

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.

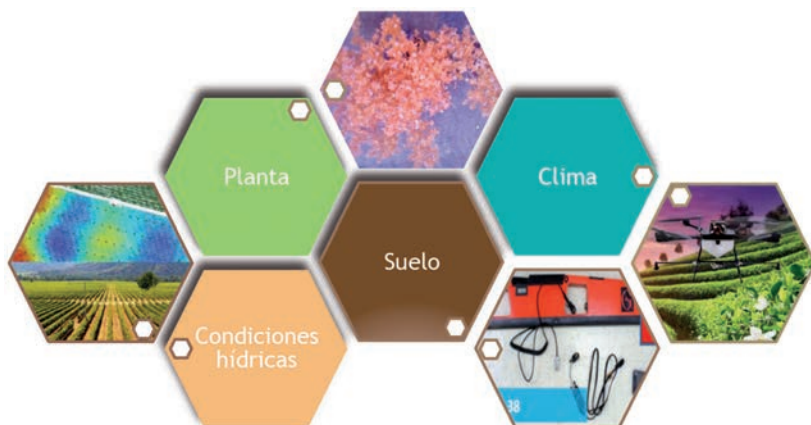


Figura 2.2. Interacción de la Agricultura 4.0 con el cultivo. (Fuente: elaboración propia).

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.

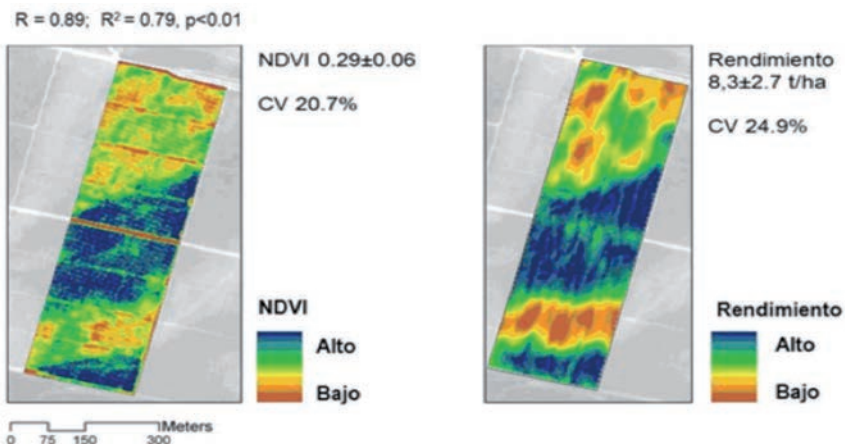


Figura 2.3. Ejemplo de mapa de rendimiento obtenido de un mismo potrero (derecha) y de variabilidad de desarrollo de planta (NDVI, izquierda). (Fuente: Martínez y Arnó, 2014).

¿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.

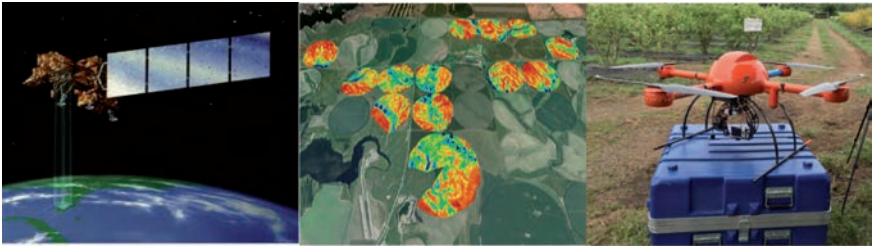


Figura 2.4. Satélite Landsat (USA) para monitoreo de recurso naturales, imagen capturada con sensor multispectral aéreo y sensor activo de terreno, respectivamente. (Fuente: elaboración propia en base a programa Copérnico).

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.).

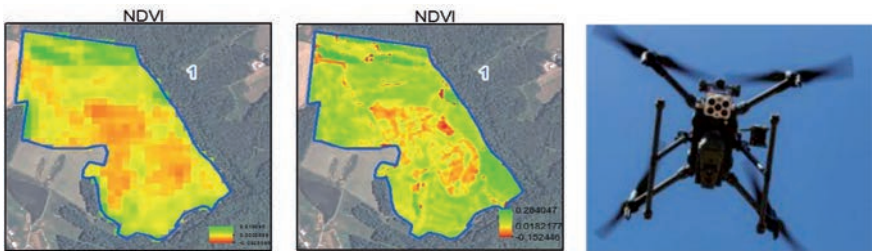


Figura 2.5. Imagen de índice verde o NDVI obtenida por Sentinel 2 (izquierda) y por formato aéreo (derecha) asociada al uso de dron. (Fuente: Elaboración propia).

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.

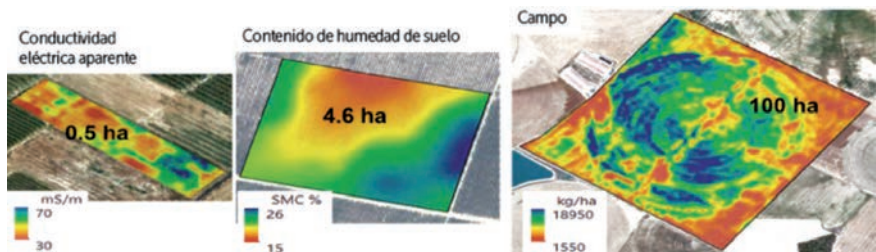


Figura 2.6. Mapa de variación de suelo (conductividad eléctrica, izquierda) su impacto en condiciones hídricas (centro) y expresión de rendimiento del mismo sitio (derecha). Fuente: (Martínez-Casasnovas, 2018).

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.

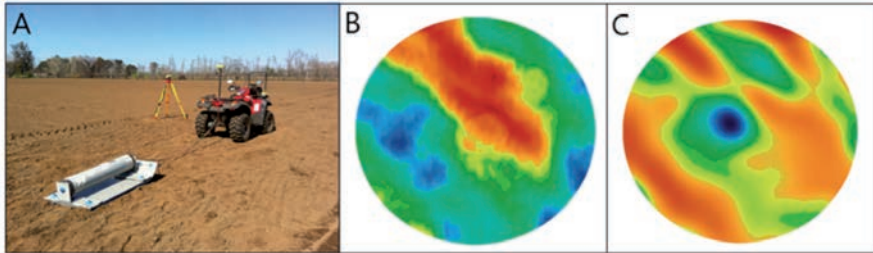


Figura 2.7. A) Unidad sensor electromagnético EM-38 + Sistema RTK para medición de topografía; B) mapa de variabilidad CE de suelo, y C) mapa topográfico del suelo. (Fuente: elaboración propia en base a programa Copérnico).

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.

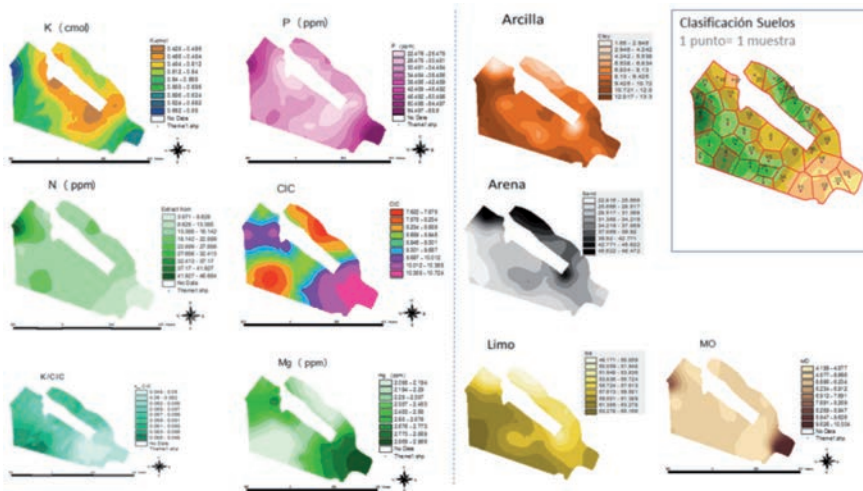


Figura 2.8. Caracterización espacial de suelos, basado en monitoreo de características físico-químicas a través del uso de mapa de EM38. (Fuente: Elaboración propia).

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.

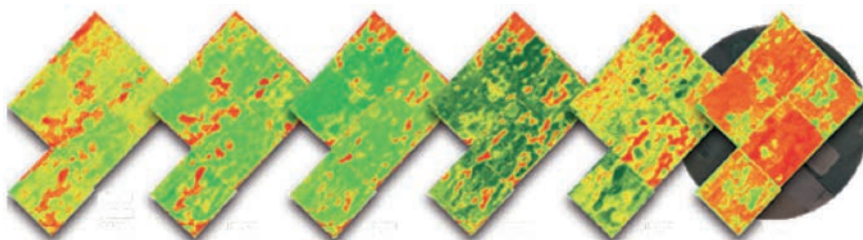


Figura 2.9. Ejemplo gráfico de la distribución variable de rendimiento, evaluado en mapas en rendimiento de distintos años. (Fuente: Programa Copérnico).

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).

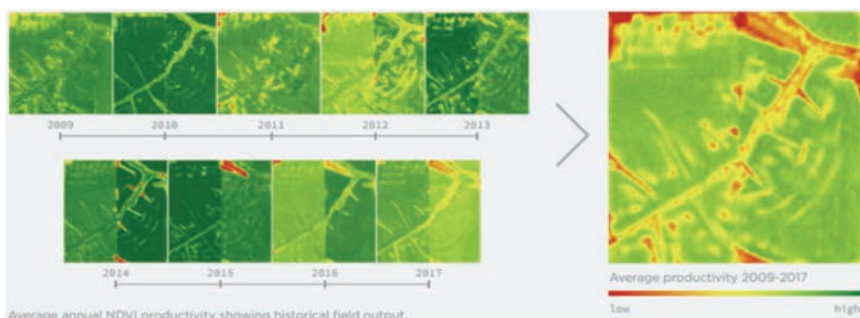


Figura 2.10. Plano de ambientes (derecha) desarrollado a partir de información satelital de varios años (izquierda). (Fuente: Planet Precision Ag Ebook, 2018).

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.).

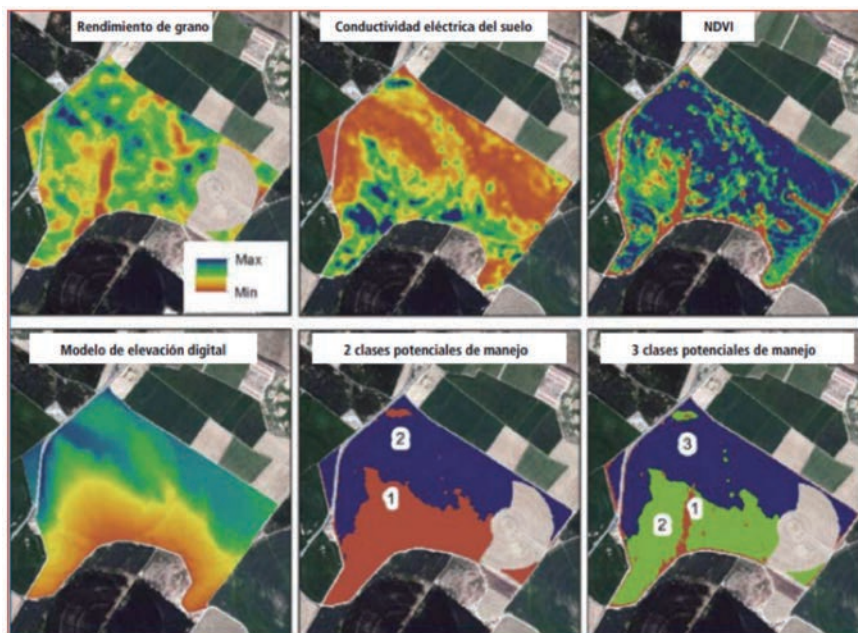


Figura 2.11. Zonificación de ambientes (2 y 3 zonas potenciales) basados en análisis multi temporal de datos adquiridos de sensores proximales y remotos. (Fuente: Escola et al, 2017).

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).

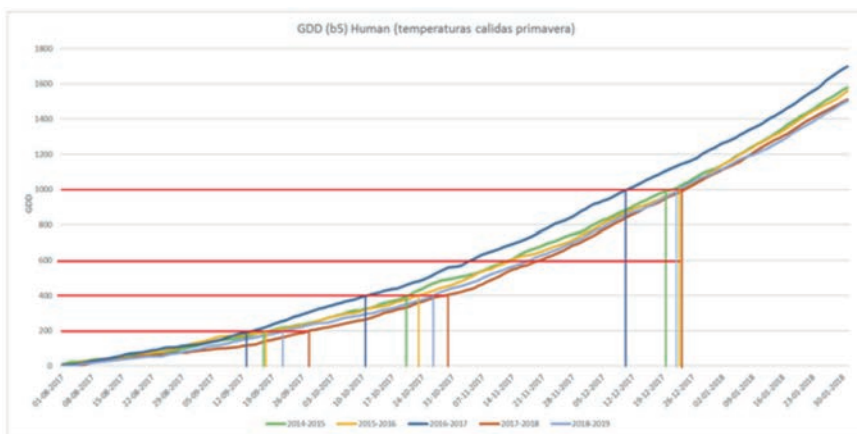


Figura 2.13. Evolución de grados día acumulados (GDD) en las últimas 5 temporadas (2014-2019) de arándanos. (Fuente: red agrometeorológica de INIA).

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.).

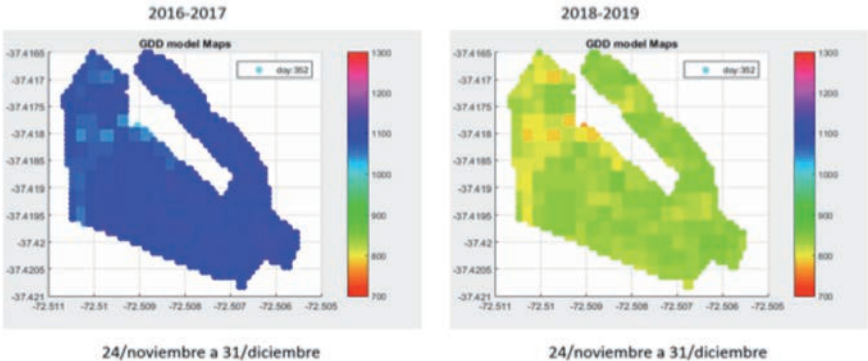


Figura 2.14. Diferencias en dos temporadas distintas (2018 y 2019) de GDD espacio - temporal para el mismo cuartel de arándanos y mismo día (DOY 352) de evaluación. (Fuente: elaboración propia).