

Introducción a la Agricultura de Precisión 4.0 en huertos de arándanos

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS

Boletín INIA / N° 457



Editores



Paula Vargas Q.

INIA Quilamapu



Stanley Best S.

INIA Quilamapu

Autores de capítulos

Paula Vargas Q. Ingeniera Agrónoma

Stanley Best S.Ingeniero Agrónomo, Ph.D.

Hernán Aguilera C. Ingeniero Agrónomo

Fabiola Flores P. Ingeniera Civil Agrícola, Dra.

Claudio Aliaga P. Ingeniero Agrícola

Valentina Alarcón P. Ingeniera Ambiental

Consultor técnico

Jaime Mejías B. Ingeniero Agrónomo, Ph.D.

Equipo ejecutor del Proyecto

Stanley Best S.Ingeniero Agrónomo, Ph.D.

Paula Vargas Q. Ingeniera Agrónoma

Hernán Aguilera C. Ingeniero Agrónomo

Fabiola Flores P. Ingeniera Civil Agrícola, Dra.

Claudio Aliaga P. Ingeniero Agrícola

Valentina Alarcón P. Ingeniera Ambiental



Liderando la agrociencia para un futuro sostenible

Introducción a la agricultura de precisión 4.0 en huertos de arándanos

Editores

Paula Vargas Q. y Stanley Best S.

Centro Regional de Investigación INIA Quilamapu



Editores

Paula Vargas Q.
Ingeniera Agrónoma
Investigadora INIA Quilamapu

Stanley Best S.
Ingeniero Agrónomo, Ph.D.
Investigador INIA Quilamapu

Director Regional INIA

Rodrigo Avilés Rodríguez

Boletín INIA N° 457.

Cita bibliográfica correcta

Vargas Q. Paula y Best S. Stanley (Eds.) 2021. "Introducción a la Agricultura de Precisión 4.0 en huertos de arándanos". Boletín INIA N° 457, 73 p. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Chillán, Chile.

ISSN: 0717- 4829

Este boletín fue editado por el Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional de Investigación INIA Quilamapu, Ministerio de Agricultura.

Permitida su reproducción total o parcial citando la fuente y editores.

Esta publicación se enmarcó en el proyecto "Estimación del rendimiento y la calidad de los huertos de arándanos (*Vaccinium corymbosum*) basado en herramientas de agricultura de precisión e IoT (Internet of Things) para la optimización de las variables de producción", iniciativa apoyada por la Fundación para la Innovación Agraria (FIA) y ejecutada por INIA Quilamapu.

Edición de textos

Rodrigo Vargas B.
Hugo Rodríguez A.

Diseño gráfico y diagramación

Ricardo González Toro.

Chillán, Chile, diciembre 2021.

Agradecimientos

Deseamos expresar nuestro sincero agradecimiento a las siguientes entidades, cada una de las cuales cumplió una función importante en la generación de la información que se entrega en este boletín INIA:

La Fundación para la Innovación Agraria, FIA, convocatoria nacional 2016 por creer en esta iniciativa de interés público y aprobar el financiamiento necesario para el desarrollo de esta investigación.

Al equipo de Hortifrut, dirigido por Denise Donnay A., que participaron activamente en este proyecto, permitiendo llevar a un buen término del mismo y contar con los resultados que se presentan en este Boletín.

A los estudiantes en práctica provenientes de distintas casas de estudio, donde destacamos la participación de Alejandra Henríquez y Viviana Estuardo.

De igual forma al equipo de profesionales del Programa de Agricultura de Precisión, PROGAP INIA, que fueron parte del proyecto activamente durante las actividades para cumplir con las metas y objetivos propuestos: Hernán Aguilera, Fabiola Flores, Claudio Aliaga, Daniela Grez, Valentina Alarcón y Javier Contreras.

Los editores



Índice

Prólogo	7
Introducción	9
Capítulo 1	11
Cambio climático: impulso a la introducción tecnológica	
1.1. Cambio climático en la agricultura	11
Capítulo 2	21
Variabilidad microclimática, espacial de características físicoquímicas del suelo y su efecto en la heterogeneidad a la respuesta productiva de los cultivos	
2.1. Etapas de una correcta introducción de la agricultura de Precisión	21
2.2. Sistemas de evaluación de la variabilidad espacial y temporal de predios y generación de ambientes productivos	22
2.2.1. Variabilidad espacial	23
2.2.2. Impacto del cambio climático sobre la variabilidad espacial de suelo	26
2.2.3. Medición de variabilidad espacial de características físico – químicas	27
2.2.4. Variabilidad temporal	30
2.2.5. Estabilidad histórica de índices vegetacionales obtenidos de información satelital	30
2.2.6. Modelos multivariados de segmentación	31
2.2.7. Impacto del clima en los ambientes productivos	32

Capítulo 3	35
Estimación de rendimiento y calidad	
3.1. Estimación de rendimiento	35
3.2. Evaluación de calidad de fruta	41
3.3. Prototipo óptico de captura (dron) para estimar rendimiento y evaluar el índice de madurez de las frutas	43
3.4. Caja de selección de frutos NIR para indicar calidad en arándanos	45
3.5. Software para clasificación del estado de madurez	50
Capítulo 4	55
Plataformas de gestión de información espacial y temporal	
4.1. Sistemas de logísticas de producción	55
4.2. Plataforma de gestión y visualización desarrollada	56
4.3. Sectorización y logística productiva	62
Capítulo 5	64
Nuevas líneas de innovación para la adaptación al cambio climático a través de una agricultura sustentable	
5.1. Sistemas de monitoreo no destructivo a través de óptica de espectrometría y tecnológica (OST- SMART) para el control y gestión de la variabilidad espacial de la producción y la calidad	64
Comentario final	68
Literatura consultada	70

Prólogo

Hoy en día existen muchas tecnologías incorporadas a la terminología de agricultura de precisión, como estaciones meteorológicas, sensores de humedad, espectrómetros para evaluar calidad, herramientas de teledetección, drones, etc. Muchas de estas aplicaciones ya están en el mercado con bajos precios, debido a la evolución constante de los avances de la tecnología que han producido reducción de costos asociado a la gran oferta electrónica y computacional. Sin embargo, el problema de penetración de estas tecnologías ha sido la falta de conexión con el conocimiento agronómico para la adopción por parte de los productores, que se traduzcan en una correcta apertura en el mercado y permitan una nueva infraestructura tecnológica con nuevos desafíos como la robótica, asociados a inteligencia artificial, generando un soporte para la expansión y sostenibilidad en el tiempo de nuevos procesos tecnológicos.

Esto, en una primera etapa requiere vincular a socios tecnológicos y profesionales que conozcan la realidad del campo, junto a las entidades gubernamentales que tengan la capacidad de ayudar a incorporar las herramientas de la agricultura 4.0 de forma consumible (fácil) y rentable para los técnicos y agricultores.

Se debe entender que la Agricultura 4.0 es el paso lógico en la transformación digital agrícola, donde se incorpora el equipamiento necesario para la adquisición de datos en toda la cadena agroalimentaria para, posteriormente, procesarlos y generar las respuestas que se requieren para la toma de decisiones. Este procesamiento y análisis de los datos incorporando computación en "cloud", junto con técnicas de analítica avanzada (Big data e Inteligencia artificial) permiten tomar decisiones en tiempo real. Esto posibilita hacer un uso más eficiente de los recursos, obtener alimentos más saludables y poder conocer y adaptar la producción a las nuevas tendencias de la demanda del mercado de forma casi inmediata (trazabilidad de producción), así como también la creación de resiliencia ante el cambio climático, todo lo anterior conectado a la correcta rentabilidad del productor.

En esta publicación hemos resumido los procesos más importantes de introducción de esta tecnología en el rubro de la producción de arándanos, con el objetivo de demostrar cómo el uso de estos avances ayuda a la rentabilidad de los productores mediante la utilización de nuevas tecnologías que potencie tanto el rendimiento como la calidad de los productos, en un formato fácil de utilizar e interpretar por los usuarios de campo, con respuesta eficiente y oportuna, y así procurar un negocio estable y duradero que mejore la competitividad del arándano a nivel nacional.

Paula Vargas Q.

Stanley Best S.

Introducción

La generación y transferencia de la tecnología son los motores del crecimiento económico moderno en la agricultura sustentable. Cada vez es más necesario apuntar a una agricultura sostenible y más productiva, que pueda satisfacer los desafíos de seguridad alimentaria local, regional y global del siglo XXI. La clave en este proceso es la tecnología como factor de producción, esto gracias a los cambios realizados en aspectos tales como la naturaleza de los bienes producidos, los mercados y la competencia internacional. Todo ello es consecuencia del incremento de la tecnología en los bienes y servicios derivados del conocimiento científico, conceptos avanzados de diseño, la inteligencia artificial, automatización, software, y descubrimientos biológicos, entre otros. Los puntos claves para acelerar el crecimiento son la innovación y desarrollo tecnológico como fuentes de crecimiento de la productividad y competitividad, a nivel empresarial y nacional.

La infraestructura agrícola e institucional difiere enormemente en el punto anterior, pero tienen en común el reto sustancial de interpretación y captura de datos oportunos, a partir de los manejos de sitios específicos asociados al uso de herramientas tecnológicas de analítica que permiten mejorar la calidad y los rendimientos de los cultivos, apuntado a la eficiencia y oportunidad en la toma de decisiones. El mayor desafío es implementar y desarrollar tecnologías habilitantes dentro del sector agrícola, tanto en ámbito local como internacional, mediante una infraestructura tecnológica de procesos y gestión de servicios avanzados (datos, computación y tecnología) de la información, que ofrezcan la oportunidad de aprovechar este conocimiento en nuevos formatos amigables para los usuarios finales, y así lograr sistemas agrícolas más sinérgicos y sostenibles a nivel nacional, aplicados a la productividad del cultivo y ambientalmente sustentables.

Dentro del mercado tecnológico se habla de tres puntos claves (adaptación, habilitación y desarrollo) como solución, y estos implican:

- Investigación
- Desarrollo tecnológico
- Aplicación e integración
- Perfeccionamiento

En respuesta a las necesidades tecnológicas en la agricultura actual, el Instituto de Investigaciones Agropecuarias, INIA, a través de su Centro Regional de Investigación Quilamapu en Chillán, crea Progap-INIA en el año 2002, dirigido por el ingeniero agrónomo, Ph.D. Stanley Best. Este programa fue creado con el propósito de orientar y enfocar los esfuerzos en el estudio y difusión de la Agricultura de Precisión.

Progap-INIA enfatiza el uso de información y tecnologías emergentes, para sintetizar y entregar herramientas de decisión tendientes a mejorar la rentabilidad del agricultor usuario. Estas actividades a menudo dependen de la interacción de distintos sistemas: sensores, tecnologías de la información y comunicación (TIC´s), procesamiento de imágenes, análisis y modelos matemáticos estadísticos, ingeniería mecánica, etc. La introducción de tecnologías de precisión dentro de las operaciones normales involucra costos adicionales. El resultado se expresa en la disminución de los costos de operación, aumento de la eficiencia, mejora de la calidad de los productos, y reducción del impacto medioambiental negativo.

Utilizando eficientemente la tecnología de la información, se pueden obtener ventajas competitivas, pero es necesario encontrar los procedimientos acertados para mantener tales ventajas.

En resumen, el Programa de Agricultura de Precisión de INIA promueve las mejoras de los procesos productivos, a través del uso de tecnologías emergentes, en una visión de reducción de la brecha tecnológica para cumplir con las exigencias internacionales y posicionar a las empresas a un nivel de competitividad igual o superior que los países desarrollados, aumentando el horizonte de competencia de la agricultura chilena.

Capítulo 1

Cambio climático: Impulso a la introducción tecnológica

Stanley Best S., Paula Vargas Q., Hernán Aguilera P.

1.1. Cambio climático en la agricultura

A lo largo de los últimos años se ha podido apreciar cómo la actividad humana se ha visto influenciada por la aceleración del cambio climático debido a la quema de combustibles fósiles, deforestación y cambios en el uso de suelo que aumentan la emisión de gases de efecto invernadero hacia la atmósfera, generando un incremento en la temperatura de la Tierra. Algunas de las consecuencias incluyen el derretimiento de glaciares, el aumento de las precipitaciones y de la frecuencia de eventos meteorológicos extremos, y modificaciones en las estaciones del clima. El ritmo acelerado del cambio climático, junto con el aumento de la población y de los ingresos a nivel mundial, amenazan la seguridad alimentaria en forma global. La agricultura es extremadamente vulnerable a estos cambios. Así se ha podido evaluar que el impacto del cambio climático, en cuanto al aumento de temperaturas (Figura 1.1.) y reducción de precipitaciones (Figura 1.2.) en los últimos años, ha sido relevante.

Lo expuesto tendrá un impacto relevante en la reducción de disponibilidad hídrica (agua acumulada en cordillera), la cual se está viendo cada año más disminuida (Figura 1.3.), teniendo un alto impacto en el riego en primavera - verano, acompañado de una mejora significativa de la eficiencia del riego en los sistemas productivos.

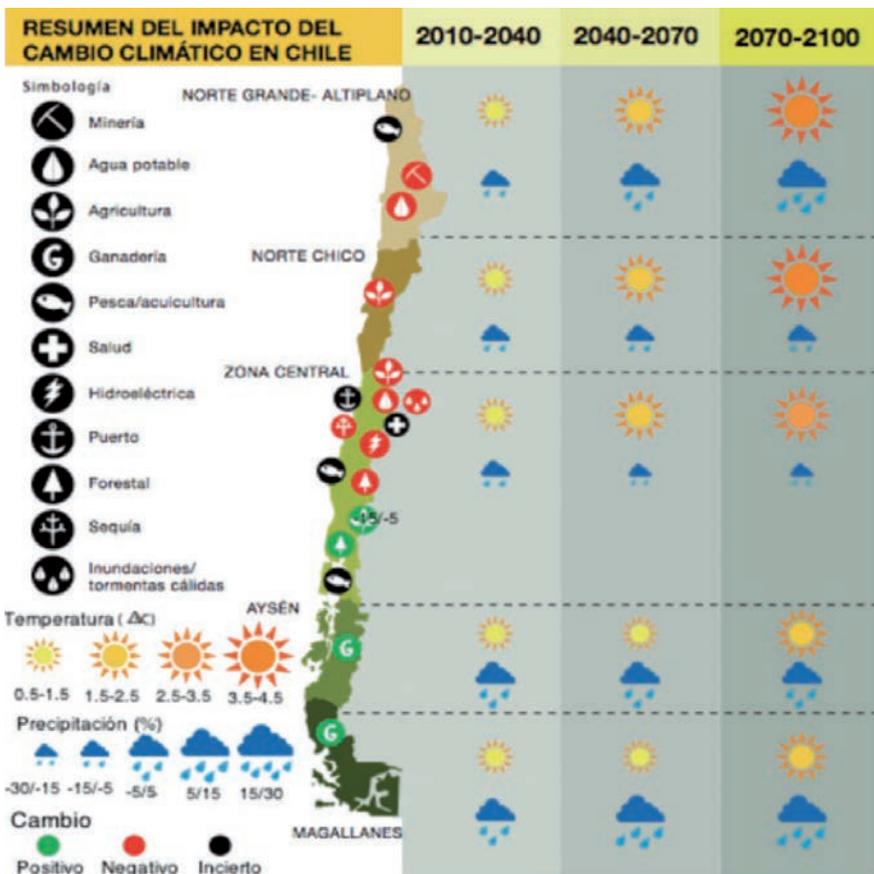


Figura 1.1. Resumen del impacto del cambio climático en Chile. (Fuente: CEPAL, 2012).

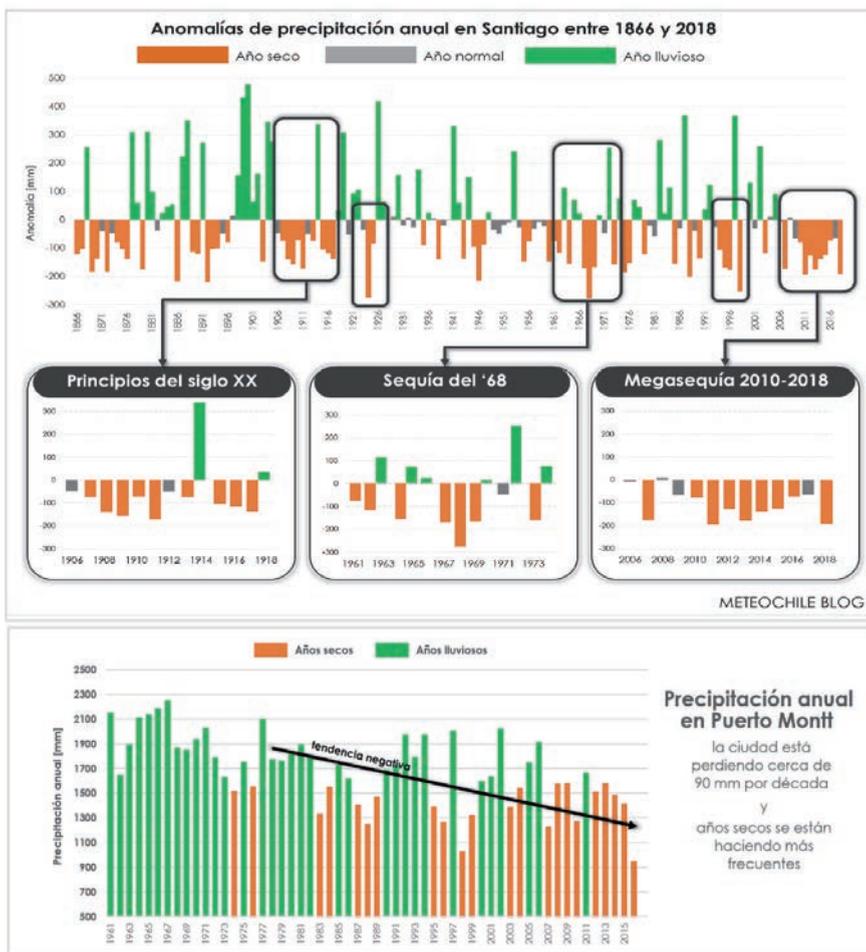


Figura 1.2. Anomalías de precipitaciones en Santiago (superior) y Puerto Montt (inferior). (Fuente: Cortés, C. 2020).

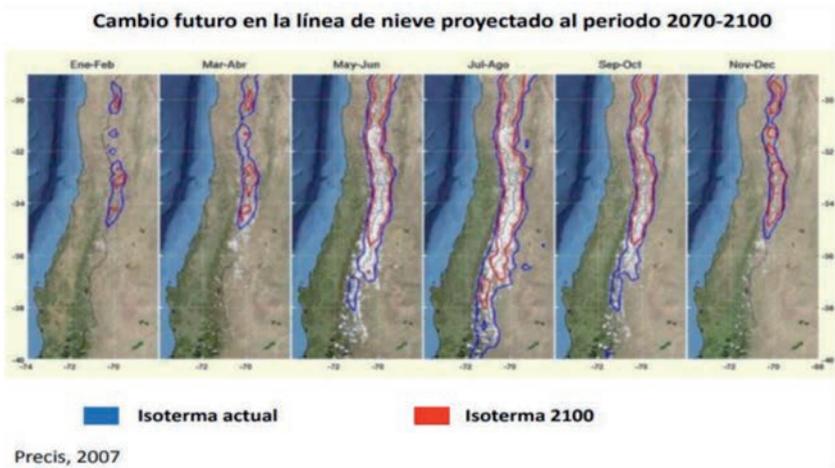


Figura 1.3. Situación actual y futura de la línea de nieve en la Cordillera de los Andes (Fuente: Central Energía. 2011).

Cabe destacar que todos los cultivos poseen un desarrollo fenológico asociado a etapas que están bastante bien establecidas en la mayoría de ellos (Figura 1.4.). Estas etapas están altamente afectadas (en magnitud) por cambios climáticos. Además, en periodos críticos, el impacto de carencia hídrica, nutricional o golpes térmicos, tienen un altísimo impacto en los resultados productivos y, por ende, de rentabilidad, factor cada día más común en el sector agrícola.

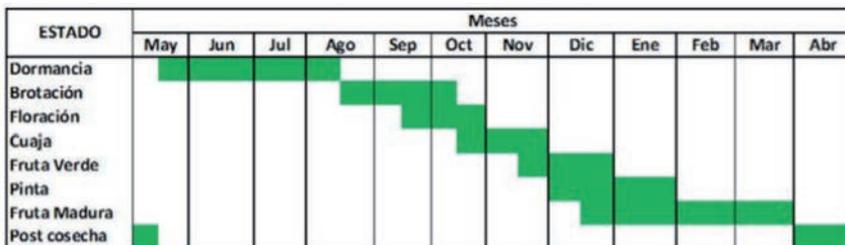


Figura 1.4. Diagrama referencial de estados fenológicos del arándano, zona sur de Chile. (Fuente: elaboración propia).

Sumado a lo anterior, el cambio climático asociado al aumento de las temperaturas, provoca la propagación de plagas y enfermedades, haciendo el control de estas más complejo y caro, y por ello con mermas importantes de rendimiento. El aumento de las temperaturas y el cambio en los regímenes pluviales (disminución) tendrán efectos directos sobre el rendimiento de los cultivos, así como efectos indirectos a través de los cambios en la disponibilidad de agua de riego, causando menores rendimientos producto del estrés hídrico en las plantas.

Por otra parte, el comportamiento de los mercados nacionales e internacionales, están provocando una alta presión en los sistemas productivos, que obligan a una urgente actualización tecnológica para poder mantener la rentabilidad del negocio agrícola. En conjunto a lo antes expuesto, los cultivos de exportación como el arándano, por su importancia estratégica deben mantenerse, aunque su estancamiento tecnológico ha frenado el aumento de productividad y calidad en los mismos, con una consiguiente reducción de la expansión de superficie plantada, factor explicado por la menor rentabilidad de estos.

Sobre la base de las condiciones restrictivas productivas asociadas al cambio climático, existe en Chile un déficit en la utilización de nuevas y mejores tecnologías en la agricultura nacional y regional, principalmente por desconocimiento, falta de capacitación y actores que presten este tipo de servicios con una relación precio y calidad aceptables para el productor, en cuanto a la visión de sus resultados potenciales que generen un ecosistema cooperativo comercial. Ello implica que no hay una transferencia práctica adecuada de estas tecnologías hacia los productores, lo que pone un freno al desarrollo de servicios tecnológicos asociados, que puedan abordar las brechas tecnológicas necesarias para reducir el impacto del cambio climático.

Para esto, es necesario contar con metodologías que puedan ser empleadas eficientemente en las áreas de producción. La organización e incorporación de toda la información predial en sistemas digitales, permite el posterior análisis de la misma; sin embargo, esta por sí sola no permite identificar la variabilidad espacial de calidades, rendimientos y factores productivos, si no se incorpora el aspecto espacial (geográfico) y temporal (evolución) de los mismos, siendo estos últimos los que realmente permiten sectorizar los problemas.

Basados en los avances computacionales y en instrumentación electrónica, se han desarrollado nuevas tecnologías en la agricultura, las cuales son aplicadas normalmente en países desarrollados (nuestros competidores). Dichos avances han dado paso a un término en el ambiente llamado Agricultura de Precisión. La agricultura tradicional, a diferencia de la agricultura de precisión, toma a los campos agrícolas como homogéneos y la aplicación de insumos no incluye la variabilidad espacial y temporal de la producción, como tampoco el análisis de las causas de esa variabilidad. Las ventajas de la agricultura de precisión sobre la tradicional son claras y contundentes, debido a la posibilidad de utilizar los insumos de manera cada vez más criteriosa con dosis adecuadas y de acuerdo a los requerimientos del cultivo en asociación a la condición de clima altamente variable. El manejo del ambiente permite la adecuada aplicación de insumos en las áreas necesarias y en donde la respuesta de esta intervención tiene un beneficio económico.

El concepto de agricultura de precisión supone el uso de tecnologías tales como sistemas de posicionamiento geográfico (GPS), sistemas de información geográficos (SIG), sistemas de análisis de información amigables, sensores electrónicos, controladores, entre otros, con los cuales los productores podrán crear un muy detallado plano de su operación productiva. La meta de la agricultura de precisión es el manejo espacial no uniforme de los predios, con el fin de reducir el uso de inputs productivos y mejorar la productividad predial en forma ambientalmente limpia. Así, la subdivisión de los predios no debe ser como tradicionalmente ocurre (por potreros o bloques), sino en zonas que presenten condiciones similares de producción (zonas de manejo homogéneas), transformándose esto, en una prioridad en la carrera de la maximización de la eficiencia de los recursos y competitividad de nuestra agricultura, ajustándose al cambio climático de una forma sostenible y amigable con el medio ambiente.

De lo antes expuesto, se ve que en la tecnología actual, si bien se ha alcanzado lo requerido para definir la variabilidad productiva de un predio, los sistemas que permiten la captura de datos y los de gestión de la información para facilitar su entendimiento y aplicación no existen en un nivel apropiado. Pero, por otra parte, el monitoreo en tiempo real, capacidades de sistematización, analíticas y técnicas de visualización de información, ofrecen la oportunidad de mejorar los flujos de información y la autonomía de las empresas dentro de la cadena de suministro, proporcionando herramientas para monitorear y responder a las exigencias del mercado y también a reducir el impacto del cambio climático. La rentabilidad es una preocupación clave para los

participantes en esta cadena de suministro, en función del valor del producto, cantidad vendida y los costos de producción. Por lo tanto, una combinación de diversas tecnologías que proporcionan las herramientas para satisfacer la calidad del producto, seguridad y rentabilidad es necesaria para mantener las cadenas de suministro y formar parte de una aproximación de precisión a la gestión agrícola de este rubro.

Si se piensa en el carácter globalizado del esquema económico actual, una forma objetiva de visualizar el avance tecnológico, y por ende, nuestra brecha tecnológica, es analizar a los principales competidores de Chile a nivel internacional. Bajo este punto de vista, es importante destacar los avances sustanciales que existen en el manejo de estas tecnologías en distintos países del hemisferio sur que compiten con Chile, como Argentina, Brasil, Australia, entre otros.

Al igual que el resto de sus competidores, Chile opera en una dinámica de mercado altamente cambiante. Desde luego, enfrenta una demanda más informada y masiva que tiene nuevos requerimientos, entre ellos, aspectos funcionales y atributos nutritivos de sus productos de exportación. Compite con una oferta que ha ido desarrollando conocimiento y tecnología para responder a las nuevas exigencias de los consumidores, donde el elemento diferenciador de mayor peso es la calidad. Para superar esta situación, se requiere mejorar e incorporar tecnologías y optimizar la coordinación de los diferentes actores del sistema exportador, apuntando a una gestión de calidad. En este último punto, es claro que los países desarrollados han avanzado en implementación de tecnologías. Uno de los puntos claros que se visualiza en el contexto de este diagnóstico y también a nivel mundial, es el uso de agroquímicos, donde estos países más que ir avanzado en mayores aplicaciones, se estabilizan o van a la baja por la disminución o estabilización de los precios pagados por productos (más bien estabilizados en los commodities) que disminuyen la competitividad y hacen más importante la eficiencia de uso de insumos.

Precios reales* de los grupos de productos básicos agrícolas, 1961-2002

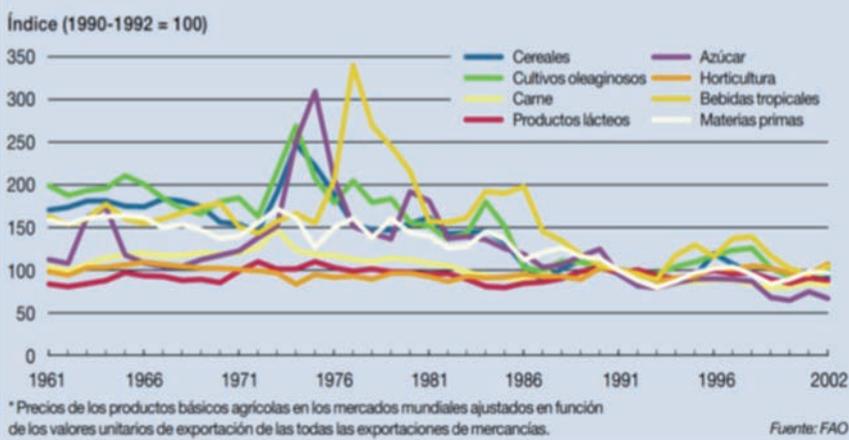


Figura 1.5. Evolución de precios de productos agrícolas (estabilización en precios de commodities) (Fuente: FAO, 2004).

En el marco de estos significativos cambios, algunos factores persisten. Por ejemplo, la gran distancia respecto de los grandes mercados objetivos en términos de cantidad y calidad de los cultivos, la tendencia de crecimiento de la población que alcanzará aproximadamente 9.000 millones en el año 2050, los efectos del cambio climático en el desarrollo de cultivos particularmente en relación de la frecuencia y sistema de drenaje de suelos, la erosión y reducción de la diversidad de cultivos, el consistente incremento de la demanda por productos saludables e inocuos, y finalmente la alta necesidad de rentabilizar los cultivos para los productores. Para enfrentar los factores de cambio señalados, tanto de la demanda como de las condiciones tecnológicas que debe incorporar la oferta para responder a sus exigencias, Chile presenta brechas indispensables de abordar, siendo la más importante el avance en el desarrollo y uso de tecnología (Figura 1.6.) por el sector productivo.



Figura 1.6. Tendencias más importantes que afectarán a la agricultura en el corto plazo. (Fuente: Country finance Group, 2015).

Cabe destacar que esta tendencia de incorporación tecnológica agrícola es ya global. Actualmente existen grandes avances en el sector asociados a desarrollos tecnológicos en países más evolucionados. El caso de Nueva Zelanda, donde se ha puesto como prioridad encontrar formas de gestionar el suelo para permitir, tanto el crecimiento económico, como la protección del medio ambiente. Esto porque dicho país posee un 55 % de la tierra bajo la agricultura, la silvicultura y la horticultura (apoyando > 25 % del PIB), dentro de su visión. Temas como la agricultura de precisión, asociado al manejo de inputs productivos, está tomando gran relevancia dentro de las políticas de Estado en la agricultura (Figura 1.7.).



Figura 1.7. Tendencias de desarrollo tecnológico en agricultura planteados por el National Land Resources Center, Nueva Zelandia, 2014. (Fuente: Collins, 2014).

Sin embargo, es difícil para las empresas navegar a través de la extensiva, pero dispersa experiencia de información asociada a desarrollos tecnológicos, que permitan lograr los productos que son requeridos por ellas en un formato práctico.

Capítulo 2

Variabilidad microclimática, espacial de características fisicoquímicas del suelo y su efecto en la heterogeneidad a la respuesta productiva de los cultivos

Stanley Best S., Paula Vargas Q.

2.1. Etapas de una correcta introducción de la agricultura de precisión

Una correcta aplicación de la Agricultura de precisión es entender la variabilidad espacial y temporal, dada en una condición específica de campo, causada por distintos factores que producen la heterogeneidad espacial, y la influencia de las condiciones climáticas sobre estos. Estos aspectos, ya tenidos en cuenta a lo largo de la historia de la agricultura, permiten un mejor manejo de la producción, mediante la implementación y uso de nuevas herramientas tecnológicas para la Agricultura de Precisión, con el objetivo de mejorar, facilitar y automatizar aquellas operaciones que ya se vienen practicando, con la determinación y conocimiento de esta variabilidad presente en el campo. Para que esto pueda ser posible, es necesario considerar los siguientes puntos: (1) reconocimiento de la variabilidad o captura de la información; (2) análisis cuantitativo y cualitativo en términos de interpretación agronómica de la información recopilada; y (3) medidas prescriptivas que permitan asumir la variabilidad como un factor clave en cuanto al manejo productivo de un cultivo determinado o (idealmente) del sistema productivo en su totalidad. Estas tres etapas de manejo asociado a la Agricultura de Precisión, quedan expresados en la denominada “Fases de integración de la AP 4.0”, en la cual se pueden reconocer la mayor parte de los elementos propios de este enfoque metodológico.

Pasos de integración que permiten una Agricultura de Precisión aplicada



Figura 2.1. Fases de una Agricultura de Precisión aplicada. (Fuente: elaboración propia).

2.2. Sistemas de evaluación de la variabilidad espacial y temporal de predios y generación de ambientes productivos

Las zonificaciones deben ser consideradas como un pilar fundamental para poder entender la variabilidad del cultivo y su interacción con el medio ambiente, para proporcionar una base de planificación agrícola. Estas segmentaciones se obtienen por medio del monitoreo del estado vegetativo de las plantas asociadas al índice de vigor, actividades fotosintéticas y las condiciones de suelo, hídricas y climáticas, para determinar las posibles respuestas del cultivo ligadas a estas interacciones (Figura 2.2.). En general, la informática y las tecnologías de precisión permiten actuar en el sitio adecuado y en el momento oportuno, al delimitar los huertos, señalando áreas con alta potencialidad que pueden responder en un plazo muy breve a un fuerte impulso de desarrollo.

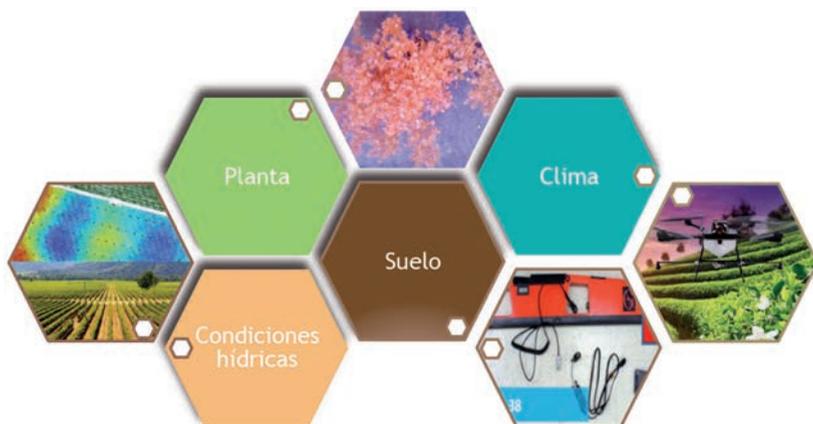


Figura 2.2. Interacción de la Agricultura 4.0 con el cultivo. (Fuente: elaboración propia).

Al tener información exacta de cada posición, se pueden comparar las características que están produciendo la variabilidad en las distintas coordenadas; en este tipo de agricultura 4.0 se tienen en cuenta las variaciones temporales, espaciales e históricas (Kreimer, P. 2003).

2.2.1. Variabilidad espacial

Se entiende por variabilidad espacial, los cambios sufridos a lo largo del terreno del cultivo, asociando factores físicos (topografía, geomorfología de suelo, profundidad de suelo, compactación, etc.), que presentan características diferenciadoras en la productividad. Estos cambios se pueden ver, por ejemplo, en un mapa de rendimiento, para lo cual es necesario recopilar datos en posiciones precisas. Para localizar estas posiciones en latitud y longitud, se utiliza un sistema DGPS (GPS diferencial), que al mismo tiempo al mismo tiempo puede ir recopilando otros datos de interés que mantengan una relación espacial, como la calidad del suelo, cantidad de agua en el terreno, densidad del cultivo, y cualquier otra variable que aporte a las diferencias productivas. Con ello se busca obtener mapas que resulten representativos del terreno y de utilidad para el agricultor (Kreimer, P. 2003). En la Figura 2.3 se aprecian las variaciones de rendimiento de un potrero.

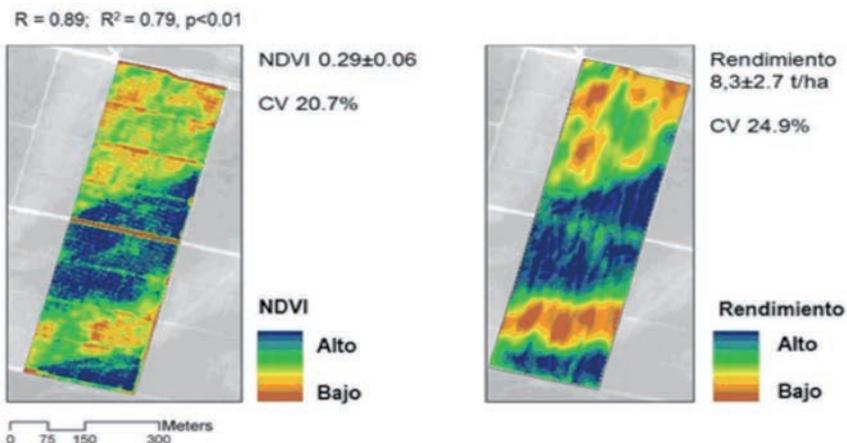


Figura 2.3. Ejemplo de mapa de rendimiento obtenido de un mismo potrero (derecha) y de variabilidad de desarrollo de planta (NDVI, izquierda). (Fuente: Martínez y Arnó, 2014).

¿Qué es y cómo se evalúa el índice de vigor (NDVI) de un cultivo?

El uso de imágenes satelitales, nos entrega imágenes multitemporales que son utilizadas ampliamente para evaluar y monitorear el estado de la vegetación. De esta forma, el índice de vigor o índice de vegetación puede ser definido como un parámetro calculado a partir de los valores de la reflectancia a distintas longitudes de onda, lo que es particularmente sensible a la cubierta vegetal (Gilbert et al., 1997). De otra forma, corresponde a un número generado por alguna combinación de bandas espectrales, que puede tener alguna relación con la expresión de la vegetación (biomasa y actividad fotosintética) presente en un píxel. La evaluación de la actividad fotosintética del cultivo se obtiene por medio de la utilización de sensores remotos que capturan la reflectancia de las plantas, información que puede provenir de satélites, aviones o capturas terrestres (Figura 2.4.). Este tipo de información es ampliamente utilizada, ya que, se han encontrado buenas correlaciones entre las producciones del cultivo y la respuesta espectral de las plantas (índices vegetacionales), lo cual puede generar una definición de variabilidad de suelo útil y beneficiosa, en especial por su bajo costo.

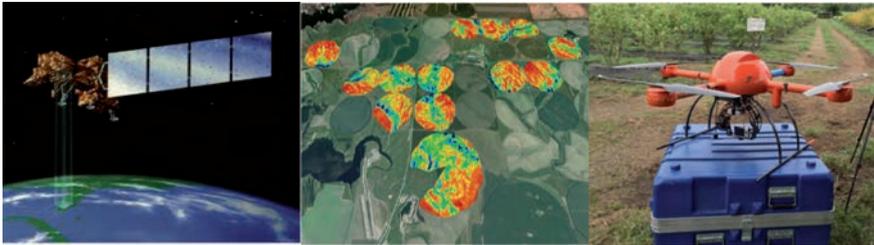


Figura 2.4. Satélite Landsat (USA) para monitoreo de recurso naturales, imagen capturada con sensor multispectral aéreo y sensor activo de terreno, respectivamente. (Fuente: elaboración propia en base a programa Copérnico).

Los índices de vigor son obtenidos mediante satélites de teledetección, cuya función es acentuar la vegetación en función de su respuesta espectral y atenuar los detalles de otros elementos como el suelo, la iluminación y/o el agua.

El índice de vegetación normalizado (NDVI) hace referencia al vigor de las plantas y se utiliza para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación con base a la medición de la intensidad de la radiación de ciertas bandas del espectro electromagnético que la vegetación emite o refleja. Permite dar un diagnóstico del cultivo por medio de la actividad y desarrollo de la vegetación, que representa la reflexión emitida por las hojas en la región espectral, asociadas al infrarrojo cercano. Esta puede ser obtenida por imágenes satelitales y drones como se muestra en la Figura (2.5.).

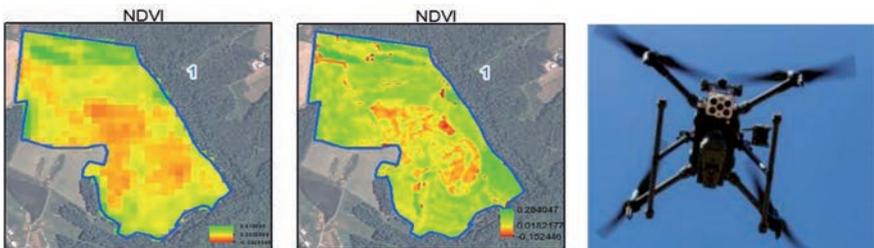


Figura 2.5. Imagen de índice verde o NDVI obtenida por Sentinel 2 (izquierda) y por formato aéreo (derecha) asociada al uso de dron. (Fuente: Elaboración propia).

Para entender un índice NDVI, debemos saber que las plantas sanas y vigorosas absorben la luz roja y reflejan la luz del infrarrojo cercano (NIR), en este caso el valor de NDVI se acercará a 1. Contrariamente, un cultivo con baja actividad fotosintética y baja biomasa, presentará un valor de NDVI más cercano a 0. En condiciones de campo, el rango real observado se encuentra típicamente entre 0,6 y 0,8 para un cultivo sano y con suficiente N, y en el rango entre 0,24 y 0,4 para un cultivo que presenta una deficiencia extrema de N. Menor a 0,2 ya no sería vegetación y se habla de suelo solamente. Cabe mencionar que existen otros índices vegetacionales que se obtienen con otras bandas, tales como verde o ámbar, pero en general se obtienen casi los mismos patrones espaciales.

2.2.2. Impacto del cambio climático sobre la variabilidad espacial de suelo

La agricultura es un sector que depende de la disponibilidad de los recursos naturales, biodiversidad, agua y suelo. Este último es el de mayor representatividad, ya que desafortunadamente los suelos chilenos, en una misma área de producción, muestran una elevada variabilidad en sus propiedades, tanto físicas como químicas, lo que tiene un impacto en el rendimiento y calidad de la producción. Esto, más el hecho de estar asociado a un clima altamente cambiante, genera importantes variaciones en los ambientes, las que pueden influir tanto positiva como negativamente en el desarrollo de las plantas y en consecuencia, en el producto final.

El uso de tecnologías ofrece un entendimiento oportuno de este impacto climático sobre las plantas, ayudando a monitorear y detectar condiciones adversas del cultivo para su eficiente corrección. Además, permite a los productores trabajar de una manera más amigable con el medio ambiente (ejemplo de ello son ajustes en los programas de fertilización y fitosanitarios), y con datos para adaptarse a las continuas barreras paraarancelarias que se presentan en el mercado (blockchain).

El Progap-INIA ha realizado estudios sobre las variables que afectan el rendimiento y calidad de la producción en huertos de arándanos. Mediante la utilización de modelos de inteligencia artificial, se ha logrado usar información geoespacial para correlacionar el rendimiento del cultivo y lograr proyectar su distribución en el espacio y tiempo. Esto, ha permitido generar una respuesta

específica de lo que ocurre en cada sector del huerto, proporcionando una potente herramienta para las distintas acciones de manejo agrícola.

Los mapas de rendimiento son indispensables para todas las acciones comerciales de este rubro. Sin embargo, tienen un tremendo potencial en mejorar el entendimiento de los procesos productivos asociados a variables de manejo. Así, los mapas de rendimiento tendrán gran utilidad en el entendimiento del desarrollo de ambientes productivos, tal como ya están siendo utilizados en cultivos tradicionales con la creación de los mapas de rendimientos desarrollados por las nuevas cosechadoras y el análisis multitemporal de estos.

Por lo tanto, al generar estos ambientes se puede tener injerencia de sus limitantes para acciones dirigidas, dando paso al correcto uso de la agricultura por ambientes, mediante la Agricultura 4.0, permitiendo que su evaluación pueda ser desarrollada desde diferentes perspectivas.

2.2.3. Medición de variabilidad espacial de características físico - químicas

Para poder entender la variabilidad de suelo en un sitio y como esto puede estar afectando la productividad, y por ende la rentabilidad del cultivo, es clave poder conocer cuáles son las características de suelo, tanto en condiciones físicas (topografía, textura, retención de humedad, profundidad, etc.) como químicas (nivel de fertilidad, CIC, % materia orgánica, entre otras). Sin embargo, es muy curioso que raramente se encuentre este tipo de información dentro de los registros de los productores, teniendo en cuenta que este tipo de evaluación se realiza quizás una sola vez, como es el caso de las características físicas. La explicación que se puede dar es que muchas veces el agricultor considera que esta información es muy cara de obtener y no visualiza claramente el beneficio que le puede reportar en el corto, mediano y largo plazo, para mejorar la productividad y calidad de su producción.

Por otra parte, es importante destacar que esta información por sí sola no será útil, si no es utilizada para apoyar el desarrollo de las normas de manejo de los cultivos, ya que la producción no solamente se limita por las condiciones naturales, sino también por la variabilidad inducida por el propio productor al no realizar las acciones adecuadas en las diferentes zonas productivas que

posee o en los momentos adecuados para cada una de ellas. Así, se hace muy importante tener herramientas de monitoreo que permitan al productor tener conocimiento de la condición del terreno para poder, así, definir las condiciones de variabilidad productiva en sus terrenos, que le permitan tomar las acciones correctivas tanto en siembra, aplicaciones de insumos y seguimiento posterior del cultivo en su evolución.

Está bastante probado en la literatura, que la variabilidad espacial del cultivo está altamente asociada a la variación de las propiedades geomorfológicas de los suelos. Los suelos son complejos cuerpos tridimensionales cuyas propiedades varían de forma continua en las tres dimensiones espaciales (XYZ), o de otra forma, en espacio (latitud-longitud) como en topografía y profundidad de suelo, albergando una amplia gama de procesos físicos y biológicos que interactúan con las condiciones ambientales, generando una cuarta dimensión que es el tiempo. Esto los ha hecho tradicionalmente difíciles y costosos de caracterizar y, por eso, la mayoría de los predios han sido plantados o sembrados sin disponer a priori de información sobre su variabilidad. La zonificación desarrollada tras evaluar la conductividad eléctrica de suelo (Figura 2.6.), ha sido utilizada para la delineación de zonas homogéneas dentro de los predios y, también, para optimizar el muestreo de suelos, con el fin de caracterizar e identificar la causas que afectan al rendimiento y/o la variabilidad de la calidad.

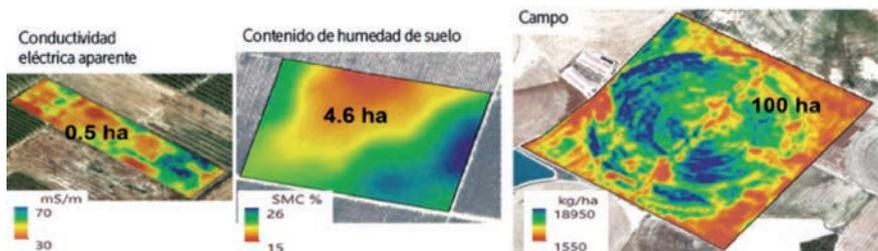


Figura 2.6. Mapa de variación de suelo (conductividad eléctrica, izquierda) su impacto en condiciones hídricas (centro) y expresión de rendimiento del mismo sitio (derecha). Fuente: (Martínez-Casasnovas, 2018).

El equipo de medición de conductividad eléctrica de los suelos, al ser asociada a la altimetría existente (Figura 2.7.), es usado como una herramienta de apoyo para la caracterización físico-hídrica del suelo, de manera de entregar

información que permita medir su variabilidad y, de esta forma, explicar la variación espacial del estrés hídrico detectado en las plantas.

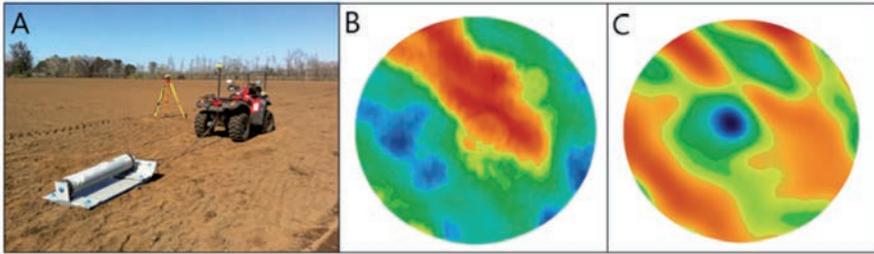


Figura 2.7. A) Unidad sensor electromagnético EM-38 + Sistema RTK para medición de topografía; B) mapa de variabilidad CE de suelo, y C) mapa topográfico del suelo. (Fuente: elaboración propia en base a programa Copérnico).

Este equipo presta gran utilidad para la definición de zonas de condiciones disímiles dentro de un potrero, lo que permite localizar, con gran exactitud, puntos de medición para obtener una caracterización edáfica del sector (Figura 2.8). Lo anterior es muy útil para evaluar las condiciones en las cuales se desarrolla un sistema de riego variable y también para la definición de la fertilización óptima con el apoyo de equipos adecuados.

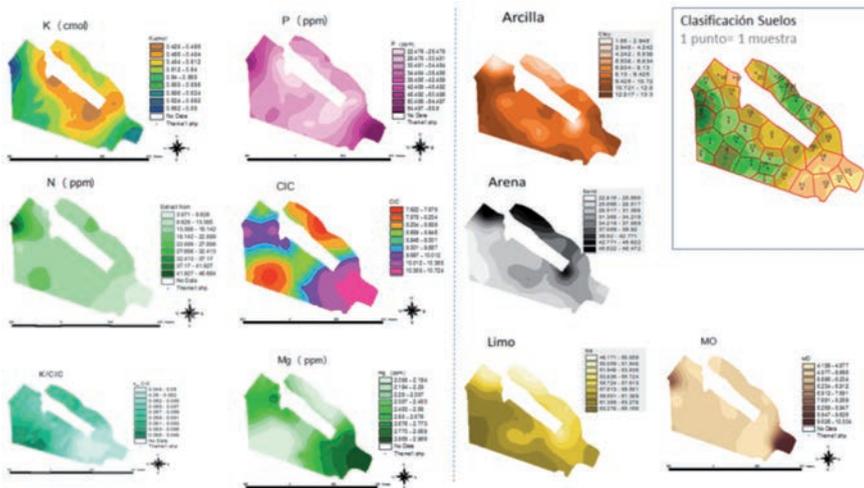


Figura 2.8. Caracterización espacial de suelos, basado en monitoreo de características físico-químicas a través del uso de mapa de EM38. (Fuente: Elaboración propia).

2.2.4. Variabilidad temporal

La variabilidad temporal es el resultado de comparar un determinado número de mapas del mismo terreno a través de los años. Al interpretar este tipo de variabilidad se obtienen deducciones, pero, aún así, se pueden obtener mapas de tendencias que muestren características esenciales (Kreimer, P. 2003). En la Figura 2.9. se observan las comparaciones de rendimiento de distintos años.

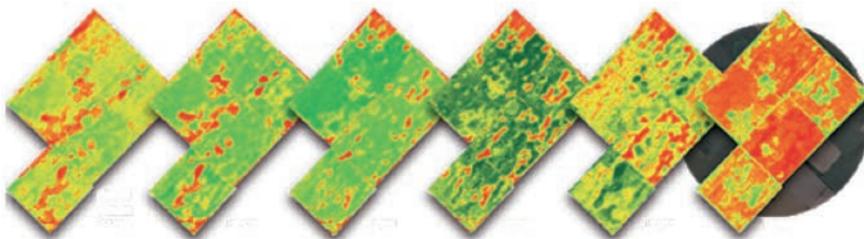


Figura 2.9. Ejemplo gráfico de la distribución variable de rendimiento, evaluado en mapas en rendimiento de distintos años. (Fuente: Programa Copérnico).

2.2.5. Estabilidad histórica de índices vegetacionales obtenidos de información satelital

Este análisis consiste en la agrupación formando clúster de los elementos analizados de cada mapa de índice vegetacional (NDVI), obteniendo una clasificación estadística de los datos; es decir, la finalidad es clasificar objetos en clúster o grupos, mediante la utilización de un set de varios años de una misma localidad de mapas vegetacionales (NDVI). Estos grupos se forman en función del grado de similitud entre los miembros del mismo clúster (Figura 2.10).

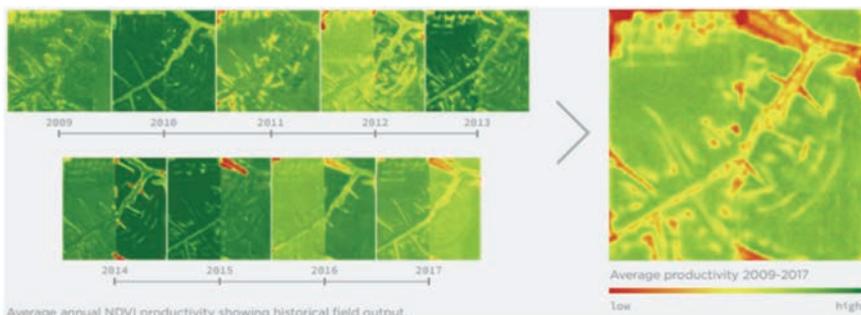


Figura 2.10. Plano de ambientes (derecha) desarrollado a partir de información satelital de varios años (izquierda). (Fuente: Planet Precision Ag Ebook, 2018).

2.2.6. Modelos multivariados de segmentación

Sobre la base de la utilización de planos de diferentes variables explicativas potenciales de la variación de rendimiento (NDVI, topografía, CE, etc.), se utiliza la rutina de análisis multivariado de clasificación (kmeans, super vector machine, regression tree, red neuronal, etc.), la cual permite definir los ambientes con mayor robustez en su definición (Figura 2.11.).

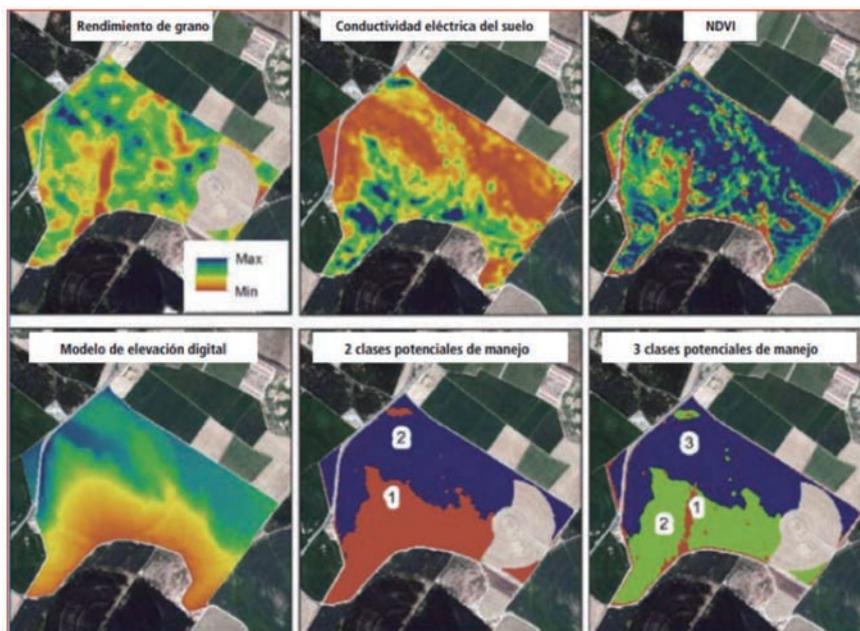


Figura 2.11. Zonificación de ambientes (2 y 3 zonas potenciales) basados en análisis multi temporal de datos adquiridos de sensores proximales y remotos. (Fuente: Escola et al, 2017).

Como se ha explicado, para lograr una buena caracterización de la variabilidad del predio, se requiere la obtención adecuada de las variables que definen estos ambientes y de los pasos para lograrlo, como se muestra en la Figura 2.12.



Figura 2.12. Pasos para una correcta y eficiente zonificación del cultivo. (Fuente: elaboración propia).

Por otra parte, estos ambientes tienen comportamientos diferenciados según la condición climática imperante, la cual cambia de año en año, teniendo mayores fluctuaciones en la última década dado por el cambio climático.

2.2.7. Impacto del clima en los ambientes productivos

Una amplia diversidad de variables, tanto genéticas como de origen ambiental, son conocidas por influir en el crecimiento y desarrollo de las plantas. En sistemas agrícolas, intensidad de luz, calidad del aire, nutrientes del suelo, humedad y temperatura, son factores ambientales particularmente importantes. El monitoreo de las condiciones ambientales puede ser crucial para agricultores que deseen implementar prácticas de manejo en etapas específicas del desarrollo de cultivos. Por ejemplo, la evolución fenológica asociada a las condiciones climáticas, puede evidenciar condiciones no favorables para el cultivo (mayor tasa de evapotranspiración y deficiencias de riego por ejemplo), en ciertos estados, que al final de la temporada son indetectables al no existir registros.

Por otro lado, la radiación solar incidente tiene una alta relación en los procesos de actividad de las plantas (fotosíntesis, demanda hídrica de las plantas, etc.), que a la vez poseen una alta correlación con la condición de temperatura del ambiente, siendo esta última la más usada por ser más sencilla de obtener.

Para una gran mayoría de especies frutales, la temperatura y la consiguiente acumulación de calor son los factores ambientales influyentes en el desarrollo fenológico de los cultivos de inicio a fin (cosecha), siendo utilizado para la planificación de acciones agronómicas en los cultivos, por lo que es necesario conocer los requerimientos térmicos de cada especie, así como las sumas térmicas del lugar de plantación, para llevar a cabo oportunamente estas acciones. Generalmente, estos parámetros son medidos sobre la base de un índice llamado grados días acumulados (GDD), el cual está definido por la acumulación de temperatura media diaria ($T^{\circ} \text{max} - T^{\circ} \text{min} / 2$) sobre una base térmica. La Figura 2.13. expone una aplicación a los campos de arándanos (7 grados).

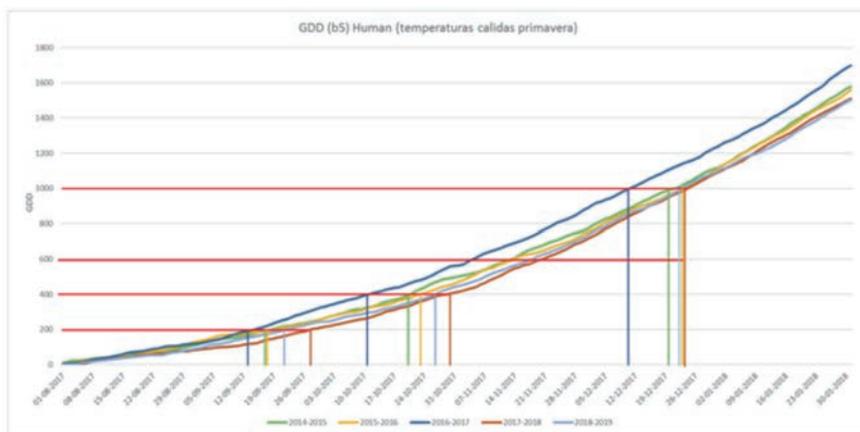


Figura 2.13. Evolución de grados día acumulados (GDD) en las últimas 5 temporadas (2014-2019) de arándanos. (Fuente: red agrometeorológica de INIA).

Los grados días acumulados (GDD) son de gran utilidad para los científicos, consultores de cultivos y productores, ya que se utilizan para predecir la tasa de desarrollo de la planta y la etapa de crecimiento. En ciertos cultivos, esta información se utiliza para ayudar a planificar las decisiones de manejo, como el tiempo de riego, o momentos de fertilización o la aplicación de pesticidas,

como también para programar la cosecha. Sin embargo, el desarrollo de los GDD de año en año son diferentes por lo que las fenologías se contraen y expanden (Figura 2.13.) y, por ende, las acciones agronómicas deben ser ajustadas a estas variaciones, con el fin de reducir el impacto del clima sobre los ambientes y en el resultado final del cultivo.

Una forma de evaluar el impacto fenológico del clima en el desarrollo de los cultivos, es mediante el uso de información satelital o drones en el desarrollo de curvas de evolución de vigor en las plantas. Hoy en día existen diferentes plataformas de seguimiento de cultivos sobre la base de información de índices vegetativos (MSAVI, NDVI, GDVI, etc.) que permiten visualizar los problemas asociados al desarrollo del cultivo y hacen posible cuantificar qué tan bien o mal está el cultivo en un determinado periodo de su desarrollo, cuando estas están ajustadas al desarrollo del GDD y no sólo a fechas, ya que, año a año las condiciones de acumulación térmica cambian.

Sin embargo, a pesar de poder ajustar el impacto climático multiestacional en el desarrollo de los índices del cultivo, existe el problema de la variabilidad de suelo (textura, profundidad, topografía, etc.) que generan un impacto ambiental diferencial por zonas que, finalmente, terminan en un impacto en los rendimientos y calidades variables que habitualmente se encuentran en los predios (Figura 2.14.).

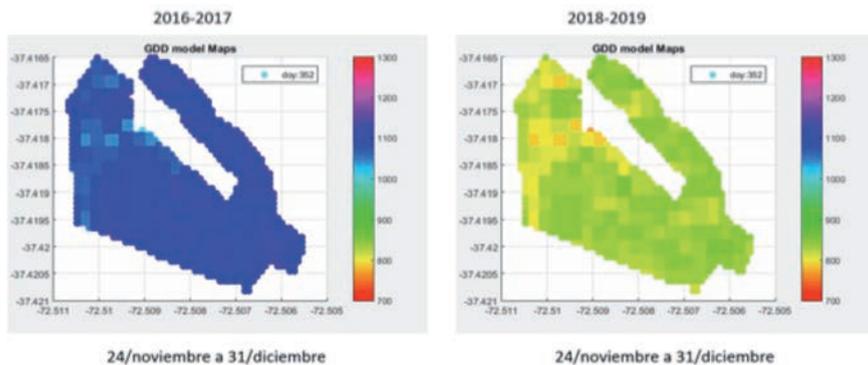


Figura 2.14. Diferencias en dos temporadas distintas (2018 y 2019) de GDD espacio - temporal para el mismo cuartel de arándanos y mismo día (DOY 352) de evaluación. (Fuente: elaboración propia).

Capítulo 3

Estimación de rendimiento y calidad

Paula Vargas Q., Stanley Best S., Hernán Aguilera C.,
Fabiola Flores P., Valentina Alarcón P.

3.1. Estimación de rendimiento

La estimación del rendimiento en los cultivos es uno de los datos más importantes a la hora de determinar la producción agrícola, tanto para ajustar sus estrategias comerciales, como para adecuar las logísticas de cosecha y postcosecha. La compilación de los datos de superficies cultivadas presenta dificultades, ya que muchos productores carecen de estos o no tienen. La forma de datos más utilizada, sigue siendo la estimación visual o el uso de estadística poco representativa. Esta práctica conduce a obtener datos poco fiables, teniendo en cuenta las condiciones de variabilidad antes expuestas. Es por esto que se considera la agricultura de precisión como el conjunto de una serie de herramientas informáticas para mejorar la generación, captación, almacenamiento y análisis de información para contribuir a la toma de decisiones.

Dentro de estas necesidades, el INIA en conjunto con la empresa Hortifrut S.A., se adjudicaron un proyecto en la convocatoria FIA 2016, que tiene como objetivo solucionar los efectos de la inestabilidad climática en la agricultura y la producción, denominada “Estimación del rendimiento y la calidad de los huertos de arándanos (*Vaccinium corymbosum*) basado en herramientas de agricultura de precisión e IoT (Internet of Things) para la optimización de las variables de producción”.

La tecnología desarrollada en este proyecto se basó en un sistema de optimización de cosecha para mejorar las estimaciones y planificaciones manuales, ya que con el manejo de la variabilidad espacio-temporal a nivel de sub-parcela, se buscó como resultado una producción más homogénea mediante una mayor eficiencia de los recursos disponibles. Ello con la finalidad

de manejarla de acuerdo a los objetivos productivos, además de asegurar la calidad del arándano en su destino final. El prototipo integra tecnologías de informática y electrónica de punta, que permiten lograr una convergencia tecnológica en un dispositivo de muy bajo costo y fácil aplicación, que asegura una adopción a los distintos niveles socioculturales de sus usuarios.

Para poder llevar a cabo una adecuada agregación de ambientes, se debe tener información relevante de caracterización de suelo (textura, profundidad, topografía, etc.) que muchas veces no se obtiene fácilmente debido a su alto costo. Otra forma de evaluar los ambientes, es mediante el uso de información multiestacional de índices vegetativos, es decir, expresión en planta, asociado a información de topografía (incidencia en radiación, suelo) que, mediante un modelamiento multivariado, explicado anteriormente, generan ambientes caracterizados (Figura 3.1.) que expresan el potencial de cada uno, factor que fue la base del modelo de estimación desarrollado por este proyecto.

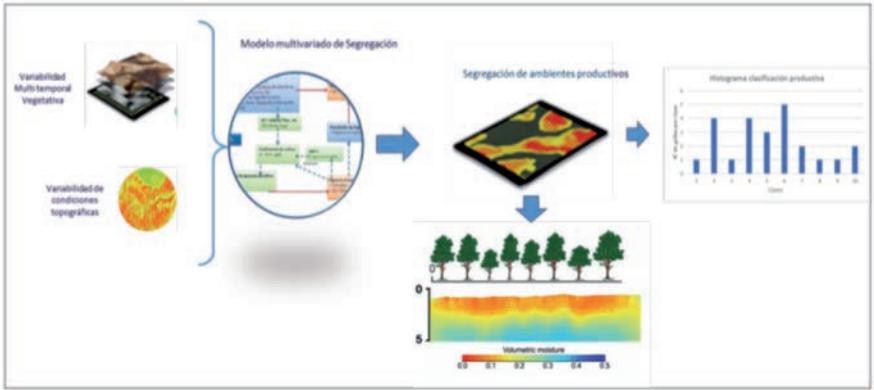


Figura 3.1 Esquema de modelo de caracterización de ambientes. (Fuente: elaboración propia).

Para realizar una clasificación de zonas en los predios, se utilizaron técnicas de clustering que, en la disciplina de la inteligencia artificial, identifica de forma automática agrupaciones o clústeres de elementos de acuerdo a una medida de similitud entre ellos. Además, se utilizó el algoritmo no jerárquico de K-Means condicionado a un modelo de entropía. Esto permitió describir, de mejor manera, la variabilidad intragrupal. Se considera como datos de entrada valores de topografía, radiación y datos de NDVI históricos obtenidos del sensor

Sentinel 2 (A y B). La estrategia fue diseñada con el objetivo de caracterizar la variabilidad espacial de la superficie y de la vigorosidad de la planta (planos de NDVI históricos) como el propuesto por Prakash et al., (2012). Finalmente, el resultado del modelo se integra bajo un árbol de decisión y clusterización en base a 10 zonas (Figura 3.2.), las cuales fluctúan desde una muy permeable (cluster 1) a las más compactadas o más impermeables (cluster 10).

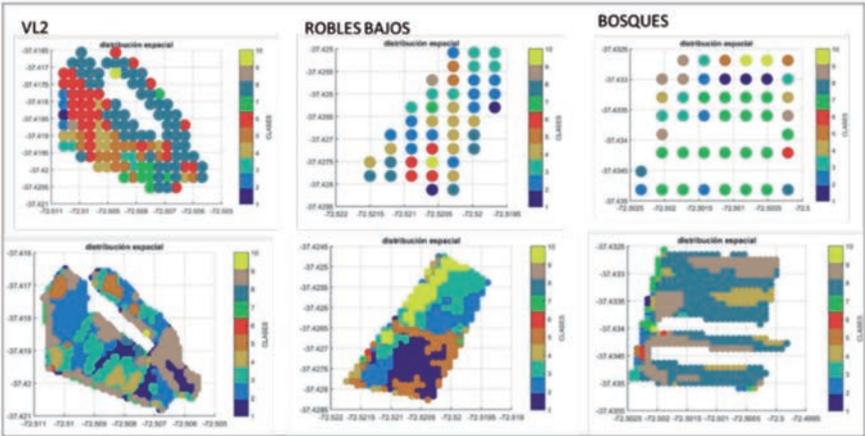


Figura 3.2. Resultados de la caracterización zonal estructurada en 10 clases, considerando varianza temporal de la información de base. (Fuente: elaboración propia).

Dentro del marco de las herramientas de inteligencia artificial, el perceptron multicapa es en la actualidad, una de las arquitecturas más utilizadas en la resolución de este tipo de problemas. Al utilizar este método, se obtuvo un poder predictivo aceptable de variación geomorfológica del predio en estudio. Esto indica que el ajuste de los datos fue mínimo, indicando un factor de ajuste R^2 (~50%, ver Figura 3.3.), por lo que no se asegura en el uso de este modelo para la predicción exacta de textura directa, pero sí como un buen modelo de evaluación de variabilidad del suelo, útil para ser utilizado para la caracterización física y, por ende, un adecuado diseño de riego.

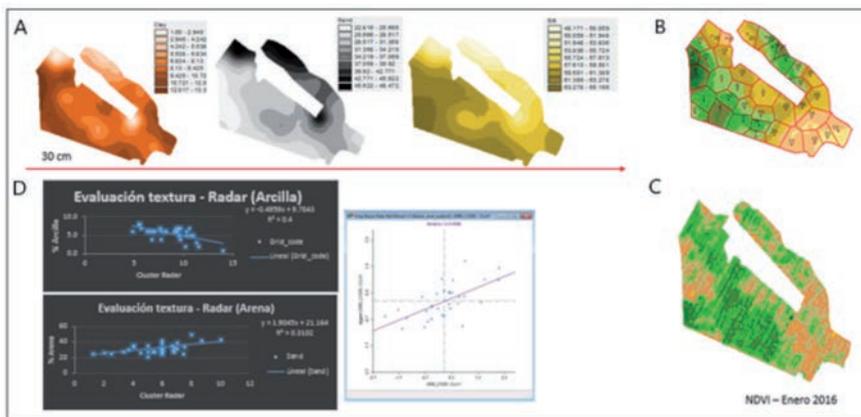


Figura 3.3. Evaluación espacial de suelo mediante uso de modelo SAR-Multiespectral. Con mapas texturales reales del sitio (A), Modelo de segmentación SAR-Multiespectral (B), Mapa de NDVI sector estudio (C) y curvas de correlación y ajuste (D). Fuente: elaboración propia, en base a resultados de proyecto INIA-FIA-Hortifrut. (Fuente: elaboración propia).

Para poder evaluar espacialmente los suelos sobre la base de la estructura productiva (rendimientos) de cada cuartel, se procedió a trabajar con la forma de distribución de tipos de suelos generados por cuartel. De estos se tuvo acceso a los rendimientos reales y se incorporaron los factores climáticos a un modelo numérico.

A través de una base de información de 250 cuarteles de rendimiento de más de 4 años de información espacial de suelo, variación de biomasa, clima, entre otros factores, se generó un modelo de estimación de rendimiento y calidad basados en redes neuronales (Figura 3.4.).



Figura 3.4. Interfaz usuario del modelo de estimación de rendimiento obtenido. (A) Modelo de determinación de fecha de cosecha y variabilidad de GDD. (B) Modelo de clasificación de variabilidad y generación de archivos base para estimar rendimiento. (C) Modelo de estimación de rendimiento con módulo A y módulo B. (D) Modelo de detección de Berry. (E) Generación de reportes. (Fuente: elaboración propia).

Los resultados del modelo generaron errores de estimaciones, en general, menor a 10 %, realizadas con 2 meses de antelación a cosecha (octubre), la cual fue validada en la temporada 2019 con resultados de igual orden de magnitud de error. Sin embargo, para el correcto funcionamiento del modelo, se requiere de información satelital en septiembre y octubre, factor no muy funcional para la zona sur de Chile, por el alto grado de nubosidad presente, pero en la medida que se pueda ir incorporando información al modelo de microsátélites (información diaria), se podrá mejorar este problema.

Por otra parte, el sistema predice el día de cosecha, sobre la base de acumulaciones térmicas prediales con un pixel de 30 m, tal como se puede visualizar en la Figura 3.5.

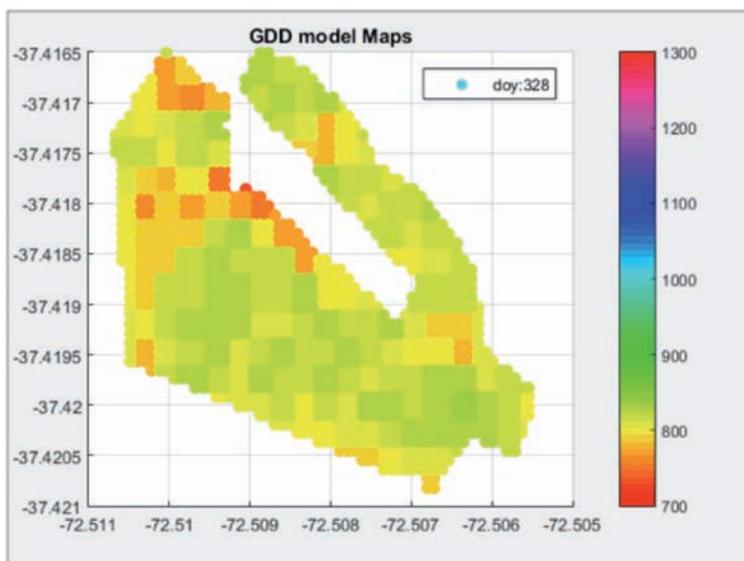


Figura 3.5. Evolución de acumulación térmica en gados día espacial del bloque en VL2 en estudio. (Fuente: elaboración propia).

Sumado a la estimación, se logró desarrollar un modelo que permite evaluar los diferentes potenciales niveles de madurez y llevarlos a planos espaciales. Los modelos fueron validados con información verídica de terreno, utilizando el prototipo óptico de captura (drones), permitiendo segmentar espacialmente los niveles de madurez (Figura 3.6.) usados, para la evaluación localizada de fruta.

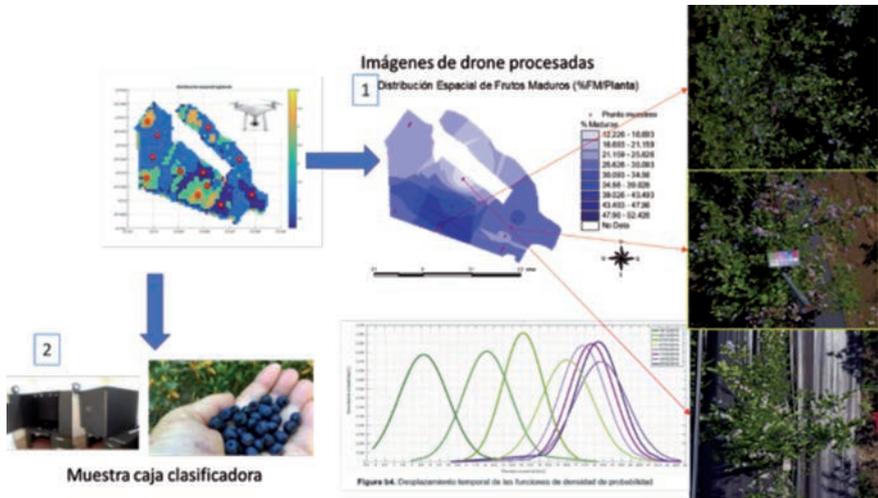


Figura 3.6. Esquema de salidas del modelo espacial de madurez de fruta (1) y sección de muestreo en campo para análisis químico detallado (2). (Fuente: elaboración propia).

3.2. Evaluación de calidad de fruta

Hace algunos años se consideró al arándano como uno de los frutos más deseados a nivel mundial, lo que demandó un mayor manejo agronómico para aumentar su producción y mejorar su calidad. En el hemisferio sur se realizaron diferentes estudios para ver los beneficios de este cultivo, aumentando año tras año la producción y, por ende, los envíos a distintas zonas geográficas a nivel mundial, siendo Chile uno de los principales países exportadores.

Según cifras de ODEPA, en 2018 se exportaron 113.944 toneladas de arándanos en frescos. Para mantener estas cifras, se exige una adecuación en la oferta orientada, básicamente, a satisfacer al consumidor con alimentos de alta calidad, ya que a medida que el comercio evoluciona hacia lo internacional, la calidad se consolida como la herramienta competitiva por excelencia, conduciendo a la necesidad de fortalecer un mercado interno exigente, así como la inserción y posicionamiento de sus productos en los mercados internacionales.

Estos estándares de calidad e inocuidad nacen para proteger la salud del consumidor y satisfacer sus expectativas de calidad. Las demandas de alimentos de calidad son cada vez mayores; en consecuencia, se han incrementado las exigencias de los productos agrícolas, de modo cumplan altos estándares y sean producidos en condiciones ecológicamente responsables. Esta calidad de la fruta está influenciada por los manejos agronómicos y condiciones agroclimáticas, las cuales atrasan o adelantan los estados fisiológicos del cultivo, lo que se traduce en el potencial productivo y afectan considerablemente la aceptabilidad del arándano chileno en los mercados objetivos, trayendo consigo consecuencias en el largo plazo. A esto se suma la creciente preocupación por tener una dieta más equilibrada y nutritiva, características propias del arándano que son altamente apreciadas por los mercados, debido a su alto valor nutricional y contenido de antioxidantes.

Respecto a la calidad de las frutas, no se debe pensar únicamente en frutos de aspecto homogéneo y que no tengan daños, sino que se debe determinar cómo los consumidores perciben la fruta en términos sensoriales, entre los cuales destacan parámetros como la firmeza, los grados brix y la acidez titulable, así como también los análisis de antocianos y polifenoles. Estos permiten caracterizar la fruta y establecer relaciones con la calidad y vida de postcosecha que ella presentará. Para esto es necesario realizar diferentes mediciones de los parámetros, con la finalidad de obtener un resultado reproducible y comprobable mediante escalas. En el caso de la madurez del fruto, que está relacionado con las antocianinas y polifenoles, la calidad de la apariencia se determina visualmente; sin embargo, de esta forma no es posible clasificar con precisión el grado de coloración de los frutos maduros, derivados de una alta heterogeneidad de frutos cosechados.

Lo expuesto anteriormente ha impulsado que los esfuerzos estén orientados a generar nuevas tecnologías y a adaptar otras que permitan predecir los rendimientos, la calidad y condición de los frutos, para tomar acciones de mitigación y disminuir las pérdidas de sustentabilidad que pudiera generar el cambio climático.

¿Qué son las antocianinas?

Se trata de la madurez fisiológica y fenológica del fruto que depende, principalmente, del porcentaje de contenidos fenólicos y sólidos solubles

(azúcares) presentes en la baya. Mientras más altos los contenidos de sólidos solubles y fenólicos, mayores serán sus propiedades organolépticas, demostradas en color, sabor y aroma en el fruto. Existe una relación entre el color y la maduración de las frutas que se refleja al momento de la cosecha, postcosecha y comercialización, debido a los cambios de pigmentación que tienen lugar durante el desarrollo y maduración del producto en la planta. De este modo, se puede relacionar el contenido antioxidante con el color de las frutas.

El fruto del arándano contiene principalmente antocianinas, responsables de su característico color azul, y además posee una excelente fuente de vitamina C, fibra dietética, y minerales como manganeso, potasio, hierro y calcio. También es importante destacar que, por su elevada actividad antioxidante, presenta potenciales beneficios para la salud, lo que ha despertado gran interés desde el punto de vista nutricional y, a su vez, desde el enfoque de protección y prevención de enfermedades.

3.3. Prototipo óptico de captura (dron) para estimar rendimiento y evaluar el índice de madurez de las frutas

La adopción de técnicas de agricultura de precisión permite un ahorro considerable en el consumo de insumos y energía, orientado a la calidad de los cultivos. Herramientas como drones y espectroscopía de infrarojo cercano, han permitido monitorizar el rendimiento y la calidad de la fruta de una forma no destructiva.

Se evidencia que, a partir de los drones, vistos como una herramienta tecnológica innovadora, es posible resolver las problemáticas expuestas en campos de cultivos de gran extensión, ya que con cámaras de alta definición e información geográfica, pueden recorrer más de mil hectáreas en menos de una hora. Estos dispositivos para la toma de mediciones y captura remota que sobrevuelan los cultivos con cámaras multiespectrales, pueden tomar fotografías y grabar videos de alta resolución que detectan características de los cultivos, ayudando a respaldar las decisiones para una mejor precisión y productividad del campo.

Como se ha mencionado, los principales indicadores de calidad de los arándanos están asociados con la aceptabilidad del consumidor. En el proyecto de estimación de rendimiento y calidad en arándanos, se buscó desarrollar un modelo para la clasificación de rendimiento y calidad de las bayas cosechadas, mediante uso de tecnologías de visión y modelamiento digital a favor de la maximización de las logísticas comerciales y base para mejorar acciones agronómicas. Adicionalmente, es necesario avanzar hacia la determinación de las características organolépticas de los frutos (contenido adecuado de azúcares, ácidos y compuestos volátiles responsables del aroma característico de los arándanos), con el objetivo de asociar las distribuciones de calidad de la fruta en postcosecha.

La evaluación del rendimiento y calidad de arándanos se propone de la siguiente manera: el dron cuenta con capacidad de vuelo autónoma guiada por sistema de posicionamiento RTK (cinemática en tiempo real) con sistema de captura de datos inalámbrico e integración de electrónica y programación para control automático de recolección, almacenamiento y descarga de datos. Este envía las imágenes RGB capturadas sobre las plantas a un servidor que procesa y estima los kilogramos de fruta de la planta y, a su vez, mide el índice de color de la fruta para determinar el punto óptimo de cosecha. En la Figura 3.8., se muestra el porcentaje de índice de madurez por planta de arándano.

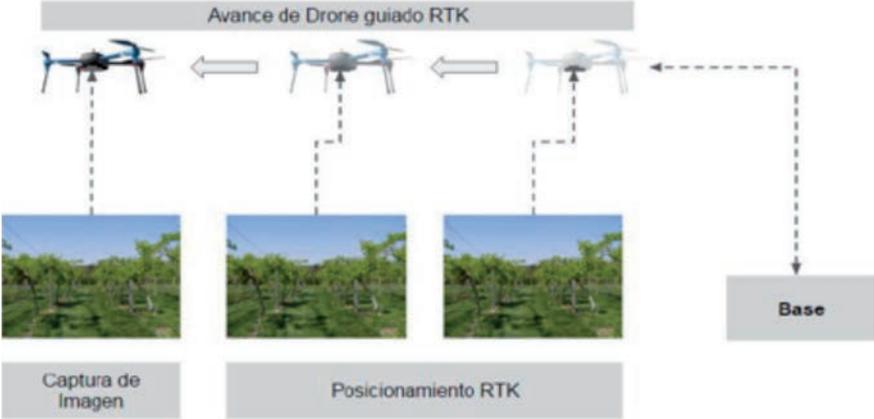


Figura 3.7. Dron para estimar rendimiento y calidad. (Fuente: elaboración propia).

Una vez capturada las imágenes de los arándanos, se envían al servidor web de procesamiento para el análisis y proyección de los datos, generando un plano de madurez que determina las zonas con mayor madurez dentro del campo.

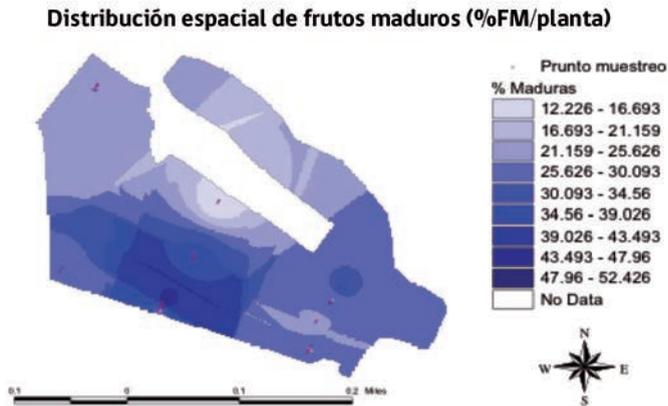


Figura 3.8. Mapa de proyección datos para indicar el en índice de madurez de las bayas de arándano. (Fuente: elaboración propia).

3.4. Caja de selección de frutos NIR para indicar calidad en arándanos

La madurez en la cosecha determina, considerablemente, la calidad y el potencial de vida de postcosecha de las frutas (Kader, 1999). La heterogeneidad de la madurez del fruto dificulta la estimación de la fecha óptima de inicio de la cosecha. El trabajo apunta a precisar la fecha exacta de cosecha, para que la producción no se vea afectada por el descarte de las empresas exportadoras, al no cumplir con los estándares requeridos. La idea es crear una herramienta de clasificación de calidad a través de la espectroscopía de infrarrojo, que además destaque por su condición de detección de patrones para selección de bayas, originando un fruto deseable para los mercados.

El método de espectroscopía de infrarrojo cercano (NIR, por sus siglas en inglés) se utiliza ampliamente para la determinación de ciertos compuestos químicos, lo que permite analizar un gran número de muestras en corto tiempo, sin necesidad de hacer extracción previa de los compuestos. El uso de sensores VIS-NIR es un gran avance para la agricultura. Estas herramientas utilizan el infrarrojo

cercano, donde un haz de luz que es emitido por la lámpara, pasa directamente a la muestra donde una parte es absorbida y otra reflejada, permitiendo determinar, a través de calibraciones, el analito de interés. Esta tecnología apunta al monitoreo del cultivo a tiempo real, considerando las variables de producción, podas y la condición de calidad de la fruta que hoy son subjetivas, y que para un real impacto deben ser objetivas y de bajo costo. Actualmente se cuenta con metodologías o herramientas que evalúan el ciclo productivo del cultivo o la calidad de la fruta, dando un diagnóstico directo a través de un análisis químico de ésta. Por su alto costo se toman sólo de 1 a 5 muestras por predio, siendo poco representativas dentro del área de producción a causa del desconocimiento de la variabilidad espacial del campo. Estas metodologías, además son poco utilizadas debido al tiempo de entrega de los resultados por parte del laboratorio (costo/beneficio). Debido a esto, los resultados de los análisis químicos limitan la toma de decisiones de forma oportuna afectando los planes de manejo agronómico de los cultivos. Las otras vías utilizadas son a través de manuales técnicos y recomendaciones bibliográficas, quedando sujeto a la experiencia e intuición del técnico o asesores de campo que muchas veces son erráticas debido a que no están sujetas para cada condición edafoclimática específica y que, asociados a la inestabilidad climática, causan enormes pérdidas en la calidad comercial de la producción.

En la agricultura, estos sensores se calibran mediante técnicas de quimiometría analítica, que podría definirse como la aplicación de la química que utiliza la matemática y la estadística para diseñar experimentos y analizar datos químicos. Así, el conjunto de datos proporcionados por los sensores (espectros VIS-NIR) y los datos de los laboratorios convencionales, permiten generar algoritmos de predicción para identificar y cuantificar un compuesto de interés. Estos métodos tienen variadas aplicaciones en la agricultura para evaluar calidad de frutas y semillas, nutrición foliar y de suelo, además de detección de enfermedades. Esto solo con el espectro proporcionado por el sensor una vez calibrado, entrega los parámetros cuantitativos o de calidad de un producto en específico. Este sistema resulta tener muchas ventajas, entre ellas, que es un sistema no destructivo, y que no necesita una preparación de la muestra. Basta solo con acercar el sensor y obtener el espectro del haz de luz. Otra ventaja es el número de muestras que pueden obtener, ya que es una herramienta útil en el análisis rápido de muestras, tanto en campo, como en laboratorio sin utilizar reactivos químicos ni producir contaminantes. Además, estas técnicas permiten obtener información de las muestras en tiempo real, lo que posibilita la toma de decisiones de manera oportuna, mejorando las logísticas del predio.

La interacción NIR con diferentes compuestos en la planta, puede proporcionar información sobre muchos parámetros químicos y físicos en cultivos, como también análisis de suelo y tejidos vegetales, mediciones de madurez y calidad en la fruta, determinación de enfermedades, entre otras. Estos sistemas se encuentran dentro del mercado y están a la venta con diferentes precios y usos (Figura 3.9). Algunos de ellos son: Avaspec-NIR256 de Avantes, ocupado para la identificación de patógenos; el espectroradiómetro Felix F-750 para la medición de calidad como materia seca, sólidos solubles, acidez titulable y color; el analizador NIR portátil Phazir Rx de Polychromix, especialmente para uso en distintas áreas; o el uso de cámaras NIR en un sistema de detección automatizada (drone) de Sentera, que permite visualizar diferentes parámetros a través de todo el campo en tan solo minutos.



Figura 3.9. Espectroradiómetros disponibles en el mercado. (Fuente: imágenes libres internet).

Así, para el caso de los arándanos, el principal interés del prototipo NIR desarrollado en este estudio, fue relacionar los porcentajes de pigmentos fenólicos con el índice de madurez, que son cambios de aspecto visual, fisiológico y bioquímico, sobre el efecto en calidad y madurez del fruto, con la utilización de diferentes técnicas de evaluación a través de la caja de selección de frutos.

La caja de selección de frutos indicadores de calidad se basa en un sistema o software de clasificación de bayas de arándanos, a partir de filtros ópticos que permiten el paso de luz correcto para determinar las antocianinas. Esto filtros son montados en una cámara NIR, dando origen a una segregación de frutos desde pintones a maduros, identificando la condición de las bayas cosechadas que puede determinar su vida útil en postcosecha y su destino de comercialización (Figura 3.10).



Figura 3.10. Prototipo para captura de imágenes con cámara NIR, en condiciones de luz controlada. (Fuente: elaboración propia).

Para determinar la calidad de los frutos, en este caso arándanos, se extraen muestras desde el predio en estudio y son transportadas a laboratorio para realizar los respectivos análisis. Los arándanos cosechados se extraen de diferentes partes del huerto, para incorporar el factor variabilidad en el muestreo.

Los frutos cosechados se clasifican según el grado de madurez (Fig. 3.11.):

Clase 1: Sobre madura (IQF).

Clase 2: Madura (exportación).

Clase 3: Medio pintón (exportación según destino y porcentaje de muestra).

Clase 4: Pintón (exportación según destino y porcentaje de muestra).

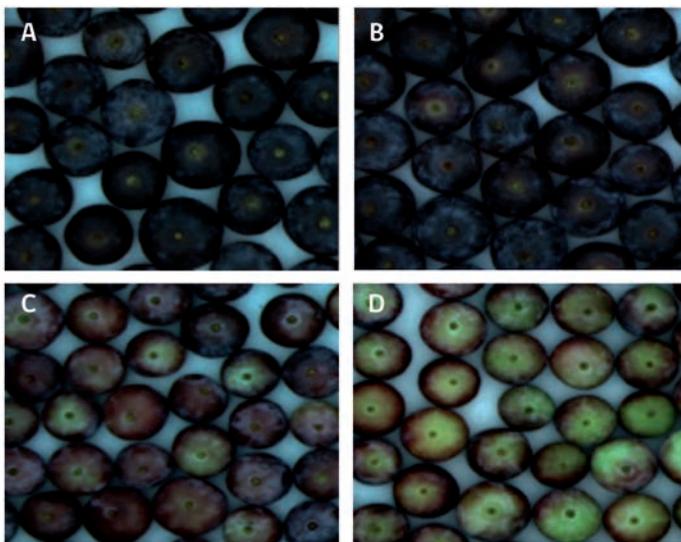


Figura 3.11. Grados de madurez del arándano: a) sobre maduras, b) maduras, c) medio pintón, d) pintón. (Fuente: elaboración propia).

La cámara NIR seleccionada corresponde a una cámara de alta resolución que facilita el posterior procesamiento de las imágenes. Esta corresponde a una cámara QSI, que posee una alta sensibilidad, amplio rango dinámico, tasas de lectura doble, rendimiento de ruido muy bajo y la posibilidad de montar ruedas portafiltros internas (Figura 3.12.).



Figura 3.12. Cámara QSI. (Fuente: elaboración propia).

Determinación de distancia para fabricación de carcasa del prototipo

Antes de realizar la carcasa del prototipo, es necesario tener en cuenta los puntos anteriormente mencionados (cámara, filtros cámara e iluminación), así como también la distancia a la que se ubicará la cámara del objeto, en este caso en particular bayas. La idea es generar un software que además determine el diámetro de bayas de manera automática a través de las imágenes capturadas, para disminuir el tiempo en que se realiza manualmente.

3.5. Software para clasificación del estado de madurez

Se capturaron varias imágenes con las bayas separadas por clases subjetivamente, para obtener las curvas espectrales de cada baya, discriminando las que se salgan de los rangos medios (Figura 3.13.). A partir de varias curvas (conjunto de datos) espectrales por clase, se determinaron los rangos espectrales de cada tipo a clasificar (Figura 3.14.).

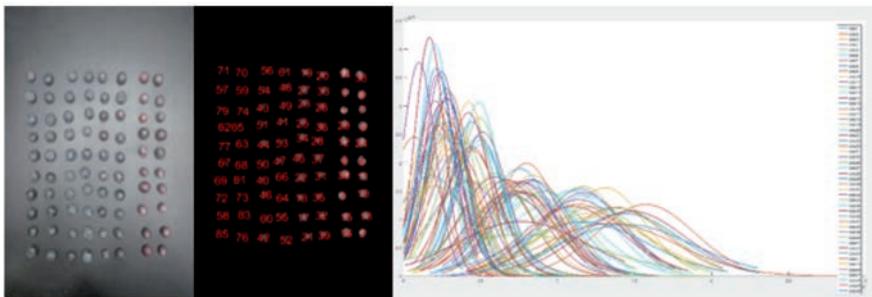


Figura 3.13. Curvas espectrales para cada baya, diferenciación de clases. (Fuente: elaboración propia).

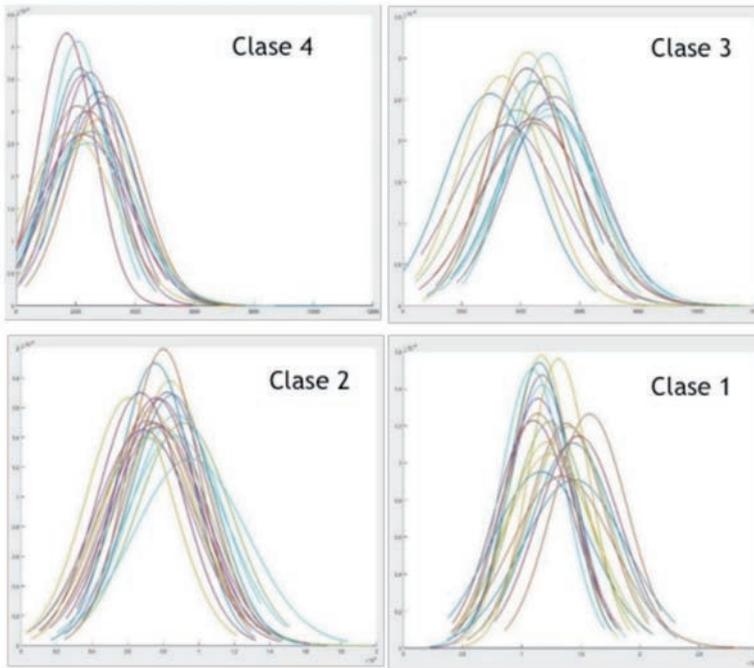


Figura 3.14. Curvas espectrales para cada baya, para diferenciación de clases o estados de madurez. (Fuente: elaboración propia).

Una vez definidos los rangos, se genera el software de clasificación. Lo primero que realiza el programa es el pre procesamiento de la imagen, donde se mejora la calidad de este, aplicando filtros y eliminando ruidos, para realizar así el trabajo posterior.

Luego se detecta cada baya mediante técnicas de detección de objetos, lo que consiste en transformar puntos de la imagen en un espacio de parámetros. La idea es encontrar curvas parametrizables (círculos) (Figura 3.15.). Tras detectar los círculos o bayas, se obtienen las propiedades de cada una, se extrae el promedio de los píxeles de cada baya y a partir de este valor se realiza su clasificación.

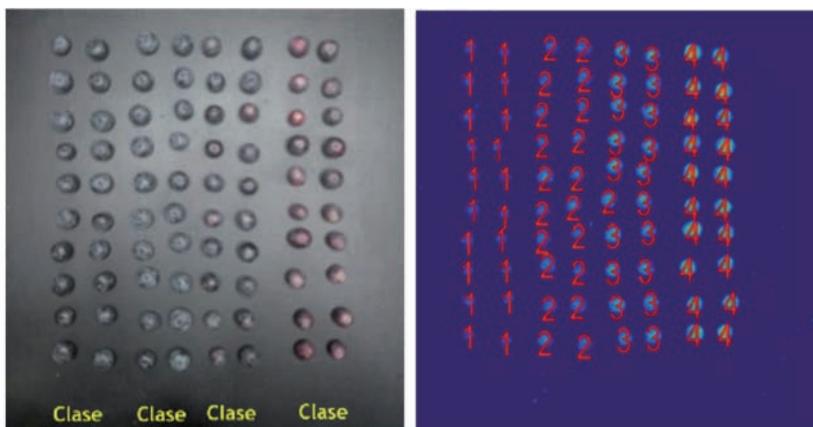


Figura 3.15. Clasificación de arándanos separados visualmente. (Fuente: elaboración propia).

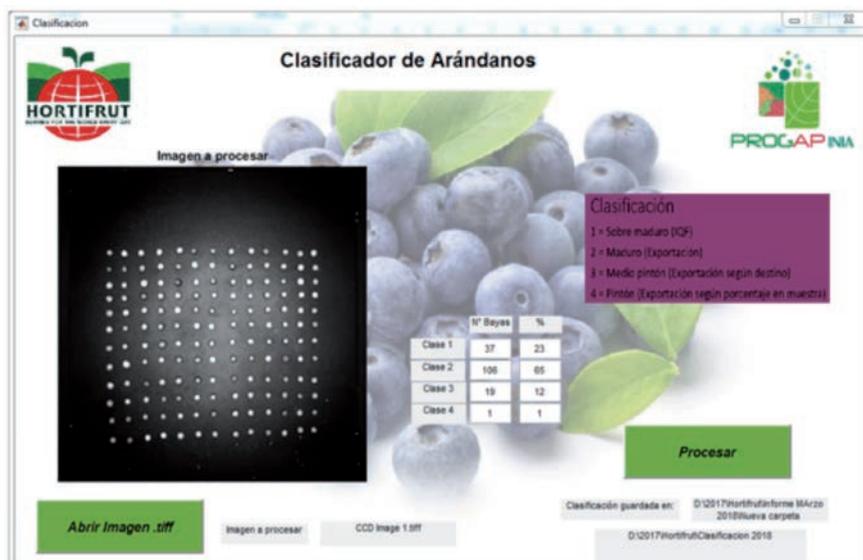


Figura 3.16. Software de clasificación de frutos para determinar su índice de madurez. (Fuente: elaboración propia).

Finalmente, el software de clasificación de frutos se presenta como se muestra en la Figura 3.16. En este se introduce la imagen obtenida de la cámara QSI de las bayas en formato tiff. Luego se presiona el botón “Procesar” para procesar dichas imágenes. El resultado que se presenta en el recuadro corresponde a la cantidad de bayas por clase que hay y guarda una imagen en la carpeta, señalando las bayas con sus respectivas clases.

¿Cómo se relaciona la madurez fenólica con la cámara NIR?

La madurez fenólica aumenta las concentraciones de antocianinas progresivamente, hasta alcanzar una concentración máxima, para luego disminuir en el periodo de sobre madurez. La cohesión celular se ve disminuida debido al efecto del envejecimiento celular, por la degradación de las paredes y membranas celulares. Es por ello que ocurre una liberación de antocianos desde las células, facilitando su extracción y oxidación. La baya con un adecuado estado de madurez fenólica, posee una cutícula con altos contenidos de antocianos, mejorando las características organolépticas de los frutos.

En las Figuras 3.17. y 3.18., se muestran los resultados de la cuantificación de los polifenoles totales. De acuerdo a estos resultados, las bayas de arándanos presentan mayor contenido de polifenoles en el estado 4, determinado con el método de reflectancia como los frutos con madurez ideal.

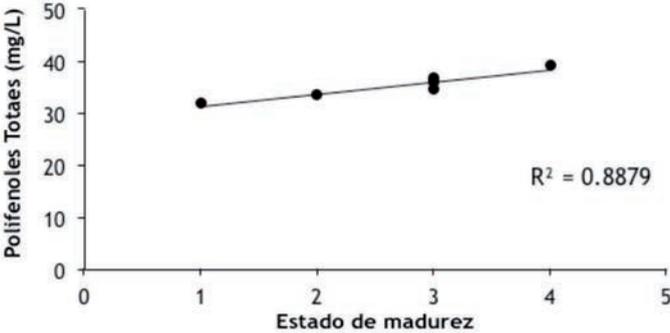


Figura 3.17. Polifenoles totales en función de la clasificación del estado de madurez. (Fuente: elaboración propia).

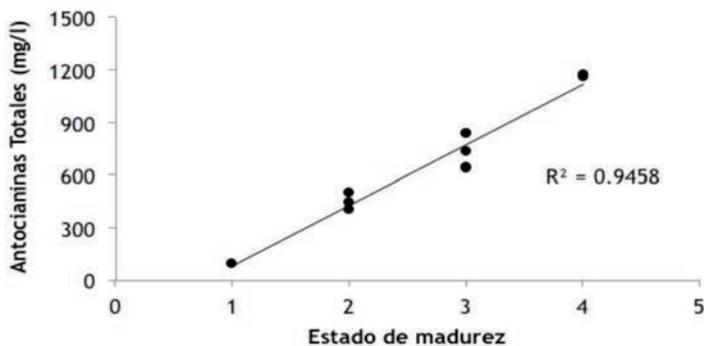


Figura 3.18. Antocianos totales en función de la clasificación del estado de madurez. (Fuente: elaboración propia).

Al visualizar ambos gráficos, se puede evidenciar que la clasificación realizada sobre el formato óptico permitió una clara diferenciación en los niveles de estos parámetros, al agruparse cada estado de madurez determinada por los niveles ópticos dentro de una zona bien definida.

Una vez que los rangos están definidos, se genera el software de clasificación, tal como lo muestra la Figura 3.16. Este nuevo software entrega un porcentaje de 200 bayas clasificadas para cada clase y su porcentaje de madurez correspondiente.

Capítulo 4

Plataformas de gestión de información espacial y temporal

Stanley Best S., Paula Vargas Q.

4.1. Sistemas de logísticas de producción

Los sistemas de logística hacen referencia a una estructura de procesamiento, almacenaje y visualización de la información. En la actualidad existen muchas empresas que prestan servicios de plataformas online, para estructurar la información generada desde el campo hasta el destino final de la producción, en su mayoría operan de forma aislada e independiente. El futuro de la agricultura digital debe apuntar a tener una plataforma única que permita reunir toda la información, y así promover un sistema amigable que integre cada una de las herramientas y sensores inteligentes, de manera que ayuden a los productores, encargados de campo y empresas exportadoras, a obtener la información necesaria para manejar de forma oportuna el campo, y optimizar la cadena de producción y comercialización del producto final.

Cuando hablamos de gestión de la información, no solo se hace referencia al control de la producción, sino también, a un sistema de trazabilidad de las cosechas y comercialización que permite una estructura para las empresas. Se deben recolectar y registrar los datos relevantes para la institución, que pueden influir en la trazabilidad de los alimentos, en toda la cadena de suministro.

Las plataformas y aplicaciones móviles deben contar con un servidor compuesto por una DATA BASE, alimentada con datos de monitoreo por sistemas electrónicos (continuos o discontinuos), como también de distintas variables agronómicas monitoreadas en forma manual, las cuales son ingresadas al sistema para su visualización y análisis. Así se recibe información de entrada para ser procesada por los algoritmos matemáticos de los modelos de predicción de campo (como los modelos antes expuestos) y un output de salida para ser visualizados por los usuarios en PC y teléfono celular (Figura 4.1.).

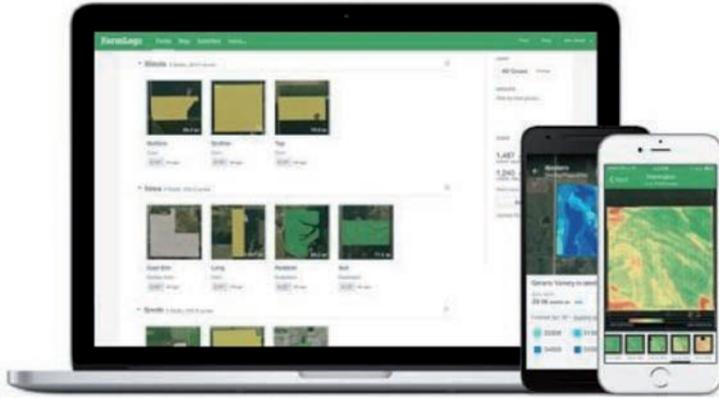


Figura 4.1. Sistema Cropio para manejo de sistemas agrícolas. (Fuente: John Deere).

La tecnología e internet están cambiando todo y la sociedad, en general, cada vez va asumiendo mejor estos cambios. El fin de crear plataformas es que resulten funcionales en campo. Para esto se necesita que tengan el formato móvil, de manera que permitan visualizar la data en terreno a través de teléfonos celulares, ya sea conectados con sensores de monitoreo o para ver mapas de especialización por medio de coordenadas de GPS. Estos sistemas pueden ser del tipo online, pero también se recomienda que posean la capacidad de funcionamiento off line (sin internet), especialmente en los campos donde el internet es débil o inexistente.

El desarrollo de estas tecnologías también debe ir de la mano con el desarrollo de nuevas capacidades que se requieren de parte de los agricultores para su manejo y condiciones para acceder a ellas (internet, telefonía móvil u ordenadores). La implementación de estas nuevas herramientas tecnológicas será fundamental en el conocimiento de las dinámicas de mitigación y adaptación moderna de la agricultura al cambio climático.

4.2. Plataforma de gestión y visualización desarrollada

Las tecnologías de la información y de la comunicación (TIC) son un conjunto de tecnologías que permiten el acceso, producción, desarrollo y comunicación de información, presentada en diferentes códigos, como texto, imágenes y sus elementos más representativos, siendo estos la computación, los teléfonos

móviles e internet. Sobre este pilar de la actual demanda en los procesos agrícolas, el proyecto FIA “Estimación del rendimiento y calidad de los huertos de arándanos basados en herramientas de agricultura de precisión e IoT (internet of things) para la optimización de las variables de producción”, desarrolló una plataforma para ser utilizada con la información obtenida (Figura 4.2.).

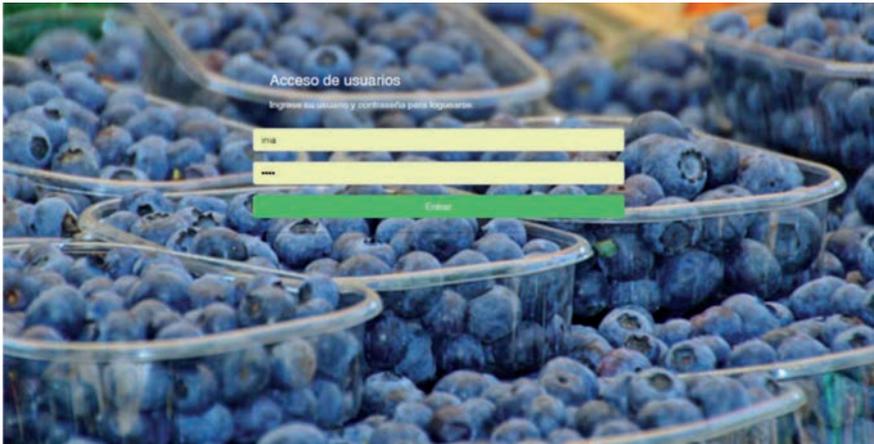


Figura 4.2. Pantalla de inicio de la plataforma de gestión de rendimientos y calidad en arándanos. (Fuente: elaboración propia).

Esta plataforma web muestra diferentes opciones de uso, las que se pueden ver fácilmente en el menú de inicio, permitiendo visualizar las múltiples utilidades que ofrece. Estas se pueden encontrar en el sub-menú ubicado en la parte inferior de la pantalla (Figura 4.3.). Algunas de ellas son:

- Rendimiento localizado, en el que se ve todo el trabajo realizado con el dron en campo, para poder tomar la data y luego ser analizada.
- Proyección de rendimiento, cuya función es mostrar de forma macro el rendimiento asociado a los cuarteles en campo.
- Estimación de calidad del huerto, donde se advierte todo el trabajo asociado a la calidad de la fruta que viene del huerto, la forma en que se presenta y los diferentes parámetros asociados a su calidad, para así determinar la calidad de la fruta.



Figura 4.3. Menú explicativo de acciones posibles desarrolladas por plataforma. (Fuente: elaboración propia).

En la plataforma, según la clave con que se ingrese, se encontrará con el despliegue de esta y de los cuarteles ya incorporados en sistema, tal como lo podemos ver en la Figura 4.4.



Figura 4.4. Esquema de entrada de la plataforma de gestión de rendimiento y calidad de arándanos. (Fuente: elaboración propia).

Al seleccionar la opción “Ingresar a plataforma”, se volverá al menú espacial donde se podrán observar los polígonos en que se están trabajando con el servicio de datos. Aquí, en el menú superior derecho, se podrán ingresar nuevos polígonos al predio donde se está trabajando.

Por otra parte, dentro de la plataforma, al posicionarse en un cuartel y hacer click con el botón derecho del mouse, se desplegará el menú de opciones asociado a los diferentes componentes de esta plataforma (Figura 4.5.). La primera fase es subir la estimación de rendimiento espacial (explicada y validada anteriormente en esta publicación), de manera que sirva de base para la localización de puntos de muestreo tanto para la captura de información por el dron, como para la toma de muestreo de fruta, la que será evaluada en el equipo de medición de calidad (también explicado anteriormente).

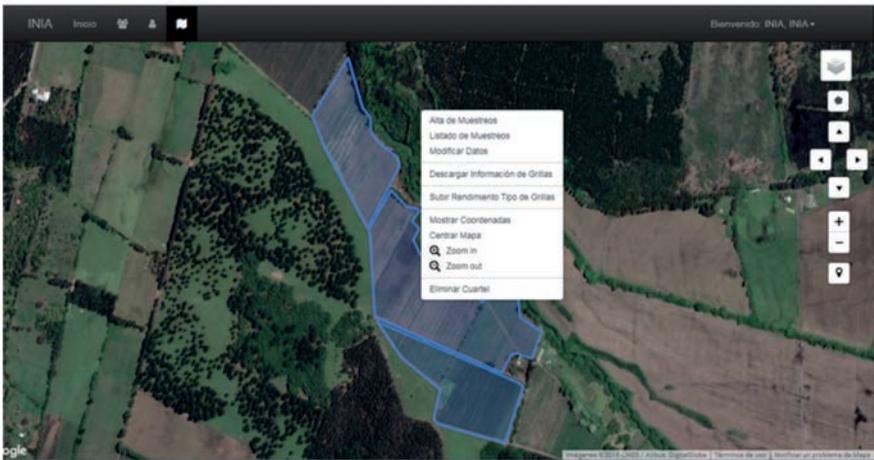


Figura 4.5. Visualización de menú principal en la plataforma. (Fuente: elaboración propia).

El archivo resultante de la estimación de rendimiento es subido a la plataforma. Una vez que el mapa de rendimiento ya está cargado, se puede pasar a la segunda fase, la cual implica la selección de puntos de monitoreo, tanto para las capturas con dron, como para la recolección de muestras, para la evaluación de calidad de frutas con equipo estacionario desarrollado por este proyecto (Figura 4.6.).



Figura 4.6. Esquema explicativo de menú de monitoreo. (Fuente: elaboración propia).

La plataforma también brinda la posibilidad de visualizar el listado de muestreos a través del pop up, donde estarán todos los muestreos asociados (rendimiento o calidad) al cuartel que se consulte. Lo anterior, puede estar asociado a la fecha propuesta de realización, al responsable del muestreo, según cuando se realizó o si está pendiente, y a las diferentes acciones posibles de realizar, las que se pueden ver en la Figura 4.7.

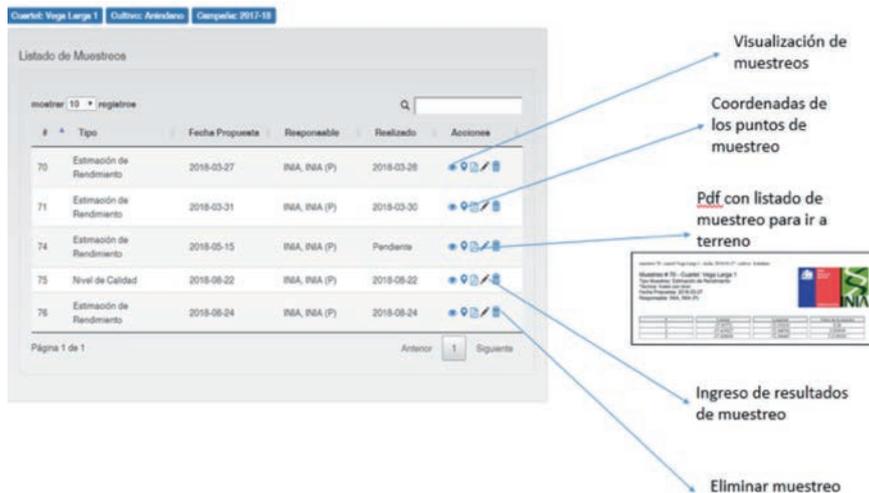


Figura 4.7. Pop up de visualización de muestreos y acciones posibles de realizar en plataforma. (Fuente: elaboración propia).

Una vez ingresadas las muestras, el sistema interno de la plataforma desarrolla los mapas interpolados con la información ingresada, generando los planos en formato de base de datos que permiten no solo ser visualizados, sino también utilizados como información base para estudios más avanzados de modelos. Finalmente, tal como se aprecia en el contexto del proyecto, se generó un sistema que integra la estimación del rendimiento y la calidad de la fruta bajo un esquema de operación. Los resultados de rendimiento y calidad de fruta no solo serán útiles para la evaluación y logística de cosecha, sino también para ajustes en labores agronómicas como podas, fertilizaciones post cosecha, entre otros (Figura 4.8.).



Figura 4.8. Esquema de operación del modelo de estimación del rendimiento y calidad de fruta. (Fuente: elaboración propia).

De esta forma, la data integrada de campo en sistemas de información robusta, será utilizada por los encargados de campo, asesores y servicios agrícolas, quienes podrán reducir los problemas de producción causados por el cambio climático (Figura 4.9.).

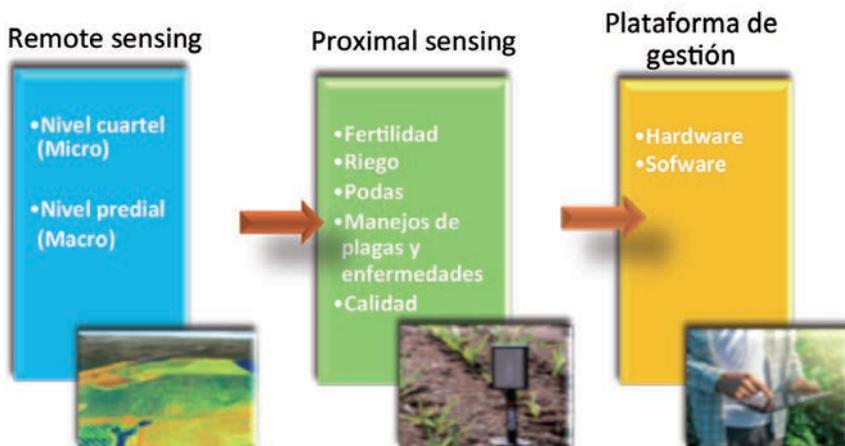


Figura 4.9. Interacción del modelo gestión, para la integración en campo de la Agricultura de Precisión. (Fuente: elaboración propia).

4.3. Sectorización y logística productiva

Mediante una buena estimación de rendimiento para la cosecha, se estima la cantidad de cosecheros necesarios, lo cual es muy beneficioso para la rentabilidad económica de las empresas agrícolas (productores). A su vez, la caracterización de los rendimientos y calidades asociados a los problemas de cada zona permitirá, al productor, mejorar su gestión productiva, lo que tendrá también una incidencia clara en sus rentabilidades.

Los mapas de rendimiento proporcionan potentes soluciones para automatizar el manejo sitio-específico que incluye todas las prácticas de producción agrícola utilizadas para ajustar el uso de insumos y la eficacia de los riegos sobre eficiencia de cultivos a través de los monitores. El manejo preciso de los agroquímicos y riegos hacen posible que los agricultores adquieran información detallada de las características espaciales de sus campos, lo que permite un manejo de estos recursos de acuerdo a las necesidades del cultivo.

En concreto, lo que se espera al crear mapas de rendimientos basados en la variabilidad espacial de los sectores, es que ayude a los encargados de huerto a corregir las aplicaciones de agroquímicos y determinen, eficientemente,

el uso de los riegos. En conjunto, esto ayuda considerablemente a disminuir la heterogeneidad de la producción y la elaboración de medidas correctivas previas que ayuden al cultivo a responder de una mejor manera a las incidencias climáticas. De esta manera impiden el uso deficiente de los recursos, creando una agricultura más sustentable y sostenible.

El proyecto permitió contar con información cualitativa de la calidad de la fruta, a través de los mapas de rendimientos, para incluirla en la trazabilidad para exportación y, de esta forma, avalar la calidad final del producto. Todo lo anterior significa optimizar la producción y expandirse a nuevos mercados de altos estándares, asegurando la calidad y la estabilidad fue la exportación, lo que se traduce en ventajas competitivas. El objetivo fue entregar una herramienta de fácil utilización e interpretación para los asesores en terreno, procurando ayudar en la toma de decisiones de logísticas del huerto, apuntando a la estimación del rendimiento de la planta, a la calidad de los frutos y su durabilidad en postcosecha, pues son factores determinantes para definir los destinos de comercialización.

Capítulo 5

Nuevas líneas de innovación para la adaptación al cambio climático a través de una agricultura sustentable

Paula Vargas Q., Valentina Alarcón P., Fabiola Flores P.

5.1. Sistemas de monitoreo no destructivo a través de óptica de espectrometría y tecnología (OST- SMART) para el control y gestión de la variabilidad espacial de la producción y la calidad

La agricultura se enfrenta a grandes desafíos, como el estancamiento del rendimiento y calidad debido a la disminución de la tierra cultivable provocado por la degradación de suelos, manejos agronómicos deficientes, escasa disponibilidad de agua, entre otros factores, como consecuencia del cambio climático. En este escenario, se dificulta la producción de alimentos para una creciente población que, se estima, superará los 9.700 millones para 2050 y será bajo condiciones limitantes de recursos naturales. Por lo tanto, es urgente rediseñar la agricultura para hacerla más eficiente y efectiva en uso de recursos, y lograr la sostenibilidad.

Se hace necesario diagnosticar el estado de los cultivos, en términos de trazabilidad y producción, para aumentar la eficiencia en rendimiento y calidad de la producción, evitando pérdidas económicas. Actualmente, la agricultura está sufriendo un estancamiento en los retornos al productor, situación que se torna compleja con el cambio climático. Este provoca un aumento de los costos de producción asociados a los insumos hídricos, energéticos y mano de obra, lo que incide en el resultado productivo y económico de los cultivos. Por ello, la meta es mejorar la productividad a través de la calidad, para que permita obtener mejores precios de venta, tanto en fresco como para procesos agroindustriales.

Por otra parte, el cambio climático afecta la calidad y condición de los frutos, la maduración y, en general, el comportamiento de cada variedad. Hoy en día se cuenta con metodologías o herramientas que evalúan la calidad de las frutas, dando un diagnóstico directo a través de un análisis químico. Sin embargo, estas metodologías son poco utilizadas, debido al tiempo de entrega de resultados por parte del laboratorio (costo/beneficio). Debido a esto, los análisis químicos limitan la toma de decisiones de forma oportuna, afectando los planes de logística de producción y comercialización. Las otras vías utilizadas corresponden a recomendaciones bibliográficas, quedando sujetas a la experiencia e intuición del técnico o asesores de campo, que muchas veces son erráticas, debido a que no están realizadas para cada condición edafoclimática específica, como se explicó en los capítulos anteriores y que, asociadas a la inestabilidad climática, causan enormes pérdidas en la calidad comercial de la producción. El factor calidad y condición de fruta es un ejemplo de ello, ya que pueden variar entre un 50 y 80 % en el campo, dependiendo de la interacción de los manejos agronómicos y el cultivo, que además son gravemente afectados por los cambios climáticos, trayendo consigo fluctuaciones de temperatura, lluvias inoportunas y, en algunos casos, escasez hídrica. Estos, al ir asociados a técnicas agrícolas ineficientes, afectan negativamente la calidad de las frutas, tanto para procesos agroindustriales, como para las ventas en fresco. Es necesario intervenir de forma rápida e innovadora, con la ayuda de sensores (espectroscopía), que permitan generar una herramienta que diagnostique parámetros agronómicos sobre las podas y la calidad de frutos, y que puedan ser utilizados como estándar de segregación, ayudando a los productores a tomar medidas correctivas ante la inestabilidad climática que afecta a los cultivos.

El Programa de Agricultura de Precisión de INIA, junto a Hortifrut S.A., ejecutó entre 2018 y 2021, el proyecto “Sistemas de monitoreo no destructivo a través de óptica de espectrometría y tecnológica (OST- SMART) para el control y gestión de la variabilidad espacial de la producción y calidad en uvas y arándanos basado en herramientas de agricultura de precisión que para mitigar el efecto del cambio climático”, dentro de la línea de Biosensores, consistente en la calibración de un equipo de uso comercial de bajo costo, para evaluar la calidad y condición de las frutas (arándanos y vides). En arándanos permite obtener los valores de grados brix, antocianinas, polifenoles, materia seca, firmeza y acidez titulable, y en bayas de uvas se obtienen valores de fenoles, brix y acidez titulable. El desarrollo propuesto permitirá a los encargados de campo, visualizar en tiempo real la situación específica de sus predios, asegurando diagnóstico instantáneo de la evolución de frutos.

El proyecto contó con datos provenientes de todas las zonas productivas, con una duración de 4 años y más de 5 mil datos por variable, para ajustar los modelos quimiométricos a un r^2 de 95 % de eficiencia, los que fueron montados dentro de un servidor para alojar los datos y predecir. Hoy está en fase de validación en distintos campos distribuidos dentro Chile, que son parte de la producción nacional para cuantificar la efectividad.

Este equipo mide de forma instantánea, en menos de 1 minuto, los valores, que podrán ser obtenidos en un smartphone conectado a un servidor, donde se alojarán los datos colectados por el usuario y su georreferenciación, para localizar las muestras y poder proyectar la información dentro del predio y generar mapas de cosecha diferenciados. Además, puede ser utilizado en packing y en el destino de llegada de las frutas para validar la calidad de bayas.

El sensor seleccionado es preciso, de fácil uso y de bajo costo y permite abarcar un gran número de muestras en tiempo limitado. Además, impide pérdidas por análisis y al estar asociado a las herramientas de AP e IOT, permite una rápida conexión, generando adecuadas respuestas para intervenir de una forma óptima en las logísticas de producción y comercialización.



Figura 5.1. Esquema de herramienta del Laboratorio Digital. (Fuente: elaboración propia).

Los productores obtendrán información real y de rápido acceso sobre el direccionamiento de estado de la calidad en la temporada, por medio de un sensor a un equipo móvil conectado con un servidor de datos. Este proyecto está siendo dirigido para almacenar datos actuales y de los últimos años, permitiendo a los agricultores visualizar proyecciones de las próximas temporadas, siendo capaces de medir la susceptibilidad del cultivo en distintos parámetros agroclimáticos.

Además, reúne la información de la calidad asociada a la detección de puntos evaluados con el sensor Smart a través del huerto, y en conjunto serán capaces de determinar las logísticas de cosecha y producción. Este proyecto concluye con un nuevo servicio digital, que abre nuevos horizontes para Ferialert, Scuat fungi alert y la adaptación de nuevas herramientas para el rubro agrícola que sirve para determinar y detectar un diagnóstico del cultivo y la producción de forma remota.

Cabe señalar que este proyecto, respaldado por los Start-Up internacionales de sensores presentes en Chile, cuenta con la colaboración de la viña Valdivieso, interesada en mejorar la calidad de sus vinos.

Comentario final

El actual reto de la agricultura es un enfoque de sistemas sinérgicos para la gestión y la toma de decisiones, tanto productivas como en las estrategias de comercialización. No hay una varita mágica que puede lograr todos los objetivos o tareas, por lo que los productores deben aprender a utilizar una variedad de métodos y aprovechar múltiples tecnologías para lograr, en última instancia, un mayor éxito que se mide en ganancias por hectárea.

El beneficio se puede lograr a partir de la reducción de los insumos, el aumento de los rendimientos o una combinación de ambos. Pero mientras más productores de tecnología y datos implementan en su enfoque a los sistemas individuales, mayor es el grado de dificultad que encuentran en la fusión de esta información con el fin de generar los resultados deseados.

La empresas hortofrutícolas requieren avanzar en nuevos desarrollos que rentabilicen a sus productores mediante la utilización de nuevas tecnologías que potencien, tanto los rendimientos, como la calidad de los productos que se producen, que sea de fácil utilización e interpretación por los usuarios de campo con repuesta eficiente y oportunas, ya que su principal objetivo es potenciar a los grandes, medianos y pequeños agricultores para que alcancen altos niveles de rendimientos, y así procurar que sea un negocio estable y duradero en el tiempo, logrando abastecer en su totalidad la demanda del mercado a causa del aumento de la población.

La rentabilidad del rubro está en mejorar el manejo agronómico con mayor precisión en las decisiones de campo con sistemas en nube (IoT), lo que permite monitorear, tanto diariamente, como año a año los resultados, permitiendo así a profesionales y técnicos, rentabilizar sus tiempos y, por ende, el de los productores, reduciendo la inestabilidad de los retornos, factor que fidelizará estos con la empresa.

Las combinaciones entre hardware y software son innovadoras en el desarrollo de una industria moderna acorde a los requerimientos del mundo actual, permitiendo optimizar los insumos asociados a producción y generando nuevas oportunidades para el empleo agrícola.

Chile necesita crecer en cuanto a desarrollo e inserción de nuevas tecnologías que maximicen la eficiencia de los sectores agropecuarios, específicamente el área frutícola, que representa más del 60 % de la producción agrícola.

La producción de arándanos, al ser un atractivo comercial para exportación, está dando origen a nuevos competidores como Uruguay, Argentina, Perú y México, más el constante aumento de la oferta de arándanos en fresco, lo que obliga a los productores a intervenir de forma rápida e innovadora con la ayuda de tecnología de información y comunicación (TIC), aplicada a la agricultura digital que permita mantener el liderazgo como país exportador de arándanos del hemisferio sur.

Literatura consultada

Central Energía, 2011. Efectos del cambio climático en la generación hidroeléctrica en Chile. Central de información y discusión de energía en Chile. <http://www.centralenergia.cl/2011/01/17/efectos-del-cambio-climatico-en-la-generacion-hidroelectrica-en-chile/>

CEPAL, 2012. La economía del cambio climático en Chile. Gobierno de Chile. <http://hdl.handle.net/11362/35372>

Collins A., 2014. Status, trends & priorities in soil management. National Land Resource Centre. http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/GSP/docs/WS_managinglivingsoils/Collins_NZ.pdf

Cortés, C., 2020. Megasequía, la historia continúa. <https://blog.meteochile.gob.cl/2018/12/28/megasequia-la-historia-continua>

Escola A., Martínez J. y Arno J., 2017. Agricultura de Precisión: ¿Qué se oculta detrás del nombre? Universidad de Lleida. <https://repositori.udl.cat/bitstream/handle/10459.1/65447/025715.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

Gilabert, M. A., González-Piqueras J., y GarcíaHaro F., 1997. "Acerca de los índices de vegetación", Revista de Teledetección. España.

Country Finance Group, 2015. Entrevista con agricultores en Francia, Alemania, Polonia y Gran Bretaña.

Kader, A., 1999. Fruit maturity, ripening, and quality relationships. Acta Hort. 485, 203-208.

Kreimer, P. (2003). Las TICs en la agricultura de precisión, ceditec (centro de difusión de tecnologías ETSIT-UPM).

Martínez-Casasnovas J., 2018. Tierras Agricultura. Recuperado de <https://repositori.udl.cat/bitstream/handle/10459.1/64588/027158.pdf?sequence=1&isAllowed=>

Martínez J., y Arnó J., 2014. Centro de investigación en Agrotecnología. http://www.acenologia.com/dossier/dossier143_0614.htm

Oficina de estudios y políticas agrarias, 2019. Panorama de la agricultura chilena. Ministerio de agricultura, Chile. <https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2019/09/panorama2019Final.pdf>.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), 2004. El estado de los mercados de productos básicos agrícolas. Dirección de información Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. <http://www.fao.org/3/y5419s/y5419s.pdf>

Planet Precision Ag Ebook., 2018. Precision Ag Insights from Frequent Imaging. Smarter Farming. <https://assets.planet.com/docs/planet-precision-ag-ebook-2018-smarter-farming.pdf>

Prakash, S., Wu, X., y Bhat, S.R., 2012. History, Evolution, and Domestication of Brassica Crops. *Plant Breeding Reviews* 35:19-82.

Red Agrometeorológica de INIA, 2020. Frutales y cultivos, grados día. Agrometeorología. https://agrometeorologia.cl/grados_dia/GD_5_AYER



Liderando la agrociencia para un futuro sostenible

Boletín INIA / N° 457

www.inia.cl

