientes de determinación superiores al 90% en el caso de °Brix. Lo que a su vez se extrapola a la acumulación de compuestos fenólicos y antocianos.

Las imágenes de satélite adquieren verdadera importancia cuando tienen la capacidad de registrar la variabilidad espacial del viñedo, un conocimiento muy fundamental para tomar decisiones sobre la gestión agronómica (Mashalaba et al., 2020). Actualmente, diversos sensores electrónicos se utilizan para detectar la variabilidad intraparcelsaria con el fin de permitir una gestión diferenciada de las operaciones de campo más importantes, como la fertilización, la poda o la vendimia (Llorens et al.,

2010). De hecho, tal y como afirman Arnó et al., 2017 existen pocas dudas sobre el hecho de que la vendimia selectiva puede proporcionar ventajas económicas para una viticultura más sostenible y competitiva. En este sentido, los resultados de este trabajo muestran la posibilidad de cartografiar la variabilidad espacial de indicadores de calidad de la uva de vinificación, no sólo entre parcelas sino también dentro de las mismas, mediante la obtención de modelos derivados de índices espectrales obtenidos a partir de imágenes Sentinel-2.

En un análisis comparativo entre las dos temporadas, se observa que el año 2018 se caracterizó por una mayor acumulación de precipitación total, registró temperaturas estacionales más frescas y presentó índices de vigor vegetativo más tempranos en comparación con la temporada anterior. Además, se destacó por alcanzar un mejor promedio de NDVI tanto en la plantación de 2007 como en la de 2010. Como resultado, se evidenció una ligera mejora en los niveles de °Brix y pH, así como un incremento en el índice de color y una mayor acumulación de antocianos y fenoles totales en el vino producido durante esta temporada. Estos hallazgos sugieren la influencia potencial que podría tener el clima y las condiciones de crecimiento, en la calidad y composición de la uva y el vino, resaltando la importancia de considerar factores ambientales y fenológicos en la gestión vitivinícola para optimizar la producción y la calidad del producto final.

La identificación de las principales causas que contribuyen a las diferencias entre ambas temporadas es un desafío complejo que puede requerir un análisis más detallado en futuras investigaciones. No obstante, es notable que la relación entre los índices espectrales y las variables estudiadas, tanto en la etapa de precosecha como en la de poscosecha, no sigue el mismo patrón en ambas estaciones. Esta diferencia está potencialmente influenciada por las condiciones climáticas y, posiblemente, por las prácticas agrícolas y de riego aplicadas en las parcelas, un aspecto que ya

ha sido explorado en estudios anteriores que resaltan la importancia de estos factores en la formación de antocianos.

Es relevante mencionar que, con el inicio del envero, azúcares y antocianos comienzan a acumularse conjuntamente, mostrando una relación directa entre ellos (Coombe y Mccarthy, 2000). Sin embargo, como consecuencia de los cambios de temperatura, podría producirse un desfase entre los azúcares y las antocianinas (Schultz y Jones, 2010; Gouot et al., 2019). La temperatura y la luminosidad han sido señalados como factores climáticos claves que afectan la fisiología de la vid (Abeyasinghe et al., 2019) afirmando que la luminosidad estimula la acumulación de antocianinas y las altas temperaturas la inhiben (Poudel et al., 2009; Moreno et al., 2011). Además, Peña (2009) afirma que el clima de la zona y su efecto térmico y lumínico tienen una gran influencia en todo el proceso de desarrollo, afectando a la fotosíntesis y a la formación de azúcares y ácidos. De hecho, existen diversos estudios que permiten establecer que las condiciones climáticas afectan a la maduración de la uva más que las características del suelo (Sweetman et al., 2014; Gutiérrez y Moreno, 2018). Ubalde et al., 2010 lo complementa indicando que el suelo es el responsable de determinar la composición fenólica y las características de sabor.

Determinar estratégicamente la localización de la toma de muestras en campo utilizando criterios que consideren áreas de respuesta homogéneas es una metodología particularmente ventajosa. Como afirman Hall et al., 2002, las imágenes de satélite son una herramienta invaluable en la planificación del desarrollo del viñedo, ya que permiten identificar regiones con características similares en cuanto a retención de humedad y necesidades de fertilización para controlar el vigor de la vid. En nuestro estudio, nos apoyamos en características de respuesta homogéneas, como el comportamiento vegetativo histórico y la topografía, para determinar la ubicación de un número mínimo de muestras que fueran representativas de la superficie total y, por ende, abarquen todas las variaciones presentes

en la zona de estudio. Este enfoque garantizó una toma de muestras eficiente y efectiva, permitiendo una evaluación exhaustiva de las condiciones del viñedo en su conjunto.

La aplicación práctica de estos modelos va más allá de la simple obtención de datos; se traduce en la creación de mapas que se convierten en valiosas herramientas para el enólogo y el viticultor, ya que hace más eficiente el proceso de muestreo de calidad en campo, al proporcionar una visión detallada de la variabilidad de maduración. Al zonificar el viñedo y determinar las áreas más representativas, estos mapas permiten tomar decisiones fundamentadas en la planificación de cosecha como, por ejemplo, estos mapas permiten identificar las zonas más propicias para realizar el muestreo en campo, una tarea que, sin el respaldo de un mapa previo, suele basarse en el conocimiento empírico y en estimaciones in situ realizadas por el personal de terreno.

La integración de tecnologías de percepción remota, como las imágenes de Sentinel-2, no solo agiliza los procesos, sino que también proporciona una herramienta valiosa para maximizar la calidad de la producción vitivinícola, ya que, al adquirir una serie de imágenes, contribuye en la precisión de estos mapas, permitiendo una planificación más efectiva y respaldada por datos objetivos. La combinación de datos espectrales y características homogéneas identificadas previamente facilita la generación de mapas que no solo mejoran la eficiencia operativa, sino que también optimizan la toma de decisiones estratégicas, elevando así el nivel de manejo y rendimiento del viñedo.

El estudio de las variables directamente implicadas en la calidad del vino, como °Brix, pH, compuestos fenólicos y el color, contribuye al interés de los investigadores por profundizar en estudios de técnicas no destructivas y asequibles basadas en el uso de imágenes de satélite que permitan comprender los factores que determinan la concentración de estas

variables de calidad y podrían complementarse con la amplia información de la que dispone progresivamente el viñedo, relacionada con la gestión agronómica, como la nutrición, el aclareo, el deshojado y el injerto, entre otros. Aunque los modelos obtenidos no alcanzan altos coeficientes de determinación, presentan una fiabilidad suficiente para obtener estimaciones precisas de las variables en estudio a nivel de planta, además son muy útiles para la gestión diferenciada de las vendimias, proporcionando información espacial para la cosecha selectiva con el fin de categorizar diferentes tipos de vino.

## **6.2 Conclusiones**

Determinar un modelo que permita definir una vendimia diferenciada, en función de la variabilidad de la parcela y por tanto de las posibles zonas de maduración temprana o tardía del viñedo, es muy útil para obtener una mejora en la producción y por tanto en la calidad del vino. El objetivo de esta investigación fue determinar modelos a partir de series de imágenes Sentinel-2 que permitan estimar, previo a la vendimia, variables críticas que inciden en la calidad del vino. Entre estas variables se incluyen la acumulación de azúcar, medida en grados °Brix y el pH. Así mismo, se exploraron las variables evaluadas después de la cosecha, que son las responsables en los vinos tintos de gran parte de sus características sensoriales. Las variables poscosecha: índice de color (IC) y compuestos fenólicos (FT, AT), que están presentes en la piel y semillas de las bayas que se extraen durante el proceso de elaboración del vino tinto e influyen en la calidad del vino (Casassa et al., 2022).

Nuestros objetivos principales consistieron en evaluar la eficacia de las imágenes Sentinel-2 en este tipo de estudios. En este sentido, buscamos determinar, en primer lugar, la utilidad de las imágenes en momentos clave del ciclo de crecimiento de la vid. Por otro lado, nos propusimos identificar patrones espectrales y visuales que facilitaran la selección óptima de índices o bandas capaces de responder de manera precisa a nuestras variables de interés.

En cuanto al uso de imágenes Sentinel-2, se evidencia claramente la ventaja que poseen, tanto en la frecuencia con la que pueden obtenerse las imágenes como en su resolución espectral. Esta última característica posibilita la generación de índices en diversas zonas del espectro electromagnético. El desarrollo de modelos basados en índices y variables espectrales derivados de imágenes satelitales Sentinel-2 ha resultado

primordial para la estimación de parámetros de calidad de uva vinífera y vino. Estos modelos, proyectados en toda el área de interés, con la misma resolución espacial que las imágenes, ofrecen una herramienta poderosa para mejorar la gestión diferenciada de la viña y, en consecuencia, la calidad de los vinos producidos.

En relación a los índices y bandas en estudio, no se observa una tendencia clara en cuanto a cuál de ellos muestra una mejor correlación con las variables. Sin embargo, en el caso de las variables precosecha, se destaca una mayor ocurrencia de las bandas del infrarrojo de onda corta y el índice de vegetación NDVI. Por otro lado, en las variables de poscosecha, destacan las bandas de borde rojo, infrarrojo cercano además del índice de humedad. Esta disparidad podría interpretarse como una desventaja, ya que no es posible determinar de manera concluyente cuáles son las bandas o índices que influyen en la predicción de las variables pre y poscosecha, lo que sugiere ahondar en nuevos ensayos o explorar con otras especies. Sin embargo, lo que se esperaba al comienzo de esta investigación era determinar un proceso que ayudara a mejorar el proceso artesanal, enfocado en obtener un vino de mejor calidad, con las condiciones básicas existentes en el viñedo. Desde esta perspectiva, las imágenes son una herramienta valiosa. Se observa que la ventaja proviene más de la metodología de trabajo que en la identificación de una banda específica, ya que los modelos no necesariamente deben ser universales y parece práctico y lógico que sea necesario adaptarse a las diversas condiciones ambientales tan cambiantes y que influyen notablemente en el *terroir* y, por ende, en la calidad del vino.

Respecto a la determinación de las fechas claves, se observa que el interés por la acumulación de azúcar en el fruto se produce posterior al envero, periodo en el que transcurren entre 55 y 60 días hasta la cosecha. Durante este periodo, es conveniente determinar tanto el contenido de azúcar en el fruto como su acidez, pero se hace más necesario poco antes de la

recolección. En este estudio, los resultados más destacados, en términos de coeficiente de determinación en los modelos de regresión examinados para °Brix y pH, se han logrado entre 15 y 20 días previos a la vendimia. La identificación de este intervalo clave constituye un componente esencial de la investigación, ya que permite acotar y definir el periodo propicio para llevar a cabo el proceso en cada temporada. Este enfoque se revela fundamental al satisfacer las necesidades de los enólogos, proporcionando datos esenciales para una gestión agronómica y económica de los viñedos que sea rápida, precisa y eficaz.

En lo que respecta a la generación de modelos para estimar las variables tanto pre como poscosecha, la metodología utilizada se considera exitosa. Esto se debe a que permite una selección objetiva de las bandas que muestran una mayor probabilidad de respuesta frente a las variables estudiadas. Esta selección se basa en criterios como la minimización del error en los promedios absolutos, la combinación de variables que se presentan con un menor grado de correlación entre sí y una mayor significancia estadística. Este enfoque metodológico garantiza que los modelos desarrollados sean confiables, lo que facilita su aplicación en la estimación de variables vitivinícolas tanto antes como después de la cosecha. La selección de las variables y la evaluación de los modelos contribuye a la obtención de resultados de alta calidad. Los modelos, lejos de ser concebidos como entidades estáticas y únicas, son herramientas flexibles que capturan la dinámica y la diversidad inherentes al proceso de maduración de la uva y sus implicaciones en la calidad del vino. Esta perspectiva resalta la importancia de no limitarse a patrones predefinidos, sino de considerar la complejidad y la riqueza de la variabilidad presente en la respuesta espectral de la vid. Este enfoque amplio y adaptable es fundamental para comprender y aprovechar plenamente la riqueza de información proporcionada por la teledetección en el contexto vitivinícola.



En relación a los coeficientes de determinación obtenidos, los resultados deben ser analizados de forma diferente. El caso de °Brix, índice de color y antocianos totales de la primera temporada son particularmente positivos, con valores elevados entre 65% y 77%, abriendo la posibilidad de una predicción fiable de estas variables, contribuyendo en la definición de cosecha selectiva y facilitando el muestreo realizado manualmente directamente en el campo. El resto de las variables no son igualmente concluyentes, aunque la relación tiende a ser menor que las mencionadas, existe una relación útil que puede ser utilizada como indicador de la variabilidad intraparcelaria para mejorar en la práctica el manejo agronómico. Coeficientes de determinación entre 42% y 57% en las campañas 2017 y 2018 respectivamente, indican la necesidad de mejorar el estudio en el futuro, bien incrementando el intervalo espectral o empleando sensores de mayor resolución espacial.

La modelización no pretende omitir el trabajo de campo, sino contribuir a mejorar la eficiencia de un trabajo tradicional que presenta un sesgo importante debido a la nula posibilidad de visitar todas las hileras de una parcela. Los grandes viñedos se ven obligados a centrarse en visitar y revisar sólo aquellas parcelas que han alcanzado históricamente la mejor evaluación de calidad, ya que el ritmo de cambio es muy rápido al acercarse la vendimia. En consecuencia, la posibilidad de tener, a través de imágenes de satélite, una visión más detallada del interior de las parcelas hace que el trabajo de campo sea más eficiente para determinar cuáles son las zonas que merecen ser inspeccionadas y, por tanto, poder mejorar la calidad agrupando las zonas con igual calidad dentro de las parcelas.

Este estudio presenta un potencial práctico significativo al proyectar un modelo indicador de variables precosecha y poscosecha los cuales no solo identifican, sino que también cuantifican de manera espacial la variabilidad inherente en la acumulación de azúcar y la acidez en el viñedo, así como en la determinación de las variables poscosecha: índice de color, fenoles y

antocianos totales. Estos factores son esenciales para evaluar la calidad del vino, su capacidad de envejecimiento y el distintivo estilo que caracteriza a cada marca vinícola. Los mapas generados a partir de los modelos construidos no solo constituyen una herramienta visual, sino que también pueden utilizarse estratégicamente para mostrar la variabilidad en la maduración de la vid en toda la zona de estudio.

Esta herramienta, de alta confiabilidad y funcionamiento semiautomático, representa un avance significativo al permitir la segmentación precisa de las parcelas de cultivo en regiones homogéneas. Esta capacidad de segmentación no solo simplifica la gestión durante la vendimia, sino que también abre la puerta a una gestión diferenciada más precisa en todo el ciclo de producción de vino. En un contexto donde la optimización de los procesos es vital para elevar el estándar de calidad en la elaboración del vino y garantizar una gestión eficiente en todas las etapas, la integración de soluciones tecnológicas como el uso de imágenes de satélite Sentinel-2 cobra un protagonismo esencial.

Estas imágenes no solo proporcionan una visión detallada de las condiciones de la vid antes de la cosecha, sino que también contribuyen a modelar el entorno de manera precisa. Además, la aplicación del algoritmo *k-means* para agrupar las zonas con características similares resulta fundamental. Esta herramienta no solo identifica áreas con una concentración más alta de sustancias y una actividad metabólica más propicia para la maduración esperada, sino que también facilita la identificación de zonas primarias de cosecha

Así, la combinación de estas tecnologías no solo optimiza el proceso de vendimia, sino que también mejora significativamente la calidad de la producción vinícola. Al proporcionar una visión detallada y segmentada del viñedo, se permite una gestión más eficiente y precisa, lo que contribuye a elevar el estándar de excelencia en la vinificación.

El objetivo de optimizar todos los procesos de la cadena de producción del vino es elevar el nivel de calidad de la vinificación, favoreciendo una gestión óptima de todas las fases. La incorporación de soluciones tecnológicas, como el uso de imágenes de satélite Sentinel-2, al proceso de muestreo de fruta juega un papel clave, ya que su alta periodicidad permite modelizar las condiciones de la vid antes de la cosecha. La fase final de la maduración y el momento de la vendimia es un periodo muy corto en el que la posibilidad de identificar sectores homogéneos para la vendimia y programar así el espacio de la bodega resulta estratégico. Por lo tanto, la metodología presentada es una herramienta que permite mejorar un proceso artesanal, al generar mapas de valores estimados de las variables en estudio, con los cuales definir las zonas clave a revisar en campo, aumentando las posibilidades de realizar una vendimia dirigida, a través de muestreos sitio-específicos, lo que da la capacidad de tomar decisiones en la gestión del viñedo.

Los resultados también muestran la conveniencia de profundizar este estudio en dos aspectos concretos en el futuro: (i) aumentar el número de muestras para mejorar la dispersión y variedad de los datos; e (ii) incluir una variable climática, como la temperatura acumulada, que podría ayudar a comprender las variaciones en la maduración y en el comportamiento que tiene la acumulación de los compuestos fenólicos en las bayas para obtener modelos más robustos, ya que como vimos en los apartados iniciales, ambas temporadas presentaron diferencias significativas en cuanto a temperatura, radiación solar y precipitaciones acumuladas. Estas variaciones térmicas y en la radiación solar tienen implicaciones directas en el desarrollo fenológico de la vid, afectando aspectos como la acumulación de grados día y la fotosíntesis. La presencia de temperaturas más frescas en la temporada 2018 puede haber generado un ritmo de desarrollo más moderado, con implicación positiva tanto en la concentración de variables

precosecha (°Brix y pH) como en la poscosecha (índice de color y polifenoles).

Los resultados positivos obtenidos en términos de productividad, junto con la disponibilidad de imágenes satelitales libres y de alta periodicidad, brindan la oportunidad de determinar áreas dentro de las parcelas que requieren un estudio más detallado y, eventualmente, una cosecha diferenciada. La adecuada selección de uvas con características similares se posiciona como un factor clave para mejorar la calidad y la productividad de la vinificación. Este trabajo subraya la viabilidad de la teledetección y la vendimia selectiva como herramientas valiosas para gestionar el estilo y la calidad del vino producido, brindando nuevas perspectivas y enfoques en el ámbito vitivinícola.



## Referencias Bibliográficas

- Abeyasinghe, S.K.; Greer, D.H. and Rogiers, S.Y. 2019. "The Effect of Light Intensity and Temperature on Berry Growth and Sugar Accumulation in *Vitis Vinifera* 'Shiraz' under Vineyard Conditions." *Vitis* 58 (1): 7–16. <https://doi.org/10.5073/vitis.2019.58.7-16>.
- Acevedo-Opazo, C.; Tisseyre, B.; Guillaume, S. and Ojeda, H. 2008. "The Potential of High Spatial Resolution Information to Define Within-Vineyard Zones Related to Vine Water Status." *Precision Agriculture* 9 (5): 285–302. <https://doi.org/10.1007/s11119-008-9073-1>.
- Agricotec S.L. 2022. "Agricotec." 2022. <https://agricotec.es/secciones/2/politica-de-privacidad->
- Aguilera, G. 2019. "The Wine Growing Geography Of Chile 2019." *Vinifera*.
- Aguilera, G. 2015. "Patrimonio e Identidad Vitivinícola. Reflexiones Sobre La Evolución de Los Significados Culturales Del Vino En Chile." *Revista Iberoamericana de Viticultura, Agroindustria y Ruralidad* 4 (2): 88–105.
- Amararathna, M.; Johnston, M. and Rupasinghe, H.P. 2016. "Plant Polyphenols as Chemopreventive Agents for Lung Cancer." *International Journal of Molecular Sciences* 17 (8). <https://doi.org/10.3390/ijms17081352>.
- Ammoniacci, M.; Kartsiotis, S.P.; Perria, R. and Storchi, P. 2021. "State of the Art of Monitoring Technologies and Data Processing for Precision Viticulture." *MDPI* 11 (Agriculture). <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/agriculture11030201>.
- Aprende a Catar Vinos. 2005. "Aprende a Catar Vino." <https://Aprendeacatarvino.Wordpress.Com/2009/09/21/Refractomet>

- ro-de-Campo/. 2005.  
<https://aprendeacatarvino.wordpress.com/2009/09/21/refractometro-de-campo/>.
- “Aprendiendo Juntos de Vino.” 2018. 2018.  
[https://www.facebook.com/aprendiendodevinojuntos/about\\_contact\\_and\\_basic\\_info](https://www.facebook.com/aprendiendodevinojuntos/about_contact_and_basic_info).
- Arana, I.; Jarén, C. and Arazuri, S. 2005. “Maturity, Variety and Origin Determination in White Grapes (*Vitis Vinifera* L.) Using near Infrared Reflectance Technology.” *Journal of Near Infrared Spectroscopy* 13 (6): 349–57. <https://doi.org/10.1255/jnirs.566>.
- Arnó, J.; Bordes, X.; Ribes-Dasi, M.; Blanco, R.; Rosell, J.R. and Esteve J. 2005. “Obtaining Grape Yield Maps and Analysis of Within-Field Variability in Raimat (Spain).” *Precision Agriculture 2005, ECPA 2005*, no. June 2015, 899–906.
- Arnó, J.; Martínez-Casasnovas, J.A.; Ribes-Dasi, M. and Rosell J.R. 2009. “Review. Precision Viticulture. Research Topics, Challenges and Opportunities in Site-Specific Vineyard Management.” *Spanish Journal of Agricultural Research* 7 (4). <https://doi.org/10.5424/sjar/2009074-1092>.
- Arrizabalaga, M.; Morales, F.; Oyarzun, M.; Delrot, S.; Gomès, E.; Irigoyen, J. J.; Hilbert, G. and Pascual I. 2018. “Tempranillo Clones Differ in the Response of Berry Sugar and Anthocyanin Accumulation to Elevated Temperature.” *Plant Science* 267 (May 2017): 74–83. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2017.11.009>.
- Atzberger, C. 2013. “Advances in Remote Sensing of Agriculture: Context Description, Existing Operational Monitoring Systems and Major

- Information Needs." *Remote Sensing* 5 (2): 949–81.  
<https://doi.org/10.3390/rs5020949>.
- Ballesteros, R.; Ortega, J.F.; Hernández, D. and Moreno, M.A. 2015. "Characterization of *Vitis Vinifera* L. Canopy Using Unmanned Aerial Vehicle-Based Remote Sensing and Photogrammetry Techniques." *American Journal of Enology and Viticulture* 66 (2): 120–29.  
<https://doi.org/10.5344/ajev.2014.14070>.
- Bautista, A.; Iniesta, J.; Pardo, F.; López, J. and Gómez E. 2008. "Estabilización Del Color de Los Vinos Tintos Utilizando La Micro-Oxigenación Conjuntamente Con Taninos Enológicos y Virutas de Roble. Una Alternativa a La Crianza En Barricas." *Investigación y Ciencia*.
- Bei, R.; Fuentes, S. and Collins, C. 2019. "Vineyard Variability: Can We Assess It Using Smart Technologies?" *IVES Technical Reviews, Vine and Wine*, no. El 29. <https://doi.org/10.20870/ives-tr.2019.2544>.
- Best, S.; León, L.; Quintana, R.; Aguilera, H.; Flores, F. and Concha V. 2013. "Viticultura de Precisión, Terroir Digital." *Boletín Inia N°269*, 2013.
- Biblioteca Nacional de Chile. 2015. *Patrimonio Vitivinícola - Aproximaciones a La Cultura Del Vino En Chile*.
- Bindi, M.; Fibbi, L.; Gozzini, B.; Orlandini, S. and Miglietta F. 1996. "Modelling the Impact of Future Climate Scenarios on Yield and Yield Variability of Grapevine." *Climate Research* 7 (3): 213–24.  
<https://doi.org/10.3354/cr007213>.
- Bodegas de la Mancha. 2021. "La Mancha Denominación de Origen." <https://Bodegasdelamancha.Com/El-Ciclo-de-La-Vid-En-La-Mancha/>. March 21, 2021. <https://bodegasdelamancha.com/el-ciclo-de-la-vid-en-la-mancha/>.



- Bohm, J. n.d. "Vine to Wine Circle." <https://www.vinetowinecircle.com/terroir/terroir-y-viticultura/>. Accessed April 14, 2024. <https://www.vinetowinecircle.com/terroir/terroir-y-viticultura/>.
- Bois, B.; Wald, L.; Pieri, P.; Van Leeuwen, C.; Commagnac, L.; Chery, Ph.; Christen, M.; Gaudillère, J.P. and Saur, E. 2008. "Estimating Spatial and Temporal Variations in Solar Radiation within Bordeaux Winegrowing Region Using Remotely Sensed Data." *Journal International Des Sciences de La Vigne et Du Vin* 42 (1): 15–25. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2008.42.1.829>.
- Bonilla, I.; Martínez De Toda, F. and Martínez-Casasnovas J.A. 2015. "Vine Vigor, Yield and Grape Quality Assessment by Airborne Remote Sensing over Three Years: Analysis of Unexpected Relationships in Cv. Tempranillo." *Spanish Journal of Agricultural Research* 13 (2): 1–8. <https://doi.org/10.5424/sjar/2015132-7809>.
- Borgogno-Mondino, E.; Lessio, A.; Tarricone, L.; Novello, V. and de Palma, L. 2018. "A Comparison between Multispectral Aerial and Satellite Imagery in Precision Viticulture." *Precision Agriculture* 19 (2): 195–217. <https://doi.org/10.1007/s11119-017-9510-0>.
- Bramley, R.G.V. and Hamilton, R. P. 2004. "Understanding Variability in Winegrape Production Systems 2. Within Vineyard Variation in Quality over Several Vintages." *Australian Journal Of Grape And Wine Research* 10 (1): 32–45. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2004.tb00006.x>.
- Bramley, R.G.V. 2010. "Precision Viticulture: Managing Vineyard Variability for Improved Quality Outcomes." In *Managing Wine Quality: Viticulture and Wine Quality*, 445–80. Woodhead Publishing Limited. <https://doi.org/10.1533/9781845699284.3.445>.

- Bramley, R.G.V. and Hamilton, R.P. 2007. "Terroir and Precision Viticulture: Are They Compatible?" *Journal International Des Sciences de La Vigne et Du Vin* 41 (1): 1–8. <https://doi.org/10.20870/oenone.2007.41.1.855>.
- Bramley, R.G.V.; Ouzman, J. and Boss, P.K. 2011. "Variation in Vine Vigour, Grape Yield and Vineyard Soils and Topography as Indicators of Variation in the Chemical Composition of Grapes, Wine and Wine Sensory Attributes." *Australian Journal of Grape and Wine Research* 17 (2): 217–29. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2011.00136.x>.
- Bramley, R.G.V.; and Hamilton, R.P. 2008. "Understanding Variability in Winegrape Production Systems." *Australian Journal of Grape and Wine Research* 10 (1): 32–45. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2004.tb00006.x>.
- Bramley, R.G.V.; Pearse, B.; Felix, V. and Chamberlain, P. 2003. "Being Profitable Precisely - a Case Study of Precision Viticulture from Margaret River," 84–87.
- Brom, J.; Nedbal, V.; Procházka, J. and Pecharová, E. 2012. "Changes in Vegetation Cover, Moisture Properties and Surface Temperature of a Brown Coal Dump from 1984 to 2009 Using Satellite Data Analysis." *Ecological Engineering* 43:45–52. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.03.001>.
- Bucchetti, B.; Matthews M.A.; Falginella, L.; Peterlunger, E. and Castellarin, S. D. 2011. "Effect of Water Deficit on Merlot Grape Tannins and Anthocyanins across Four Seasons." *Scientia Horticulturae* 128 (3): 297–305. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.02.003>.
- Busse-Valverde, N.; Gómez-Plaza, E.; López-Roca, J.M.; Gil-Muñoz, R. and Bautista-Ortín, A. B. 2011. "The Extraction of Anthocyanins and

- Proanthocyanidins from Grapes to Wine during Fermentative Maceration Is Affected by the Enological Technique." *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 59 (10): 5450–55. <https://doi.org/10.1021/jf2002188>.
- Buzzetti, C. 2018. "Una Mirada al Mercado Vitivinícola Nacional e Internacional," 2018. <https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2018/02/vino2018.pdf>.
- Buzzetti, C. 2021. "Análisis a Las Exportaciones de Vino Embotellado." *Odepa*. <https://bibliotecadigital.odepa.gob.cl/bitstream/handle/20.500.12650/70635/ArtExpVino202101.pdf>.
- Canals, R.; Llaudy, M.C.; Valls, J.; Canals, J. M. and Zamora, F. 2005. "Influence of Ethanol Concentration on the Extraction of Color and Phenolic Compounds from the Skin and Seeds of Tempranillo Grapes at Different Stages of Ripening." *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 53 (10): 4019–25. <https://doi.org/10.1021/jf047872v>.
- Casassa, F. and Sari, S. 2006. "Aplicación Del Sistema Cie-Lab a Los Vinos Tintos. Correlación Con Algunos Parámetros Tradicionales." *Revista Enología* 3 (May): 10.
- Casassa, F.; Fanzone, M.L. and Sari, S.E. 2022. "Comparative Phenolic, Chromatic, and Sensory Composition of Five Monovarietal Wines Processed with Microwave Technology." *SSRN Electronic Journal* 8 (June): e12332. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4167632>.
- Castro, A. L. 2005. "Efecto Del Momento de Cosecha de Uva Cv. Merlot Cobre La Composicion Quimica y Sensorial de Los Vinos En El Valle Del Maipo." Universidad de Chile.

- Catania, C. and Avagnina, S. 2007. "La Maduración de La Uva." In *Curso Superior de Degustación de Vinos*, INTA, 1–14.
- Chaves, M.M.; Harley, P.C.; Tenhunen, J.D. and Lange, O.L. 1987. "Gas Exchange Studies in Two Portuguese Grapevine Cultivars." *Physiologia Plantarum* 70 (4): 639–47. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1987.tb04318.x>.
- Chen, Ch., Zheng, Y.; Wu, T.; Wu, Ch. and Cheng, X. 2016. "Oral Administration of Grape Seed Polyphenol Extract Restores Memory Deficits in Chronic Cerebral Hypoperfusion Rats." *Behavioural Pharmacology* 28 (2-3 Special Issue): 207–13. <https://doi.org/10.1097/FBP.0000000000000276>.
- Chira, K.; Pacella, N.; Jourdes, M. and Teissedre, P.L. 2011. "Chemical and Sensory Evaluation of Bordeaux Wines (Cabernet-Sauvignon and Merlot) and Correlation with Wine Age." *Food Chemistry* 126 (4): 1971–77. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.12.056>.
- Cogato, A.; Meggio, F.; Collins, C. and Marinello, F. 2020. "Medium-Resolution Multispectral Data from Sentinel-2 to Assess the Damage and the Recovery Time of Late Frost on Vineyards." *Remote Sensing* 12 (11). <https://doi.org/10.3390/rs12111896>.
- Cogato, A.; Pagay, V.; Marinello, F.; Meggio, F.; Grace, P. and De Antoni Migliorati, M. 2019. "Assessing the Feasibility of Using Medium-Resolution Imagery Information to Quantify the Impact of the Heatwaves on Irrigated Vineyards." *Remote Sensing* 11 (2869): 1–19.
- Comuzzo, P. and Battistutta, F. 2018. *Acidification and PH Control in Red Wines*. *Red Wine Technology*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814399-5.00002-5>.
- CONICYT. 2007. "The Wine and Vine Grape Production Sector in Chile," 29.

- Coombe, B.G., and Mccarthy, M.G. 2000. "Dynamics of Grape Berry Growth and Physiology of Ripening." *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 131–35.
- Cortell, J.M.; Halbleib, M.; Gallagher, A.V.; Righetti, T.L. and Kennedy, J.A. 2005. "Influence of Vine Vigor on Grape (*Vitis Vinifera* L. Cv. Pinot Noir) and Wine Proanthocyanidins." *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 53 (14): 5798–5808. <https://doi.org/10.1021/jf0504770>.
- Cozzolino, D. 2016. "Metabolomics in Grape and Wine: Definition, Current Status and Future Prospects." *Food Analytical Methods*. Springer New York LLC. <https://doi.org/10.1007/s12161-016-0502-x>.
- Cunha, M.; Marçal, A.R.S. and Silva, L. 2010. "Very Early Prediction of Wine Yield Based on Satellite Data from Vegetation." *International Journal of Remote Sensing* 31 (12): 3125–42. <https://doi.org/10.1080/01431160903154382>.
- Devaux, N.; Crestey, T.; Leroux, C. and Tisseyre, B. 2019. "Potential of Sentinel-2 Satellite Images to Monitor Vine Fields Grown at a Territorial Scale." *Oeno One* 53 (1): 51–58. <https://doi.org/10.20870/oenone.2019.53.1.2293>.
- Diago-Santamaria, M.P. 2010. "Estudio y Desarrollo Del Deshojado Precoz Como Tecnica Para El Control Del Rendimiento Productivo de La Vid." *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis* 53 (9).
- Di Gennaro, S.; Matese, A.; Gioli, B.; Toscano, P.; Zaldei, A.; Palliotti, A. and Genesio, L. 2017. "Multisensor Approach to Assess Vineyard Thermal Dynamics Combining High-Resolution Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Remote Sensing and Wireless Sensor Network (WSN) Proximal

Sensing." *Scientia Horticulturae* 221 (April): 83–87.  
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.04.024>.

Di Gennaro, S.; Toscano, P.; Cinat, P.; Berton, A. and Matese, A. 2019. "A Low-Cost and Unsupervised Image Recognition Methodology for Yield Estimation in a Vineyard." *Frontiers in Plant Science* 10.  
<https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00559>.

Downey, M.O.; Dokoozlian, N.K. and Krstic M.P. 2006. "Cultural Practice and Environmental Impacts on the Flavonoid Composition of Grapes and Wine: A Review of Recent Research." *American Journal of Enology and Viticulture* 57 (3): 257–68. <https://doi.org/10.5344/ajev.2006.57.3.257>.

Downey, M.O.; Harvey, J.S. and Robinson, S.P. 2003. "Analysis of Tannins in Seeds and Skins of Shiraz Grapes throughout Berry Development." *Australian Journal of Grape and Wine Research* 9 (1): 15–27.  
<https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2003.tb00228.x>.

Duran, O.D. and Trujillo, Y. 2008. "Estudio Comparativo Del Contenido Fenólico de Vinos Tintos Colombianos e Importados." *Vitae* 15 (1): 17–24.

Edo-Roca, M.; Nadal, M. and Lampreave, M. 2013. "How Terroir Affects Bunch Uniformity, Ripening and Berry Composition in *Vitis Vinifera* Cvs. Carignan and Grenache." *Journal International Des Sciences de La Vigne et Du Vin* 47 (1): 1–20. <https://doi.org/10.20870/oenone.2013.47.1.1533>.

ESA. 2015. *ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services*.

- Esparza, I.; Santamaría, C. and Fernández, J.M. 2006. "Chromatic Characterisation of Three Consecutive Vintages of Vitis Vinifera Red Wine: Effect of Dilution and Iron Addition." *Analytica Chimica Acta* 563 (1-2 SPEC. ISS.): 331–37. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2005.09.043>.
- Esser, A. and Ortega, R. 2002. "Aplicaciones de La Viticultura de Precisión En Chile: Estudio de Casos." *Agronomía y Forestal UC* 5 (17): 17–22.
- Ezquerro, D. 2016. "Relación Entre Parámetros Químicos Determinantes de La Calidad de La Uva y El NDVI, Para La Estimación de La Fecha de Vendimia." Universidad Zaragoza.
- Fernández, M.; Peña, I. and Sánchez de Pablo, J.D. 2011. "Factors of Competitiveness in the Wine Industry: An Analysis of Innovation Strategy." *World Academy of Science, Engineering and Technology* 78 (6): 503–13. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1076181>.
- Filippo, S.; Toscano, P.; Gatti, M.; Poni, S.; Berton, A. and Matese, A. 2022. "Spectral Comparison of UAV-Based Hyper and Multispectral Cameras for Precision Viticulture."
- Forino, M.; Picariello, L.; Rinaldi, A.; Moio, L. and Gambuti, A. 2020. "How Must PH Affects the Level of Red Wine Phenols." *Lwt* 129 (January): 109546. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109546>.
- Fountas, S.; Espejo-Garcia, B.; Kasimati, A.; Mylonas, N. and Darra, N. 2020. "The Future of Digital Agriculture: Technologies and Opportunities." *IT Professional* 22 (1): 24–28. <https://doi.org/10.1109/MITP.2019.2963412>.
- Gabrielyan, A. and Kazumyan, K. 2018. "The Investigation of Phenolic Compounds and Anthocyanins of Wines Made of the Grape Variety Karmrahyut." *Annals of Agrarian Science* 16 (2): 160–62. <https://doi.org/10.1016/j.aasci.2018.03.005>.

- Gao, Bo-Cai. 1996. "NDWI A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water From Space." *Elsevier* 23 (3): 257–66. <https://doi.org/10.24059/olj.v23i3.1546>.
- Gebbers, R. and Adamchuk, V.I. 2010. "Precision Agriculture and Food Security." *Science* 327 (5967): 828–31. <https://doi.org/10.1126/science.1183899>.
- Gennaro, S.; Dainelli, R.; Palliotti, A.; Toscano, P. and Matese, A. 2019. "Sentinel-2 Validation for Spatial Variability Assessment in Overhead Trellis System Viticulture versus UAV and Agronomic Data." *Remote Sensing* 11 (21). <https://doi.org/10.3390/rs11212573>.
- Gennaro, S. and Matese, A. 2020. "Evaluation of Novel Precision Viticulture Tool for Canopy Biomass Estimation and Missing Plant Detection Based on 2.5D and 3D Approaches Using RGB Images Acquired by UAV Platform." *Plant Methods* 16 (1): 1–13. <https://doi.org/10.1186/s13007-020-00632-2>.
- Gil-Pérez, B.; Zarco-Tejada, P.J.; Correa-Guimaraes, A.; Relea-Gangas, E.; Navas-Gracia, L.M.; Hernández-Navarro, S.; Sanz-Requena, J. F.; Berjón, A. and Martín-Gil, J. 2010. "Remote Sensing Detection of Nutrient Uptake in Vineyards Using Narrow-Band Hyperspectral Imagery." *Vitis - Journal of Grapevine Research* 49 (4): 167–73.
- Giovas, R., Tassopoulos, D.; Kalivas, D.; Lougkos, N. and Priovolou, A. 2021. "Remote Sensing Vegetation Indices in Viticulture: A Critical Review." *Agriculture (Switzerland)* 11 (5). <https://doi.org/10.3390/agriculture11050457>.
- Giraldo, C. 2017. "Escenarios de La Vitivinicultura Chilena Generados Por Los Cambios En La Aptitud Productiva, Como Consecuencia Del Cambio Climatico Para Medios Del Siglo XX1." *Universidad de Chile, Facultad*



de Ciencias Forestales y de La Conservacion de La Naturaleza.  
Universidad de Chile.

- Gitelson, A.A. and Merzlyak, M.N. 1996. "Signature Analysis of Leaf Reflectance Spectra: Algorithm Development for Remote Sensing of Chlorophyll." *Journal of Plant Physiology* 148 (3–4): 494–500. [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(96\)80284-7](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(96)80284-7).
- Gouot, J.C., Smith, J.P.; Holzzapfel, B.P.; Walker, A.R. and Barril, C. 2019. "Grape Berry Flavonoids: A Review of Their Biochemical Responses to High and Extreme High Temperatures." *Journal of Experimental Botany* 70 (2): 397–423. <https://doi.org/10.1093/jxb/ery392>.
- Gutiérrez-Gamboa, G. and Moreno-Simunovic, Y. 2018. "Location Effects on Ripening and Grape Phenolic Composition of Eight 'Carignan' Vineyards from Maule Valley (Chile)." *Chilean Journal of Agricultural Research* 78 (1): 139–49. <https://doi.org/10.4067/S0718-58392018000100139>.
- Hall, A., Lamb, D.W.; Holzzapfel, B. and Louis, J. 2002. "Optical Remote Sensing Applications in Viticulture – a Review." *Australian Journal of Grape and Wine Research* 8, 36–47.
- Hall, A; Louis J. and Lamb, D. 2003. "Characterising and Mapping Vineyard Canopy Using High-Spatial- Resolution Aerial Multispectral Images." *Computers and Geosciences* 29 (7): 813–22. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(03\)00082-7](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(03)00082-7).
- Hallik, L.; Kazantsev, T.; Kuusk, A.; Galmés, J.; Tomás, M. and Niinemets, Ü. 2017. "Generality of Relationships between Leaf Pigment Contents and Spectral Vegetation Indices in Mallorca (Spain)." *Regional Environmental Change* 17 (7): 2097–2109. <https://doi.org/10.1007/s10113-017-1202-9>.

- Hansen, P.M.; and Schjoerring, J. K. 2003. "Reflectance Measurement of Canopy Biomass and Nitrogen Status in Wheat Crops Using Normalized Difference Vegetation Indices and Partial Least Squares Regression." *Remote Sensing of Environment* 86 (4): 542–53. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00131-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00131-7).
- Hatfield, J.L.; Prueger, John H., Sauer, T. J.; Dold, Ch.; O'brien, P. and Wacha, Ken. 2019. "Applications of Vegetative Indices from Remote Sensing to Agriculture: Past and Future." *Inventions* 4 (4): 1–17. <https://doi.org/10.3390/inventions4040071>.
- He, F., Liang, N.N; Mu, L.; Hong-Pan, Q.; Wang, J.; Reeves, M.J. and Qing-Duan, Ch. 2012. "Anthocyanins and Their Variation in Red Wines I. Monomeric Anthocyanins and Their Color Expression." *Molecules* 17 (2): 1571–1601. <https://doi.org/10.3390/molecules17021571>.
- He, F., Mu, L.; Liang Yan, G.; Liang, N.N.; Hong-Pan, Q.; Wang, J.; Reeves, M.J. and Qing Duan, Ch. 2010. "Biosynthesis of Anthocyanins and Their Regulation in Colored Grapes." *Molecules* 15 (12): 9057–91. <https://doi.org/10.3390/molecules15129057>.
- Heras-Roger, J.; Díaz-Romero, C. and Darias-Martín J. 2016. "A Comprehensive Study of Red Wine Properties According to Variety." *Food Chemistry* 196 (October): 1224–31. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.10.085>.
- Hernández, C., Escribano, J. and Tarquis, A. 2014. "Comparación Del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada Obtenido a Diferentes Escalas En Pastos de Dehesa." *53ª Reunión Científica de La SEEP*, 121–28.
- Herrera, M.E. and Chuvieco E. 2014. "Estimación Del Contenido de Agua a Partir de Mediciones Hiperespectrales Para Cartografía Del Riesgo de

Incendio." *Cuadernos de Investigación Geográfica* 40 (2): 295–309. <https://doi.org/10.18172/cig.2518>.

Hornedo-Ortega, R.; Reyes Gonzalez-Centeno M.; Chira, K.; Jourdes, M. and Teissedre, P.L. 2020. "Phenolic Compounds of Grapes and Wines: Key Compounds and Implications in Sensory Perception." In *Chemistry and Biochemistry of Winemaking, Wine Stabilization and Aging*, 13. <https://doi.org/10.5772/intechopen.93127>.

Hunter, J.J. 2000. "Implications of Seasonal Canopy Management and Growth Compensation in Grapevine." *South African Journal of Enology & Viticulture* 21 (2). <https://doi.org/10.21548/21-2-2215>.

Hunter, J.J. and Bonnardot, V. 2002. "Climatic Requirements for Optimal Physiological Processes: A Factor in Viticultural Zoning." *4th Int. Symp. on Viticultural Zoning*, no. July 2015, 553–65.

Hunter, J.J. and Visser J.H. 1998. "The Effect of Partial Defoliation, Leaf Position and Developmental Stage of the Vine on the Photosynthetic Activity of *Vitis Vinifera* L. Cv Cabernet Sauvignon." *South African Journal of Enology & Viticulture* 9 (2): 9–15. <https://doi.org/10.21548/9-2-2297>.

Hunter, J.J., and C.G. Volschenk. 2001. "Effect of Altered Canopy: Root Volume Ratio on Grapevine Growth Compensation." *South African Journal of Enology & Viticulture* 22 (1). <https://doi.org/10.21548/22-1-2163>.

International Organisation Of Vine And Wine. 2010. "Resolución OIV/VITI 333/2010." <https://www.oiv.int/public/medias/380/viti-2010-1-es.pdf>.

Jackson, M.G.; Timberlake, C.F.; Bridle, P. and Vallis, LI. 1978. "Red Wine Quality: Correlations between Colour, Aroma and Flavour and Pigment and Other Parameters of Young Beaujolais." *Journal of the Science of*

*Food and Agriculture* 29 (8): 715–27.  
<https://doi.org/10.1002/jsfa.2740290810>.

Jaffré, J.; Valentin, D.; Dacremont, C. and Peyron, D. 2009. "Burgundy Red Wines: Representation of Potential for Aging." *Food Quality and Preference* 20 (7): 505–13.  
<https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2009.05.001>.

Jarén, C; Aguilheiro-Santos, A.C.; Palma, V.; Rato, A.; Arias, N. and Arazuri, S. 2011. "Determinación Del Contenido En Polifenoles En Uva de Mesa Mediante Tecnología NIRS." *VI Congreso Iberico de Agroingenieria*, no. September 2010, 1–5.

Jiménez-Brenes, F.M., López-Granados, F.; Torres-Sánchez, J.; Peña, J.M.; Ramírez, P.; Castillejo-González, I.L. and de Castro, A.I. 2019. "Automatic UAV-Based Detection of *Cynodon Dactylon* for Site-Specific Vineyard Management." *PLoS ONE* 14 (6): 1–21.  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0218132>.

Jofré, C. 2004. "Estudio de Dos Métodos de Determinación de Madurez Fenólica En Bayas de Var. Cabernet Sauvignon," 66.

Johnson, L.F., Bosch, D.F.; Williams, D.C. and Lobitz, B. M. 2001. "Remote Sensing of Vineyard Management Zones: Implications for Wine Quality." *Applied Engineering in Agriculture* 17 (4).  
<https://doi.org/10.13031/2013.6454>.

Johnson, L.F., Roczen, D.E.; Youkhana, S.K.; R. R. Nemani, and D. F. Bosch. 2003. "Mapping Vineyard Leaf Area with Multispectral Satellite Imagery." *Computers and Electronics in Agriculture* 38 (1): 33–44.  
[https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(02\)00106-0](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(02)00106-0).

- Jones, G.V.; White, M.A.; Cooper, O.R. and Storchmann, K. 2005. "Climate Change and Global Wine Quality." *Climatic Change* 73 (3): 319–43. <https://doi.org/10.1007/s10584-005-4704-2>.
- Kalisperakis, I.; Stentoumis, Ch; Grammatikopoulos, L. and Karantzalos, K. 2015. "Leaf Area Index Estimation in Vineyards from UAV Hyperspectral Data, 2D Image Mosaics and 3D Canopy Surface Models." *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives* 40 (1W4): 299–303. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-1-W4-299-2015>.
- Kalopesa, E.; Karyotis, K.; Tziolas, N.; Tsakiridis, N.; Samarinas, N. and Zalidis, G. 2023. "Estimation of Sugar Content in Wine Grapes via In Situ VNIR–SWIR Point Spectroscopy Using Explainable Artificial Intelligence Techniques." *Sensors* 23 (3). <https://doi.org/10.3390/s23031065>.
- Kalstein. n.d. "Kalstein." <https://Kalstein.Ec/>. Accessed April 14, 2024. <https://kalstein.ec/>.
- Keller, M. 2010. "Managing Grapevines to Optimise Fruit Development in a Challenging Environment: A Climate Change Primer for Viticulturists." *Australian Journal of Grape and Wine Research* 16 (SUPPL. 1): 56–69. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2009.00077.x>.
- Kennedy, J.A. 2002. "Understanding Grape Berry Development." *Practical Winery and Vineyard*, no. August, 1–5.
- Kennedy J.A. 2008. "Grape and Wine Phenolics: Observations and Recent Findings" 35 (April): 107–20.
- Khaliq, A.; Comba, L.; Biglia, A.; Ricauda-Aimonino, D.; Chiaberge, M. and Gay, P. 2019. "Comparison of Satellite and UAV-Based Multispectral Imagery for Vineyard Variability Assessment." *Remote Sensing* 11 (4). <https://doi.org/10.3390/rs11040436>.

- Kontoudakis, N.; Esteruelas, M.; Fort, F.; Canals, J.M.; De Freitas, V. and Zamora, F. 2011. "Influence of the Heterogeneity of Grape Phenolic Maturity on Wine Composition and Quality." *Food Chemistry* 124 (3): 767–74. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.06.093>.
- Kurtural, S.K. and Gambetta, G.A. 2021. "Global Warming and Wine Quality: Are We Close to the Tipping Point?" *Oeno One* 55 (3): 353–61. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2021.55.3.4774>.
- Kyraleou, M.; Koundouras, S.; Kallithraka, S.; Theodorou, N.; Proxenia, N. and Kotseridis, Y. 2016. "Effect of Irrigation Regime on Anthocyanin Content and Antioxidant Activity of *Vitis Vinifera* L. Cv. Syrah Grapes under Semiarid Conditions." *Journal of the Science of Food and Agriculture* 96 (3): 988–96. <https://doi.org/10.1002/jsfa.7175>.
- Lamb, D.W., Weedon, M.M. and Bramley, R.G.V. 2004. "Using Remote Sensing to Predict Grape Phenolics and Colour at Harvest in a Cabernet Sauvignon Vineyard: Timing Observations against Vine Phenology and Optimising Image Resolution." *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 46–54.
- Laroche-Pinel, E., Sylvie, D., Costard, A.D.; Rousseau, J.; Hourdel, J.; Vidal-Vignerot, M.; Cheret, V. and Clenet, H. 2021. "Monitoring Vineyard Water Status Using Sentinel-2 Images: Qualitative Survey on Five Wine Estates in the South of France." *Oeno One* 55 (4): 115–27. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2021.55.4.4752>.
- Leeuwen, C.V. 2010. "9. Terroir: The Effect of the Physical Environment on Vine Growth, Grape Ripening and Wine Sensory Attributes." In *Managing Wine Quality: Viticulture and Wine Quality*, edited by Andrew G. Reynolds, 273–315. Woodhead Publishing Limited. <https://doi.org/10.1533/9781845699284.3.273>.

- Leeuwen, C.V.; Destrac-Irvine, A.; Dubernet, M.; Duchêne, E.; Gowdy, M.; Marguerit, E.; Pieri, P.; Parker, A.; De Rességuier, L. and Ollat, N. 2019. "An Update on the Impact of Climate Change in Viticulture and Potential Adaptations." *Agronomy* 9 (9): 1–20. <https://doi.org/10.3390/agronomy9090514>.
- Leeuwen, C.V., Friant, P.; Choné, X.; Tregoat, O.; Koundouras, S. and Dubourdieu, D. 2004. "Influence of Climate, Soil, and Cultivar on Terroir." *American Journal of Enology and Viticulture* 55 (3): 207–17.
- Leeuwen, C.V. and Seguin, G. 2006. "The Concept of Terroir in Viticulture." *Journal of Wine Research* 17 (1): 1–10. <https://doi.org/10.1080/09571260600633135>.
- Lewis, M.J. and Bamforth, Ch.W. 2006. "PH." In *Essays in Brewing Science*, 13–19. Springer, Boston, MA. [https://doi.org/https://doi.org/10.1007/0-387-33011-9\\_2](https://doi.org/https://doi.org/10.1007/0-387-33011-9_2).
- Lima, L.J. 2015. "Estudio De Caracterización De La Cadena De Producción Y Comercialización De La Agroindustria Vitivinícola: Estructura, Agentes Y Prácticas." *Oficina de Estudios y Políticas Agrarias. Ministerio de Agricultura*, 208.
- Liu, Y.; Yang, P.; Yuan, Ch.; Wang, H.; Han, F.; Liu, Y. and Wang, L. 2018. "Stability of Anthocyanins and Their Degradation Products from Cabernet Sauvignon Red Wine under Gastrointestinal PH and Temperature Conditions." *Molecules* 23 (2). <https://doi.org/10.3390/molecules23020354>.
- Llorens, J.; Gil, E.; Llop, J. and Escolà, A. 2010. "Variable Rate Dosing in Precision Viticulture: Use of Electronic Devices to Improve Application Efficiency." *Crop Protection* 29 (3): 239–48. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2009.12.022>.

- Lobell, D.B., Field, Ch.B.; Cahill, K.N. and Bonfils, C. 2006. "Impacts of Future Climate Change on California Perennial Crop Yields: Model Projections with Climate and Crop Uncertainties." *Agricultural and Forest Meteorology* 141 (2–4): 208–18. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.10.006>.
- López, N., Puértolas, E.; Condón, S.; Álvarez, I. and Raso, J. 2008. "Application of Pulsed Electric Fields for Improving the Maceration Process during Vinification of Red Wine: Influence of Grape Variety." *European Food Research and Technology* 227 (4): 1099–1107. <https://doi.org/10.1007/s00217-008-0825-y>.
- Lukić, I.; Radeka, S.; Budić-Leto, I.; Bubola, M. and Vrhovsek, U. 2019. "Targeted UPLC-QqQ-MS/MS Profiling of Phenolic Compounds for Differentiation of Monovarietal Wines and Corroboration of Particular Varietal Typicity Concepts." *Food Chemistry* 300 (June). <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125251>.
- Mahlein, A.K.; Kuska, M.T.; Thomas, S.; Wahabzada, M.; Behmann, J.; Rascher, U. and Kersting, K. 2019. "Quantitative and Qualitative Phenotyping of Disease Resistance of Crops by Hyperspectral Sensors: Seamless Interlocking of Phytopathology, Sensors, and Machine Learning Is Needed!" *Current Opinion in Plant Biology* 50:156–62. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2019.06.007>.
- Malheiro, A.C.; Santos, J.A.; Fraga, H. and Pinto, J.G. 2010. "Climate Change Scenarios Applied to Viticultural Zoning in Europe." *Climate Research* 43 (3): 163–77. <https://doi.org/10.3354/cr00918>.
- Martínez de Toda, F. 2011. *Claves de La Viticultura de Calidad. Nuevas Técnicas de Estimación y Control de La Calidad de La Uva En El Viñedo*. Edited by Mundiprensa. 2°.



- Martínez-Casasnovas, J.A., Agelet, J.; Arnó, J.; Bordes, X. and Ramos, M.C. 2010. "Protocolo Para La Zonificación Intraparcelaria de La Viña Para Vendimia Selectiva a Partir de Imágenes Multiespectrales." *Revista de Teledetección*, 47–52.
- Martínez-Casasnovas, J.A., Agelet-Fernández, J.; Arno, J. and Ramos, M.C. 2012a. "Análisis de Zonas de Manejo Diferencial En Viñedo y Relación Con El Desarrollo de La Viña, Madurez y Calidad de La Uva." *Spanish Journal of Agricultural Research* 10 (2): 326–37. <https://doi.org/10.5424/sjar/2012102-370-11>.
- Martínez-Casasnovas, J.A.; and Sánchez-Bosch, I. 2000. "Impact Assessment of Changes in Land Use/Conservation Practices on Soil Erosion in the Penedes-Anoia Vineyard Region (NE Spain)." *Soil and Tillage Research* 57 (1–2): 101–6. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(00\)00142-2](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(00)00142-2).
- Martínez-Gil, A.M., Gutiérrez-Gamboa, G.; Garde-Cerdán, T.; Pérez-Álvarez, E.P. and Moreno-Simunovic, Y. 2018. "Characterization of Phenolic Composition in Carignan Noir Grapes (*Vitis Vinifera* L.) from Six Wine-Growing Sites in Maule Valley, Chile." *Journal of the Science of Food and Agriculture* 98 (1): 274–82. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8468>.
- Mashalaba, L.; Galleguillos, M.; Seguel, O. and Poblete-Olivares, J. 2020. "Predicting Spatial Variability of Selected Soil Properties Using Digital Soil Mapping in a Rainfed Vineyard of Central Chile." *Geoderma Regional* 22:e00289. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00289>.
- Matese, A.; and Filippo Di Gennaro, S. 2015. "Technology in Precision Viticulture: A State-of-the-Art Review." *International Journal of Wine Research* 7 (1): 69–81. <https://doi.org/10.2147/IJWR.S69405>.
- Matese, A., Toscano, P.; Filippo Di Gennaro, S.; Genesio, L.; Vaccari, F.P.; Primicerio, J.; Belli, C.; Zaldei, A.; Bianconi, R. and Gioli, B. 2015.

- “Intercomparison of UAV, Aircraft and Satellite Remote Sensing Platforms for Precision Viticulture.” *Remote Sensing* 7 (3): 2971–90. <https://doi.org/10.3390/rs70302971>.
- Maturana, J.; Bello, M. and Manley, M. 2004. “Antecedentes Históricos y Descripción Del Fenómeno El Niño, Oscilación Del Sur.” *El Niño y La Niña 1997 - 2000. Sus Efectos En Chile*, 13–27.
- Mello, R. and Caione, G. 2012. “Soil Fertility - Plant Analysis.” In *IntechOpen*, edited by Roland Nuhu Issaka, 13. <https://doi.org/10.5772/55414>.
- Merkyte, V.; Longo, E.; Windisch, G. and Boselli, E. 2020. *Phenolic Compounds as Markers of Wine Quality and Authenticity. Foods*. Vol. 9. <https://doi.org/10.3390/foods9121785>.
- Mira de Orduña, R. 2010. “Climate Change Associated Effects on Grape and Wine Quality and Production.” *Food Research International* 43 (7): 1844–55. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.05.001>.
- Mirás-Avalos, J.M.; Cancela, J.J.; Fandiño, M.; Rey, B.J. and Dafonte, J. 2020. “Zoning of a Newly-Planted Vineyard: Spatial Variability of Physico-Chemical Soil Properties.” *Soil Systems* 4 (4): 1–17. <https://doi.org/10.3390/soilsystems4040062>.
- Mora, G.M. 2019. “The Palgrave Handbook of Wine Industry Economics.” In *The Palgrave Handbook of Wine Industry Economics*, 177–200. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-98633-3>.
- Morales, L.; Canessa, F.; Mattar, C.; Orrego, R. and Matus, F. 2006. “Caracterización Y Zonificación Edáfica Y Climática De La Región De Coquimbo, Chile.” *Revista de La Ciencia Del Suelo y Nutrición Vegetal* 6 (3): 52–74. <https://doi.org/10.4067/S0718-27912006000300005>.

- Moreno del Valle Fernández, M.; Peña García-Pardo, I. and Sánchez de Pablo González del Campo, J.D. 2011. "Factors of Competitiveness in the Wine Industry: An Analysis of Innovation Strategy." *World Academy of Science, Engineering and Technology* 78 (6): 503–13. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1076181>.
- Mori, K.; Goto-yamamoto, N.; Kitayama, M. and Hashizume, K. 2007. "Loss of Anthocyanins in Red-Wine Grape under High Temperature" 58 (8): 1935–45. <https://doi.org/10.1093/jxb/erm055>.
- Mozell, M.R. and Thachn, L. 2014. "The Impact of Climate Change on the Global Wine Industry: Challenges & Solutions." *Wine Economics and Policy* 3 (2): 81–89. <https://doi.org/10.1016/j.wep.2014.08.001>.
- Mulinacci, N.; Santamaria, A.R.; Giaccherini, C.; Innocenti, M.; Valletta, A.; Ciolfi, G. and Pasqua, G. 2008. "Anthocyanins and Flavan-3-Ols from Grapes and Wines of *Vitis Vinifera* Cv. Cesanese d’Affile." *Natural Product Research* 22 (12): 1033–39. <https://doi.org/10.1080/14786410802133845>.
- Müller, K. 2004. "Chile Vitivinícola En Pocas Palabras." *Revista de Enología*, no. 52.
- Nadal, M. and Lampreave, M. 2004. "The Effects of Irrigation on the Water Relations of the Grapevine , Yield , Grape and Wine Composition of Tempranillo Cv in Mediterranea." *Journal International Des Sciences de La Vigne et Du Vin* 38:75–80. <https://doi.org/https://doi.org/10.20870/oeno-one.2004.38.1.938>.
- Nikfardjam, M.S.P.; Márk, L.; Avar, P.; Figler, M. and Ohmacht, R. 2006. "Polyphenols, Anthocyanins, and Trans-Resveratrol in Red Wines from the Hungarian Villány Region." *Food Chemistry* 98 (3): 453–62. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.06.014>.

- ODEPA. 2021. "Boletín Del Vino." *Boletín Del Vino: Producción, Precios y Comercio Exterior Avance a Junio 2021*, 37.
- OIV. 2021. *Compendium of International Methods of Wine and Must Analysis International Organisation of Vine and Wine. International Organisation of Vine and Wine. Vol. 2.*
- (OIV), International Organisation of Vine and Wine. 2022. "International Organisation of Vine and Wine (OIV)." *International Regulatory Co-Operation*, no. April, 168–69. <https://doi.org/10.1787/9789264244047-44-en>.
- Olsen, J.L.; Olesen, A.; Breuning-Madsen, H. and Balstrom, T. 2011. "A Method to Identify Potential Cold-Climate Vine Growing Sites - a Case Study from Røsnæs in Denmark." *Geografisk Tidsskrift* 111 (1): 73–84. <https://doi.org/10.1080/00167223.2011.10669523>.
- Palliotti, A.; Tombesi, S.; Silvestroni, O.; Lanari, V.; Gatti, M. and Poni, S. 2014. "Changes in Vineyard Establishment and Canopy Management Urged by Earlier Climate-Related Grape Ripening: A Review." *Scientia Horticulturae* 178:43–54. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.07.039>.
- Pantaleoni-Reluy, N.; Baghdadi, N.; Simonneau, T.; Bazzi, H.; El Hajj, M.; Pret, V.; Amin, G. and Daret, E. 2022. "Can We Detect the Damage of a Heatwave on Vineyards Using Sentinel-2 Optical Remote Sensing Data?" *OENO One* 56 (1): 145–59. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2022.56.1.4632>.
- Pardo, J.A. 2016. "Seguimiento Fenológico Del Cultivo de Uva Isabela (Vitis Sp) En Fusagasuga Cundinamarca." Universidad de Cundinamarca.
- Pastonchi, L.; Filippo Di Gennaro, S.; Toscano, P. and Matese, A. 2020. "Comparison between Satellite and Ground Data with UAV-Based

- Information to Analyse Vineyard Spatio-Temporal Variability." *Oeno One* 54 (4): 919–34. <https://doi.org/10.20870/OENO-ONE.2020.54.4.4028>.
- Peña, A. 2005. "Factores Que Regulan El Color En Uvas Tintas". Publicaciones científicas y de extensión. Grupo de Investigación Enológica, Universidad de Chile. Pages 12–14.
- Pérez-Quezada, J. 2006. "Viticultura de Precisión Aplicada Al Viñedo." *Revista Enología N°2. Facultad de Ciencias Agronómicas Universidad de Chile*, 1–3.
- Picariello, L.; Rinaldi, A.; Forino, M.; Petracca, F.; Moio, L. and Gambuti, A. 2019. "Modification of the Organic Acid Profile of Grapes Due to Climate Changes Alters the Stability of Red Wine Phenolics during Controlled Oxidation." *Vitis - Journal of Grapevine Research* 58 (127): 127–33. <https://doi.org/10.5073/vitis.2019.58.special-issue.127-133>.
- Piccardo, D., Favre, G.; Pascual, O.; Canals, J.M.; Zamora, F. and Gonzalez-Neves, G. 2019. "Evaluación de La Composición y Calidad Del Color de Vinos Tintos Tannat Elaborados Por Maceración Pre-Fermentativa En Caliente." *41st World Congress OfVine and Wine* 02006. <https://doi.org/https://doi.org/10.1051/bioconf/20191202006>.
- Posom, J.; Soonnamtiang, N.; Kotethum, P.; Konjun, P.; Sirisomboon, P.; Saengprachatanarug, K. and Wongpichet, S. 2020. "Two Different Portables Visible-near Infrared and Shortwave Infrared Region for on-Tree Measurement of Soluble Solid Content of Marian Plum Fruit." *Engineering Journal* 24 (5): 227–36. <https://doi.org/10.4186/ej.2020.24.5.227>.
- Poudel, P.R.; Mochioka, R.; Beppu, K. and Kataoka, I. 2009. "Influence of Temperature on Berry Composition of Interspecific Hybrid Wine Grape

'Kadainou R-1' (Vitis Ficifolia Var. Ganebu × V. Vinifera 'Muscat of Alexandria')." *J. Japan. Soc. Hort. Sci* 78 (2): 169–74. [www.jstage.jst.go.jp/browse/jjshs1](http://www.jstage.jst.go.jp/browse/jjshs1).

Pringle, M.J.; McBratney, A.B.; Whelan, B.M. and Taylor, J.A. 2003. "A Preliminary Approach to Assessing the Opportunity for Site-Specific Crop Management in a Field, Using Yield Monitor Data." *Agricultural Systems* 76 (1): 273–92. [https://doi.org/10.1016/S0308-521X\(02\)00005-7](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(02)00005-7).

Priori, S.; Pellegrini, S.; Perria, R.; Puccioni, S.; Storchi, P.; Valboa, G. and Costantini, E.A.C. 2019. "Scale Effect of Terroir under Three Contrasting Vintages in the Chianti Classico Area (Tuscany, Italy)." *Geoderma* 334 (July 2018): 99–112. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.048>.

Programa Territorial Integrado, Vinos de Chile 2010. 2010. "Monitoreo de Madurez." *Centro Tecnológico de La Vid y El Vino*.

Rendulic-Jelusic, I.; Sakic-Bobic, B.; Grgic, Z.; Zikovic, S.; Osrecak, M.; Puhelek, I.; Anic, M. and Karoglan, M. 2022. "Grape Quality Zoning and Selective Harvesting in Small—To Adopt or Not to Adopt." *Agriculture*. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/agriculture12060852>.

Reynolds, A.G. and Rezaei, J.H. 2014. "Spatial Variability in Ontario Cabernet Franc Vineyards III. Relationships among Berry Composition Variables and Soil and Vine Water Status." *Journal of Applied Horticulture* 16 (3): 167–92. <https://doi.org/10.37855/jah.2014.v16i03.30>.

Ribereau-Gayon, P.; Glories, Y.; Maujean, A.; Dubourdieu, D. 2006. *Handbook of Enology. Vol 2. The Chemistry of Wine Stabilization and Treatments*. 2nd ed. John Wiley and Sons

Romero, M.; Luo, Y.; Su, B. and Fuentes, S. 2018. "Vineyard Water Status Estimation Using Multispectral Imagery from an UAV Platform and

- Machine Learning Algorithms for Irrigation Scheduling Management." *Computers and Electronics in Agriculture* 147 (January): 109–17. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.02.013>.
- Rouse, J.W. Haas, R.H; Schell, J.A. and Deering, D.W. 1973. "Monitoring Vegetation Systems In The Great Plains With Ert's." *NASA SP-351* 24 (1): 24–26. <https://doi.org/10.1021/jf60203a024>.
- Ruiz, V.S. 2017. "Evolución Climática y Previsiones Para El Sector Vitivinícola. Adaptación Del Viñedo." *Próximos Retos de La Viticultura*, 9–20.
- SAG, División Protección Agrícola y Forestal; Subdepartamento de Viñas Vinos y Bebidas Alcohólicas. 2021. "Informe Final - Producción de Vinos 2021." *Informe Final, Producción de Vinos 2021*.
- Santesteban, L.G., Guillaume, S.; Royo, J.B. and Tisseyre, B. 2011. "Are Precision Agriculture Tools and Methods Relevant at the Whole-Vineyard Scale?" *Precision Agriculture 2011 - Papers Presented at the 8th European Conference on Precision Agriculture 2011, ECPA 2011*, 302–11.
- Santos, J. A.; Grätsch, S. D.; Karremann, M. K.; Jones, G.V. and Pinto, J.G. 2013. "Ensemble Projections for Wine Production in the Douro Valley of Portugal." *Climatic Change* 117 (1–2): 211–25. <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0538-x>.
- Sassu, A.; Gambella, F.; Ghiani, L.; Mercenaro, L.; Caria, M. and Pazzona, A.L. 2021. "Advances in Unmanned Aerial System Remote Sensing for Precision Viticulture." *Sensors, MDPI*. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/s21030956>.
- Schultz, H.R. and Stoll, M. 2015. "Some Critical Issues in Environmental Physiology of Grapevines: Future Challenges and Current Limitations."

*Environmentally Sustainable Viticulture: Practices and Practicality*, 209–58. <https://doi.org/10.1201/b18226>.

Schultz, H.R. 2000. "Climate Change and Viticulture: A European Perspective on Climatology, Carbon Dioxide and UV-B Effects." *Australian Journal of Grape and Wine Research* 6 (1): 2–12. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2000.tb00156.x>.

Schultz, H.R. and Jones, G.V. 2010. "Climate Induced Historic and Future Changes in Viticulture." *Journal of Wine Research* 21 (2): 137–45. <https://doi.org/10.1080/09571264.2010.530098>.

Serrano, L.; González-Flor, C. and Gorchs, Gil. 2012. "Assessment of Grape Yield and Composition Using the Reflectance Based Water Index in Mediterranean Rainfed Vineyards." *Remote Sensing of Environment* 118:249–58. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.021>.

Sinaga, K.P. and Shen Yang, M. 2020. "Unsupervised K-Means Clustering Algorithm." *IEEE Access* 8:80716–27. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2988796>.

Sotomayor, J.P. 1984. "Determinación de Madurez En Uvas Para Vinificar," 22–26. *Revista Ipa, Quilamapu* N°22, Biblioteca Inia.

Sotomayor, J.P and Ruiz, C. 2000. "Establecimiento y Manejo de Vides En El Secano Interior Centro Sur de Chile." *Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Centro Regional de Investigación Quilamapu*.

Sozzi, M., Kayad, A.; Marinello, F.; Taylor, J.A. and Tisseyre, B. 2020. "Comparing Vineyard Imagery Acquired from Sentinel-2 and Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Platform." *Oeno One* 54 (2): 189–97. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2020.54.2.2557>.



- Sun, L., Gao, F.; Anderson, M.C.; Kustas, W.P.; Alsina, M.M.; Sanchez, L.; Sams, B. et al. 2017. "Daily Mapping of 30 m LAI and NDVI for Grape Yield Prediction in California Vineyards." *Remote Sensing* 9 (4): 1–18. <https://doi.org/10.3390/rs9040317>.
- Sweetman, C.; Sadras, V.O.; Hancock, R.D.; Soole, K. L. and Ford, C.M. 2014. "Metabolic Effects of Elevated Temperature on Organic Acid Degradation in Ripening *Vitis Vinifera* Fruit." *Journal of Experimental Botany* 65 (20): 5975–88. <https://doi.org/10.1093/jxb/eru343>.
- Tardaguila, J., Stoll, M.; Gutiérrez, S.; Proffitt, T. and Diago, M.P. 2021. "Smart Applications and Digital Technologies in Viticulture: A Review." *Smart Agricultural Technology* 1 (July): 100005. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2021.100005>.
- Taylor, J.; Tisseyre, B.; Bramley, R. and Reid, A. 2005. "A Comparison of the Spatial Variability of Vineyard Yield in European and Australian Production Systems." *Precision Agriculture 2005, ECPA 2005*, no. October 2015, 907–14.
- Teixeira, A.; Eiras-Dias, J.; Castellarin, S.D.; and Gerós, H. 2013. "Berry Phenolics of Grapevine under Challenging Environments." *International Journal of Molecular Sciences* 14 (9): 18711–39. <https://doi.org/10.3390/ijms140918711>.
- Theodorou, N.; Nikolaou, N.; Zioziou, E.; Kyraleou, M.; Kallithraka, S.; Kotseridis, Y. and Koundouras, S. 2019. "Anthocyanin Content and Composition in Four Red Winegrape Cultivars (*Vitis Vinifera* L.) under Variable Irrigation." *Oeno One* 53 (1): 39–51. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2019.53.1.2366>.
- Tisseyre, B.; Ojeda, H. and Taylor, J. 2007. "New Technologies and Methodologies for Site-Specific Viticulture." *Journal International Des*

*Sciences de La Vigne et Du Vin* 41 (2): 63–76.  
<https://doi.org/10.20870/oeno-one.2007.41.2.852>.

Tonietto, J. and Carbonneau, A. 2004. "A Multicriteria Climatic Classification System for Grape-Growing Regions Worldwide." *Agricultural and Forest Meteorology* 124 (1–2): 81–97.  
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2003.06.001>.

Trought, M.C.T., Dixon, R.; Mills, T.; Greven, M.; Agnew, R.; Mauk, J. L. and Praat, J.P. 2008. "The Impact of Differences in Soil Texture within a Vineyard on Vine Vigour, Vine Earliness and Juice Composition." *Journal International Des Sciences de La Vigne et Du Vin* 42 (2): 62–72.  
<https://doi.org/10.20870/oeno-one.2008.42.2.828>.

Tsioukas, V.; Soubry, I. and Patias, P. 2017. "Monitoring Vineyards with UAV and Multi-Sensors for the Assessment of Water Stress and Grape Maturity." *Journal of Unmanned Vehicle Systems* 5:1–16.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1139/juvs-2016-0024>.

Ubalde, J.; Sort, X.; Zayas, A. and Poch, R. 2010. "Effects of Soil and Climatic Conditions on Grape Ripening and Wine Quality of Cabernet Sauvignon." *Journal of Wine Research* 21 (1): 1–17.  
<https://doi.org/10.1080/09571264.2010.495851>.

Uribe, H. and Catalan, A. 2016. "Caracterización Hidroclimatológica y Del Uso de Suelo Del Secano de La Región de O'higgins." *Boletín Inia N°320* 1:49–81.

Urretavizcaya, I.; Santesteban, L.G.; Tisseyre, B.; Guillaume, S.; Miranda, C. and Royo, J.B. 2013. "Oenological Significance of Vineyard Management Zones Delineated Using Early Grape Sampling (Precision Agric, 10.1007/S11119-013-9328-3)." *Precision Agriculture* 15 (1): 130–31. <https://doi.org/10.1007/s11119-013-9328-3>.

- Valle, G.; Gonzalez, A.; Baez, R. Del. 2005. "Antocianinas En Uva (*Vitis Vinifera* L.) y Su Relación Con El Color." *Revista Fitotecnia Mexicana* 28 (4): 359–68.
- Vélez, S., Rubio, J.A.; Andrés, M.I. and Barajas, E. 2019. "Agronomic Classification between Vineyards ('Verdejo') Using NDVI and Sentinel-2 and Evaluation of Their Wines." *Vitis - Journal of Grapevine Research* 58 (33): 33–38. <https://doi.org/10.5073/vitis.2019.58.special-issue.33-38>.
- Vidal, S.; Francis, L.; Noble, A.; Kwiatkowski, M.; Cheynier, V. and Waters, E. 2004. "Taste and Mouth-Feel Properties of Different Types of Tannin-like Polyphenolic Compounds and Anthocyanins in Wine." *Analytica Chimica Acta* 513 (1): 57–65. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2003.10.017>.
- Volschenk, C.G. and Hunter, J.J. 2001. "Effect of Seasonal Canopy Management on the Performance of Chenin Blanc/99 Richter Grapevines." *South African Journal of Enology & Viticulture* 22 (1): 2–7. <https://doi.org/10.21548/22-1-2165>.
- Wang, L.; Hunt, E.R.; Qu, J.J.; Hao, X. and Daughtry, C.S.T. 2013. "Remote Sensing of Fuel Moisture Content from Ratios of Narrow-Band Vegetation Water and Dry-Matter Indices." *Remote Sensing of Environment* 129:103–10. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.10.027>.
- Wang, L.; Qu, J.J.; Hao, X. and Hunt, E.R. 2011. "Estimating Dry Matter Content from Spectral Reflectance for Green Leaves of Different Species." *International Journal of Remote Sensing* 32 (22): 7097–7109. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.494641>.

- Weiss, M.; Jacob, F. and Duveiller, G. 2020. "Remote Sensing for Agricultural Applications: A Meta-Review." *Remote Sensing of Environment* 236 (December 2018): 111402. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111402>.
- White, R.E. 2015. *Understanding Vineyard Soils*. Oxford University.
- Wrolstad, R.E.; Durst, R.W and Lee, J. 2005. "Tracking Color and Pigment Changes in Anthocyanin Products." *Trends in Food Science and Technology* 16 (9): 423–28. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2005.03.019>.
- Xue, J. and Su, B. 2017. "Significant Remote Sensing Vegetation Indices: A Review of Developments and Applications." *Journal of Sensors* 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/1353691>.
- Yuste, J. 2013. "Viticultura de Precisión: Introducción y Objetivos." *Viticultura de Precisión. VIII Encuentro Técnico, Madrid. Fundación Para La Cultura Del Vino*, 15–25.
- Yuste, J. 2017. "Estrategias Vitícolas Frente al Cambio Climático: Influencia En La Maduración Tecnológica y Fenólica, En El Aroma y La Composición Nitrogenada de La Uva." *Próximos Retos de La Viticultura. Fundación Para La Cultura Del Vino*. 2000 (2005): 29–41. [https://www.culturadelvino.org/fcv/wp-content/uploads/pdf/encuentros/encuentro\\_2017.pdf](https://www.culturadelvino.org/fcv/wp-content/uploads/pdf/encuentros/encuentro_2017.pdf).
- Zarrouk, O.; Francisco, R.; Pinto-Marijuan, M.; Brossa, R.; Santos, R.R; Pinheiro, C.; Costa, J.M.; López, C. and Chaves, M.M. 2012. "Impact of Irrigation Regime on Berry Development and Flavonoids Composition in Aragonez (Syn. Tempranillo) Grapevine." *Agricultural Water Management* 114:18–29. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.06.018>.
- Zbarsky, V.; Datla, K.P.; Parkar, Sh.; Rai, D.K.; Aruoma, O.I. and Dexter, D.T. 2005. "Neuroprotective Properties of the Natural Phenolic

Antioxidants Curcumin and Naringenin but Not Quercetin and Fisetin in a 6-OHDA Model of Parkinson's Disease." *Free Radical Research* 39 (10): 1119–25. <https://doi.org/10.1080/10715760500233113>.

Zhu, J.; Fraysse, R.; Trought, M.C.T.; Raw, V.; Yang, L.; Greven, M.; Martin, D. and Agnew, R. 2020. "Quantifying the Seasonal Variations in Grapevine Yield Components Based on Pre- And Post-Flowering Weather Conditions." *Oeno One* 54 (2): 213–30. <https://doi.org/10.20870/oenone.2020.54.2.2926>.

Zoecklein, B.W., Fugelsang, K.C.; Gump, B.H. and Nury, F.S. 2013. "Phenolic Compounds and Wine Color." In *Wine Analysis and Production*, 1st ed., 115–51. [https://doi.org/10.1007/978-1-4757-6978-4\\_7](https://doi.org/10.1007/978-1-4757-6978-4_7).