Ing. Agr. Pedro C. Towers

Mapeo de Variabilidad de Vid con NDVI

Edición 2009

AgriSat

Prefacio

Esta guia ha sido escrita con el fin de ilustrar de modo general el uso de los mapas de vigor en viticultura. Su contenido aspira a explicar de manera cualitativa el origen de los datos, las causas de la elección de fuentes para los mismos, la información que actualmente se extrae de ellos con fines prácticos, y algunos enfoques para su aplicación que se fundan en usos actuales. Apunta a responder preguntas que corrientemente se tienen, así como servir de apoyo y estímulo a quienes ya usan la tecnología a fin que hagan de ella un uso más rentable, tanto aplicándolo de maneras nuevas como ideando nuevos usos y productos derivados de los datos.

La aplicación actual es tan variada, y los estudios actuales para mejorar la tecnología en varias direcciones son tan prometedores, que es de suponer que existirá una creciente necesidad por profesionales especialistas en el tema que asistan a viticultores quienes, frecuentemente, trabajan al máximo de su capacidad y tienen escaso tiempo para adquirir destrezas suficientes en todas las herramientas necesarias para hacer uso óptimo de la información espacial, como es el caso de los Sistemas de Información Geográfica. El trabajo está, entonces, dirigido a éstos últimos, a fin de reducirles el esfuerzo de asimilar esta tecnología y hacerles conocer sus alcances y así progresar en su aplicación o ayudarlos a definir lo que necesitan.

El texto no es exhaustivo ni excesivamente cuantitativo. Reúne, en realidad, temas que comúnmente tratamos con clientes y colegas por lo que debe leerse así: es apenas una guía y está lejos de ser un texto técnico o académico completo.

Reunir estos conocimientos ha significado varios años de pruebas, aciertos, errores, y frustraciones. De por si, la percepción remota y la aerofotografía se basan en conceptos relativamente sencillos y claros que pronto resultan esconder complicaciones y requerimientos técnicos inesperados y difíciles. Cuando a eso se suma la necesidad de asociar los datos a variables agronómicas, la complejidad se multiplica sin escrúpulos. Para profesionales como nosotros, formados principalmente en el cultivo de especies anuales bajo condiciones de secano, la viticultura ha resultado, además, un desafío importante. Sin embargo, los viticultores que hemos tratado han sido en general personas inteligentes, sumamente capacitadas, y abiertas. Quisiera agradecerles a todos ellos la paciencia, la simpatía, y su buena disposición para cooperar de manera productiva.

Específicamente quisiera agradecer a Guillermo Yaciofano y Leonardo Sardá del Grupo Peñaflor, a Fernando Puliti de Norton, a Alejandro Livellara de Séptima, y a Julio Chaab de Lurton por sus aportes de datos para ensayos y correlaciones; a Nicholas Morrow de GeoVantage por la provisón de datos, el uso de uno de sus excelentes sistemas, y su apoyo para proyectos dentro y fuera de Argentina; y a mi socio, Rodrigo Bonich, por la solución de cada una de las dificultades técnicas de adquisición y procesamiento que hemos tenido que sortear todos estos años.

Por último, y de modo más general, quisiera agradecer a las siguientes empresas y entidades que nos han suministrado datos o autorizado la exhibición de imágenes de sus fincas:

CONAE:	Comisión Nacional de Actividades Espaciales.
Bodegas y viñedos:	Antucurá; Chandon; Chakana; Gallo Brothers; La Celia; Luigi Bosca; Lurton; Nieto Senetiner; Norton; Peñavid; Renacer; Tapiz; Trapiche; Valle de la Puerta; y Vinpat (NQN).
Productores:	Leviand; Fincas del Inca.
Otros:	Aeroterra SA; Frontera SRL; Proyecto Agricultura de Precisíón INTA Manfredi; Stanley Best (INIA).

Percepción remota para viticultura

El desarrollo de la aerofotografía y, posteriormente, de la percepción remota satelital, ha establecido de manera irrefutable la utilidad de las imágenes obtenidas para ubicar y cuantificar la extensión de rasgos del terreno. Los patrones visibles de textura y forma pueden asociarse a características de una gran variedad de superficies, lo que permite su mapeo y diferenciación conforme el detalle en las imágenes sea el adecuado.

Reflectancia

A la diferenciación por características visibles se ha agregado en las últimas décadas la posibilidad de diferenciación por particularidades espectrales. Esta idea se fundó en el conocimiento derivado de la espectrometría química, que identificó las longitudes de onda del espectro electromagnético que cada sustancia absorbe o refleja cuando es iluminada (Figura 1). Así, del mismo modo que una sustancia pura absorbe y refleja ciertas calidades de luz, si sobre el terreno predominan ciertas sustancias es posible inferir su abundancia de manera remota mediante la medición de la luz reflejada en ciertas porciones del espectro electromagnético. El caso que nos incumbe principalmente es el de la vegetación: en ésta predomina la presencia de pigmentos fotosintéticos cuyo comportamiento espectral es definido.

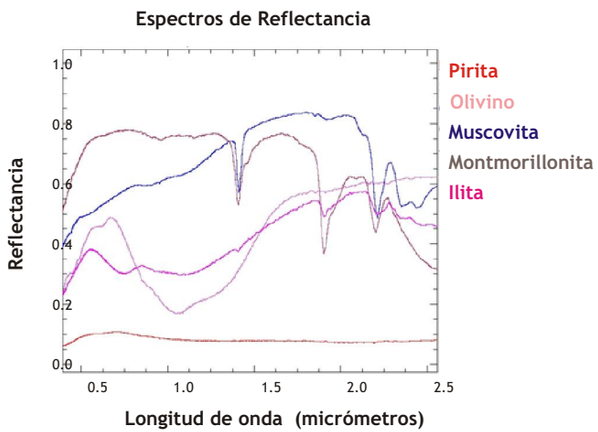

Figura 1: Espectro de reflectancia de minerales comunes. El eje y muestra la proporción de luz incidente que resulta reflejada por dicha sustancia a cada longitud de onda.

Los fenómenos citados son relativamente independientes de la cantidad de luz incidente. En otros términos, la proporción de luz reflejada es la misma aunque cambie la intensidad. Esta proporción se denomina "reflectancia", y como ésta es constante con distintos grados de iluminación, puede emplearse bajo diversas condiciones para determinar el estado de la vegetación u otra superficie.

Si se combinan los efectos físicos sobre la luz que ciertas estructuras tienen con la respuesta de las sustancias que dichas estructuras contienen, la capacidad de identificar la naturaleza de una superficie y su condición aumenta considerablemente. Esta capacidad se ha visto significativamente aumentada con el advenimiento de tecnología digital para la captura de imágenes, la cual dio origen a sensores multiespectrales de uso común en la actualidad.

Un sensor multiespectral es una cámara digital en la que la luz se separa en distintas porciones del espectro electromagnético (Figura 2), denominadas bandas, para elaborar imágenes separadas, cada una de las cuales obtiene de la escena solamente la luz reflejada en esa banda (Figura 3). Típicamente, un sensor multiespectral capta todas las imágenes simultáneamente, por lo que para cada punto del terreno quedan registrados los datos de brillo de cada porción del espectro en una imagen distinta. Esta característica permite graficar el espectro de reflectancia que, a su vez, indica el tipo de superficie del punto en cuestión (Figura 4).

Figura 2: Cámara multiespectral común para uso aerotransportado. Puede apreciarse que se compone de cuatro cámaras independientes, cada una de las cuales captura una porción del espectro

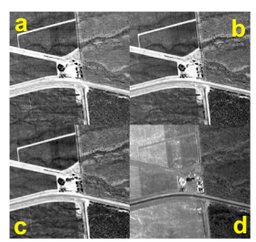

Figura 3: Imágenes de bandas individuales de una cámara multiespectral de parte de una finca en Mendoza, Argentina, capturadas simultáneamente:
a) Luz azul; b)Luz verde;
c) Luz roja; d) Luz infrarroja cercana.

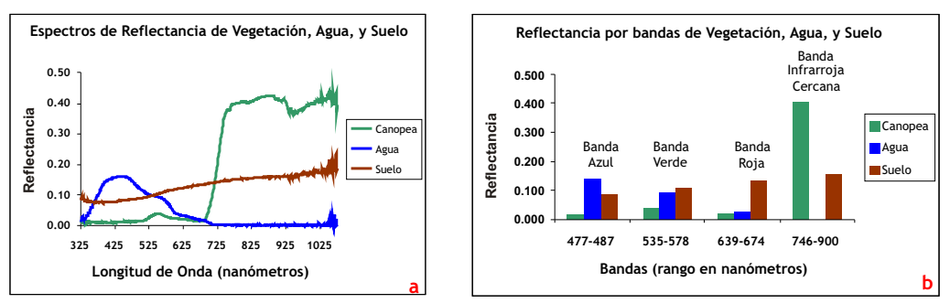

Figura 4: a) Reflectancia continua de superficies de agua, suelo, y cultivo de una finca vitícola, para el rango de longitudes de onda del ultravioleta (UV) al Infrarrojo Cercano (NIR). b) Reflectancia media para cada banda capturada por un sensor multiespectral, de las mismas superficies. Puede observarse como el agua absorbe crecientemente (refleja decrecientemente) las longitudes más largas, y la fuerte reflectancia de la vegetación en el infrarrojo.

El espectro electromagnético abarca un rango muy amplio de radiación (Figura 5). Cuando la fuente de iluminación de una escena es el sol, los sensores que adquieren luz reflejada deben naturalmente estar diseñados para disponer de bandas sensibles a las longitudes de onda que éste emite (Figura 6). Más aún, carece de sentido cuando se estudian rasgos del terreno utilizar bandas que sustancias presentes en la atmósfera puedan absorber y modificar, ya que al pasar la luz por la atmósfera esta resultaría modificada por éstas sustancias antes de ser reflejadas por el terreno, de modo que las diferencias entre sitios o fechas podría deberse a estos fenómenos de atenuación atmosférica y no a diferencias entre sitios del terreno.

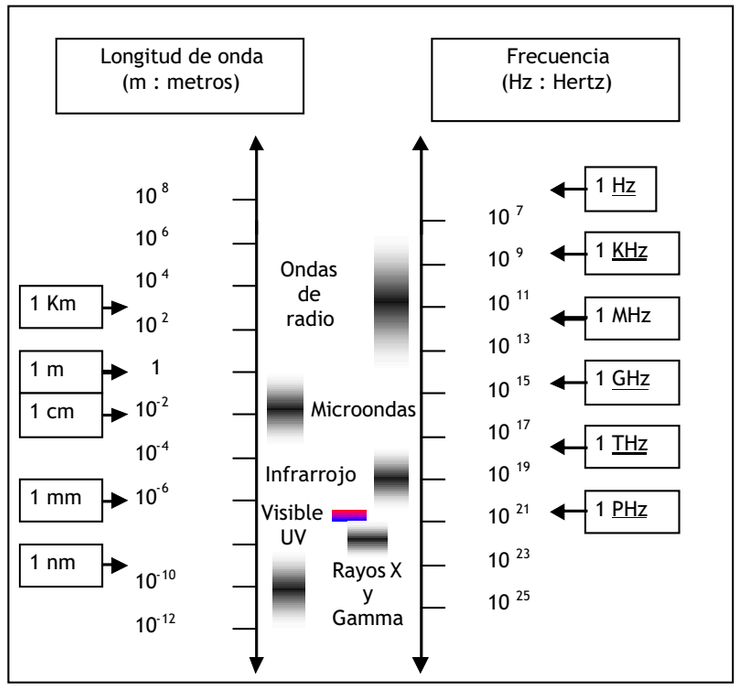

Figura 5: Espectro electromagnético. La radiación abarca un rango muy amplio de longitudes de onda que van desde los rayos gamma hasta las ondas de radio. La porción del espectro visible a los ojos es estrecha y abarca desde los 400 nm hasta los 700 nm.

En términos generales, después de cuatro décadas de observación terrestre con sensores multiespectrales, se han establecido las porciones del espectro que se ven menos afectados por fenómenos atmosféricos y que brindan información de importancia para el relevamiento de la vegetación, el agua, y los suelos (Figura 4).

Reflectancia de la vegetación

Como puede verse en la Figura 4a, la vegetación refleja poca luz del espectro visible, y mucha en la porción denominada Infrarrojo cercano. El espectro visible es la radiación electromagnética a la que son sensibles nuestros ojos, y coincide con el rango de

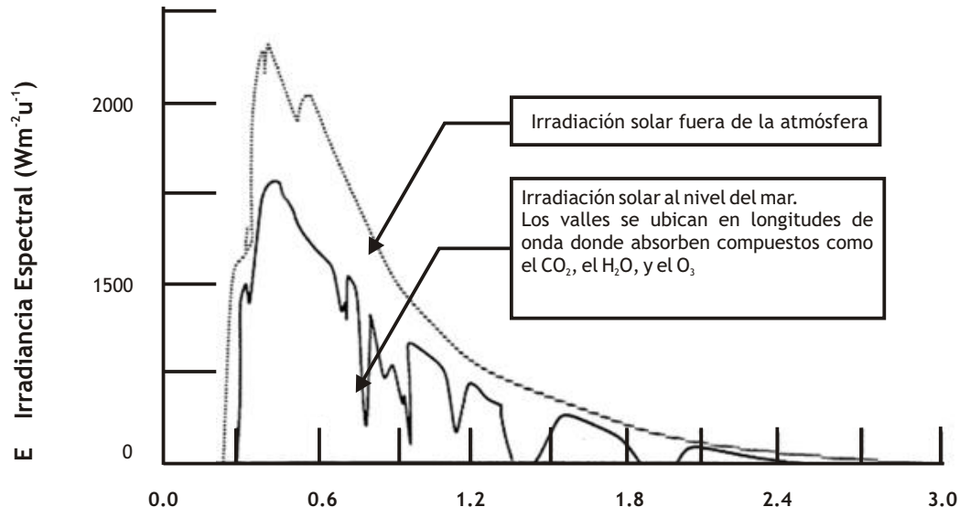

Figura 6: Espectro de emisión solar. La curva punteada corresponde a la potencia de energía electromagnética emite el Sol. Puede verse que éste solo emite en el rango que va del ultravioleta al infrarrojo de onda corta (no emite rayos gamma ni infrarrojo térmico u ondas de radio). Al pasar por la atmósfera, la energía es atenuada de manera diferencial según cada longitud de onda por la absorción y dispersión que sustancias y particulas provocan. La energía que lleva a la superficie terrestre está graficada con la línea llena.

frecuencias en las que el sol emite con más abundancia (Figura 6). Si se observa esa parte del espectro de reflectancia de la vegetación, puede verse que la luz verde es más reflejada que la luz azul o la roja, lo que explica el motivo por el cual la vegetación aparece de ese color a nuestros ojos.

La respuesta de la vegetación a la luz visible está dominada por la concentración de clorofila en las hojas. La clorofila absorbe principalmente luz azul y luz roja, y dicha absorción aumenta con el contenido de clorofila, de modo que la luz reflejada en esos colores disminuye conforme las hojas tienen mayor concentración de clorofila o el cultivo tiene más área foliar verde.

Por otra parte, en el infrarrojo cercano la vegetación viva refleja fuertemente la luz incidente. Nuestros ojos no ven este tipo de luz, y si lo hicieran es probable que la vegetación nos encandilaría. La proporción de luz incidente que es reflejada en el infrarrojo cercano está determinada por la estructura celular de la hoja, en particular por un tejido conocido como mesófilo esponjoso. Esto implica que este brillo está condicionado por

una característica física, no química, y resulta proporcional a la abundancia de éste tejido, lo que equivale a decir que depende de la cantidad de hoja presente, o el área foliar. De lo anterior se desprende que un área foliar abundante siempre deviene en reflectancias altas en el infrarrojo cercano, esté la hoja dotada de clorofila o no.

Índices de vegetación

Resumiendo, a mayor área foliar, mayor reflectancia en el infrarrojo cercano; y a mayor contenido de clorofila, menor reflectancia en el rojo. Así, conforme un cultivo aumenta su vigor, o su productividad primaria bruta, crece la diferencia entre la luz infrarroja y la luz roja reflejada. Esta característica, común a todo tipo de vegetación, es la que da origen a los denominados "índices de vegetación" o "índices verdes" (si bien no se emplea la luz verde en el cálculo, se denominan así por su empleo para determinar el vigor de vegetación verde, o viva).

Existe una gran variedad de índices de vegetación derivados de la diferencia o cociente entre la luz infrarroja y la luz roja reflejadas. Sin lugar a dudas, los dos de uso más común en viticultura son el RVI (Ratio Vegetation Index) y el NDVI (Normalised Difference Vegetation Index).

El RVI es un cociente entre la luz infrarroja cercana (NIR – Near Infrared) y la luz roja.

$$RVI = NIR / R$$

Por ser un cociente, este índice tiene la ventaja de resultar muy sensible a cambios en el vigor de la vegetación, y de hecho se emplea de manera extensa en Australia para determinar diferencias pequeñas de vigor dentro de cultivos de vid. Su defecto radica en que a menos que la reflectancia medida por un sensor esté cuidadosamente calibrada a valores absolutos, carece de un rango estandarizado de valores y solo sirve de manera relativa para una ocasión particular. No conviene comparar valores de RVI de fechas u horas distintas, donde diferencias de iluminación pueden alterar el cociente.

Con mucho, el NDVI es el índice de uso más extendido. Es un índice de diferencia, vale decir que se calcula a partir de la diferencia entre la reflectancia del infrarrojo y el rojo. El NDVI se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$NDVI = (NIR – R) / (NIR + R)$$

Como puede apreciarse, el numerador es la diferencia entre los valores de la banda infrarroja y los valores de la banda roja. Sin embargo, dicha diferencia se encuentra dividida por la suma de ambos valores. Esta normalización obliga a que los valores del NDVI necesariamente se encuentren en el rango de -1 a 1, y debido a que la vegetación viva siempre tiene mayor reflectancia en el NIR que en el R, su NDVI es mayor que 0.

Una de las mayores virtudes del NDVI radica en que al sumar los valores de ambas bandas en el denominador, intensidades distintas de iluminación total compensan el valor del índice, con lo que el mismo se corrige por diferencias de intensidad lumínica incidente. Resulta claro ver que un cultivo que recibe más luz aumentaría proporcionalmente los valores del NIR y del R, con lo que la diferencia entre ambos resultaría de un valor absoluto mayor. Esta diferencia se pondera al dividir por la suma de las bandas.
La importancia de lo citado radica en que conforme la inclinación solar aumenta por la hora del día, o hacia el verano, el NDVI mantiene valores semejantes para un estado particular de la vegetación. Así, permite comparar imágenes capturadas en momentos distintos, e inclusive minimiza la diferencia entre zonas del cultivo iluminadas y sombreadas.

Una gran cantidad de trabajos a lo largo de los años han confirmado al NDVI como un índice robusto en comparación con otros índices de vegetación, algunos de los cuales han mostrado su utilidad en condiciones especiales, pero ninguno ha resultado tan confiable ante un rango muy amplio de condiciones de crecimiento, cultivos, o coberturas vegetales de todo tipo.

Sin embargo, una debilidad del NDVI consiste en su falta de sensibilidad creciente con aumentos del IAF por encima de 2. Si bien los viñedos, en particular aquellos de conducción vertical como los espalderos, tienen valores de IAF bajos si éste se estima sobre la totalidad del terreno, ocurre que el IAF computado solamente bajo la canopia puede ser elevado y presentar cierto nivel de saturación. Además, al capturar imágenes sobre espalderos, los valores de canopia se ven integrados con valores de suelo desnudo, soleado y sombreado, lo cual naturalmente agrega ruido a los datos del cultivo puro. Por este motivo, hoy se están llevando a cabo esfuerzos para pulir procedimientos que eliminen o eludan problemas de saturación, sombras, suelo desnudo, y atenuación atmosférica, algunos de los cuales incluyen la elaboración de índices de vegetación específicos.

Mapeo de variabilidad con NDVI

El cálculo del NDVI a partir de una imagen es sencillo. La imagen del NIR y la del R se hacen coincidir píxel por píxel y se aplica la formula citada para su cálculo. De esto se produce una imagen de NDVI, donde cada píxel tiene un valor entre -1 y 1 que corresponde al NDVI del rasgo del terreno en cuestión (Figura 7).

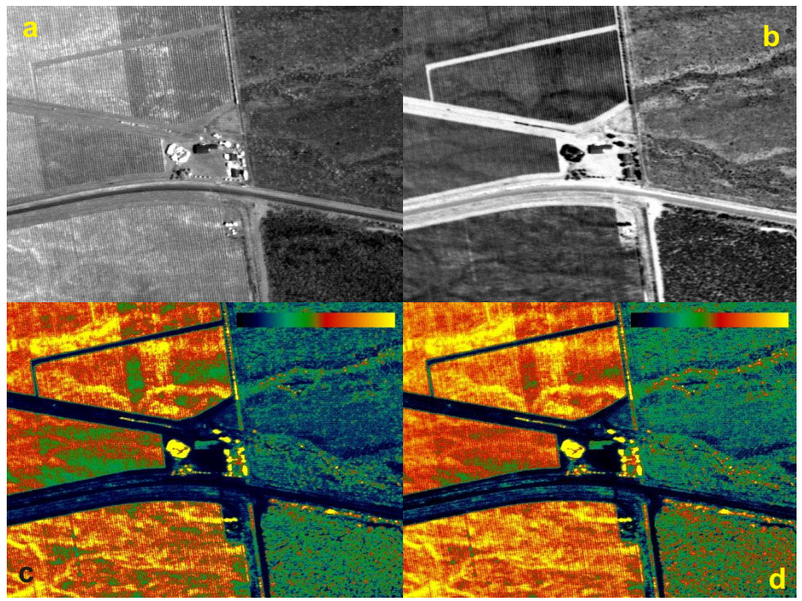

Figura 7: a) imagen de banda NIR; b) imagen de banda R; c) imagen coloreada del RVI; d) imagen coloreada del NDVI.

De la observación de escenas de NDVI se ve que:

1. Existe indefectiblemente una variabilidad espacial del NDVI, aún en cultivos muy uniformes, y
2. Los valores cercanos suelen tener valores parecidos.

La primera afirmación coincide con lo observado en todo tipo de mapeo espacial, sea de NDVI, de fotografía común, de conductividad eléctrica del suelo, o de rendimiento (Figura 8).

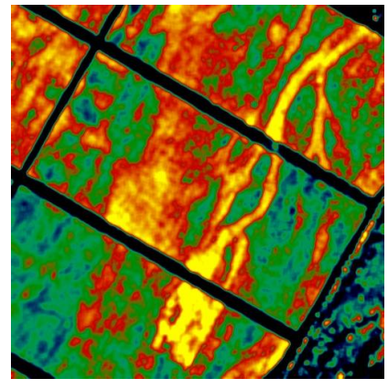

Figura 8: Variabilidad espacial de vigor. Las diferencias de calidad de suelo condicionan el vigor dentro de lotes con manejo uniforme. En esta imagen suavizada de NDVI de un cuartel típco en el Valle de Uco, Mendoza, el NDVI se ha coloreado en una escala creciente azul-verde-rojo-amarillo.

La variabilidad espacial es una condición universal, y su apreciación ha conducido al postulado que el manejo de los cultivos podría mejorarse y optimizarse tomando en cuenta las diferencias que surgen entre sitios distintos, donde el manejo podría adecuarse para asignar recursos de manera específica a ese sitio. Este concepto ha dado origen a la denominada "Agricultura Sitio-Específica" y a herramientas y aplicaciones para su ejecución, normalmente conocidas como "Agricultura de Precisión".

La segunda afirmación se deriva del cambio paulatino que el terreno o condiciones de crecimiento normalmente tienen (Figura 9).

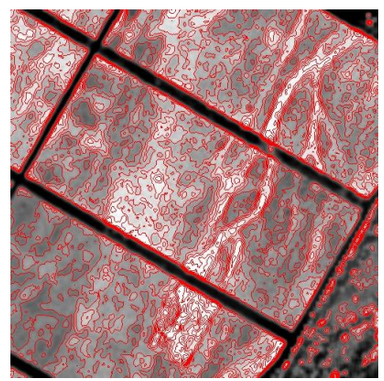

Figura 9: Curvas de nivel de vigor del cuadro indicado en la figua anterior. Lo normal es que la variabilidad, cuando es natural y no inducida, sea gradual aunque pueda tener gradientes importantes.

En términos prácticos, las fronteras de condiciones de crecimiento no suelen ser abruptas salvo cuando los cambios están provocados por diferencias inducidas por el manejo, como puede ser el riego a través de válvulas distintas. El cambio paulatino de condiciones de crecimiento permite simplificar el manejo estableciendo dentro de un predio zonas de manejo de condiciones semejantes que pueden tratarse como uniformes, sin necesidad de decidir la asignación de recursos sobre una infinidad de puntos. Ningún productor puede adoptar súbitamente una técnica de manejo que lo obligue a aplicar un manejo distinto para cada píxel de un mapa que genera y, en términos prácticos, inicialmente debe conformarse con dividir una unidad de producción en tres o cuatro subclases a lo sumo.

En viticultura, el aprovechamiento de la variabilidad espacial para obtener beneficios económicos tiene dos ámbitos de aplicación: la optimización del rendimiento y la mejora de la calidad. Si bien ambas están relacionadas, difiere del caso de cultivos extensivos como el maíz donde lo central suele ser optimizar la utilidad a partir del rendimiento.

Como el NDVI mide el vigor del cultivo, su biomasa productiva, resulta de utilidad de dos maneras. Por una parte el vigor es indicador de la calidad del sitio: las plantas crecen y desarrollan canopeas más vigorosas en aquellos lugares donde las condiciones de crecimiento son mejores. Por otra, el vigor del cultivo determina su productividad futura, por lo que el valor de NDVI se relaciona con el rendimiento a cosecha.

Ahora, el vigor del cultivo puede ser consecuencia de una gran cantidad de condiciones de crecimiento o limitantes que deben ser determinadas si han de ser manejadas o corregidas. Un mapa de NDVI ubica y dimensiona zonas de vigor pero no brinda información sobre sus causas. Estas deben determinarse de manera tradicional, mediante inspecciones o muestreos dirigidos por el mapa, y las decisiones sobre el manejo a aplicar deben adecuarse a lo necesario en cada caso, o a lo posible.

Como se verá más adelante, un objetivo a lograr es conducir el cultivo a un valor de vigor deseado o adecuar el manejo al vigor existente. Las imposiciones de calidad en uva de vinificar obligan al viticultor a cuidar que el vigor se mantenga dentro de ciertos rangos, y los mapas de NDVI le permiten conocer si ese rango se cumple o si el manejo debe ser modificado para alcanzarlo.

Aún en los casos en los que resulta difícil conducir todo un cultivo al nivel de vigor deseado, es posible aumentar muy significativamente el rendimiento económico del mismo conociendo la distribución de vigor. Está establecido que niveles de NDVI distintos conducen a calidades de uva muy diferentes, de modo que dentro de un mismo cuadro donde la variedad, la conducción, y el manejo han sido uniformes, se producen calidades de uva que pueden resultar sumamente distintas y que por ende dan origen a vinos de calidad, y precio, muy diferentes. En estos casos resulta crucial que en la cosecha no se mezclen partidas de calidad inferior con las mejores, y la cosecha diferencial llevada a cabo a partir de mapas de NDVI puede evitar que esto ocurra. El impacto económico de ésta práctica puede ser realmente importante y, de hecho, el empleo de zonas de vigor para cosecha es una práctica extendida en bodegas que producen vinos de alta gama.

Fuentes de NDVI y requisitos para obtención de datos útiles

Los mapas de NDVI pueden obtenerse de una variedad de fuentes, pero para que resulten útiles deben cumplirse una serie de condiciones, entre las que se destacan:

1. El momento del cultivo en que se toma debe ser el apropiado
2. El nivel de detalle debe ser suficiente para ver los rasgos de la dimensión que se busca conocer
3. La información debe estar disponible a tiempo de ser empleada
4. La calidad del NDVI elaborado debe ser confiable
5. El costo debe ser aceptable

La discusión habitual sobre la fuente óptima para obtener los datos suele concentrarse sobre las ventajas comparativas entre datos obtenidos a partir de satélites o aviones. Si bien no caben dudas sobres las ventajas casi excluyentes del uso de aerofotografía multiespectral sobre la obtenida a partir de satélites, conviene explicar los motivos con cierto detalle a medida que se describe el modo de asegurar que las condiciones citadas arriba puedan cumplirse.

Momento de captura

La variabilidad de un viñedo resulta evidente en etapas tempranas de su crecimiento. Si bien la brotación de zonas débiles puede adelantarse a la de zonas con plantas más vigorosas, pasadas unas seis semanas a partir de la brotación resulta evidente cuales son y serán los sitios de cada nivel relativo de vigor. Las zonas débiles, intermedias, o muy vigorosas ya son claramente visibles a principios de Noviembre en Mendoza, y posiblemente antes en San Juan, La Rioja, o Cafayate. Lo expresado avalaría capturas tempranas porque permitiría decidir la aplicación de manejo correctivo temprano en el ciclo.

Sin embargo, la producción y calidad de la uva dependerá del equilibrio entre área foliar y la cantidad de racimos en envero, que típicamente se alcanza hacia mediados de Diciembre en los viñedos de zonas cálidas, de San Juan hacia el norte, y por mediados de Enero en Mendoza y al Sur. Teniendo esto en cuenta, debe considerarse que un mapeo realizado seis a ocho semanas antes del envero tendrá dos inconvenientes: la variabilidad relativa entre

zonas de vigor se podrá ver alterada por manejos de la canopia como el despampanado entre la fecha de la captura y el envero, y no se sabrá con certeza cual es el nivel de vigor que se alcanzará en envero (Figura 10).

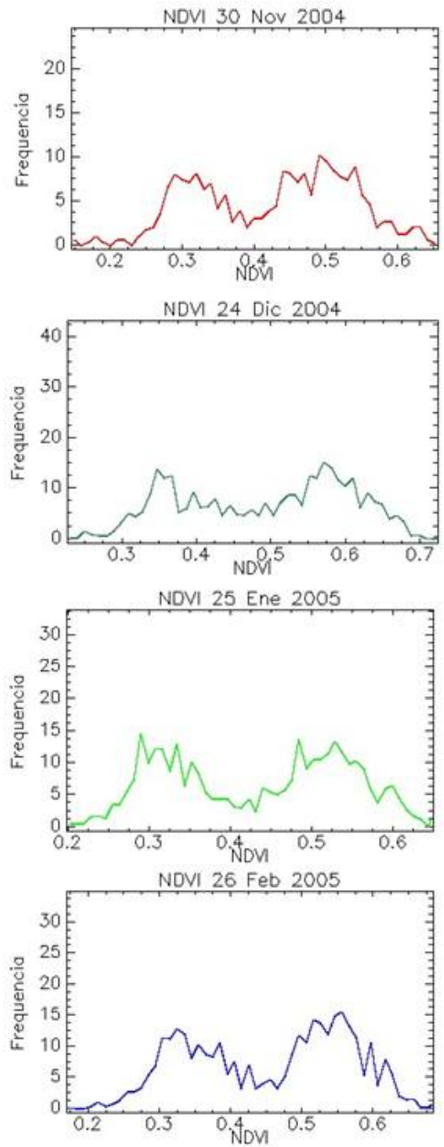

Figura 10: Histogramas de NDVI de una finca vitícola completa en Tupungato, Mendoza, a lo largo de un ciclo de crecimiento. Las modas en la distribución se mantienen a lo largo de la estación de crecimiento, con un NDVI máximo, y menor variación previa a envero, época en que se realizan despampanados. Los valores modales se modifican muy poco a partir de envero, que en ésta zona ocurre alrededor del 10 de Enero.

La adquisición de escenas en envero tiene la ventaja de mostrar el cultivo como quedará hasta la cosecha, por lo menos en zonas donde el crecimiento a partir de envero está detenido o restringido. Así, los niveles de vigor alcanzados podrán asociarse a rendimientos o valores de equilibrio esperados, es decir que con datos de envero se puede conocer tanto la variabilidad final como la magnitud del vigor en cada sitio de un cuadro.

En resumen, la adquisición de datos tempranos en el ciclo se justifican si se busca corregir la variabilidad durante el ciclo, en particular para vigorizar zonas débiles que no alcanzarán biomasas suficientes, o para dirigir raleos que ajusten la carga de frutos según el vigor relativo de cada zona para alcanzar viñedos más equilibrados. La adquisición en envero es recomendable para zonificar la cosecha, dirigir muestreos para corrección de limitantes persistentes como capacidad de retención de agua mediante el incremento de goteros (tarea que se realizaría para una campaña posterior), o para realizar estimaciones como peso de poda. Con mucho, es la fecha de adquisición más común en todo el mundo.

Fuentes de datos

Cualquiera sea la fecha escogida para tomar datos de NDVI, conviene saber cual es la fuente preferida. Tratándose de oportunidad de captura, resulta fundamental que la toma se realice dentro de un período acotado de días alrededor de la fecha deseada, típicamente de no más de tres días en un sentido u otro, y que se disponga de los datos pocos días después para estar a tiempo de emplearlos durante el ciclo en curso.

Casi la totalidad de los satélites de uso comercial actuales disponen de bandas NIR y R con las cuales elaborar un NDVI. Para cumplir con el requisito de disponer de una ventana de oportunidad adecuada, un satélite debería disponer de una revisita (tiempo mínimo entre dos adquisiciones sucesivas del mismo punto) menor a una semana, o que su pasada coincida con el período requerido. A esto debe agregarse el requisito que al momento del sobrevuelo la zona de interés se encuentre libre de nubes, que el satélite no tenga otras capturas programadas que demoren la adquisición ordenada hasta pasadas posteriores, que el nivel de detalle sea suficiente, y que la entrega de los datos sea expeditiva.

Hoy puede afirmarse que resulta difícil obtener de manera confiable escenas de satélites para uso en viticultura. A modo de resumen:

a) Sensor MODIS (Satélites ACQUA y TERRA): tienen revisita casi diaria y adquisición permanente (capturan haya o no órdenes de relevamiento), pero su píxel corresponde a un cuadrado sobre el terreno de 250 m, es decir de más de 6 ha. Esto implica una superficie mayor al tamaño de muchos cuadros, con lo que evidentemente queda descartado para ver la variabilidad dentro del mismo (Figura 11).

b) Landsat TM: Pasa cada 16 días, lo cual resulta excesivo, en particular en zonas con clima monzónico donde es común la presencia de nubes, aún dispersas. Adicionalmente, su píxel tiene 25 m de lado, que sigue siendo demasiado grande para un cómputo adecuado de valores de NDVI en cuarteles chicos por la contaminación lumínica de calles y cuadros vecinos en los márgenes de un cuadro (Figura 11).

c) ALOS: Las capturas programadas no son regulares, y no se pueden encargar. Su revisita es de 46 días. Tiene un píxel de 10 m, lo cual es aceptable para viticultura, pero la imposibilidad de saber si se dispondrá de los datos en tiempo restringen su uso a estudios históricos con imágenes de archivo. Las escenas son económicas: cuestan aproximadamente U$S/ha 0.0012, debiéndose comprar la escena completa de U$S 600.00.

d) IKONOS: La adquisición debe ordenarse con un mínimo de 10 000 ha. La revisita es alta (aproximadamente 3 días), pero la toma de imágenes está sujeta a la prioridad del pedido. Como IKONOS es extensamente usado con fines periodísticos y militares, puede ocurrir que una orden se demore. Su resolución es de 4 m, suficiente para relevamiento de viñedos, pero normalmente el producto debe aceptarse hasta con 20 % de nubosidad, lo cual puede convertir la imagen en inutilizable para fines agropecuarios. El costo es alto, típicamente de unos U$S/ha 0.20, es decir que el egreso mínimo es de unos U$S 2 000.00 (Figura 12).

e) Quickbird: Se trata de un satélite de características semejantes al IKONOS, pero con una resolución superior (2.4 m), de revisita, costo, y limitantes parecidas (Figura 12).

Es posible que se logre una mejora en muchos de los aspectos citados con la constelación RapidEye de 5 satélites con 5 m de resolución, lanzados en Septiembre de 2008, aunque los costos citados por el momento son muy elevados.

Por contraste, el empleo de aviones (Figura 13) elude el problema de la oportunidad porque los vuelos pueden planificarse con corto aviso y según pronósticos meteorológicos. Normalmente durante una campaña de vuelo se traslada el equipo a la zona con alguna anticipación y se realizan los relevamientos en los momentos que la nubosidad lo permite.

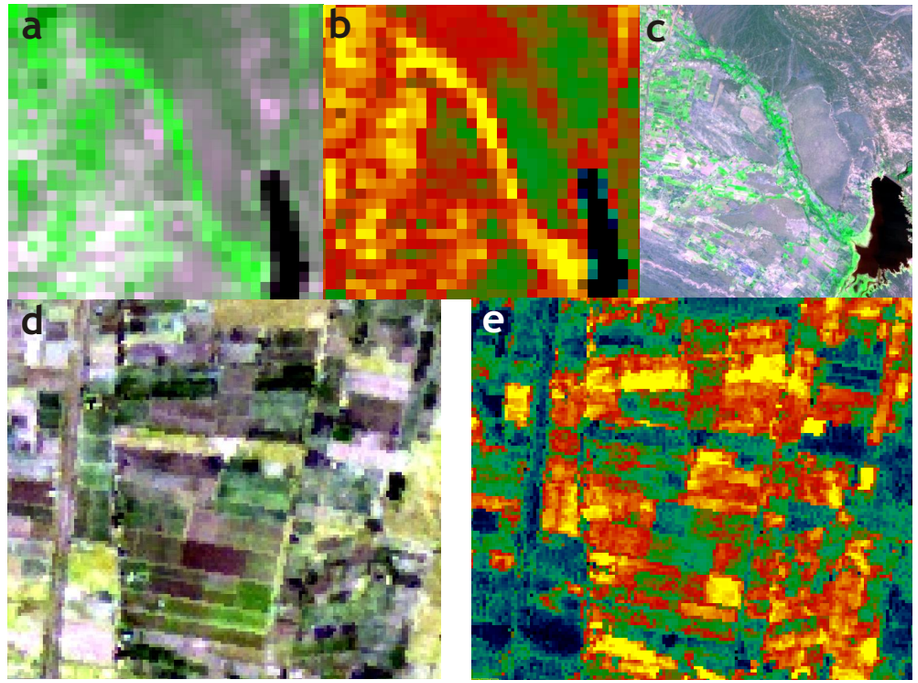

Figura 11: Recortes del sensor MODIS de la zona del dique el Carrizal, Mendoza: a) combinación de bandas, b)NDVI coloreado; c) segmento de escena del Landsat de la misma zona; d) Finca individual situada en sector NE de c); e) NDVI coloreado de la misma finca. Puede apreciarse el nivel de detalle insuficiente para uso en fincas individuales del MODIS, y para cuarteles chicos individuales del Landsat.

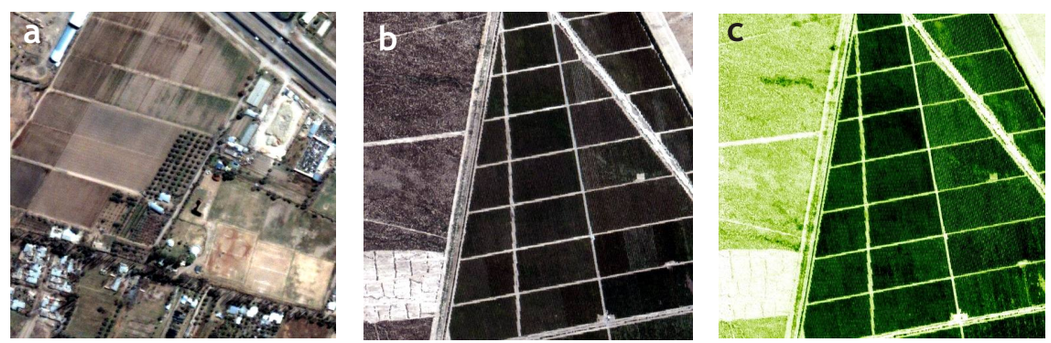

Figura 12: a) Segmento de imagen IKONOS de finca en Guaymallén, Mendoza,en color real; b) Segmento de viñedo en Agrelo, Mendoza, de imagen Quickbird; c) NDVI de Quickbird coloreado en escalas de verde. Estos sensores disponen de detalle suficiente para relevamientos detallados, pero pueden tener inconvenientes en la oportunidad de adquisición.

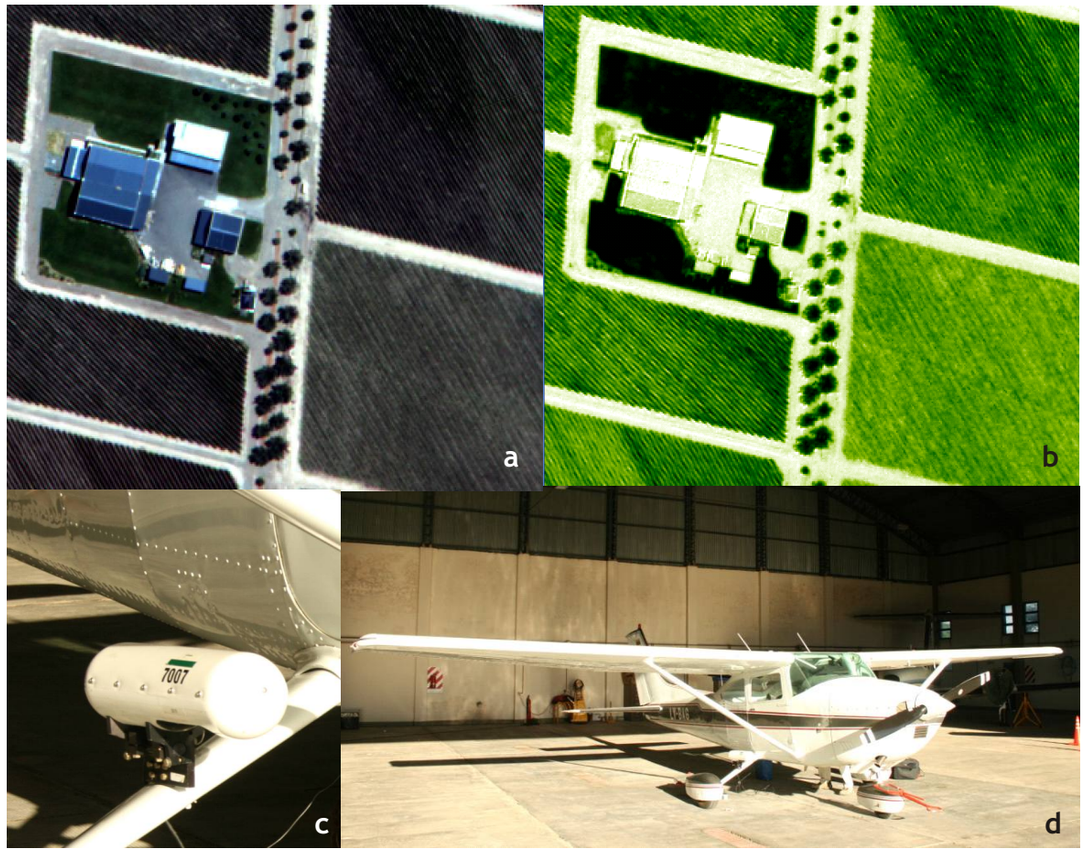

Figura 13: Aerofotografía en viñedos: a) Imagen aerofotográfica de un viñedo y bodega con 1 m de resolución espacial; b) NDVI en escala de verdes; c) Cámara multiespectral GeoVantage 3000 montada en el tren de aterrizaje; d) Aeronave Cessna 182 de AgriSat S.A. con cámara montada.

Si bien el costo por ha es más elevado que para datos provenientes de satélites (en el orden de U$S/ha 7.00 a 10.00 en Argentina, Chile, o EE.UU.), estos valores incluyen el extenso procesamiento posterior a la captura de datos y que incluye la elaboración del NDVI, la corrección geométrica de los datos, la georreferenciación, la clasificación en zonas de vigor, y la extracción de su estadística. Más aún, los relevamiento aéreos se cobran por la superficie relevada solamente, de modo que el egreso suele ser substancialmente menor al incurrido para comprar una imagen satelital de alta resolución. A modo de ejemplo, una finca de 200 ha abonaría por un relevamiento aproximadamente lo mismo que los datos crudos (sin procesar) de una imagen IKONOS, asegurándose además la toma y entrega dentro de los tiempos previstos.

Detalle

Es una creencia difundida que el mayor detalle siempre acarrea ventajas, pero se trata de una presunción sesgada, ya que los archivos con mucho detalle resultan más voluminosos y frecuentemente muestran un nivel de variabilidad excesivo.

El nivel de detalle, o resolución espacial, se define como el tamaño que un píxel de una imagen representa en el terreno. Normalmente las resoluciones altas (píxeles chicos) importan un mayor costo de adquisición y procesamiento, por lo que el tamaño óptimo es el menor que brinda la información requerida. Esto implica que el objetivo del relevamiento es el que determinará la resolución máxima a obtenerse.

Para el caso de la viticultura, lo común para usos agronómicos es una resolución tal que permita una zonificación en tres o cuatro clases de vigor por cuadro, que presenten fronteras netas. Con esto pueden implementarse tareas de manejo claras. Si la resolución es demasiado grande, las diferencias entresuelo y canopia comienzan a verse y el mapa de NDVI resulta un salpimentado de puntos que impide ver con claridad la variabilidad del cultivo de manera integrada (Figura 14).

A fin de eludir este problema, cuando lo que busca es conocer la variabilidad del cultivo, los datos de píxeles deben integrarse para que píxeles adyacentes contengan aproximadamente la misma proporción de suelo y canopia. Esta integración supone una resolución espacial del orden del ancho del sistema de conducción que se está relevando. Para espalderos típicos, donde el suelo constituye una proporción importante de la escena, un valor útil es de entre 2 y 3 m.

Sin embargo, para la mayoría de las cámaras multiespectrales, una resolución de esas dimensiones obligaría volar a alturas superiores a los techos operativos de aeronaves chicas y económicas para el relevamiento, de modo que la resolución estándar en viñedos es de 0,75 a 1 m, lo cual se encuentra dentro de las alturas de operación normales. Las imágenes con esta resolución pueden procesarse para reducir la resolución al valor deseado o ponderar los valores de píxeles vecinos hasta lograr fronteras netas en las clasificaciones (Figura 14). Existen algunos casos en los que resulta necesario una resolución muy alta, del

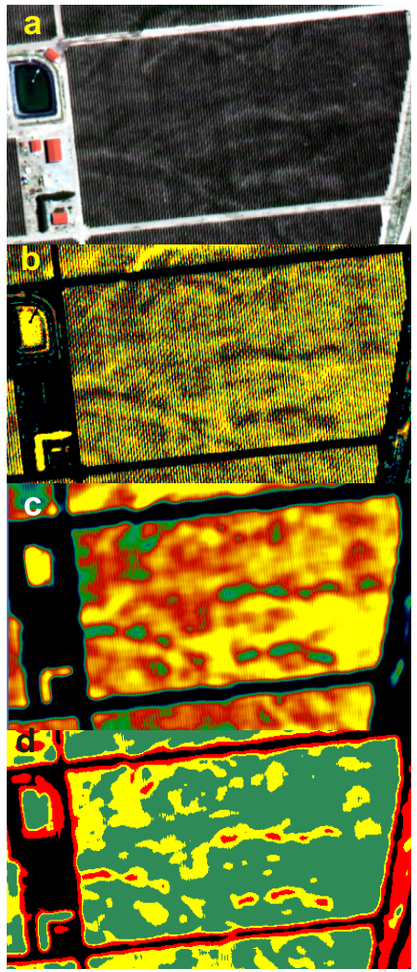

Figura 14: Aerofotografía de viñedo en Ugarteche, Mendoza, con 0,75 m de resolución espacial: a) Cuartel individual en color real; b) NDVI coloreado sin suavizado; c) NDVI coloreado con suavizado; d) NDVI suavizado clasificado en 3 clases. El suavizado mediante filtros espaciales permite clasificaciones con fronteras netas que facilitan la zonificación de tareas de muestreo, manejo, o cosecha.

orden de 20 o 25 cm, pero se trata de relevamientos de tipo experimental donde se busca conocer datos de claros o plantas individuales para estudios de correlación con parámetros vegetales (Figura 15).

Las escenas obtenidas en aerofotografía multiespectral digital rara vez abarcan una finca completa. A fin de poder unirlas para realizar un mosaico, y para poder ubicar puntos y zonas de interés sobre el terreno de modo que sus coordenadas, distancias, o superficies puedan medirse, la imágenes individuales deben someterse a dos procesos, conocidos como ortorrectificación y georreferenciación (Figura 16).

La ortorrectificación consiste en corregir las deformaciones derivadas del relieve, de la inclinación del avión durante la toma, y las propias del lente de la cámara. El resultado es una imagen llevada a un plano. La georreferenciación agrega a cada punto de la imagen una coordenada en algún sistema geográfico o cartográfico, de modo que puedan ubicarse con un GPS. Así, las imágenes se unen para brindar un mosaico de características semejantes a un mapa, sobre el cual pueden realizarse mediciones y donde cada punto puede ubicarse mediante coordenadas en un sistema establecido (Figura 17). Para su uso como tal, conviene tener cierto manejo de un GPS y familiaridad con nociones básicas de cartografía.
Una segunda corrección que puede resultar necesaria es la calibración radiométrica. Esto implica ajustar los valores de brillo de cada banda a valores absolutos a fin de eludir artefactos en los índices, como los que pueden surgir por cambios en el

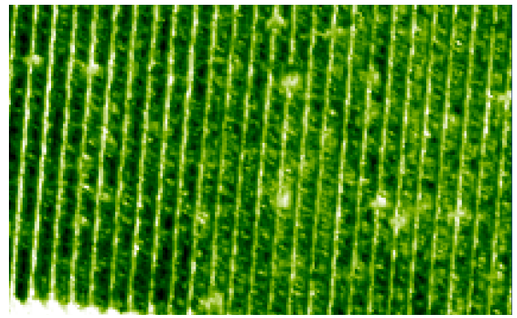

Figura 15: NDVI de espalderos en escala de verdes. Las resolución espacial es de 30 cm, lo cual permite distiguir claramente la canopea de la entrefila.

tiempo de exposición de las imágenes o la reflectancia direccional de ciertas superficies. Cuando el uso de la información se limita a determinar la distribución de la variabilidad relativa, la calibración radiométrica de los datos no siempre es indispensable. En cambio, si se busca hacer uso cuantitativo de la información o se quiere monitorear la evolución de un cultivo con relevamientos periódicos, los datos deben calibrarse por alguno de los métodos existentes. Estos suelen variar según el sensor empleado y las herramientas disponibles para conseguir una calibración, pero el sistema de calibración constituye un modo de dar importante valor agregado a los datos, por lo que el método utilizado, si resulta confiable, suele ser información propietaria de cada empresa que brinda el servicio de aerofotografía.

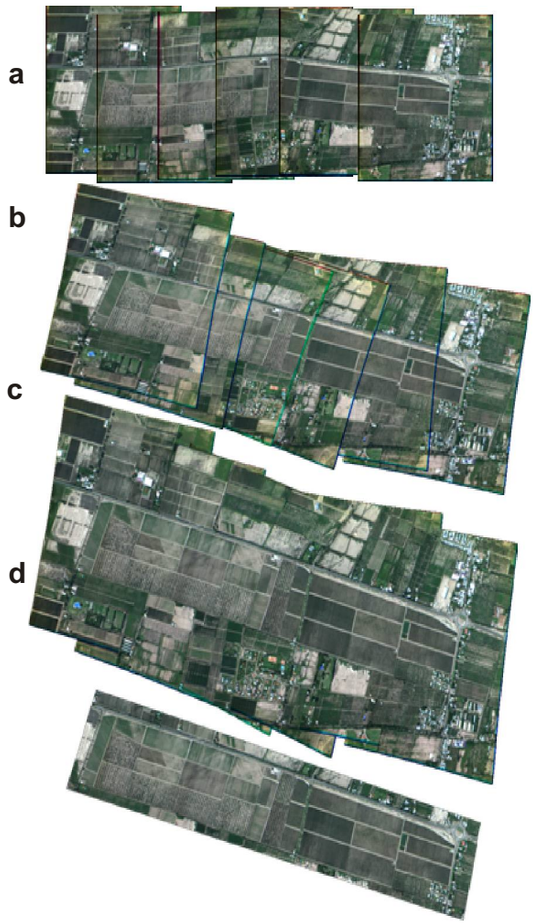

Figura 16: Proceso de corrección de fotogramas y armado de mosaico georreferenciado: a) Fotogramas crudos de una línea de vuelo; b) Fotogramas orthorrectificados y georreferenciados; c) Mosaico georreferenciado con color equilibrado; d) Recorte de la finca de interés.

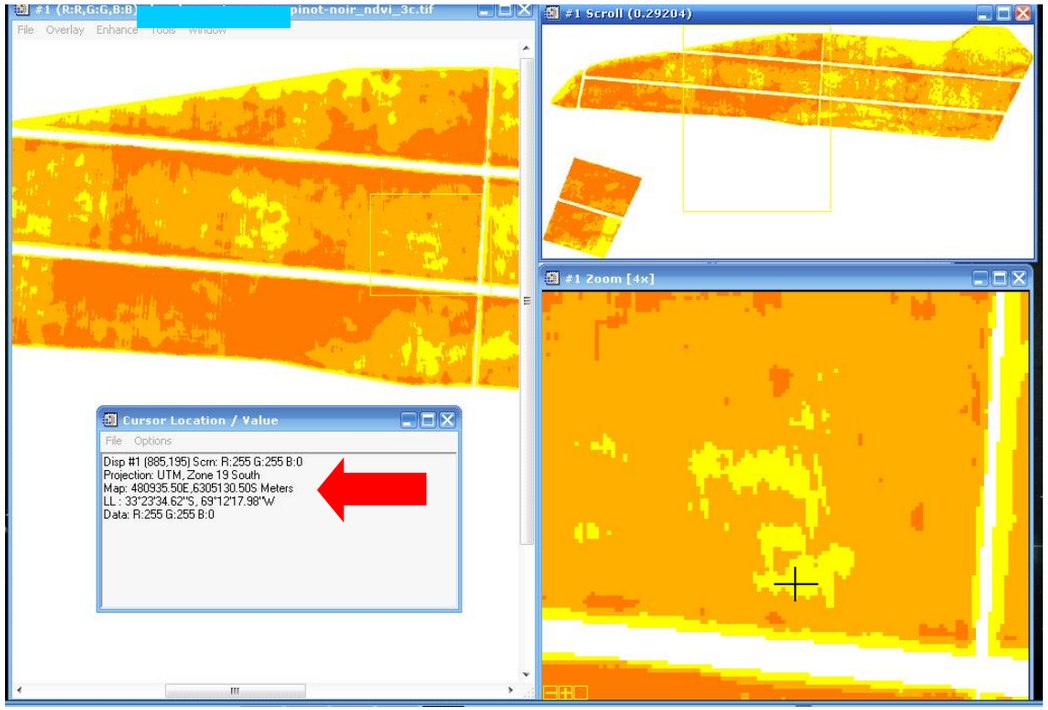

Figura 17: Pantallas del ENVI mostrando el NDVI en tres clases para cuarteles de pinot noir en una finca del Valle de Uco, Mendoza, con distintos grados de aumento. Al colocar el cursor sobre un rasgo, el software despliega las coordenadas del punto en coordenadas geográficas (LL) y cartográficas (Map), como indica la flecha roja.

Información entregada

Existe cierta variedad en la oferta de información entregada a partir de RVI o NDVI. En la vasta mayoría de los casos se entregan como un mosaico digital con algún grado de georreferenciación y coloreados para resaltar la variabilidad. El caso más simple, de uso en Australia, es un RVI clasificado en una cierta cantidad de clases (típicamente 3 a 8), sin calibración radiométrica. Para la identificación visual de la variabilidad o su modificación, puede ser suficiente, y es posible extraer algunas conclusiones cuantitativas si el RVI de años sucesivos se normaliza dividiendo el valor por el rango total o intercuantil. En esos casos se obtienen datos que van de 0 a 100 % del vigor y, si se sostiene la presunción que el vigor máximo obtenible aparece siempre en alguna parte de un cuadro, la comparación entre imágenes brinda información de cierta utilidad cuantitativa.

Lo más común es la entrega de mapas de NDVI georreferenciados, en los que los valores se encuentran diferenciados en 3 a 8 clases de vigor, y cada clase corresponde a un rango de datos igual (un "density slice" que se obtiene dividiendo el valor máximo menos el mínimo por la cantidad de clases) (Figura 18), o bien cada clase tiene la misma cantidad de datos (una clasificación en cuantiles – por ejemplo en cuatro clases cada una con 25 % de los datos). Es frecuente ver que este tipo de productos está estandarizado y la georreferenciación no es más que una grilla en unidades de distancia superpuesta sobre la imagen. También es común que el productor se encuentre habituado al producto entregado por su proveedor y emplee las imágenes, que sabe están procesadas de manera estandarizada, sin preocuparse por la proyección cartográfica, la calibración radiométrica, o el sistema de clasificación empleado.

Más aún, frecuentemente desconocen la posibilidad de extraer información adicional de este tipo de relevamiento.

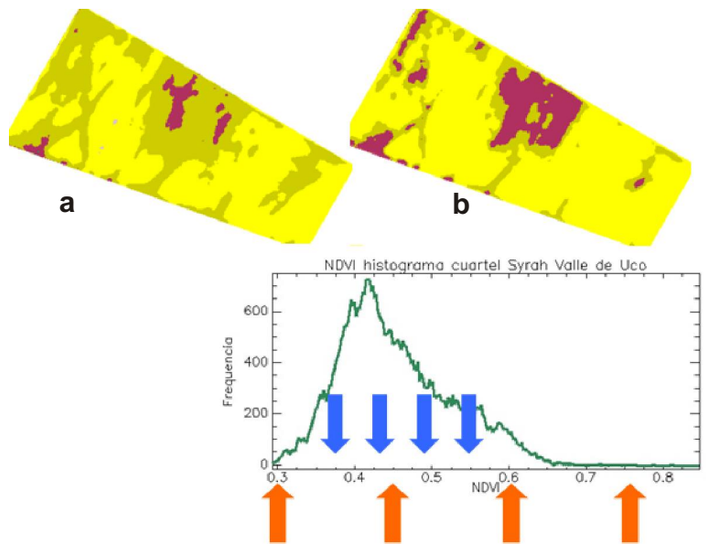

Figura 18: Sistemas de zonificación del vigor: a) El "Density slice" toma el rango completo de valores de NDVI de un lote y los agrupa en porciones de igual rango (flechas anaranjadas en el histograma). Este sistema no identifica fronteras correctas cuando éstas realmente aparecen en el terreno; b) Las clasificaciones de tipo estadístico, como el K-means, agrupan los puntos de modo que separan clases alrededor de las modas promintenetes cuando estas existen. Si la distribución es unimodal, el cuartel queda dividido en cuantiles, vale decir en zonas con la misma cantidad de

El producto de más completo entregado consiste en una serie de archivos para cada finca, todos los cuales están debidamente ortorrectificados y georreferenciados en formatos digitales que además de permitir su impresión, entregan coordenadas ciertas al abrirse con software apropiado, como un sistema de información geográfico (SIG o GIS). Los datos de NDVI están calibrados radiométricamente, y las clasificaciones se realizan en tantas clases como solicite el cliente (comúnmente no más de 3 por cuadro), empleando sistemas de clasificación que agrupan los puntos de forma tal que los de una clase tengan la menor

diferencia entre si y la mayor entre clases, lo cual asegura que de existir fronteras de clase efectivas en el terreno, éstas se encuentren ubicadas en el mismo sitio que en las imágenes (Figura 18).

Los productos de éste tipo suelen entregarse con y sin la grilla de conducción del cultivo superpuesta, a fin de poder emplearse de manera expeditiva a campo sin necesidad de empleo de un GPS (Figura 20).

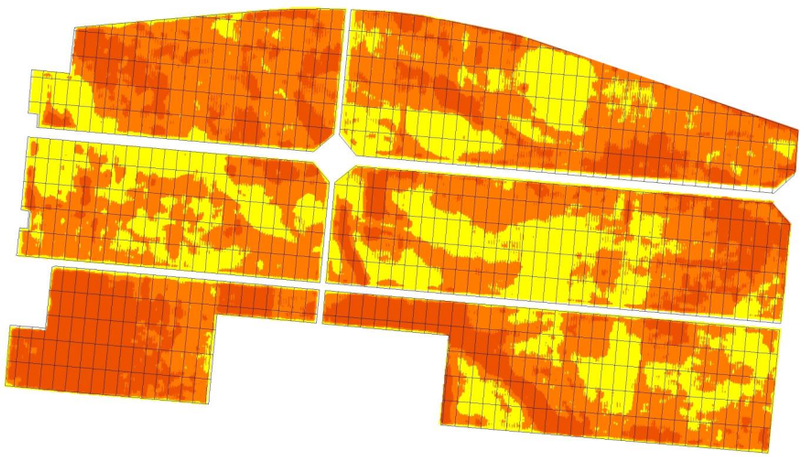

Figura 20: Unidades mayores de Malbec en espalderos de una finca en Ugarteche, Mendoza. El NDVI está clasificado en 3 clases y sobre la imagen se ha superpuesto una grilla que indica el espaciamiento cada cinco filas y cinco claros. Dicha grilla permite la ubicación a campo de rasgos del terreno sin la necesidad de acudir con un GPS.

En casos como este, el proveedor entrega al cliente un mosaico de la finca entera en color real (Figura 19a), y otro del NDVI coloreado con una escala de colores continua que permite de un vistazo ver las diferencias de vigor en la finca completa (Figura 19b).

Los cuadros individuales se recortan y clasifican uno por uno (Figura 19d). Cada clase se colorea con un color que corresponde al valor medio de NDVI de la clase, lo que permite comparar imágenes de distintos años y advertir si el vigor por clase se ha corrido. Además, como lo corriente es fijar la cantidad de clases a priori, cuando dos clases aparecen con colores cercanos en la tabla, resulta fácil decidir si dichas clases meritan tratarse como distintas o no (Figura 21).

La clasificación de cuadros individuales, o unidades menores, sirve particularmente para dirigir muestreos que permitan identificar causas de variabilidad y aplicar correcciones al manejo a fin de corregirla.

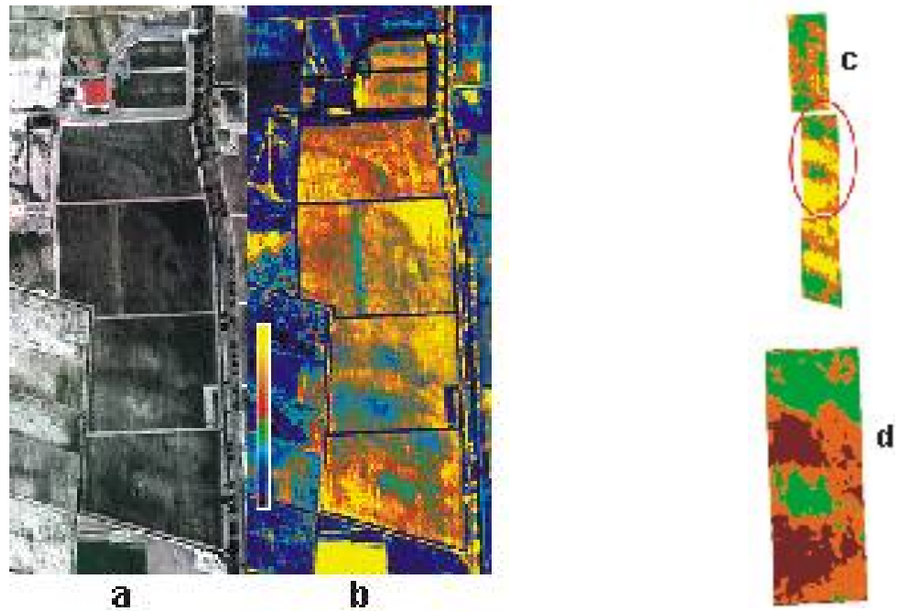

Figura 19: Información estándar entregada por AgriSat SA: a) Imagen RGB color real de finca de Agrelo, Mendoza; b) NDVI coloreado en escala de vigor creciente azul-verde-rojo-amarillo de la finca completa;
c) NDVI de Unidades mayores (típicamente una variedad y sistema de conducción) en tres clases de NDVI obtenidas mediante clasificaciones estadísticas que agrupan puntos semejantes; d) NDVI de unidades menores (cuadros individuales de manejo uniforme) en tres clases de NDVI obtenidas mediante clasificaciones estadísticas que agrupan puntos semejantes. Obsérvese que las fronteras de clase en las clasificaciones de unidades menores pueden resultar un tanto distintas que en el mismo cuadro en la unidad mayor (círculo rojo y d).

Figura 21: Escala de colores para clases de NDVI. El color que se asigna a una clase depende del rango de NDVI medio de dicha clase. Puede ocurrir que en un cuartel uniforme dos clases caigan dentro del mismo rango y reciban el mismo color, lo cual indica que no merecen ser tratadas como clases distintas. El coloreado por rango permite advertir a primera vista si un cuadro es muy heterogéneo, y detectar los cambios en años sucesivos.

Media	Rango		Colores		Clases
< 0.04	-1.00	0.04	Negro		Clase 01
0.06	0.04	0.08	Rojo 1		Clase 02
0.10	0.08	0.12	Rojo 2		Clase 03
0.14	0.12	0.16	Rojo 3		Clase 04
0.18	0.16	0.20	Marrón 1		Clase 05
0.22	0.20	0.24	Marrón 2		Clase 06
0.26	0.24	0.28	Marrón 3		Clase 07
0.30	0.28	0.32	Marrón 4		Clase 08
0.34	0.32	0.36	Amarillo 1		Clase 09
0.38	0.36	0.40	Amarillo 2		Clase 10
0.42	0.40	0.44	Amarillo 3		Clase 11
0.46	0.44	0.48	Amarillo 4		Clase 12
0.50	0.48	0.52	Verde 1		Clase 13
0.54	0.52	0.56	Verde 2		Clase 14
0.58	0.56	0.60	Verde 3		Clase 15
0.62	0.60	0.64	Verde 4		Clase 16
0.66	0.64	0.68	Azul 1		Clase 17
0.70	0.68	0.72	Azul 2		Clase 18
0.74	0.72	0.76	Azul 3		Clase 19
> 0.76	0.76	1.00	Azul 4		Clase 20

Considerando que una de las aplicaciones más rentables de los mapas de NDVI radica en la zonificación para cosecha de partidas de uva de calidad uniforme, también resulta importante contar con la clasificación conjunta de todos los cuadros de una finca que tienen la misma variedad, manejo, y sistema de conducción. En estas "unidades mayores", las clases de vigor agrupan zonas donde la maduración y calidad son uniformes y, por tratarse de la misma variedad, pueden cosecharse conjuntamente. También en este caso es corriente el empleo de tres clases y el coloreado se realiza con la misma escala que para las unidades menores, aunque si las diferencias de vigor son graduales, las fronteras entre clases pueden no coincidir exactamente con las encontradas en las unidades menores (Figura 19).

Al emplear NDVI calibrado, tanto los valores de NDVI como los de su dispersión son comparables en secuencias temporales. Por este motivo, este tipo de clasificaciones incluyen tablas de estadísticas donde para cada unidad mayor y menor se consignan los valores de superficie por clase, el rango de valores, la media del NDVI, y la dispersión como desvío estándar y coeficiente de variación (Tabla 1). Con estos datos es posible verificar si el manejo aplicado eleva o deprime el vigor de una zona, y si la variabilidad se ha reducido o aumentado, objetivos comunes en el manejo agronómico de viñedos.

Cuartel	Clase de Vigor	Clase de color	Superficie [has]	Mínimo	Máximo	Media	Desvío	CV [%]
3b	Total		2.5	0.307	0.739	0.569	0.064	11.2
	Menor	13	0.6	0.307	0.526	0.481	0.039	8.1
	Intermedia	15	1.2	0.526	0.603	0.565	0.022	3.9
	Mayor	16	0.8	0.603	0.739	0.639	0.026	4.1

Tabla 1: Estadísticas de clases de NDVI de un cuartel individual.

Si los relevamientos se efectúan en la misma fecha de años sucesivos, es posible solicitar al proveedor un estudio de detección de cambios. Esto consiste en restar de la imagen de un año la del año anterior. Así, lo lugares donde el vigor ha aumentado aparecen con valores positivos, donde no hay cambio los valores son semejantes, y donde el vigor ha disminuido se tienen valores negativos. Las diferencias, a su vez, pueden clasificarse en diferencias absolutas o porcentuales (Figura 22).

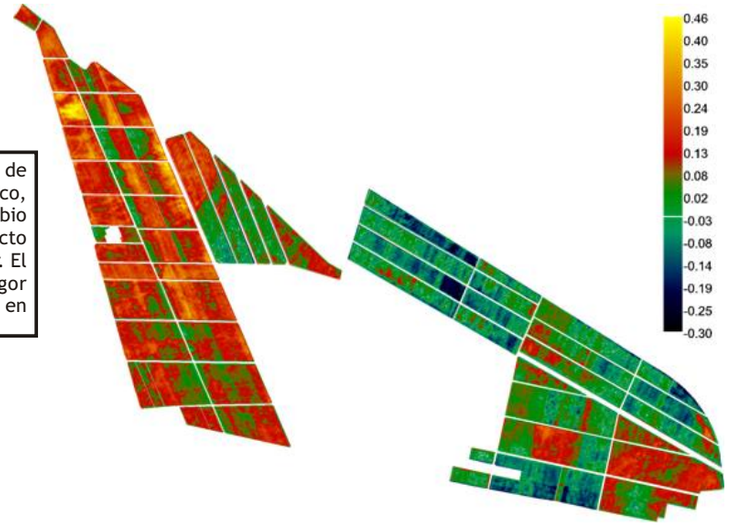

Figura 22: Imagen de detección de cambios en una finca del Valle de Uco, Mendoza. Las escala indica el cambio en valores absolutos de NDVI respecto de la misma fecha del año anterior. El resultado de aumento de vigor intencional es claramente visible en los cuarteles occidentales.

Algunos productores que tienen experiencia en el manejo de sistemas de información geográficos prefieren disponer de los datos originales de NDVI y ensayar sistemas de clasificación que se ajustan a su experiencia o necesidades particulares. Para estos casos resulta conveniente entregar los datos como vectores de puntos, donde cada píxel de la imagen se ha convertido en un punto con coordenadas y un valor de NDVI, y que por el formato empleado admiten manejo por medio de tablas de tipo data base o Excel (Figura 23).

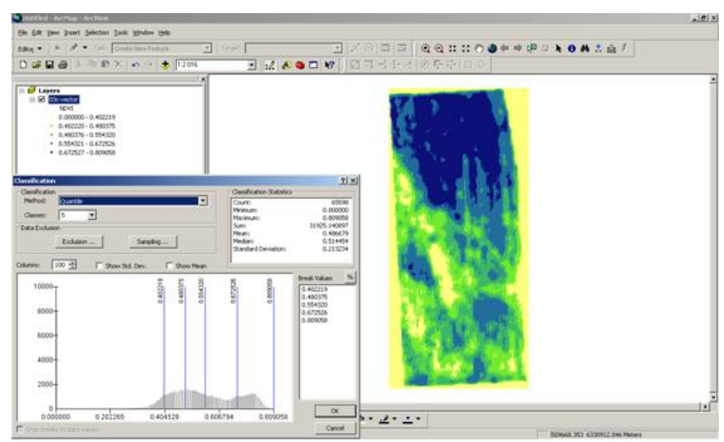

Figura 23: Clasificación en cuantiles sobre un NDVI despeglegado como vector de puntos en un GIS. Este tipo de software es muy versátil para ensayar clasificaciones hasta obtener resultados específicos para una situación o aplicación.

Factores comunes que afectan el NDVI

Como se ha venido indicando, el NDVI puede emplearse fundamentalmente con dos enfoques: empleando el estado de la planta como indicador de la calidad del sitio a fin de ubicar medidas correctivas del vigor, o bien aprovechando la variabilidad para cosechar partidas de uva de calidad diferente.

El empleo de un mapa de NDVI para dirigir la atención a zonas de vigor puede ser tan simple como asistir al viticultor a conocer y recorrer los cultivos bajo su responsabilidad. Por simple, no se trata de un empleo trivial: es muy común que los viticultores dispongan de tiempo insuficiente para recorrer de manera completa los viñedos porque frecuentemente son superficies importantes o se distribuyen en varias fincas. Más aún, cultivos en espalderos insumen mucho tiempo para recorrerse y, al contar con zonas de vigor ubicadas geográficamente, es posible dirigirse directamente a los lugares de interés para ver la situación a campo e identificar las causas o monitorear los resultados de manejos específicos.

Como el NDVI refleja el desarrollo del cultivo, es importante tener en cuenta que todas las condiciones que favorecen o limitan el desarrollo del mismo pueden conducir a diferencias de vigor en el mapa. Son causas comunes de diferencia de vigor en viñedos:

a) La profundidad de suelos: Particularmente en Agrelo y el Valle de Uco, Mendoza, es común que al sistematizar predios se decapiten suelos y queden zonas donde las plantas se establecen sobre suelos someros. En casos extremos, se ven afloramientos de piedra. Un caso análogo es la presencia de caliche a poca profundidad, situación más común en Cruz de Piedra y Barrancas, Mendoza. En estos casos, el cultivo crece sobre suelos con escasa capacidad de retención hídrica y su crecimiento se encuentra visiblemente deprimido. El caso inverso puede observarse en fincas niveladas donde se acumula la fracción fina del suelo en zonas de relleno: la mayor capacidad de retención en estos lugares se ve asociado a vigores relativamente mayores. Cabe agregar que los viñedos implantados sobre suelos extremadamente arenosos, aún cuando éstos sean profundos y no se encuentren alterados, muestran pérdidas de vigor visibles por el mismo problema de dotación de agua (Figura 24).

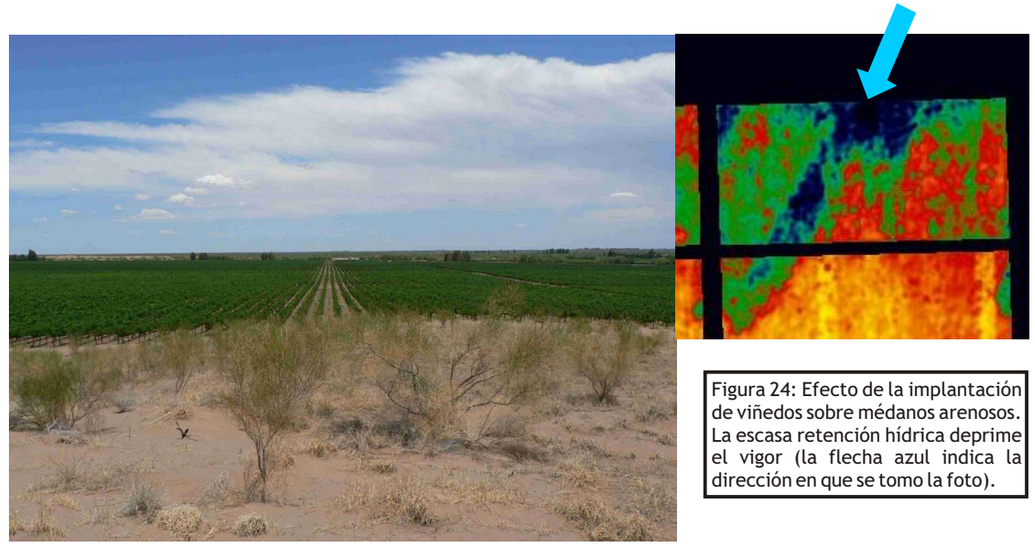

Figura 24: Efecto de la implantación de viñedos sobre médanos arenosos. La escasa retención hídrica deprime el vigor (la flecha azul indica la dirección en que se tomo la foto).

b) Salinidad: Las zonas de acumulación de sales se observan con claridad como zonas de vigor deprimido, tanto por la reducción del potencial hídrico como por toxicidad. El fenómeno es común en algunos campos de Neuquén y en San Juan (Figura 25).

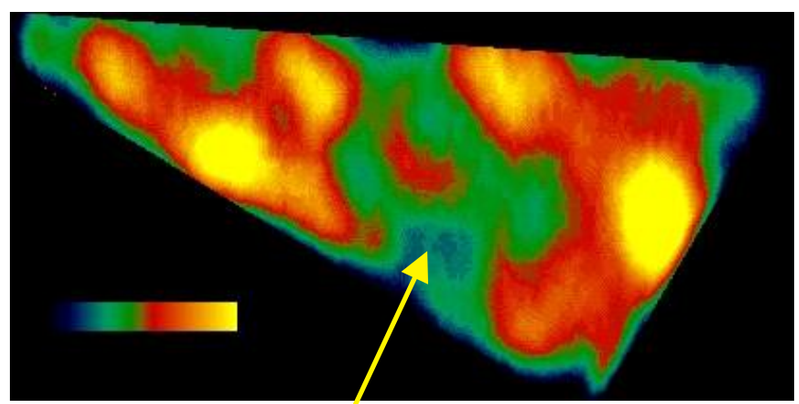

Figura 25: Efecto de la acumulación de sales de escorrentía sobre el vigor medido con NDVI en un cuadro de una finca en Neuquén.

c) Viento: La depresión de vigor por causa de viento se observan a veces en zonas donde no existe protección o ésta tiene poco desarrollo. En Pocito, San Juan, los márgenes de cuarteles expuestos al zonda muestran pérdidas de vigor de éste tipo, no asociadas al suelo.

d) Nutrientes: en zonas donde predominan suelos aluviales de fracciones diversas, además de diferencias derivadas de la retención hídrica, pueden aparecer manchas de vigor asociadas a escasez de nutrientes, en particular de Nitrógeno, limitante que frecuentemente se hace evidente en casos donde la dotación de agua es suficiente. En algunos casos, las diferencias de fertilidad pueden resultar inducidas por manejos previos.

e) Plagas: Las manchas de escaso vigor pueden estar asociadas a la presencia de plagas como nematodos o Phylloxera. En estos casos la diferencia de vigor puede aparecer como no ligada a diferencias importantes de textura o profundidad de suelos (Figura 26).

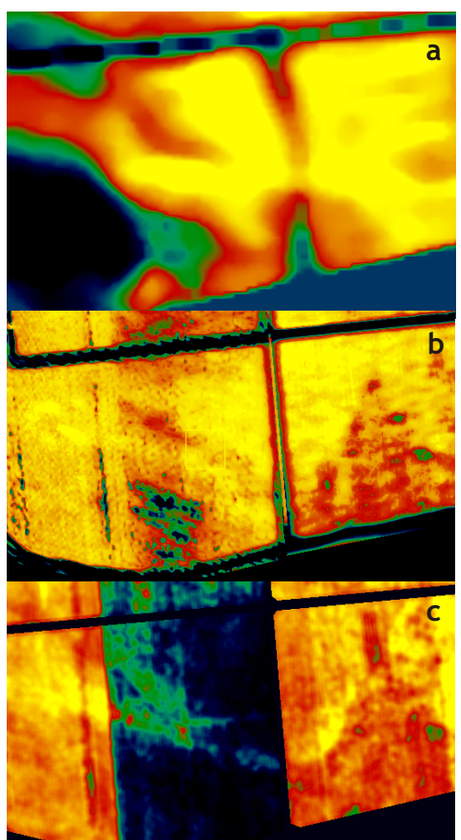

Figura 26: NDVI coloreado de la misma porción de una finca en el Valle de Uco de los años 2003 (a -5m resolución), 2005 (b - 1m resolución), y 2007 (c -2m resolución). La mancha de bajo vigor que se desplaza hacia la derecha es una infestación por nematodes. El control aplicado surtió efecto en el cuartel de más a la izquierda, pero el cuartel central tuvo que ser arrancado.

f) Fenómenos meteorológicos: Los daños por granizo se destacan claramente en los mapas de NDVI (Figura 27a), así como la huellas de heladas que se asientan de manera irregular (Figura 27b).

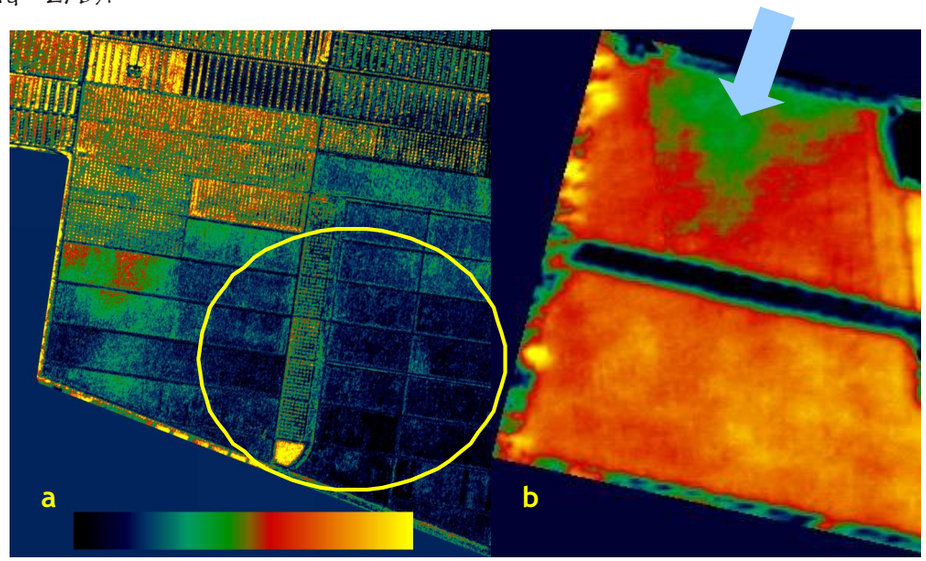

Figura 27: a) La elipse amarilla delimita el daño por granizo en una finca de Barrancas, Mendoza. La defoliación severa conduce a valores muy bajos de NDVI (azul oscuro); b) el ingreso de una masa de aire frío deja su marca en el ciclo siguiente.

g) Cultivos interfilares: Aquellos cuadros donde se cultivan verdeos entre filas alteran el NDVI, aumentándolo, ya que la vegetación verde de distinto tipo es indistinguible con éste tipo de índice. Cuando dichos cultivos son parejos, la variabilidad relativa observable en los mapas de vigor no suele estar demasiado alterada, habida cuenta que los cultivos interfilares copian la calidad del sitio del mismo modo que el viñedo, es decir que crecen mejor donde las condiciones son mejores, al igual que el cultivo (Figura 28 a y c). Resulta importante en estos casos tener en cuenta que los valores de NDVI serán mayores que los que se obtendrían si el suelo interfilar estuviese desnudo, pero que los cultivos interfilares no afectan el valor de NDVI si se encuentran secos, como es el caso de verdeos de ciclo invernal a envero, o en zonas con climas mediterráneos como California (Figura 28d). La vegetación seca tiene valores de NDVI muy semejantes al suelo. Se han señalado excepciones en los casos en los que el cultivo interfilar se establece con el objetivo de competir con el viñedo a fin de restringir su crecimiento, como ocurre a veces en viñedos

de Napa, en California, o en zonas donde se realiza viticultura de secano, como Jaunicó, Uruguay.

h) Malezas: Las malezas generalmente aparecen en manchones irregulares, por lo que alteran considerablemente la apreciación de la variabilidad del cultivo. Corrientemente se desecan químicamente con anticipación a los vuelos, se rotura el suelo, o se siegan. Su presencia es más común y seria en cultivos regados por inundación u orgánicos (Figura 28b), y en parrales pueden invertir las zonas de vigor porque crecen más vigorosamente bajo zonas iluminadas donde el viñedo tiene escasa cobertura.

Figura 28: Vegetación interfilar en viñedos con conducción vertical: a) Verdeo interfilar en un espaldero con malla antigranizo en Agrelo, Mendoza; b) Malezas interfilares en un espadero orgánico en Chilecito, La Rioja; c) Verdeo interfilar en un espaldero del Valle de Uco, Mendoza; d) Malezas secas interfilares durante el verano en Sonoma, California.

i) Manejo: distintas válvulas de riego (Figura 29), intensidad de poda o desbrote, oportunidad de despampanado, o manejos de canopia (como los de canopia libre) modifican el vigor, la cobertura, y el NDVI.

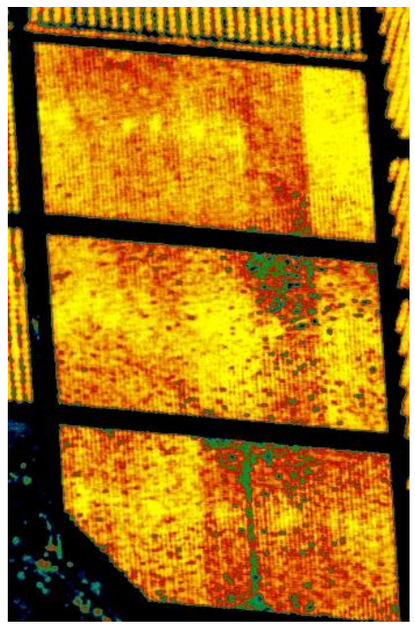

Figura 29: Diferencias en el NDVI originados en diferente presión de suministro de agua en goteros alimentados por válvulas de riego distinto en tres cuadros de espalderos en Chilecito, La Rioja.

j) Malla antigranizo: La presencia de malla (Figura 28 a) modifica los valores de NDVI, principalmente por la proporción de vegetación que asoma por encima como pámpanos en espalderos con malla Grenbouille (con mucho las más común). La malla negra no altera significativamente los valores de NDVI de la vegetación cubierta, ya que al normalizarse la diferencia entre el NIR y el R se corrige la baja en la iluminación (Figura 30). Si bien es rara, hay motivos para suponer que la malla cristal, sin embargo, puede provocar diferencias porque refleja parte de la luz directamente.

Resulta evidente que existe una variedad de factores que contribuyen a alterar los valores de NDVI dentro de un predio. La mayoría de los factores que más influyen (variedad, estructura, conducción, cultivo interfilar) son resultados del manejo y, por lo tanto, constantes para un ciclo productivo. Por este motivo, si se desea derivar información cuantitativa a partir de mapas de NDVI, resulta importante establecer relaciones distintas para cada variedad, sistema de conducción, etc. (Figura 31).

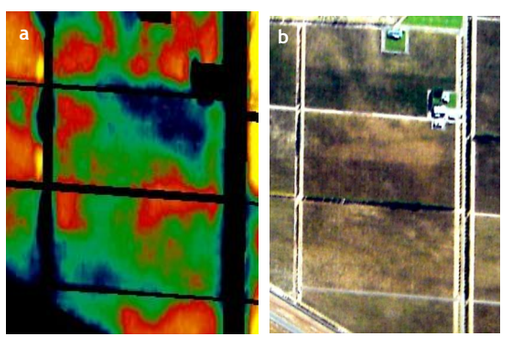

Figura 30: Efecto de la malla antigranizo en espalderos de Neuquén: a) NDVI coloreado donde el efecto de la malla no se observa; b) en la imagen RGB la presencia de malla negra es claramente visible en la mitad inferior de dos cuarteles.

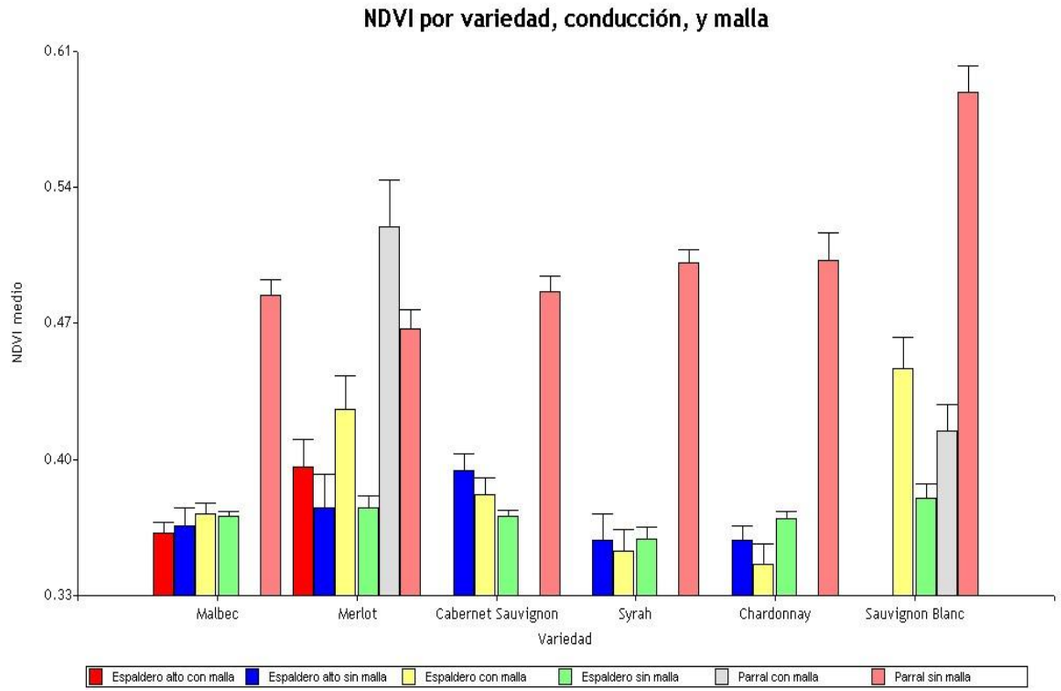

Figura 31: Valores de NDVI medio obtenidos de imágenes Landsat en cuarteles de distintas variedades y sistemas de conducción en el Valle Central de Mendoza. Resulta evidente que las diferencias entre variedades se deben no solo al vigor distinto entre ellas, sino al sistema de manejo a que cada variedad se somete, frecentemente relacionado al precio de la uva y al objetivo de calidad buscado.

Usos comunes

Cuando los mapas de NDVI se emplean para identificar las causas de las diferencias de vigor, puede ocurrir que no resulte evidente cual es la causa dominante. En aquellos casos en los que el técnico a cargo carezca de experiencia en la zona, o bien no haya modo de conocer con certeza la limitante principal de una mancha de vigor, en algunos casos puede descartarse o corroborarse mediante otras técnicas de diagnostico, como el mapeo de Conductividad Eléctrica, la cual permite confirmar si las causas radican en condiciones del suelo (Figura 32).

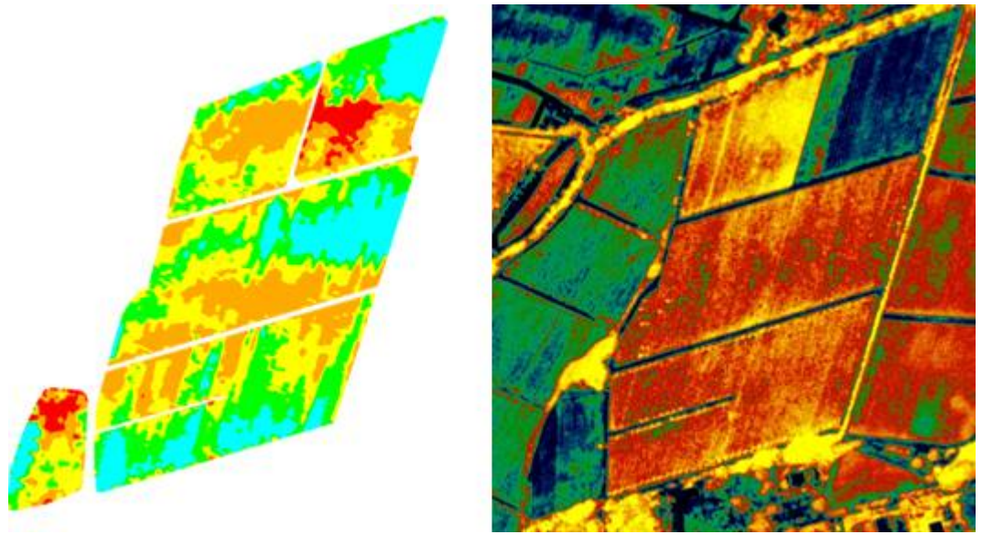

Figura 32: Variabilidad de suelos y NDVI: a) Mapa de conductividad eléctrica (CE) en una finca de Cruz de Piedra, Mendoza; b) NDVI coloreado de la misma finca. Si bien hay patrones semejantes, el NDVI resulta condicionado por diversos factores además de las condiciones edáficas. La CE puede indicar condiciones de textura, presencia de sales, o profundidad de suelo. La finca en cuestión tiene riego superficial, por lo que la acumulación de agua por diferencias de microrrelieve o sentido del riego puede determinar importantes diferencias de vigor.

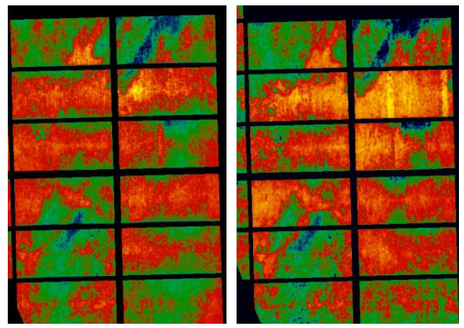

Figura 33: NDVI coloreado de dos años sucesivos de la misma porción de una finca en Caucete, San Juan. Los patrones de vigor persistentes a lo largo de los años frecuentemente se deben a condiciones edáficas.

Una vez identificada y cuantificada la causa de un vigor de incorrecto, el viticultor deberá decidir las medidas de manejo correctivas. Estas podrán ser ejecutadas dentro del ciclo de crecimiento en el cual se elaboro el mapa, o bien postergarse para su aplicación la campaña siguiente. Esta decisión dependerá de una serie de factores como la urgencia para corregir una canopia excesivamente vigorosa, lo cual tal vez se esté a tiempo de hacer con un relevamiento cercano a envero, o la necesidad de elevar la fertilidad de una zona mediante enguanado, lo cual exige tiempos mayores y puede realizarse antes del ciclo siguiente. Asimismo, será importante tener motivos para creer que las diferencias de vigor son espacial y temporalmente persistentes (Figura 33).

Además de asistir a ubicar los manejos correctivos, el monitoreo anual mediante NDVI resulta frecuentemente la única manera cierta de evaluar el éxito relativo de la medida realizada (Figura 34). Esto ocurre por el hecho sencillo que se carecen de modelos cuantitativos para predecir con precisión el resultado de acciones de uso común, por lo que resulta necesario dimensionarla empíricamente y comparar el resultado con el año anterior o con zonas donde el manejo no se aplicó. Por ejemplo, resulta difícil saber con certeza cual será el resultado de regar con mayor caudal una mancha de escaso vigor. La zona puede delimitarse, se pueden duplicar mangueras o goteros, pero el aumento del riego justo será en gran medida estimado por el viticultor y dependerá de su experiencia.

La manera de saber si el manejo decidido ha sido insuficiente, justo, o excesivo es mediante la revisión de la estadística de dos años sucesivos de mapeos, o con un trabajo de detección de cambios. En el primer caso, debe buscarse en la estadística entregada cuales son los valores medios de NDVI por clase, lo que indica si el valor de vigor obtenido por clase es el deseado. Cuando el objetivo es reducir la variabilidad general del lote, los valores de dispersión tienen que haberse reducido entre una campaña y la siguiente (Figura 34). Ambos resultados son fáciles de visualizar si se ha realizado un estudio de detección de cambios (Figura 22).

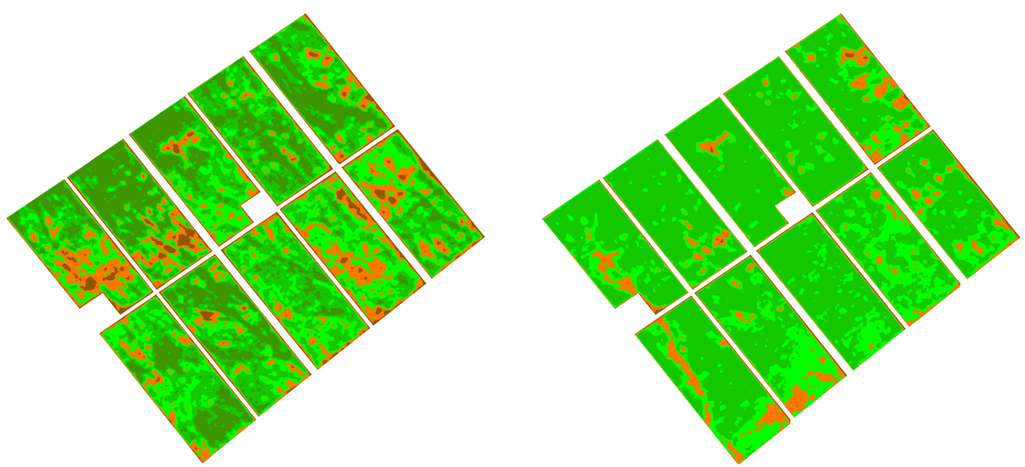

Figura 34: Efecto del manejo variable en la reducción de la variabilidad del NDVI en una finca parrales para uva de mesa de dos años sucesivos en Zonda, San Juan.

Cosecha por zonas de NDVI

Para su empleo en la zonificación de cosecha se aprovecha el hecho simple que al clasificar el NDVI de una unidad menor o mayor, dentro de una clase quedan agrupados los puntos del cuadro donde la foliosidad de la planta es semejante. En particular, si en dicho cuadro no se han realizado raleos de frutos que equilibren el cultivo según la cantidad de brotes u otro parámetro, las zonas de vigor representarán estados distintos de equilibrio. Mínimamente, dentro de cada clase el cultivo será más uniforme que dentro del cuadro entero, y puede esperarse que la calidad del fruto también lo sea. De hecho, se ha corroborado de manera suficiente como para que una importante cantidad de bodegas emplee la cosecha por zonas para separar calidades de uva distintas que dan origen a vinos de valor muy disímil.

La zonificación por si no da indicación a priori sobre la calidad de uva de cada zona de vigor, sino solamente indica que la diferencia es suficiente para asegurar la elaboración de vinos significativamente distintos entre si, hecho que ha sido avalado por diversos estudios me micro y macro vinificación en Argentina y el exterior. En Chile, EE.UU., y Australia se ha encontrado que las zonas de vigor se corresponden con contenidos marcadamente distintos de antocianos y otras sustancias. Además de la calidad, resulta común que el contenido de azúcares entre zonas difiera por hasta 2° Brix, motivo por el que en algunos casos la cosecha no solo se separa por zonas sino también por fechas.

La pregunta que surge habitualmente es si resulta posible predecir la calidad por zona. Esto puede resolverse solo mediante la elaboración de funciones que correlacionen algún parámetro de calidad con el NDVI. Es este sentido, existen tres posibilidades inmediatas:

a) Emplear el NDVI para estimar el peso de poda y emplear éste dato de manera tradicional para determinar el equilibrio logrado por sitio. La correlaciones de NDVI – peso de poda suelen brindar ajustes buenos (Figura 35), en especial sobre muestras de un claro, ya que la dificultad de obtener a partir de imágenes datos de NDVI puros por planta se dificulta por problemas de la georreferenciación precisa necesaria y por la integración en un píxel de valores de suelo y planta, en particular a las resoluciones espaciales habitualmente utilizadas. Hay que agregar que el empleo del peso de poda supone que el vigor se expresará de manera persistente en años sucesivos, presunción que se cumple mejor en zonas de cultivo áridas donde el manejo del riego es el principal determinante del vigor, y éste se

aplica de modo estandarizado.

b) Establecer relaciones entre parámetros de calidad, como los antocianos, y el NDVI. A la luz de una serie de ensayos, esto parece factible pero carecemos al momento de información que corrobore que dichas relaciones son estables entre campañas.

c) Si se dispone de funciones que relacionen el NDVI con el rendimiento y con el área foliar, resulta posible calcular el cociente entre ambos y extraer un mapa de equilibrio del viñedo durante la campaña en curso (Figura 36). Esto habilitaría la cosecha diferencial de zonas equilibradas de calidad establecida, además de permitir la corrección de zonas de vigor excesivo mediante despampanados, deshojes, o desbrotes. Resulta más difícil en esos casos corregir el equilibrio en zonas de vigor insuficiente, a menos que se considere un raleo tardío de frutos Si bien ésta estrategia aparece como importantísima, resulta necesario contar con ajustes muy buenos entre en NDVI, el rendimiento, y el área foliar, los cuales aún no se han elaborado.

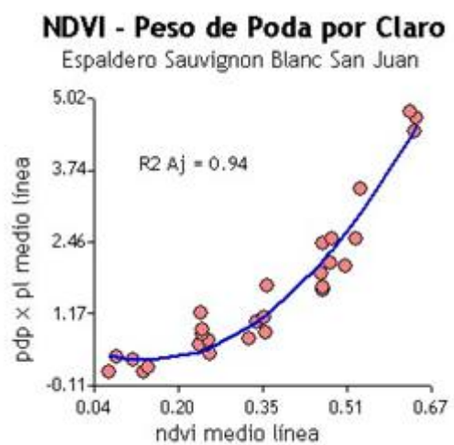

Figura 35: Función de regresión entre NDVI y peso de poda por claro (5 plantas contiguas) para espalderos de Sauvignon blanc en Caucete, San Juan.

La realización de funciones de ajuste debe tomar en cuenta las fuentes de ruido citadas con anterioridad. En esto resulta crucial el criterio del viticultor al momento de diseñar los ensayos. Afortunadamente, en al actualidad se conocen ya una serie de funciones de éste tipo que permiten conocer el tipo de ajuste y por lo tanto ayudan a determinar la cantidad de muestras necesarias a partir de la dispersión de los datos del NDVI. Esta circunstancia no es trivial, ya que la dispersión de los datos es lo que determina el tamaño de las muestras y de la unidad muestral, y una causa común de fracaso el este tipo de esfuerzo radica en la toma de muestras de tamaño insuficiente. Para el muestreo a campo, el conocimiento de la distribución del campo, el conocimiento de la distribución del vigor del cultivo y su dispersión en absolutamente fundamental para el muestreo exitoso y para no incurrir en gastos inservibles por muestreos inútiles, ya que resulta siempre importante conocer la representatividad de muestras y los mapeos de vigor permiten el muestreo estratificado que lo asegura.

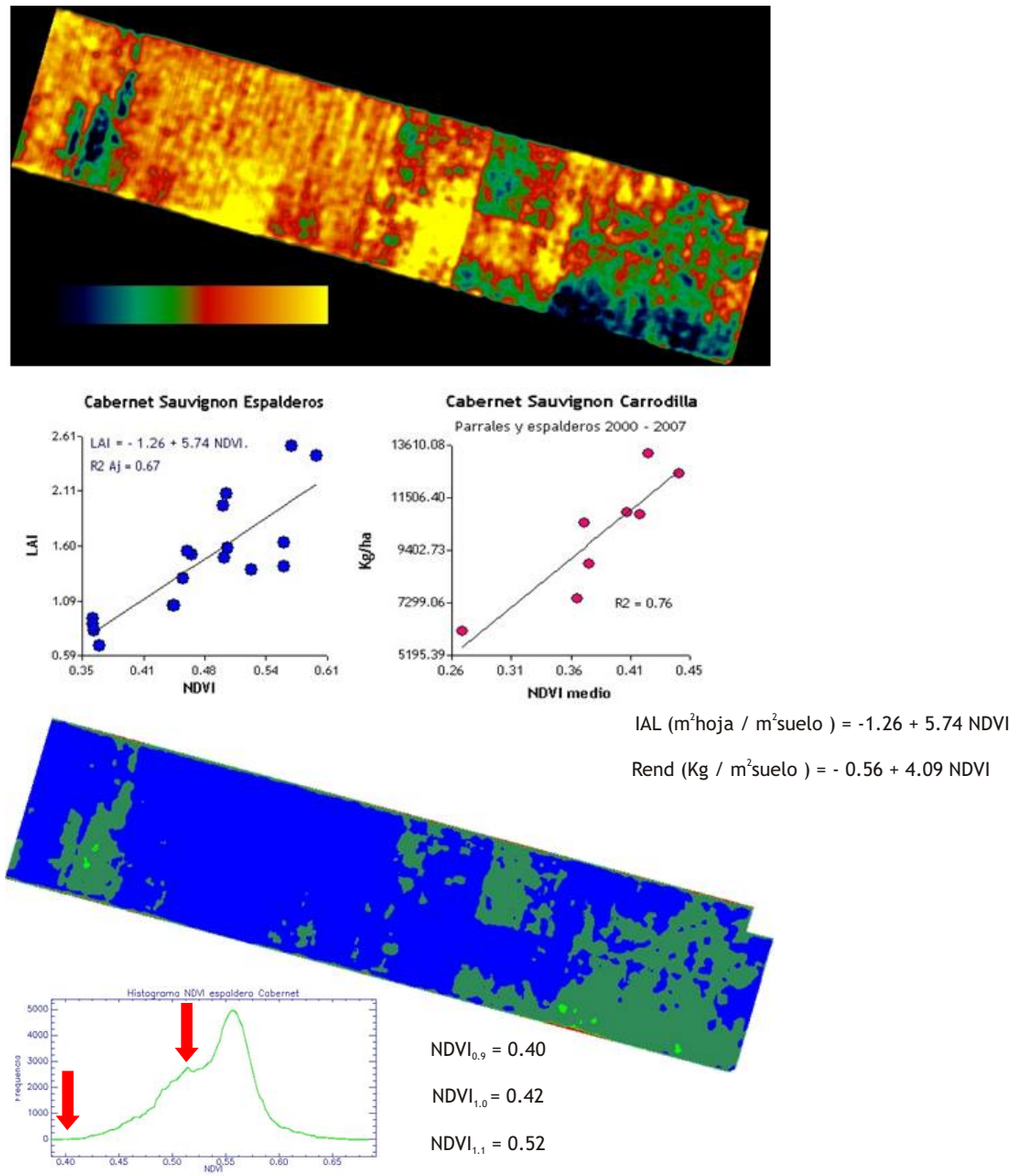

Figura 36: Procedimiento para mapeo de equilibrio en viñedos: a) NDVI coloreado empleado para dirigir muestreos de IAF y Rendimiento; b) funciones de regresión NDVI - IAF y NDVI - Rendimiento; c) clasificación de rangos de equilibrio determinados por el productor como deseables; d) histograma de NDVI de cuadro mostrando (flechas rojas) en rango dentro del cual el vigor en el cuadro tiene el equilibrio deseado. Puede apreciarse que una parte importante del mismo está excedido de vigor.

Resumen de aplicaciones corrientes

A modo de resumen, pueden listarse los usos que corrientemente reciben los mapas de vigor, a saber:

1. Usos del NDVI relativo

1.1. Para identificar causas de diferencias de vigor

1.1.1. Facilitación de recorrido de viñedos para inspección visual de estado

1.1.2. Muestreo dirigido de parámetros de interés, y cantidad de muestras según proporción de cada clase de vigor

1.1.3. Corrección de limitantes presuntas empleando superficies delimitadas por clases de vigor

1.1.3.1. Aumento de cantidad de goteros en zonas de escaso vigor, tapado de goteros en zonas de vigor excesivo
1.1.3.2. Agregado de mangueras de riego en zonas de escaso vigor, cuando el patrón de falta de vigor corre en la misma dirección que la estructura
1.1.3.3. Agregado de guano en manchas de escaso vigor
1.1.3.4. Agregado de mulch en zonas con problemas por temperatura o evaporación excesiva
1.1.3.5. Aplicación de raleos o despampanados selectivos por zona, empleando reglas basadas en la experiencia pero empleando los mapas para definirlas

1.2. Para zonificar la cosecha

1.2.1. Cosecha por zonas con destinos en bodega distintos
1.2.2. Cosecha en fechas distintas con monitoreo de madurez

2. Uso del NDVI calibrado

2.1. Todos los posibles con NDVI relativo
2.2. Monitoreo de resultados en la corrección de la dispersión
2.3. Monitoreo de resultados en el logro de vigores objetivos
2.4. Detección de cambios para determinar magnitud de diferencias entre años
2.5. Predicción de cosecha
2.6. Mapas de peso de poda
2.7. Determinación de ubicación y tamaño de muestras
2.8. Mapeo de equilibrio
2.9. Mapas de presión de raleo y defoliación

Ya sea que se empleen de la manera más sencilla o sofisticada, la percepción de la variabilidad existente debe tener como primera consecuencia la toma de conciencia sobre la importancia de muestrear SIEMPRE de manera georreferenciada, es decir tomando en cuenta al vigor del cultivo a fin de poder comparar resultados de distintos sitios y fechas. No menos importante, al momento de empezar a realizar funciones cuantitativas a partir de NDVI es condición necesaria, por lo menos a la fecha, establecerlas de manera individual para cuadros o fincas en particular, y no extrapolar los resultados.

Precauciones en el uso del NDVI

Al mirar mapas de vigor o revisar las estadísticas derivadas de la clasificación de un NDVI calibrado, conviene recordar los factores de imponen diferencias a los valores medios de clases o cuarteles.

a) La variedad. Además de diferencias entre el área foliar de variedades distintas sometidas a manejo similar, en ocasiones ocurre que variedades de menor valor son manejadas de modo de permitir mayor foliosidad o mayor rendimiento (Figura Landsat)
b) El objetivo de calidad. Es importante tener en cuenta que el manejo de canopia, en particular las presiones de poda, determinan en gran medida la cantidad de hoja, y por lo tanto de NDVI, en un cuadro. La misma variedad puede acusar valores de

NDVI muy distintos cuando en un cuadro el destino de la uva es de calidad diferente al de otro cuadro.

c) La presencia de malezas al momento del relevamiento

d) La presencia de cultivos interfilares y su condición. A tener en cuenta cuando la implantación de cultivos interfilares en un cuadro no se hace de igual manera año tras año. Por ejemplo, puede cambiar la especie, la densidad, o hacerse fila por medio.

e) Sombras: el suelo desnudo presenta un NDVI relativamente alto respecto del suelo iluminado. Cuando en años sucesivos la fotografía se adquiere en horas del día con inclinaciones solares muy distintas sobre estructuras que exponen mucho suelo, como los espalderos, la presencia de sombras interfilares puede ocasionar valores de NDVI diferentes con un estado idéntico del cultivo. Idealmente, los planes de vuelo deberían contemplar capturas en horas parecidas de un año a otro, o informar la hora de captura en la imagen (Figura 37).

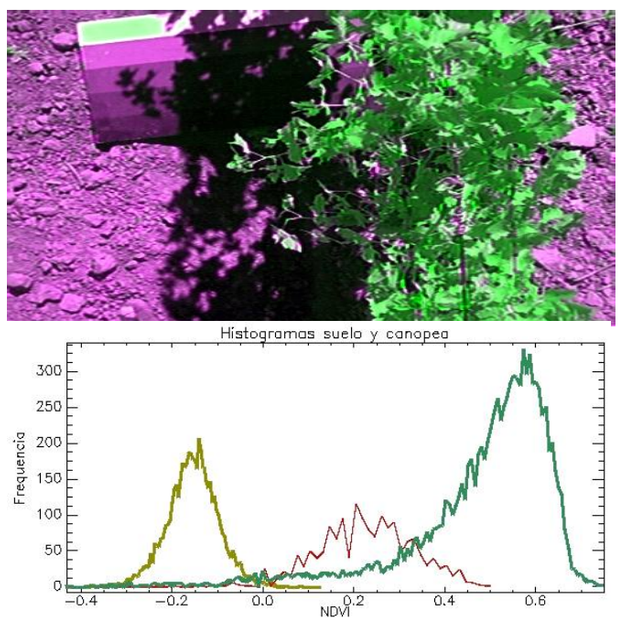

Figura 37: Imagen de un espaldero tomado con una cámara NIR + R. El histograma muestra la distribución del NDVI del suelo iluminado (marrón claro), del suelo sombreado (rojo oscuro), y de las hojas (verde). Resulta importante advertir que el suelo sombreado tiene un NDVI más alto que el suelo iluminado, lo cual afecta los valores de NDVI en imágenes tomadas con inclinaciones solares bajas.

f) Estrés. La plantas estresadas presentan diferencias de NDVI respecto de las no estresadas. El fenómeno está asociado al grosor de la película de agua que cubre las células del mesófilo y a los fenómenos de fluorescencia de la clorofila bajo estrés o saturación lumínica. Este problema puede eludirse capturando las imágenes durante la mañana.

g) Variabilidad inducida. Las consecuencias del cambio de manejo o fallas en los sistemas de riego provocan cambios en el NDVI. Se observa con cierta frecuencia que el despampanado se realiza con diferente anticipación a la toma de imágenes, de modo que la biomasa al momento de la toma puede estar condicionada por la fecha de la defoliación. El fenómeno es más notable en cultivos con malla antigranizo en la que los pámpanos sobresalen de la malla.

Estas y otras circunstancias deben tenerse presentes al comparar el NDVI de cuadros o años distintos.