

Universidad Pública de Navarra

Nafarroako Unibertsitate Publikoa

**ESCUELA TECNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS AGRONOMOS**

*NEKAZARITZAKO INGENIARIEN
GOI MAILAKO ESKOLA TEKNIKOA*

Evaluación del interés del Índice Vegetativo Diferencial Normalizado (NDVI)
para la definición de Unidades de Manejo Diferenciado del Viñedo en la Rioja Alavesa.

presentado por

Nagore Echevarria Fano-*k*

aurkeztua

INGENIERO AGRONOMO
NEKAZARITZA INGENIARITZA

Noviembre, 2010 / *Azaroaren 2010 ean*

UNIVERSIDAD PÚBLICA DE NAVARRA

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE
INGENIEROS AGRÓNOMOS**

TRABAJO FIN DE CARRERA DE INGENIERO AGRÓNOMO

**“Evaluación del interés del Índice Vegetativo
Diferencial Normalizado (NDVI) para la definición de
Unidades de Manejo Diferenciado del Viñedo en la
Rioja Alavesa.”**

Trabajo Fin de Carrera presentado por D.
Nagore Echevarria Fano al objeto de optar
al título de Ingeniero Agrónomo. Dirigido
por Dr. Luis Gonzaga Santesteban García,
profesor titular del Departamento de
Producción Agraria.

Vº Bº El director del trabajo

Presentado por

Luis Gonzaga Santesteban García

Nagore Echevarria Fano

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado a través de un contrato suscrito entre el Grupo de Investigación "Fruticultura y Viticultura Avanzadas", liderado por el Dr. Bernardo Royo, y la empresa Verdtech Nuevo Campo, a la que quiero agradecer su interés y colaboración en el desarrollo del mismo.

Quisiera agradecer su colaboración y disposición a Bodegas Luis Cañas, en especial a Jose y Olaia, las cuales han participado y prestado su ayuda en todo momento.

Quisiera dar un especial agradecimiento a mi tutor Gonzaga, el cual me ha prestado su ayuda y consejo y gracias a él he podido aprender lo bueno de la viticultura. Como no, dar las gracias igualmente a Bernardo y Carlos por permitirme aprender tanto en estos dos años en los que he podido estar con ellos. Además quiero agradecer a Joaquin y Mariaje por estar ahí siempre.

Después de tantas horas de campo juntas debo agradecer su apoyo y consejo a Inés, al igual que al resto de componentes del grupo de Viticultura y Fruticultura: Maite, Marta, Jorge, Ana, Cristina, Selma y Maitane.

RESUMEN

La variabilidad existente en una parcela condiciona en gran medida la implantación y el manejo de los cultivos. Esta variabilidad implica a su vez una variación espacial intraparcelar del rendimiento y de la calidad de la cosecha obtenida. El establecimiento de Unidades de Manejo Diferenciado en un viñedo permite, por un lado, diferenciar las labores de cultivo que se realizan en distintas zonas de una parcela, adaptándolas a las necesidades de cada una de ellas y, por otro, diferenciar niveles de calidad de uva, que pueden ser dirigidos a la elaboración de vinos de distinta calidad. La Viticultura de Precisión se presenta como un posible enfoque para la resolución de este problema, utilizando técnicas que permiten, a partir de información adquirida de modo remoto, determinar algunas características de interés del viñedo. Una de estas técnicas es el empleo de cámaras multiespectrales, que permiten calcular de los llamados índices de vegetación, siendo el más utilizado el NDVI (Índice Vegetativo Diferencial Normalizado

El objetivo de este Trabajo de Fin de Carrera es evaluar el interés del NDVI para la definición Unidades de Manejo Diferenciado en el viñedo.

El trabajo consistió en dos ensayos. El primero de ellos se centró en el estudio de la evolución del estado hídrico dentro del viñedo, comparando zonas que diferían en su valor de NDVI. Para ello, se establecieron en tres parcelas puntos de medición del potencial hídrico (Puntos de Seguimiento Hídrico, PSH) en los que se realizó un seguimiento del estado hídrico utilizando medidas de potencial xilemático a las 9 y a las 12 (hora solar). Los resultados obtenidos han demostrado que el NDVI no permite, en las condiciones de estudio, delimitar zonas del viñedo con un comportamiento hídrico diferente.

El segundo ensayo consistió en comparar características de las cepas medidas *in situ*, como son el crecimiento, la carga, el número de hojas secas y las características espectrales de la hoja, con las clases establecidas de NDVI. Para ello se estableció una red de Puntos de Zonificación (PZ) que permitieron hacer una caracterización detallada de la parcela. El estudio realizado determinó que el empleo del NDVI permite diferenciar zonas del viñedo en lo relativo a su crecimiento vegetativo, carga y características espectrales de la hoja y que, por ello, este parámetro podría contribuir a racionalizar prácticas de cultivo tales como el abonado, el aclareo de racimos, el deshojado, etc., ajustando la intensidad de las mismas a las necesidades de cada zona del viñedo

Palabras clave: Viticultura de Precisión, Unidades de Manejo, NDVI, potencial hídrico, clorofila.

Índice

I.- Antecedentes	6
I.1.- Importancia de la vid	6
I.2.- Ciclo de la vid	7
I.2.1.- Ciclo vegetativo	7
I.2.2.- Ciclo reproductor	10
I.3.- La variabilidad espacial en la agricultura	15
I.3.1.- Las propiedades geográficas de la parcela.....	16
I.3.1.1.- La orientación	16
I.3.1.2.- El relieve	16
I.3.2.- Las características del suelo.....	16
I.3.2.1.- Propiedades físicas del suelo	16
I.3.2.2.- Propiedades químicas del suelo	18
I.4.- El manejo de la variabilidad espacial intraparcelar en la agricultura	18
I.4.1.- La agricultura de precisión.....	19
I.4.2.- Herramientas en la Agricultura de Precisión	20
I.4.2.1.-Teledetección remota	20
I.4.2.2.- Sensores proxy	26
I.4.2.3.- Sensores de suelo	27
I.4.2.4.- Medidas puntuales realizadas in situ.....	29
I.5.- Experiencias de la agricultura de precisión en la viticultura	30
II.- Objetivo	41
III.- Material y método	42
III.1.- Material	42
III.1.1.- Material vegetal.....	42
III.1.2.- Material instrumental	43
III.2.- Método	44
III.2.1.-Ensayo nº 1	44
III.2.2.- Ensayo nº 2.....	49
IV.- Resultados y discusión.....	53
IV.1.-Análisis previo	53
VI.2.- Evaluación del interés del NDVI para diferenciar zonas del con similar funcionamiento hídrico (Ensayo 1	55

IV.3.- Evaluación del interés del NDVI para la diferenciación de Unidades de Manejo del Viñedo (Ensayo 2)	65
IV.3.1.-Crecimiento vegetativo	65
IV.3.2.-Carga	65
IV.3.3.- Número de hojas secas	66
IV.3.4.- Características espectrales de la hoja	67
V.- Conclusiones	69
VI.- Bibliografía	70
VII.- Anexos	75
VII.1.- Anexo 1: Índices vegetativos.....	75

Índice de tablas

Tabla 1: Intervalos de NDVI que definen cada una de las clases de NDVI en las parcelas estudiadas	56
Tabla 2: Análisis comparativo del crecimiento vegetativo según la suma de sección de pámpanos en cada clase de NDVI.	69
Tabla 3: Análisis comparativo de la carga según la media del número de racimos en cada clase de NDVI.....	70
Tabla 4: Análisis comparativo del número de hojas secas en cada clase de NDVI.	70
Tabla 5: Análisis comparativo del contenido en clorofila y flavonoles según la clase de NDVI en la parcela 084.	71
Tabla 6: Análisis comparativo del contenido en clorofila y flavonoles según la clase de NDVI en la parcela 096.	71

Índice de Figuras

Figura 1: Sensor GreenSeeker con GPS montado en un quad	31
Figura 2: Sistema de mapeado Veris 3100 y un diagrama de la unidad de trabajo	32
Figura 3: Sensor EM38DD y esquema del método de trabajo.	33
Figura 4: Reflectividad del suelo desnudo, la vegetación sana y la vegetación enferma según las distintas longitudes de onda.	43
Figura 5: Localización las parcelas.....	47
Figura 6: Medidor de la relación Clorofila/Flavonoles Dualex (Force-A, Orsay, Francia)	48
Figura 7: Conversión de la imagen real (1) a IR (2) y el posterior NDVI (3)	49
Figura 8: Ubicación de los Puntos de Seguimiento Hídrico (PSH) en la parcela ...	50
Figura 9: Proceso de medición del potencial hídrico.....	51
Figura 10: Distribución de los Puntos de Zonificación (PZ) en las parcelas.	53
Figura 11: Medición del contenido en clorofila y flavonoles mediante el medidor Dualex (Force-A, París, Francia).	55
Figura 12: Detalle del medidor de clorofila Dualex ((Force-A, Orsay, Francia)....	55
Figura 13: Histograma del NDVI de la parcela 084 (a), en la 096 (b) y en la parcela 114 (c).....	58
Figura 14: Evolución del potencial xilemático de 3 clases de NDVI en la parcela 084 a las 9:00 hs.	59
Figura 15: Evolución del potencial hídrico de los puntos de NDVI bajo (a), medio (b) y alto (c) en la parcela 084 a las 9:00 hs.....	60
Figura 16: Evolución del potencial hídrico de 3 clases de NDVI en la parcela 084 a las 12:00 hs.	61
Figura 17: Evolución del potencial hídrico de los puntos de NDVI bajo (a), medio (b) y alto (c) en la parcela 084 a las 12:00 hs.....	61
Figura 18: Evolución del potencial hídrico de 3 clases de NDVI en la parcela 096 a las 9:00 hs.	63

Figura 19: Evolución del potencial hídrico de los puntos de NDVI bajo (a), medio (b) y alto (c) en la parcela 096 a las 9:00 hs.	63
Figura 20: Evolución del potencial hídrico de 3 clases de NDVI en la parcela 096 a las 12:00 hs.	64
Figura 21: Evolución del potencial hídrico de los puntos de NDVI bajo (a), medio (b) y alto (c) en la parcela 096 a las 12:00 hs.	65
Figura 22: Evolución del potencial hídrico de 2 clases de NDVI en la parcela 114 a las 9:00 hs.	66
Figura 23: Evolución del potencial hídrico de los puntos de NDVI bajo (a) y alto (b) en la parcela 114 a las 9:00 hs.	66
Figura 24: Evolución del potencial hídrico de 2 clases de NDVI en la parcela 114 a las 12:00 hs.	67
Figura 25: Evolución del potencial hídrico de los puntos de NDVI bajo (a) y alto (b) en la parcela 114 a las 12:00 hs.	67

I.- Antecedentes

I.1.- Importancia de la vid

La vid es uno de los cultivos más extendidos mundialmente. Con una superficie mundial de casi 8 millones de hectáreas representa, a pesar de su decrecimiento en los últimos años, una gran importancia económica. En Europa, continente con mayor antigüedad en su cultivo, contiene cerca del 60 % de la superficie mundial total, siendo los países más importantes España, como el primero en cuanto a superficie invertida, Francia e Italia. Sin embargo, en los últimos 10 años ha comenzado la aparición de nuevos países productores, entre los cuales cabe destacar China, con un claro aumento de la superficie. Su extensión llega a países como Irán, Argentina, Rumania, Australia o Sur África (MARM, 2009; OIV, 2006).

En cuanto a las producciones, Europa sigue permaneciendo en el primer puesto pero con menor dominancia, seguido por Asia, con una viticultura relativamente joven. En este caso hay que destacar el estado de España, el cual a pesar de estar en primer lugar en cuanto a superficie destinada a la vid, se sitúa en el 5º lugar en cuanto a producción. Señalar la clara disminución de la producción en los países europeos, en busca de una mejor calidad a costa de una menor producción (MARM, 2009; OIV, 2006).

El destino de toda esta producción es muy variado, desde uva para fresco a pasas. Europa es el principal productor que destina la uva a la elaboración de vino. A pesar de decrecer en los últimos años, países como Italia, Francia y España mantienen una dominancia con respecto al resto de países. La apertura del libre mercado ha proporcionado la promoción del resto de países como Chile, Argentina, o Australia (MARM, 2009; OIV, 2006).

España, siendo uno de los países con mayor superficie vitícola, elaboró un método de distinción y reconocimiento de los vinos nacionales. Así, inscritos dentro de los Vinos de Calidad Producidos en una Región Determinada (VCPRD), se encuentran las 4 denominaciones distintas con las que puede contar un vino: Vino de Calidad con Indicación Geográfica, Denominación de Origen, Denominación de Origen Calificada, y los Vinos de Pago. En conjunto representan a 73 VCPRD distribuidos por todo el país, siendo Castilla La Mancha la comunidad con mayor número de vinos de calidad certificados (MARM, 2009; OIV, 2006).

Sin duda, La Rioja se presenta a la cabeza de todas las comunidades con mayor superficie invertida en la producción de vino (48,1 %), y con mayor número de bodegas elaboradoras (cerca de 1100). De esto hay que destacar la menor producción obtenida en los últimos años, limitando cada vez más la producción por hectárea por parte de las Denominaciones, manteniendo y promoviendo la mayor calidad del vino (MARM, 2009; OIV, 2006).

Hablando a nivel económico, la producción de vino nacional supuso en la pasada campaña 2008-2009 un total de 1.802 millones de euros, de ellos el 52 % proveniente del comercio exterior y el 48 % del comercio nacional. Esto da una clara idea del enfoque productor a vinos de mayor calidad y con denominación calificada para su promoción y venta exterior (MARM, 2009; OIV, 2006).

1.2.- Ciclo de la vid

La vid es una planta perenne, la cual tiene una sucesión de ciclos anuales interdependientes, pues las condiciones de vegetación a lo largo de un ciclo debidas al medio y al hombre, tienen influencias en los ciclos vegetativos siguientes (REYNIER, 2002).

1.2.1.- Ciclo vegetativo

a) El lloro

Antes de la entrada en vegetación, se observa, al final del invierno, una exudación a nivel de las heridas de poda, que comienza por un simple rezumo para hacerse intenso y detenerse. La duración de los lloros es generalmente de varios días, pero alcanza hasta tres o cuatro semanas (REYNIER 2002).

Los lloros corresponden a la entrada en actividad del sistema radicular por acción de la elevación de la temperatura del suelo. Se produce una activación de la respiración celular, una recuperación de la absorción de agua y de elementos minerales, así como una movilización de las reservas. Los fenómenos osmóticos provocan un movimiento ascendente de savia que en ausencia de vegetación se derrama a nivel de las heridas de poda. El cese de los lloros está provocado por el desarrollo de bacterias que forman, en el líquido, una masa viscosa que obtura los vasos leñosos (REYNIER 2002).

Los lloros no parecen jugar un papel fisiológico. Incluso cuando son abundantes, no parece provocar un debilitamiento de la cepa, pero sí puede causar inconvenientes: aumenta la sensibilidad a las heladas primaverales de las yemas rehidratadas por su exudación, por ello se aconseja, en la poda, hacer un corte oblicuo opuesto a la yema; y dificulta la formación del tejido de soldadura en el caso del injerto de campo, por ello, se aconseja descabezar el patrón varios días antes de la operación del injerto (REYNIER 2002).

b) El desborre

Cuando en primavera las yemas comienzan a hincharse, las escamas protectoras que las recubren se abren y la borra que se ve al principio aparece al exterior. La fecha de desborre es un estado fenológico importante a determinar; se hace referencia para ello a los estados de referencia de Baggiolini y cada vez más, a los estados de referencia de Eichhorn y Lorenz (REYNIER 2002).

Observando el desborre en una vara se aprecia que las yemas de la extremidad desborran las primeras; ésta es una característica del crecimiento llamada acrotonía. Esta precocidad en el desborre de las yemas de la extremidad tiene como consecuencia retrasar o impedir el desborre de las yemas de rango inferior por inhibición por correlación (REYNIER 2002).

Durante el invierno y el comienzo de la primavera, la actividad celular de la yema se manifiesta desde que la temperatura supera un cierto umbral, llamado umbral de crecimiento o cero de vegetación, que se sitúa alrededor de 10 °C. Al principio, esta actividad es de corta duración y de poca intensidad pues crece con la subida de las temperaturas, las acciones diarias de la temperatura son acumulativas (REYNIER 2002).

c) El crecimiento

El crecimiento de un pámpano procedente de una yema latente comprende tres fases:

- Al principio, un periodo de aceleración lenta del crecimiento a lo largo del cual las variaciones diarias son todavía débiles.
- A continuación, un período de crecimiento diario rápido con una parada momentánea en la floración.
- Por último, un período de crecimiento ralentizado que termina en la parada de crecimiento.

La parada de crecimiento que se manifiesta por un endurecimiento de la yema terminal que se deseca y cae, sucede normalmente a final de julio, principio de agosto, es decir, unos 100 a 120 días después del desborre, aunque hay una gran variabilidad según las condiciones climáticas de la primavera y el vigor de las cepas (REYNIER 2002).

El crecimiento de las hojas, zarcillos y ramos anticipados se realiza al mismo tiempo que el de los entrenudos subyacentes. El crecimiento de los ramos anticipados nacidos de las yemas prontas no empieza hasta que existe una cierta distancia al ápice del pámpano (REYNIER 2002).

Después de un despunte se constata que los nietos adquieren un crecimiento mucho más activo. Esta activación del crecimiento es debida a la supresión de la yema Terminal que ejerce en efecto inhibitorio, llamado dominancia apical. Esta inhibición es parcial para las yemas prontas y total para las yemas latentes. Por ello, un cierto número de yemas prontas y ninguna yema latente entran en crecimiento (REYNIER 2002).

El crecimiento en la cepa de los pámpanos de un sarmiento no es el mismo. Se constata, en efecto, que la longitud de los pámpanos de una vara disminuye de la

extremidad hacia la base. Esta diferencia de crecimiento de los ramos nacidos de un mismo sarmiento es otra manifestación de la acrotonía. Las yemas que desborran primero ejercen en efecto inhibitorio en los ramos situados debajo (REYNIER 2002).

El crecimiento es el resultado del aumento de tamaño de las células preexistentes y de la multiplicación celular. La yema latente está formada de meristemos primarios o puntos vegetativos y de esbozos de hojas, de zarcillos y de entrenudos. El crecimiento del ramo es el resultado de la suma de los crecimientos de cada uno de estos órganos y de la actividad del meristemo terminal (REYNIER 2002).

En un pámpano en crecimiento se pueden distinguir tres zonas cuyas actividades metabólicas son diferentes: el ápice vegetativo, que comprende la yema terminal y las hojas jóvenes que no han alcanzado la mitad de su tamaño normal; la zona intermedia, que está compuesta de hojas adultas; y la zona basal, con hojas adultas envejecidas, cuya actividad se ralentiza (REYNIER 2002).

d) El agostamiento

Mientras los racimos maduran, se asiste a un cambio de aspecto de los pámpanos: el color verde desaparece al mismo tiempo que se diferencia netamente la corteza que encontraremos en invierno en el sarmiento. El pámpano se hace más duro impregnándose de lignina y acumulando sustancias de reserva, en particular almidón; el agostamiento comienza durante la maduración de los frutos, prosigue tras la madurez, mientras las hojas vivas no estén vacías de la mayor parte de las sustancias que han elaborado (REYNIER 2002).

e) Caída de las hojas

Cuando empieza a decrecer notablemente la temperatura hasta las proximidades del cero de vegetación, por debajo del cual sabemos que la actividad de la planta cesa, se produce la caída de las hojas; pero antes los materiales alimenticios que contienen descienden por los vasos cribosos para constituir las reservas de los brazos, tronco, cuello y raíces de la cepa. Las hojas amarillean o se tiñen de colores, se desecan y caen finalmente. La vid ha entrado en su fase de reposo invernal (HIDALGO 2002).

1.2.2.- Ciclo reproductor

El desarrollo de los órganos reproductores empiezan con la iniciación de las inflorescencias en las yemas latentes el año precedente y la diferenciación de las flores en primavera; después se desarrollan sucesivamente la floración, el cuajado, el crecimiento y la maduración de las bayas del racimo (REYNIER 2002).

a) La iniciación floral

La fertilidad de las yemas representa la exteriorización de su iniciación floral, resultado de la acción de factores externos y factores ligados a la planta. Es el resultado de dos fenómenos distintos:

- la inducción floral, que es el fenómeno fisiológico de la percepción de estímulos que determinan la diferenciación de un meristemo hacia la constitución de una inflorescencia;
- la iniciación floral, que es el fenómeno morfológico de la diferenciación de la inflorescencia y de las flores.

La iniciación de las inflorescencias comienza el año anterior a la aparición de las inflorescencias, en las yemas de la base y progresando gradualmente hacia la extremidad. Al principio se produce la iniciación de tres a cinco esbozos de hojas, después sucede la de las inflorescencias y la de sus hojas opuestas. La iniciación de las flores comienza en la primavera siguiente, algunos días antes del desborre, formando las ramificaciones del racimo y prosigue hasta la floración diferenciando los órganos de los botones florales (REYNIER 2002).

b) Floración

Corresponde a la expansión de la flor por la apertura (dehiscencia) de la corola, que se deseca y cae. Se produce generalmente en junio, pero la fecha varía según la variedad y las condiciones climáticas. Las flores de un racimo no se abren todas al mismo tiempo, la floración se escalona de diez a quince días. La dehiscencia del capuchón y su caída están favorecidas por la insolación y el calor (mínimo 15 °C). al caer el capuchón, los estambres se separan del gineceo, y efectuando una rotación de 180° liberan el polen (REYNIER 2002).

c) Polinización:

Es la liberación y transporte del polen. Puede ser indirecta (alógama) o directa (autogamia). La alogamia es obligatoria para las variedades femeninas que deben de estar asociadas en cultivos mixtos con variedades hermafroditas cuya floración se produzca en el mismo período. En las variedades hermafroditas, la alogamia permite una mejor fecundación (REYNIER 2002).

d) Fecundación:

Durante la germinación del polen en el estigma, el núcleo vegetativo degenera y el germinativo se divide en dos dando lugar a dos núcleos gaméticos. Uno de los gametos fecunda la oosfera y dará origen al embrión de la semilla, diploide. El otro gameto se une a los núcleos polares dando origen al endospermo de la semilla, triploide. El ovario comienza a engrosarse y transformarse en fruto, en el proceso conocido como fecundación (ROYO, 2007).

Existen casos en los que el desarrollo del fruto se produce en ausencia total de fecundación, proceso conocido como partenocarpia. La partenocarpia puede ser permanente, facultativa o accidental; y da lugar a bayas mas pequeñas y, normalmente, mas azucaradas. En otras variedades puede presentarse una proporción variable de bayas apirenas, tratándose en este caso de una fisiopatía denominada *millerandage*. Este fenómeno es accidental, y se produce generalmente como consecuencia de unas condiciones climáticas durante la floración o por la presencia de otras alteraciones o virosis en la planta (ROYO, 2007).

e) Cuajado

El número de frutos maduros es siempre inferior al número de flores que están diferenciadas. Un cierto número de flores fecundadas evolucionan a fruto, cuajan, mientras que un cierto número de flores no polinizadas y de ovarios fecundados caen, se dice que se corren. El término corrimiento corresponde a la caída de flores y de ovarios (REYNIER 2002).

La tasa de cuajado es el número de bayas que quedan en el racimo en relación al número de flores de la inflorescencia. La tasa de cuajado es relativamente baja, incluso en ausencia de corrimiento (REYNIER 2002).

f) Maduración

El desarrollo de las bayas empieza con la polinización y continua hasta el estado de madurez. Se traduce en un crecimiento en volumen de las bayas acompañado de una evolución de las características físicas (color, firmeza) y de la composición química de la uva (azúcares, ácidos, compuestos fenólicos). Se distinguen generalmente 3 periodos a lo largo del desarrollo del fruto (REYNIER 2002):

- 1) un periodo herbáceo, durante el cual la baya, verde y dura, engorda y se comporta como un órgano clorofílico en crecimiento;
- 2) un periodo de maduración, durante el cual la baya cambia de color, engorda de nuevo y se comporta como un órgano de transformación y, sobre todo, de almacenamiento. Comienza con un período de evolución rápido de las características físicas y bioquímicas de la uva, el envero, y termina con el estado de madurez;
- 3) un periodo de sobremaduración, durante el cual la uva se pasifica, mientras que su composición química evoluciona y puede sufrir ataques de hongos (*Botrytis cinerea*)

El crecimiento en volumen de las bayas, desde el cuajado hasta la maduración de la uva, se efectúa en tres fases. La Fase I o de crecimiento rápido dura de cinco a siete semanas y se realiza en principio (hasta los 20 – 25 días después de la antesis) por proliferación y agrandamiento celular. La Fase II o de crecimiento ralentizado dura

solamente algunos días para las variedades precoces y a veces hasta cuatro semanas para las variedades tardías. Es una fase de transición que tiene lugar alrededor del envero y durante la misma se alcanza la madurez fisiológica de las semillas. Y la Fase III o de crecimiento rápido realizada únicamente por el agrandamiento celular (REYNIER 2002).

El tamaño final de la baya depende de la variedad y de los efectos del clima, de la alimentación hídrica, de las prácticas de cultivo y de la cantidad de uva por cepa (REYNIER 2002).

El periodo de maduración se manifiesta por una modificación física y bioquímica del racimo. En cuanto a la modificación física la baya verde se colorea, se ablanda y engorda de nuevo. Las células de la pulpa de las variedades de vinificación se rompen. Las bayas son jugosas en la madurez. En el caso de la modificación bioquímica la acidez disminuye mientras que el contenido en azúcares, compuestos fenólicos (taninos y materia colorante) y en compuestos aromáticos aumenta. Esta evolución comienza por una fase de transición, el envero, de corta duración (ocho a doce días, generalmente), y continúa por una fase de maduración. Si los racimos no se recolectan, evolucionan aun durante una fase posterior llamada fase de sobremaduración (REYNIER 2002).

El principio de la maduración sucede normalmente después de la parada de crecimiento de los pámpanos, El metabolismo de la planta se caracteriza por (REYNIER 2002):

- una fotosíntesis intensa, ya que la superficie foliar es importante y las condiciones climáticas son favorables (luz, temperatura) en el supuesto que la transpiración no este limitada (sequía, por ejemplo);
- una respiración moderada, pero menos intensa que en los órganos jóvenes, de manera que la parte de azúcares degradados por respiración es mas reducida que durante el periodo de crecimiento de los pámpanos y de las vayas verdes;
- una conducción (o migración) importante de azúcares hacia los órganos que tienen función de almacenamiento de reservas: los racimos y las partes vivaces (sarmientos, partes aéreas del tronco y sistema radical).

El envero corresponde a una acumulación brusca e importante de azúcares en las bayas. Esta acompañada de una modificación del color de las uvas, se dice que enveran. Este enriquecimiento rápido es el resultado de una modificación del sentido de las migraciones. Por una parte, los productos de la fotosíntesis cesan temporalmente de su circulación descendente hacia las partes vivaces y se dirigen únicamente hacia los racimos, todos los sarmientos participan en esta migración, los azúcares de los sarmientos no fructíferos (principalmente nietos) se dirigen hacia los sarmientos que tienen racimos. Por otra, las reservas en azúcares (sacarosa y principalmente almidón)

de la madera y del sistema radicular son movilizadas repentinamente y en proporción mas o menos importante en beneficio de los racimos. El nivel de estas reservas es importante para asegurar un buen comienzo de la maduración (REYNIER 2002).

Durante la maduración el crecimiento del contenido en azúcares de la uva obedece a tres procesos (REYNIER 2002): esencialmente por migración de azúcares producidos por fotosíntesis, por movilización eventual de reservas, y por transformación de ácido málico en azúcares, cantidad que no es importante.

Mientras que la uva verde contiene sobre todo glucosa, al final del invierno el contenido en fructosa aumenta y en algunas variedades puede ser superior al de glucosa. La riqueza en azúcares de las bayas en la madurez, depende de la variedad, del clima del año, del terreno, del régimen hídrico, del patrón y del conjunto de técnicas de cultivo del viñedo (REYNIER 2002).

En el curso del crecimiento vegetativo de las hojas y las bayas verdes son la sede de síntesis de ácidos orgánicos, cuyos contenidos disminuyen a lo largo de la maduración. Esta disminución de la acidez tiene diversas causas (REYNIER 2002):

- degradación respiratoria: los ácidos orgánicos sirven de sustrato a la respiración. La degradación aumenta con la temperatura (la acidez de las uvas maduras es mas reducida los años de verano calido) esta degradación afecta sobre todo al ácido málico hasta 30 °C, al ácido málico y al ácido tartárico por debajo de 30°C.
- transformación de ácido málico en azúcares: la síntesis de azúcar a partir de ácido málico, participa en la disminución de la acidez y en el enriquecimiento de azúcares. Parece que la producción de azúcares por esta vía es limitada;
- fenómenos de dilución: durante la maduración la uva engorda por aporte de agua procedente de las raíces lo que contribuye a disminuir la concentración en ácidos;
- migración de bases procedentes de las raíces, que se traduce en un aumento de la alcalinidad de las cenizas.

La disminución de la acidez durante la fase de maduración se debe a la contribución de estos cuatro fenomenitos. El contenido de cada uno de los ácidos orgánicos es el resultado del equilibrio entre los recursos y las pérdidas por combustión respiratoria o transformación, Así el contenido en ácido málico disminuye porque las degradaciones son importantes, mientras que las migraciones hacia los racimos son reducidas. El contenido en ácido tartárico permanece sensiblemente constante, ya que las síntesis y las migraciones equilibran las pérdidas por respiración. El equilibrio ácido-base de los racimos depende del contenido relativo de ácidos orgánicos y de potasio (REYNIER 2002).

La acidez final del racimo varía en función de la interacción variedad-portainjerto, de las características del medio y de las prácticas culturales (REYNIER 2002).

Los compuestos fenólicos son sustancias orgánicas cuya estructura química comprende una o varias funciones *fenol*. Los compuesto fenólicos participan en la coloración de la uva y en las propiedades visuales y gustativas del vino, Se distinguen: los ácidos fenólicos, antocianos, principales (constituyentes de los pigmentos rojos), los flavonoides (principales constituyentes de los pigmentos amarillos) y los taninos, constituyentes del color, de la estructura y de la astringencia de los vinos (REYNIER 2002).

En el momento de envero, las bayas verdes pierden la clorofila y evolucionan a rojas o más o menos amarillas. Esta evolución que prosigue durante la maduración permite distinguir las variedades tintas de las blancas. Esta coloración debida a la materia colorante, antocianos (rojos) y flavonoides (amarillos) no afecta más que al hollejo; sin embargo, la pulpa de algunas variedades, llamadas tintoreras, acumulan antocianos. Al mismo tiempo, otras sustancias orgánicas, los taninos, sufren unas modificaciones cuantitativas y cualitativas en los hollejos y pepitas. Tas la vinificación, los compuestos fenólicos se encuentran en el vino y participan en sus características organolépticas (REYNIER 2002).

Los constituyentes más importantes son los antocianos y los taninos. Su evolución durante la maduración es uno de los factores determinantes de la calidad de las uvas. En los hollejos los antocianos aparecen en el envero, y su concentración aumenta más o menos regularmente para ralentizarse en la proximidad de la madurez; el hollejo contiene también ácidos fenólicos, taninos y un poco de flavonoles. El aumento del contenido de taninos esta ligado al de los antocianos y a los azucares, una variedad tinta, rica en azucares esta bien provista, generalmente, de antocianos y taninos (REYNIER 2002).

En la pulpa se encuentran los ácidos fenólicos, algunos taninos y, excepcionalmente, antocianos (REYNIER 2002).

En las pepitas, la concentración en taninos extraíbles disminuye a lo largo de la maduración o a veces durante el envero. Las pepitas también contienen ácidos fenólicos. Los taninos de las pepitas son distintos a los de los hollejos y dan astringencia y amargor. En los raspones aumenta la concentración de taninos débilmente y también su amargor (REYNIER 2002).

Un racimo maduro es rico en antocianos y taninos fácilmente extraíbles, mientras que la extracción de los taninos de las pepitas es relativamente moderada. Por el contrario, cuando un racimo no esta completamente madura, el contenido de antocianos y taninos de los hollejos es bajo y son más difícilmente extraíbles. Los compuestos fenólicos participan de manera importante en la calidad visual y

organoléptica de los vinos y también en sus defectos. Las características de los vinos tintos dependen de la naturaleza, estructura y concentración de compuestos fenólicos del racimo en el momento de la cosecha y de su evolución a lo largo de la vindicación y de la crianza del vino (REYNIER 2002).

La coloración y la tipicidad fenólica de los mostos dependen del genotipo de la viña cultivada, del medio y de las técnicas de cultivo (REYNIER 2002).

1.3.- La variabilidad espacial en la agricultura

El comportamiento de todo cultivo esta condicionado por dos condicionantes importantes, como son el clima y el suelo. El clima es un parámetro uniforme en toda la parcela, pero es el suelo, distinto en su formación y distribución, el que representa la variabilidad intraparcelar. Esta variabilidad del suelo es una realidad conocida, así como su influencia en los cultivos. El paisaje agrícola constituye una adaptación de los cultivos al sistema suelo-clima. Incluso dentro de un determinado sistema son observables y cuantificables diferencias directamente atribuibles a las características del suelo (BALLESTA et al. 2000).

Desde siempre, la variabilidad en las características de la parcela ha representado un gran condicionante en la agricultura. La posición de la parcela y sus características edáficas llega a ser un limitante a la hora de la elección del cultivo. De esta forma, en la agricultura se comenzó con la elección de las parcelas más fértiles para la implantación de ciertos cultivos, sobre todo extensivos, más exigentes en cuanto a las condiciones nutricionales. A partir de esto, se destinó las parcelas más pedregosas y de peores condiciones al cultivo de la vid.

A nivel de parcela, la variabilidad espacial de las características físico-químicas del suelo, topografía y condiciones climáticas de un viñedo es un hecho bien conocido en viticultura. Esta variabilidad espacial está relacionada directamente con la variabilidad espacial del vigor y los parámetros productivos y cualitativos del viñedo (HALL et al., 2002; LAMB et al., 2004; BRAMLEY y HAMILTON, 2004 citado por TARDÁGUILA 2008). Estas condiciones marcan el método de gestión e implantación del viñedo.

1.3.1.- Las propiedades geográficas de la parcela

Las principales condiciones que afectan a la variabilidad de la parcela son la orientación y el relieve. Estas representan futuros problemas difíciles de resolver a la hora del manejo del viñedo una vez realizada la plantación (RIBÉREAU-GAYON et al. 1982).

1.3.1.1.- La orientación

La orientación de la parcela condiciona la radiación solar incidente sobre las cepas. Esta iluminación es el principal factor limitante en la producción y calidad de la

vendimia. La cantidad de la cosecha así como la evolución de su maduración se verá afectada si no se recibe la suficiente iluminación. La orientación condiciona la influencia de los vientos y la insolación, factores que benefician la salud del viñedo (RIBÉREAU et al. 1982).

1.3.1.2.- El relieve

El relieve tiene importancia como consecuencia de su efecto sobre el mesoclima, ya que la pendiente del terreno de la finca y la configuración de las montañas y valles en la zona modifican tanto la insolación como el movimiento de las masas de aire (ROYO, 2007). La pendiente proporciona un dato preciso, para un tipo pedológicamente definido y condiciones climáticas dadas, de la susceptibilidad del suelo a la erosión hidráulica. El escurrimiento sobre las pendientes, cuando las condiciones óptimas están dadas, provoca un considerable arrastre de materiales hacia las partes bajas y una destrucción progresiva de la capa arable fértil sobre el declive (RIBÉREAU et al. 1982). También regula la energía solar que recibe, dependiendo de la latitud, aumentando con la misma, pero de una forma acusada, los efectos heliotérmicos de la insolación de un viñedo dependen fundamentalmente de su exposición. Numerosos viñedos productores de grandes vinos se orientan hacia el sur-este y sur e incluso este y sur-oeste, pero vinos muy particulares son obtenidos a partir de una exposición especial, pudiendo interesar en climas cálidos una distinta con el fin de lograr vinos más ácidos, y no excesivamente alcohólicos (RIBÉREAU et al. 1982). Además, no hay que olvidar que la profundidad útil del suelo puede estar en muchos casos condicionada por la pendiente (ROYO, 2007). Las propiedades de pendiente o índices de erosión pueden ser obtenidos como un enlace directo de los procesos pedogenéticos (WILSON y GALLANT 2000 citados en VITHARANA, 2008).

1.3.2.- *Las características del suelo*

1.3.2.1.- Propiedades físicas del suelo

La variación espacial de la cosecha parece verse influenciada mayormente por las propiedades físicas del suelo y no tanto por sus propiedades químicas (BRAMLEY y LAMB, 2003)

La profundidad del suelo constituye el primer elemento determinante del potencial de desarrollo de la vid, por cuanto condiciona el volumen de tierra colonizado por sus raíces y consecuentemente las disponibilidades de agua y elementos fertilizantes en ella contenida. (HIDALGO, 2004) Cuando la capa explotable por las raíces es superficial y poco espesa debido a la presencia de un horizonte que no permite la penetración de las raíces, la fisiología de la vid puede ser perturbada en primavera por un exceso de agua en el suelo y, en el verano, por la sequía (REYNIER, 2002).

Suelos profundos con provisión adecuada de agua y elementos fertilizantes asimilables, son propios para las grandes producciones, mientras que los superficiales,

pobres y sin reserva hídrica, no permitiendo gran desarrollo de las vides, producen cosechas escasas, aunque de mayor calidad. (HIDALGO, 2004)

La textura o composición granulométrica del suelo tiene una importancia fundamental en el cultivo de la vid, considerándose como la fertilidad física del mismo. La composición física del suelo condiciona el desarrollo del sistema radicular y por lo tanto su aprovisionamiento hídrico y de elementos nutritivos para la planta, repercutiendo muy directamente en la cantidad y calidad de la producción, lo que explica la importancia del origen geológico de los suelos. Una alimentación racional de las cepas, conseguida en suelos en que la vid vegeta sin dificultades, asegura un buen desarrollo de la cosecha, siendo éste el principal factor de calidad actualmente considerado. (HIDALGO, 2004) Las condiciones de asfixia en el perfil dependen de la presencia de una capa impermeable a las infiltraciones, de la impermeabilidad del suelo en sí mismo y es determinada por la textura y la estructura de las diferentes capas y, por ultimo, del nivel de la capa freática en las diferentes estaciones (REYNIER, 2002).

Un ejemplo de la región de Sunraysia (Victoria, Australia), BRAMLEY (2001; citado por BRAMLEY, 2003) demostró la dependencia de la variación de producción en la cantidad y posición de la arcilla en el perfil del suelo. El área de menor producción correspondió a las áreas donde la arcilla del subsuelo se presenta una alta cantidad de arcilla y donde, en años húmedos, el encharcamiento es pronunciado.

Las zonas de baja producción en un estudio situado en Coonawarra (Australia) se presentaron en la cimas por el contrario las zonas de alta producción se presentaron en las vaguadas. A través del estudio de la profundidad del suelo y el tamaño de partícula en 190 puntos (aproximadamente 26 muestras/ha). La variación de la cosecha es conducida por la variación en la disponibilidad del agua para la planta en la zona radicular, el cual esta controlado por la variación en la profundidad del suelo, que a su vez esta controlado por la variación de la topografía. De la misma manera, BRAMLEY (2003) demostró la importancia de la elevación en el control de la variación de la producción en un viñedo de Clare Valley (Adelaida, Australia) que estaba variablemente afectado por la salinidad del suelo, En esta caso las partes bajas del terreno revelaron ser las que la producción era menor debido a que estas áreas la salinidad era mayor; la diferencia de elevación en este ejemplo era aproximadamente 13 m.

Los terrenos más adecuados para el cultivo de la vid son los suelos arenosos francos, sueltos, silicio-calizos o calizo-silíceos, profundos, aunque sean cascajosos. (HIDALGO, 2004)

I.3.2.2.- Propiedades químicas del suelo

Aparte de la caliza activa, la salinidad del suelo es el principal factor limitante del cultivo de la vid entre los componentes minerales del mismo (HIDALGO, 2004).

La resistencia de la vid a la salinidad es restringida. Fundamentalmente, el mecanismo de la acción de las sales solubles sobre la planta es consecuencia de la presión osmótica: el agua penetra en las raíces, si la concentración de su jugo celular es superior a la de la solución del mismo. Consecuentemente, todo hecho que aumente el contenido de las sales solubles en el suelo, o que tienda a una desecación del mismo, incrementa el perjuicio al hacer que las raíces se alimenten en un medio menos favorable (HIDALGO, 2004).

Los veranos secos y cálidos y los largos periodos de sequía favorecen la acción nociva de las sales solubles. La aportación de sales solubles como fertilizantes al terreno aumenta la concentración de la solución del suelo y favorecen la salinidad. El empleo de aguas de riego fuertemente mineralizadas aumentan la salinidad, tanto más rápidamente cuanto los suelos sean más arcillosos y pesados (HIDALGO, 2004).

La conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo (CE) es función del número de iones que contiene, y se considera como una media indirecta de la salinidad expresada en mhos/cm (HIDALGO, 2004). La conductividad eléctrica del suelo es una medida del flujo de corriente eléctrica a través del suelo. Suelos con texturas finas presentan partículas con una mayor superficie de contacto, lo que favorece la cohesión entre ellas, y mayores niveles de materia orgánica que los de texturas gruesas, lo cual favorece la retención de humedad y la continuidad del medio conductor. El valor de la conductividad es útil gracias a las múltiples relaciones que se pueden extraer con la textura, el contenido de agua, el contenido de materia orgánica y los nutrientes orgánicos, permitiendo con ello orientar las decisiones de manejo de fertilización, riego y preparación del suelo entre otras (FLORES, 2003).

1.4.- El manejo de la variabilidad espacial intraparcelar en la agricultura

En los últimos años, las prácticas agrícolas se han venido realizando de manera uniforme. Es decir, las labores, las semillas, los fertilizantes y los productos fitosanitarios se aplican con igual intensidad o idéntica dosis, independientemente de la localización considerada dentro de la parcela (ARNÓ, 2008). Esto supone un malgasto de los recursos y una pérdida de efectividad en la gestión de la explotación agraria.

La cosecha que se obtiene a su vez se suele presentar una variación espacial intraparcelaria considerable (ARNÓ, 2008).

Además, la falta de germinación en zonas de la parcela, la presencia local de malas hierbas, etc. obliga al agricultor al tratamiento conjunto de la parcela completa.

La agricultura de precisión se presenta como una solución a este problema, al permitir la creación de Unidades de Manejo Diferenciado según las características de la parcela. Esta zonificación permite distintas aplicaciones como son los tratamientos fitosanitarios únicamente por zonas dañadas, abonados, etc. Además de esto, y lo más importante, permite cosechar por separado en función de su calidad, y en consecuencia

de su destino, logrando un mayor beneficio económico y una reducción de gastos y del impacto ambiental.

1.4.1.- La agricultura de precisión

Bajo el nombre genérico de agricultura de precisión se agrupan las diversas técnicas que permiten la realización de las prácticas culturales de modo diferencial en función de la variabilidad del terreno y de los agentes que afectan a los cultivos. Si bien el concepto de agricultura de precisión no es nuevo, su aplicación práctica no ha podido ser llevada a cabo hasta que en la actualidad se dispone de las diversas tecnologías requeridas. Estas nuevas tecnologías posibilitan aumentar el beneficio de las explotaciones, ya sea mediante la reducción de los costes o el aumento de la producción por unidad de superficie. Además, quien practique la agricultura de precisión puede mejorar también la calidad de los cultivos gracias a la más adecuada correspondencia entre los factores aportados y las necesidades de las plantas. (BASSO et al. 2006)

La agricultura de precisión comenzó a desarrollarse en Estados Unidos a comienzos de la década de 1990, gracias al desarrollo de los sistemas de localización poco costosos, sistemas de información geográfica y sensores precisos. En la actualidad, con la ayuda de la tecnología, se puede medir, analizar y manejar la variabilidad de la que se era consciente, pero que no era hasta ahora realizable. (BASSO et al. 2006)

Los objetivos de la viticultura de precisión coinciden en esencia con los objetivos generales de la agricultura de precisión: una apropiada gestión de la variabilidad del cultivo, un aumento de los beneficios económicos y una reducción del impacto ambiental (ARNÓ et al. 2009). El empleo de técnicas de precisión permite la zonificación, creando Unidades de Manejo. Estas Unidades de Manejo permiten individualizar los problemas de la parcela en pequeñas subparcelas más fácilmente gestionables.

Para el productor vitícola, la viticultura de precisión mejora la utilización de los factores productivos (agua, fertilizantes, productos fitosanitarios), reduciendo costes y minimizando el impacto ambiental. Incluso, el diseño y la plantación de nuevas parcelas pueden orientarse de forma más adecuada en función de la variabilidad espacial de las mismas. La vendimia selectiva y la retribución según la calidad del producto son otras de las posibilidades ofrecidas por la viticultura de precisión (ARNÓ, 2008).

La posibilidad de ser capaz de diferenciar entre zonas de diferentes cualidades en una misma parcela es uno de los objetivos prioritarios en la viticultura de precisión. (ARNÓ et al. 2009). Los aspectos más relevantes que necesitan ser tomados en consideración incluye el uso eficiente de los insumos, la diferenciación de varias calidades de uva en el momento de vendimia, predicción de la cosecha, y una mayor precisión y eficiencia del manejo de la parcela (BRAMLEY 2001, MARTINEZ-

CASANOVAS y BORDES 2005, BRAMLEY y LAMB 2003 citado por ARNÓ et al. 2009)

1.4.2.- Herramientas en la Agricultura de Precisión

La agricultura de precisión cuenta con varias herramientas de actuación. En este caso se dividen según el punto de la toma de datos: teledetección remota, por el cual se toman los datos a través de largas distancias, sensores Proxy, los cuales realizan la toma de datos próximos al cultivo, o las medidas puntuales, medidas por las cuales se pueden realizar mapas de información del cultivo.

1.4.2.1.-Teledetección remota

a) Definición

La observación remota de la superficie terrestre constituye el marco de estudio de la teledetección. En sentido amplio, la teledetección no engloba solo los procesos que permiten obtener una imagen, sino también su posterior tratamiento, en el contexto de una determinada aplicación (CHUVIECO, 2002). La mayor ventaja de los sensores remotos es la reducción de la cantidad de muestreos de suelo requerido para caracterizar adecuadamente y delinear las zonas de suelo (HALL, 2002).

Desde el punto de vista de su aplicación, la teledetección tiene como objetivo el reconocimiento de las características de la superficie terrestre y de los fenómenos que en ella se producen a partir de los datos registrados por el sensor (GANDIA, 1991).

Según el origen de la señal utilizada, las técnicas de teledetección se agrupan en dos categorías (GANDIA, 1991):

- **Métodos pasivos:** se basan en la detección de las características radiativas o reflectantes del sistema observado. La fuente es el sol o la tierra y el sensor cumple únicamente la misión de captar la señal que llega. El sistema empleado tradicionalmente es la cámara de fotos, en la cual se puede disponer de varios tipos de películas: la pancromática blanco y negro, que cubre la mayor parte del espectro visible (0,35-0,7 μm) y se usa una forma estándar en fotografía aérea; la infrarroja blanco y negro con una sensibilidad espectral en 0,34-0,52 μm y 0,6-0,9 μm , ideal para usos rurales del suelo y cartografía de la cubierta terrestre; la película color, con tres emulsiones sensibles al azul, amarillo/verde y rojo; y la película infrarrojo color también conocida como falso color, en la cual las 3 emulsiones son sensibles al verde, rojo e infrarrojo. Gracias al empleo de filtros por la elección de películas adaptadas, varias cámaras pueden operar simultáneamente en bandas espectrales diferentes, lo que se conoce comúnmente como la fotografía multispectral. Su capacidad y limitaciones dependen de las propiedades ópticas de las lentes, filtros y películas utilizadas.

Dentro de este método están también los radiómetros, los cuales registran la radiación tanto solar como terrestre. Para obtener una cobertura satisfactoria se montan habitualmente en un sistema de barrido. Por ello, permiten la adquisición secuencial de información procedente de estrechas bandas del paisaje observado. Cuando el escáner recorre una línea de barrido se produce una señal eléctrica en el detector que es función de la cantidad de energía electromagnética recibida. Ésta energía es muestreada a intervalos regulares y convertida en forma digital. Este muestreo temporal equivale al muestreo geográfico a lo largo de una línea de barrido. Cada medida a lo largo de la línea de barrido es la energía recogida por una visión instantánea del sensor, lo que se conoce como píxel. Por lo tanto una línea de barrido consiste en una línea de píxeles (GANDIA, 1991).

- Métodos activos: el sensor tiene una doble función. Actúa activamente produciendo una señal de características conocidas que posteriormente recogerá, después de interactuar con el sistema observado. La información se obtiene de la comparación entre la señal emitida y a reflejada. Los instrumentos empleados en este tipo de métodos son los radar, sonar o láser. Algunas de las ventajas que implica el empleo de éstos son su operatividad en condiciones atmosféricas desfavorables (GANDIA, 1991).

La teledetección se lleva a cabo a través de los sensores, instrumentos susceptibles de detectar la señal electromagnética (radiación reflejada o emitida) que les llega de la tierra a la atmosfera, en un determinado intervalo de longitud de onda, convertida en una magnitud física que pueda ser tratada y grabada (señal analógica = fotografía, o digital = imagen numérica) (GANDIA, 1991).

b) Plataformas

Las técnicas de teledetección se pueden aplicar desde diferentes plataformas de observación, cada una de las cuales tiene caracteres propios (GANDIA, 1991).

En este caso se emplean principalmente dos plataformas de observación: los aviones, los satélites y los vehículos aéreos no tripulados.

Los satélites

Los satélites artificiales son las plataformas más adecuadas para obtener una visión de regiones de gran extensión. Constituyen un objeto artificial en el espacio que da vueltas alrededor de la Tierra siguiendo una órbita específica (GANDIA, 1991).

Los diversos satélites existentes pueden clasificarse siguiendo diferentes criterios. En primer lugar y según su funcionamiento, podemos distinguir satélites automáticos y tripulados. En segundo lugar, sus características orbitales que permiten también su clasificación (GANDIA, 1991):

- Geosíncronos o geoestacionarios: colocados en órbitas ecuatoriales, se mantienen directamente sobre un punto específico de la superficie terrestre y acompañan a la Tierra en su movimiento. Esto se consigue aumentando la altura orbital lo suficiente para que el período orbital sea igual al de la rotación de la Tierra, ejemplos de ellos son los satélites de comunicación y los meteorológicos.
- Heliosíncronos: los que tienen una órbita casi polar, diseñados de tal forma que el paso de cada órbita del satélite ocurre a la misma hora (la relación angular entre el Sol y el plano orbital del satélite se mantiene constante). Ejemplos de este tipo de satélites es el Landsat, HCMM, NOAA, SPOT y son empleados para el seguimiento de los recursos naturales.

El más empleado en la agricultura es el Landsat. Está provisto de dos sensores: el MSS, similar al de sus predecesores pero con una resolución espacial de 82 m y la denominación de sus bandas es 1, 2, 3 y 4, y el nuevo sensor TM (Thematic Mapper), que registra la radiación en 7 bandas espectrales (GANDIA, 1991).

El sensor TM ha supuesto un incremento en la calidad y cantidad de información proporcionada por los satélites Landsat. Se produce una mejora en la resolución espectral, espacial y radiométrica (GANDIA, 1991):

La resolución espectral aumenta al estar distribuida la información a lo largo de una zona más amplia del espectro y en bandas más estrechas que permiten una mejor definición y posterior análisis de las respuestas espectrales (GANDIA, 1991).

La resolución espacial sobre el terreno es alrededor de 2,6 veces la del MSS: 30 m x 30 m para todas las bandas, excepto el térmico (120 m x 120) (GANDIA, 1991).

La mejora en la resolución radiométrica consiste en que la radiación recibida para cada píxel se recoge y clasifica en 256 niveles de intensidad, lo que permite la detección de cambios menores en las magnitudes radiométricas (GANDIA, 1991).

Los sensores empleados en la teledetección por satélite son: equipos fotográficos, cámaras de televisión, radiómetros de barrido y radares. Todos ellos se pueden agrupar en dos familias (GANDIA, 1991):

- Las que permiten la adquisición casi instantánea del conjunto de la escena observada. Se trata, por ejemplo de las cámaras fotográficas y también de las cámaras electromagnéticas del barrido, donde la adquisición de la escena se efectúa instantáneamente sobre un soporte que permite una lectura rápida por barrido de un haz electromagnético.
- Los que ofrecen una adquisición secuencial de elemento de la imagen con los cuales, línea a línea se constituye el conjunto de la escena. Entre estos sensores los de barrido transversal por espejo oscilante son los más extendidos.

Los radiómetros registran la radiación tanto solar como terrestre, las cuales se separan por medio de prismas, espejos dicróicos o filtros. A su vez cada una de las dos radiaciones se puede separar en diferentes bandas usando detectores apropiados. Para obtener una cobertura satisfactoria se montan habitualmente en un sistema de barrido. Por ello, permiten la adquisición secuencial de información procedente de estrechas bandas del paisaje observado, transversales a la trayectoria de la plataforma de observación (GANDIA, 1991).

Cuando el escáner recorre una línea de barrido se produce una señal eléctrica en el detector que es función de la cantidad de energía electromagnética recibida. Esta energía es muestreada a intervalos regulares, y convertida en forma digital. Este muestreo temporal equivale al muestreo geográfico a lo largo de una línea de barrido. Cada medida a lo largo de la línea de barrido es la energía recogida por una visión instantánea del sensor, lo que se conoce como píxel. Por lo tanto una línea de barrido consiste en una línea de píxeles (GANDIA, 1991).

Las cámaras de televisión también se han utilizado en la mayoría de misiones llevadas a cabo desde satélite. Se emplearon en satélites meteorológicos y posteriormente los Landsat. Estas cámaras tienen la ventaja frente a las cámaras de fotografía convencionales de que no solo pueden usarse en misiones de corta duración, puesto que, en el caso del empleo de una película fotográfica, ésta tiene una limitación material. Así, para misiones de larga duración se usan cámaras de tipo Vidicon, que permiten obtener fotografías (0,35-1,1 μ m) con gran resolución sin necesidad de utilizar película. La radiación incidente se recoge en una placa fotoconductora, formándose una réplica de la imagen óptica. Tan pronto la imagen es tomada y registrada en banda magnética o transmitida a una estación receptora, puede tomarse una nueva. La señal analógica creada se transmite a la Tierra en tiempo real, y permite la visión en tiempo real porque no se necesita procesado (GANDIA, 1991).

Existen además sistemas activos los cuales constan de un emisor y receptor (una antena de emisión/recepción), y presentan una autonomía total respecto a fuentes de radiación exteriores. Podemos distinguir (GANDIA, 1991):

- Los LIDAR o radares láser, operan en la banda espectral del ultravioleta al infrarrojo próximo.
- Los radar que operan en las microondas, esto es, centimétricos y milimétricos, tienen un interés para la teledetección porque la atmósfera es transparente a las hiperfrecuencias (excepto en dos picos de absorción hacia los 1,35 y 0,6 cm) y por ello se pueden trabajar en condiciones atmosféricas desfavorables. Esto es beneficioso para las áreas nubosas de latitudes medias y tropicales. El sistema de radas permite polarizar la energía

Los aviones

Los sensores remotos se han mostrado efectivos para la caracterización espacial de ciertas propiedades dinámicas del cultivo (asociadas al desarrollo vegetativo de la planta), y la medida de la conductividad eléctrica, la cual ha sido especialmente indicada para la caracterización espacial de propiedades estáticas del suelo como la textura, la profundidad efectiva y la salinidad (ARNÓ, 2008).

Las medidas realizadas desde estas plataformas, situadas normalmente a alturas comprendidas entre los 4000 y los 7000 m, son apropiadas para estudios locales o regionales. Se utilizan también aviones que vuelan a mayor altura (15km.) generalmente para realizar simulaciones de los vuelos de los satélites en desarrollo (GANDIA, 1991).

En este tipo de plataforma se emplean las cámaras fotográficas, sistema utilizado desde el principio de la teledetección. La imagen observada se registra en una emulsión química sensible, generalmente, a la radiación visible y al infrarrojo próximo (0,36-0,9 μm). Su capacidad y limitaciones dependen de las propiedades ópticas de las lentes, filtros y películas utilizadas (GANDIA, 1991).

Los tipos de película más comúnmente utilizados son: la pancromática blanco y negro, que cubre la mayor parte del espectro visible (0,35-0,7 μm) y se usa una forma estándar en fotografía aérea; la infrarroja blanco y negro con una sensibilidad espectral en 0,34-0,52 μm y 0,6-0,9 μm y ideal para usos rurales del suelo y cartografía de la cubierta terrestre; la película color, con tres emulsiones sensibles al azul, amarillo/verde y rojo; y la película infrarrojo color también conocida como falso color, en la cual las 3 emulsiones son sensibles al verde, rojo e infrarrojo (GANDIA, 1991).

Gracias al empleo de filtros por la elección de películas adaptadas, varias cámaras pueden operar simultáneamente en bandas espectrales diferentes, lo que se conoce comúnmente como la fotografía multiespectral (GANDIA, 1991).

Los vehículos aéreos no tripulados

El sistema se basa en aviones no tripulados dirigidos mediante guiado autónomo y con una autonomía de entre 50 minutos y 2 horas de vuelo, que permiten monitorizar hasta 1000 hectáreas. Los aviones van equipados con un sistema de GPS que envía continuamente su localización a una estación base desde la que se opera y se observa su posición sobre la cartografía de la zona.

Antes del despegue, en la estación base se genera un plan de vuelo en el que se fijan unos puntos de control que marcan la trayectoria del avión y que se distribuyen de modo que, al seguirlos, el avión sobrevuele toda la zona de interés. Si se quiere realizar un cambio en la altura de vuelo, sobrevolar de nuevo la zona o incluso dirigir el avión a otro lugar, el plan de vuelo se puede actualizar en tiempo real. Además, si el avión pierde la comunicación con la estación de control pasa a modo seguro y retorna al punto de despegue de forma automática

Los aviones, que sobrevuelan los cultivos a una altura de entre 150 y 1000 metros van equipados con una cámara térmica y otra multiespectral. La primera mide la temperatura de la superficie de la vegetación. La segunda cámara, multiespectral, permite calcular mediante una serie de algoritmos los índices relacionados con el crecimiento y desarrollo de la vegetación, la eficiencia fotosintética e incluso la fluorescencia clorofílica.

c) Tipo de información

En viticultura de precisión el empleo de sensores remotos se ha realizado fundamentalmente utilizando cámaras multiespectrales, las cuales son capaces de capturar tanto el espectro visible como también la radiación que se encuentra fundamentalmente en el rango del infrarrojo cercano. En el caso de la determinación de las características de un viñedo lo más empleado ha sido la determinación de las características vegetativas de la viña, dada la absorbancia (absorción de la superficie a una determinada longitud de onda) y reflectancia (rebote de una longitud de onda determinada). Esta energía es capturada por los sensores para luego ser procesada (BEST et al. 2006)

Si se considera la reflectancia de las hojas de las plantas o canopy en comparación al suelo, estas presentan una mayor refracción de la energía en el espectro infrarrojo comparado con el rojo, el cual es absorbido en gran medida por las hojas. La reflectancia de estas regiones del espectro forma la base para la determinación de los índices vegetativos. Existen multitud de índices que indican tanto condiciones hídricas como vegetativas de los cultivos (ver VII.1.- Anexo 1: Índices vegetativos). Uno de los índices más empleados en viticultura de precisión corresponde al “índice vegetativo diferencial normalizado” o “NDVI” el cual es asociado a distintas categorías de vigor (BEST et al. 2006).

Los índices de vegetación espectral reducen los datos de las múltiples longitudes de onda en cada píxel de la imagen en un único valor numérico, y algunos han sido desarrollados para resaltar los cambios en las condiciones de la vegetación. Los índices de vegetación utilizan las diferencias significativas en la reflectancia de la vegetación en las longitudes de onda del verde, rojo e infrarrojo cercano (HALL, 2002). Por ejemplo, las imágenes del índice de vegetación diferencial normalizada (NDVI) son creadas por la transformación de cada píxel de la imagen multiespectral de acuerdo a esta relación (ARKUN, 2000):

$$NDVI = \frac{(\text{infrarrojo cercano}) - (\text{rojo})}{(\text{infrarrojo cercano}) + (\text{rojo})}$$

Donde el infrarrojo cercano y el rojo son respectivamente las reflectancias en cada banda. El NDVI, un número entre -1 y 1, cuantifica la diferencia relativa entre la cima de la reflectancia del infrarrojo cercano y la depresión de la reflectancia del rojo en la señal espectral, y es el indicador del vigor vegetativo o relativo a la biomasa más empleado. Los valores negativos de NDVI raramente se presentan en el medio natural.

Otros índices de uso potencial en la viticultura incluyen el *Plant Cell Ratio* (PCR), *Photosynthetic Vigour Ratio* (PVR) y el *Plant Pigment Ratio* (PPR) donde (ARKUN, 2000):

$$\text{PCR} = \frac{\text{(infrarrojo cercano)}}{\text{(verde)}}$$

$$\text{PVR} = \frac{\text{(verde)}}{\text{(rojo)}}$$

$$\text{PPR} = \frac{\text{(verde)}}{\text{(azul)}}$$

Además de estos índices, reflejos del crecimiento vegetativo del cultivo, existen índices por los cuales permiten la estimación del estado hídrico de la vegetación. Éste es el caso del *Normalized Difference Water* (NDWI) el cual estima condiciones hídricas de la vegetación mediante los sensores remotos, las propiedades de reflectancia de la vegetación verde, seca y el suelo, y según las propiedades de absorción y dispersión de los gases atmosféricos.

I.4.2.2.- Sensores Proxy

a) Definición

Los sensores Proxy son los sensores empleados a pie de campo, los cuales realizan mediciones como NDVI.

b) Plataformas

En las investigaciones de campo se utilizan radiómetros de mano y también situados sobre mástiles portátiles, o plataformas especialmente diseñadas para llevar a cabo las medidas (GANDIA, 1991).

Recientemente, en el contexto de la viticultura de precisión, se han desarrollado los denominados sensores laterales terrestres. Estos sensores miden la reflectancia de la pared vegetal, que puede relacionarse con la densidad de la canopy, el vigor y la actividad fotosintética. El GreenSeeker™ es un sensor lateral terrestre portátil, que dispone de una fuente de luz y unos detectores, capaces de emitir y registrar respectivamente, la luz reflejada por la pared vegetal (TARDÁGUILA et al. 2008)

La utilización conjunta del GreenSeeker™ y un sistema GPS, tal y como muestra la Figura 1, permite obtener datos vitícolas georreferenciados que posibilitan la generación de mapas de vigor y de porosidad de la vegetación (GOUTOULY et al, 2006 citado en TARDÁGUILA et al. 2008). El sensor GreenSeeker™, montado en un quad, es conectado a un sistema GPS y a una PDA, donde se registran todos los datos. El quad circula a una velocidad media (aproximadamente 10 Km. /h) en el viñedo donde se

realiza el ensayo. El sensor GreenSeeker™ está situado a una altura equivalente al tercio superior de la pared vegetativa (1,40 m del suelo) para evitar la influencia de la zona productiva y a 0.40 m de separación de la espaldera.

Figura 1: Sensor GreenSeeker con GPS montado en un quad



Fuente: TARDÁGUILA, 2008

c) Tipo de información

La información obtenida a partir de este tipo de sensores se presenta igual que en el caso de la teledetección remota.

I.4.2.3.- Sensores de suelo

a) Definición

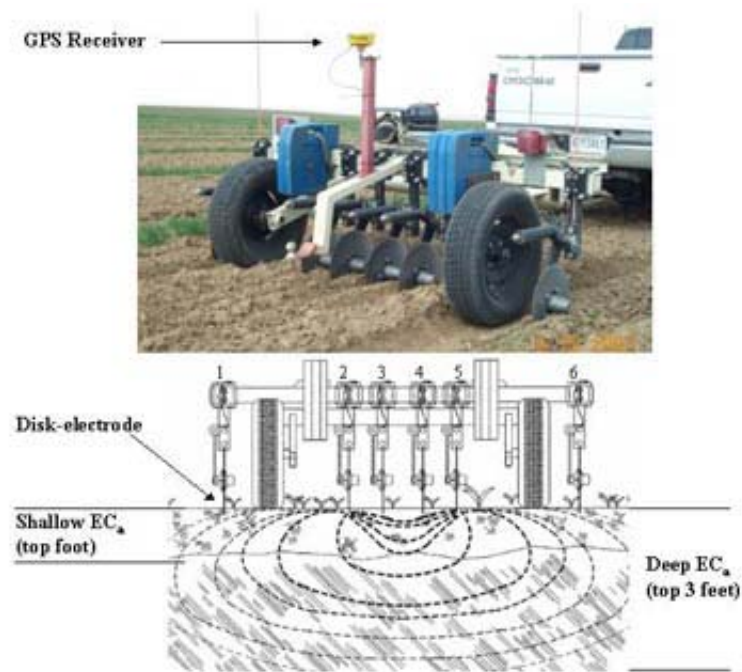
Todos estos sensores han sido diseñados para la medición de parámetros variables del cultivo, pero actualmente se ha llevado a cabo el desarrollo de nuevos sensores capaces de medir parámetros del suelo. Como se ha comentado en el apartado I.3.2.- Las propiedades edáficas, las variaciones de la conductividad eléctrica pueden indicar diferencias importantes en la humedad, textura, profundidad u otra variable de suelo que afecte a la productividad del viñedo.

b) Plataformas

Existen en el mercado distintos sensores capaces de medir las propiedades edáficas del suelo. Este es el caso de VERIS 3100 (ver Figura 2) el cual, tirado por tractor, consiste en un eje transversal al cual están sujetos seis electrodos circulares y planos dispuestos en forma paralela. Estos están conectados a un procesador que emite una corriente la cual viaja a través del suelo y es recibido por otro electrodo ubicado en una posición cercana. Al medir la diferencia de voltaje de este flujo se obtiene la conductividad. Recibe un valor de conductividad y posición cada dos segundos, la intensidad de puntos de medición dependerá de la velocidad de desplazamiento del

medio de propulsión. La medición de la conductividad debe hacerse cuando exista en el suelo al menos u 75 % del contenido de humedad a capacidad de campo (FLORES, 2003).

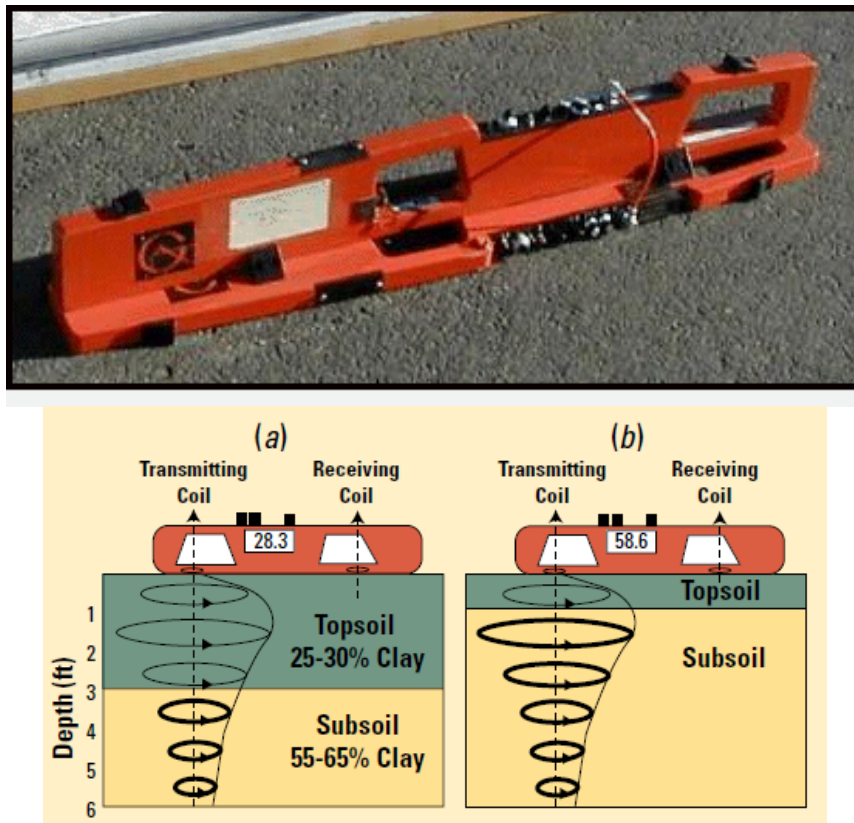
Figura 2: Sistema de mapeo Veris 3100 y un diagrama de la unidad de trabajo



Fuente: <http://www.ext.colostate.edu/pubs/crops/00568.html> visita 20/09/10

También está el sensor de inducción electromagnética EM38DD (Geonics Ltd. Canadá) (ver Figura 3). Este sensor opera simultáneamente en orientación vertical y horizontal obteniendo medidas de EC-H y EC-V con la una investigación de la profundidad de aproximadamente 0,75 a 1,50 respectivamente (VITHARANA, 2008).

Figura 3: Sensor EM38DD y esquema del método de trabajo.



Fuente: http://www.soilman.ugent.be/home/engels/facilities/soil_information_processing/EM38.html

<http://www.geonics.com/> Visita 20/09/10

c) Tipo de información

Los datos recogidos por estos sensores son principalmente la conductividad eléctrica la cual está relacionada con el contenido de arcilla, agua y materia orgánica (VITHARANA, 2008).

Otros sensores de suelo, que están en fase de desarrollo, son los sensores para la detección del contenido de materia orgánica, los sensores que detectan los niveles actuales de ciertos nutrientes, los sensores de humedad y los sensores de profundidad del suelo. En general, se trata de sensores que basan su funcionamiento en la medida de la reflectancia espectral del suelo en las regiones del visible y del infrarrojo cercano (ARNÓ, 2008).

I.4.2.4.- Medidas puntuales realizadas in situ

a) Definición

Estas medidas hacen referencia al hecho de que, a partir de cualquier tipo de dato recogido en campo, se puede establecer un mapa de zonificación que delimite la parcela en función de esa característica medida.

b) Plataformas

La recogida de datos se realiza manualmente a pie de campo.

c) Tipo de información

El tipo de información recogida podrá ser cualquier parámetro de vitícola que implique un interés por su representación espacial. Esta información deberá poseer la capacidad de ser tomada en campo como es la producción y su calidad distribuida a lo largo de la parcela.

1.5.- Experiencias de la agricultura de precisión en la viticultura

El uso de fotografías aéreas a color y a color infrarrojo para monitorizar los cultivos en Australia fue establecida cerca 1970. Esta técnica fue extendida más tarde para detectar malas hierbas en cultivos y pastizales (BARRETT y LEGGETT 1979, ARNOLD et al. 1985 citados por HALL, 2002). Las limitaciones de las fotos aéreas para monitorizar incluyen la falta de capacidad de adquisición de algunos datos cuantitativos y el alto coste (HALL, 2002).

La posibilidad de zonificar la calidad de la cosecha desde el campo es una de las principales razones que justifican el empleo de la agricultura de precisión en la viña. La capacidad de producción de distintos vinos en una misma parcela y, en consecuencia, el beneficio económico que esto supone para una bodega ha promovido el estudio de esta tecnología en su aplicación en la viticultura.

El uso de imágenes multiespectrales y su posterior análisis, han permitido un mejor entendimiento de la variabilidad, tanto en la parte vegetativa como en la productiva. La integración de la información recopilada en terreno y la producción de los vinos, han presentado altas correlaciones (BEST et al.2006).

Algunos de los objetivos perseguidos en la Viticultura de Precisión, y que se comentará con mayor detalle a continuación, son:

- a) Control y evaluación del vigor
- b) Diferenciación de la cosecha
- c) Evaluación del estado hídrico
- d) Caracterización del suelo
- e) Control de malas hierbas

f) Seguimiento sanitario del viñedo

g) Otros

Para alcanzar estos objetivos se emplean unos índices obtenidos a partir de las relaciones entre las distintas longitudes de onda (ver VII.1.- Anexo 1: Índices vegetativos).

a) Control y evaluación del vigor

Los beneficios de la administración del canopy del viñedo incluyen mejorar la calidad del vino, mejorar la producción, reducir la incidencia de las enfermedades y facilitar las operaciones mecanizadas. Los sensores remotos pueden servir como soportes para la toma de decisiones. El valor puede ser añadido como un producto combinado con la producción para los mapas del balance de la viña (índice foliar respecto a masa del cultivo) (JOHNSON et al. 2003).

Los sistemas aéreos hiperespectrales y multiespectrales son ideales para cuantificar el crecimiento del cultivo en las aplicaciones de investigación en la agricultura. Con el empleo de las imágenes aéreas se obtienen los distintos índices de vegetación. El más empleado es el NDVI (Índice de Vegetación Diferencial Normalizada), detallado en el apartado I.4.2.1.-Teledetección remota, pero no el único. Zarco-Tejada et al. (2005) elaboró un listado por el cual se estimaban algunos de los índices vegetativos estudiados en la agricultura. Con esto llevó a cabo un estudio de la relación de los niveles de clorofila, indicador del estado nutricional y crecimiento del cultivo, y los índices vegetativos.

Es bien conocido el hecho que para manejar los viñedos productores de uva de calidad, se ha de manejar el vigor de las plantas y relaciones de equilibrio (RE), entre la cantidad de hojas por Kg. de fruta. Estas relaciones de equilibrio se ven afectadas por diversos factores como clima, fertilidad, humedad de suelo y otros. El uso de mapas de NDVI, han servido para el desarrollo de determinaciones espaciales de productividad, y también mapas de balances de viñedos (ratio hoja/fruto) en diferentes estudios, que han sido utilizados para la cosecha diferencial de uvas en la producción de vinos premium (BEST et al. 2007).

Los resultados indican que existe una relación entre la relación de equilibrio (hojas/kg fruta) y las características químicas de las uvas, con una clara tendencia en una reducción de estos, con un mayor nivel de relación de equilibrio (o incremento de vigor). Este parámetro, muy estudiado en Australia por BRAMLEY y LAMB (2003) se desarrollará en el siguiente apartado. Además BEST (2007) estimó la superficie foliar necesaria para la producción de un kilo de uva.

b) Diferenciación de la cosecha

Los proyectos llevados a cabo en Australia y USA se enfocaron principalmente en la creación de sensores capaces de proporcionar valores de vendimia fiables y georeferenciados (ARNÓ et al. 2009) Por esto la primera estrategia a seguir fue la instalación de sensores en la vendimiadora de forma que permita la medida de la calidad de la uva conforme recoja la uva. En los últimos años, estos mapas de producción realizados por monitores en las vendimiadoras han constatado un alta diferencia en la cosecha según las zonas del viñedo, demostrando una alta variación espacial de los indicadores de calidad de la uva como son el color o los grados Baume (HALL et al. 2002). BRAMLEY y HAMILTON (2003) notaron que había diferencias en el vino final producido desde diferentes zonas en un estudio situado en Coonawarra (Australia), y que estas diferencias eran lo suficientemente grandes como para ser interesante cara a la toma decisiones por los enólogos. La vendimia selectiva basada en la variación del canopy (que esta íntimamente relacionado con la variación de la cosecha final), busca la diferenciación de los productos finales.

Es especialmente interesante el desarrollo de sistemas de manejo de la vegetación en tiempo real, mediante sensores y modelos integrados que detecten y manejen ciertas propiedades de interés de al vegetación. Por ejemplo, en Francia (TISSEYRE et al. 2001 citado por ARNÓ, 2008) se ha ensayado con cierto éxito en vendimiadoras la determinación gravimétrica de la cosecha mediante células de carga, y la implementación de sensores para la medida del pH del mosto y del grado por refractometría. En Australia, sin embargo, parecen mas preocupados por la identificación de las causas de la variabilidad intraparcularia (BRAMLEY y LAMB, 2003) y por el manejo diferencial de los factores que permitan alcanzar el equilibrio óptimo entre la cosecha, la calidad y la superficie foliar de las cepas (600 g de uva por m² de superficie foliar, equivalentes a 1,6 Kg. /cepa). La definición de zonas de manejo diferencial es otro de los temas de máximo interés en Australia (ARNÓ, 2008).

La búsqueda de un indicativo fácilmente medible y que ayude a diferenciación de la calidad de la uva ha llevado a varios viticultores del valle de Napa a emplear imágenes multiespectrales digitales. Estas imágenes se emplearon para monitorizar la variabilidad del viñedo como en la preparación de la vendimia, las condiciones ambientales del viñedo y la identificación de problemas relacionados con el riego, el estado nutricional, las enfermedades y las plagas. Las imágenes son cogidas a una distancia de 2 m de resolución georeferenciada y transformada al índice de vegetación diferencial normalizada (NDVI). Éste esta obviamente relacionado con el índice de área foliar y con la actividad fotosintética y, como indicador del desarrollo vegetativo o vigor de la viña, también ha sido reconocido como un factor relacionado con la calidad de la uva (HALL et al. 2003, CORTELL et al. 2005 citados por MARTÍNEZ-CASASNOVAS et al. 2010). Este área foliar del viñedo esta relacionada con la velocidad de maduración de la uva, plaga y enfermedad, el estado hídrico, las características de la uva y la calidad del vino (JOHNSON et al. 2003) Además debería

representar una suficiente capacidad de producción de fotoasimilados para sostener la maduración de frutos, evitando así mismo el exceso de sombreado que puede retardar la maduración e incrementar problemas tales como la ocurrencia de enfermedades y la disminución en la calidad de fruta por la aparición de sabores herbáceos en la fruta (BEST et al. 2006).

En Chile BEST (2007) comprobó que el NDVI derivado de imágenes multiespectrales se presenta como una variable con un carácter más integrador y firme para la sectorización de áreas de rendimientos y calidad. El resultado está también relacionado a la densidad del NDVI, lo que permite el desarrollo de muestras dirigidas, con una reducción en los costos de muestreo y una mayor representatividad de la información obtenida. Además recomienda el empleo de mapas de conductividad eléctrica como apoyo al NDVI.

Este mismo grupo elaboró un ensayo por el cual, a partir de la zonificación del NDVI realizó una serie de muestreos de forma que cuantifiquen el área foliar real propia de cada clase de vigor. Posteriormente realizaron un análisis de los vinos producidos. Así, en las zonas con alta relación m^2 hojas/Kg. de fruta ($>1,5$), las plantas produjeron vinos de menor calidad, con lo que una mayor área foliar produjo un desequilibrio en los frutos. En las zonas con baja relación m^2 hojas/Kg. de fruta ($<0,7$), también se produce uva asociada a vinos de menor calidad, lo que se asocia a la deshidratación de la fruta, produciéndose acidificaciones e inestabilidad del vino. En zonas en que existe una relación m^2 hojas/Kg. fruta media alta (1,2-1,4), la calidad de los vinos es satisfactoria. Se pueden encontrar zonas con equilibrios óptimos asociados a un rango de 0,7-1,2). La alta relación obtenida puede explicarse debido a la alta asociación de la información de NDVI con los factores productivos que generan la expresión final en la planta, la que se traduce en la producción de uvas y finalmente en el vino.

Si se quiere dar un paso más en la modelización de la calidad de la uva, SANTESTEBAN et al. (2010) recomiendan la determinación del índice NDVI u otros índices mejor relacionados con el estrés hídrico en más momentos de desarrollo de las bayas. Los resultados obtenidos en su trabajo indicaron que una zonificación realizada únicamente a partir de valores de NDVI no es suficiente para establecer Unidades de Manejo Diferenciadas ya que si bien las zonas definidas con el NDVI se relacionan con el desarrollo vegetativo la calidad no puede explicarse solo con este parámetro ya que se ve afectado por otros factores agronómicos tales como la carga de uva. La unión de ambas informaciones (carga y NDVI) podrían ser una herramienta suficiente para establecer Unidades de Manejo en el viñedo.

En Australia también se han realizado estudios para el empleo del índice vegetativo, el *Plant Cell Density* (PCD). Así BRAMLEY 2003 proveyó de un ejemplo comercial de los beneficios de usar imágenes de sensores remotos en la vendimia selectiva en un área de 3,3 ha en Margaret River (Oeste de Australia). Se empleó una imagen PCD adquirida en el envero como base para muestrear la uva de las áreas de alto y bajo vigor dos semanas antes de la vendimia. El análisis de esta uva demostró que

existían diferencias significativas en la calidad entre las regiones de bajo y alto vigor. El mapa de carga produjo una fuerte relación con la imagen PCD.

Otro de los enfoques dados en el empleo de estas técnicas es el pronóstico de las cosechas. En 2005 en la Universidad de Lleida ARNÓ trató de pronosticarla mediante el empleo del NDVI y parámetros medibles en campo como son el número de yemas, número de brotes, número de racimos y peso de poda después de la vendimia. Con estos datos concluyó que el NDVI es un parámetro relacionado positivamente con la cosecha obtenida y que presenta una elevada significación en los modelos de predicción de la cosecha. Como punto de partida han resultado ser una herramienta suficientemente interesante para la predicción de la cosecha ya sea de forma global o localizada. Presentó con vistas a futuras actuaciones en este campo, la necesidad de una mayor densidad de muestreo en ciertas variables de cultivo de forma que ayude a mejorar la estimación de la variabilidad de la cosecha y de la calidad a nivel de parcela. MARTÍNEZ-CASANOVAS (2005) estableció que para conseguir una predicción relativamente fiable de rendimiento no es suficiente con utilizar los valores de NDVI, sino que hay que acudir a otros parámetros que integren parámetros de carga. En la viña un mayor crecimiento vegetativo no significa una mayor producción de uva y/o una mayor calidad (BEST et al. 2007). El rendimiento en una misma parcela puede variar de un año a otro dependiendo de otros factores como las condiciones climatológicas durante la campaña o del aporte de agua de riego. Por esto la incorporación a su ensayo de las variables indicadoras del rendimiento del cultivo, como el número de yemas, el número de brotes y el número de racimos, además del peso de la poda del año anterior (indicador del vigor de la planta), mejoraron la predicción espacial del rendimiento. Los valores se mejoraron cuando, además de estas variables se incluía el rendimiento del año anterior. Además todas las variables de desarrollo y fertilidad del cultivo (número de yemas, número de brotes, número de racimos, peso de poda) y rendimiento mostraron diferencias significativas en las clases de NDVI identificadas.

Para SANTESTEBAN et al. (2010), que llevaron a cabo un seguimiento de la correlación entre el NDVI y la carga, comprobaron que si bien se mantiene la correspondencia entre las zonas con valores de NDVI más alto con aquellas en las que la carga es mayor, la separación de grupos estadísticamente diferentes es menos clara que lo que se observaba en el caso del desarrollo vegetativo, sin que las diferencias lleguen a ser estadísticamente significativas cuando la carga se expresa como número de bayas por cepa. Esta tendencia obedece al hecho que la capacidad productiva de los viñedos con un mayor desarrollo vegetativo tiende a ser mayor, y por tanto el número de estructuras reproductivas que se diferencian también los es.

Se observaron una gran variabilidad en la carga observada entre los puntos de una misma zona NDVI; lo que hace que no sea posible considerar a este índice como un estimador adecuado de la carga. Para el caso del rendimiento por cepa, el NDVI permitió discriminar claramente las partes menos productivas y más productivas de la

parcela. Las clasificadas como medio alto tuvieron una producción muy similar entre si, e intermedia a la de las zonas de baja y muy alta. (SANTESTEBAN et al. 2010)

El índice NDVI, u otros índices similares, deben por lo tanto complementarse necesariamente con otras medidas que sirvan para caracterizar el viñedo respecto a los otros factores que condicionan la calidad de la cosecha, y así establecer Unidades de Manejo que ayuden a la gestión del viñedo. Es particularmente importante realizar una zonificación de niveles de carga, estimada como número de racimos, ya que condiciona, a igualdad de desarrollo vegetativo y estrés hídrico de manera decisiva las características de la cosecha. (SANTESTEBAN et al. 2010)

Esta orientación en las técnicas de muestreo ha permitido aumentar ostensiblemente la capacidad predictiva del peso de racimos (y rendimiento final) a ser obtenido la cosecha, llegando a obtener altos valores de correlación. Muestreos dirigidos a partir de este tipo de planos han sido la base sobre la que se sustentan distintos sistemas de pronóstico de cosecha puestos en marcha, utilizando el concepto de viticultura de precisión, en donde se han alcanzado correlaciones entre 0,7 y 0,9 (BEST et al. 2006).

El resultado del análisis de regresión entre las variables de NDVI, rendimiento y propiedades de los suelos muestra una alta correlación entre el NDVI y el rendimiento ($R^2= 0,81$, $p<0,01$). Similares relaciones, en particular entre el NDVI y el rendimiento han sido encontradas por otros autores en estudios de viticultura de precisión (BRAMLEY y LAMB, 2003, PROFFIT et al. 2006, ACEVEDO-OPAZO et al. 2008).

Los patrones de la variación de la cosecha revelan que son temporalmente estables, y que en consecuencia, las diferentes áreas o zonas pueden ser identificadas por estas unidades, en el que la cosecha es típicamente baja, media o alta, en relación a cualquier año (BRAMLEY, 2003).

c) Evaluación del estado hídrico

Algunos autores han observado que el estado hídrico de la cepa tiene un efecto directo en la calidad de la uva al influir este en el crecimiento vegetativo y del fruto (DRY Y LOVELYS 1998 citado por ACEVEDO-OPAZO ET AL. 2008, OJEDA et al. 2002).

La variabilidad en la parcela del potencial hídrico era especialmente evidente al final del verano cuando las restricción hídrica se encontraba por debajo de las condiciones de secano (OJEDA et al. 2005 citado por TAYLOR et al. 2010, TISSEYRE et al. 2005). En cuanto el déficit hídrico aumenta (menor valor del potencial hídrico) los valores de los parámetros de cosecha decrecen. En relación a la producción, esta reducción conlleva la reducción del peso por baya. Esto quiere decir que las restricciones hídricas severas (particularmente en las zonas de mayor restricción de agua) pueden causar una fuerte atenuación del crecimiento de la viña. SCHULTZ y

MATTHEWS (1988) y GINESTAR et al. (1998) encontraron que el crecimiento de la viña es el primer factor afectado por la restricción de agua.

En condiciones de secano, el vigor esta fuertemente relacionado con la disponibilidad del agua en el suelo, por lo que los mapas NDVI pueden constituir información relevante para la proposición de distintas zonas de restricción de agua en el viñedo. (ACEVEDO-OPAZO et al. 2008). Tal como afirmaba ARNÓ et al. (2009) el índice de área foliar (LAI), la presencia de deficiencias nutricionales, el estado de estrés hídrico o el estado de desorden sanitario puede ser deducido basando en el cálculo de NDVI. Por esto se ha propuesto la medición del NDVI como indicador el estado hídrico de la parcela y su posterior zonificación de forma que se puede realizar un riego ajustado a las necesidades de la viña, buscando siempre una óptima producción y calidad. Mediante la información proporcionada por las imágenes aéreas y la resistencia eléctrica del suelo se puede caracterizar la variabilidad espacial del estado hídrico de la planta a una escala de parcela (ACEVEDO-OPAZO, 2008).

En Australia, PROFFITT et al. (2005) llevó a cabo, durante los años 2003 y 2004, la identificación de 3 zonas diferenciadas para el diseño del riego por goteo. Estas zonas se establecieron en base al uso del índice *Plant Cell Density* (PCD; Ver apartado c) Tipo de información del I. 4. 2. 1.- Teledetección remota) el cual diferenció 3 clases de vigor: alto, medio y bajo. A partir de estas clases se propuso la aplicación de un riego, uniforme sobre toda la parcela en el 2003 y diferente en cada una de las tres zonas durante el 2004. Comparado con el 2003, la cantidad aplicada de agua en el 2004 fue reducida en la zona de mayor PCD y aumentada en la zona de menor vigor. Una comparación de las imágenes derivadas del 2003 y 2004 junto con el cambio de área superficie foliar demostró que la aplicación de menos agua en zonas de alto vigor redujo el crecimiento vegetativo y que en la de menor vigor lo aumento haciendo que la parcela sea más uniforme. Además el menor crecimiento obtenido en las zonas de alto vigor promovió la aireación y la penetración de los tratamientos fitosanitarios lo que redujo el riesgo de *Botrytis* que ha llegado a ser un problema importante en los años previos (PROFFITT et al.2005).

En Chile ACEVEDO-OPAZO (2008) mostraron la relevancia del uso del NDVI para zonificar el viñedo según las restricciones de agua. Su experimento demostró que la información proporcionada por las imágenes aéreas y la resistencia eléctrica del suelo es relevante para caracterizar la variabilidad espacial del estado hídrico de la planta a nivel de parcela. Para el empleo de este índice recomiendan el empleo de información adicional como la conductividad eléctrica, la cota, el color del suelo, la profundidad, etc. La información espacial de alta resolución como las imágenes aéreas y la conductividad eléctrica del suelo ofrecen una gran promesa para caracterizar la variabilidad en cosecha, expresión vegetativa y restricción del agua. Este tipo de información constituye un soporte relevante para designar las diferentes zonas de restricción de agua. (ACEVEDO-OPAZO, 2008)

En los viñedos el potencial total de uso de agua varía según condiciones climáticas y el tamaño del canopy de las vides. De esta forma la alteración del tamaño y forma del canopy por labores de manejo puede modificar el consumo de agua por parte de las vides, al modificarse la cantidad de radiación solar interceptada. Así también, cuando se considera el consumo de agua de una planta de vid en particular, con un canopy mas grande, esta tendrá una mayor cantidad de área foliar expuestas a las otras condiciones atmosféricas que dirigen el consumo de agua (viento, humedad relativa, temperatura) y por lo tanto esta planta presentara un mayor consumo de agua (BEST et al. 2006).

Por otro lado PROFFITT (2005) seleccionó 30 cepas de una superficie de 8,8 ha de Cabernet Sauvignon localizadas mediante GPS en una parcela situada en Margaret River (Oeste de Australia). Una vez comprobado mediante medidas en parcela de la fiabilidad del empleo del índice PCD para zonificar los distintos vigores de la parcela se procedió al diseño del riego por goteo. Este se ajusto en función del crecimiento de las cepas, de forma que se reduzca el consumo de agua y se homogenice la parcela. Junto con el cambio de área superficie foliar se demostró que la aplicación de menos agua en zonas de alto vigor redujo el crecimiento vegetativo y que en la de menor vigor lo aumento haciendo que la parcela sea más uniforme.

Para el estudio del estado hídrico del cultivo se han establecido algunos índices de interés como es el *Normalized Difference Water* (NDWI). GAO (1996) realizó un estudio en U. S. A. de su utilidad, concluyendo que es perfectamente útil para la estimación del contenido de agua, pero siendo empleado como una contribución al NDVI y no como un sustituto.

d) *Caracterización del suelo*

Como se ha comentado anteriormente las características del suelo son un alto condicionante a la hora de gestionar el viñedo. La conductividad eléctrica es un indicador variable muy empleado en la zonificación del viñedo al estar altamente relacionada con la profundidad del suelo y el nivel nutricional del mismo. El estudio de los nutrientes presentes en pecíolos de un mismo viñedo sugiere unas altas diferencias espaciales en el contenido mineral del suelo. En los viñedos la variación espacial de la carga parece estar mayormente influenciada por las propiedades físicas del suelo en contra de las cualidades químicas (BRAMLEY y LAMB 2003 citado por ARNÓ et al. 2009).

Los mapas de carga espacialmente referenciados adquiridos desde un número de viñedos australianos los pasados 3 años sugieren que las regiones de viñedos de alta y baja producción tienden a permanecer constante en el tiempo. Esto implica que el suelo, y su asociación con la topografía y el microclima, juegan un papel importante en la caracterización de las características espaciales de la variabilidad del viñedo. Por esto no es de extrañar que el esfuerzo considerable en la investigación en la viticultura de

precisión esta centrado en la medición y mapeo de la variabilidad espacial de los suelos en los viñedos a escala unitaria (HALL, 2002).

En Australia TAYLOR y BRAMLEY (2004) emplearon imágenes multiespectrales de alta resolución y mapas de las propiedades eléctricas del suelo para definir las zonas del viñedo.

HALL et al. (2002) estimó el vigor de la viña mediante el empleo de imágenes aéreas como detección remota para mapear las diferencias relativas en el canopy del viñedo. En este estudio estableció que, en los diferentes suelos, debido a las diferencias intrínsecas del color, nivel de textura y contenido mineral y orgánico, tienen diferentes características de reflectancia óptica. La precaución debe ser tomada cuando se usa los sensores ópticos remotos para mapear la estructura del suelo en la base del suelo reflectante debido a la penetración de unos pocos milímetros de la superficie del suelo del infrarrojo cercano y visible (HALL, 2002).

Aunque los dispositivos de actuación variable se implementaron inicialmente en abonadoras y pulverizadores, su aplicación se ha extendido también a las labores de preparación de suelo. De este modo, algunos de los parámetros utilizados para la regulación de los aperos de trabajo del suelo, como la velocidad de giro de los accionados por la toma de fuerza o la profundidad de trabajo, pueden modificarse en continua a partir de análisis preciso de la variabilidad intraparcelsaria especificada en adecuados mapas de compactación, profundidad o textura del suelo (ARNÓ, 2008).

e) Control de malas hierbas

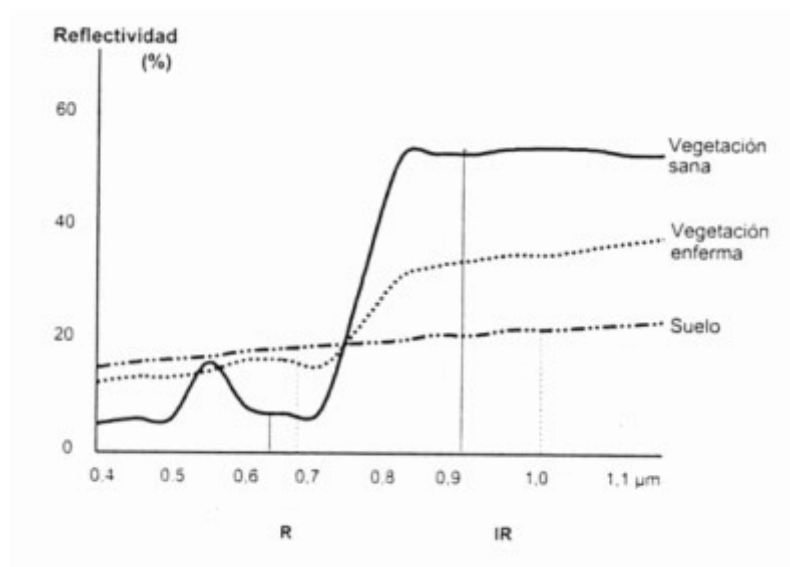
La detección de la presencia de malas hierbas (para la aplicación intermitente de herbicidas) y el monitoreo de la condición del cultivo (para la aplicación de fertilizantes durante el ciclo) son dos ejemplos de dispositivos disponibles para su uso en viticultura de precisión (ARNÓ, 2008).

f) Seguimiento sanitario del viñedo

Otros factores que pueden afectar a la cosecha incluye el posible efecto de las condiciones adversas o el estado sanitario del cultivo (ARNÓ et al 2005, SORT y UBALDE 2005 y ZHANG et al. 2002 citados por ARNÓ et al. 2009). Por esto las plagas y enfermedades ha sido uno de los puntos clave de investigaciones enfocadas en su seguimiento y control

La diferente reflectividad de la vegetación sana y enferma, tal y como muestra la Figura 4, permite diferenciar mediante fotos aéreas el estado sanitario del viñedo.

Figura 4: Reflectividad del suelo desnudo, la vegetación sana y la vegetación enferma según las distintas longitudes de onda.



Fuente: http://www.scanterra.com.ar/conozca_mas.html

En California, JOHNSON et al. (1996 citado por HALL, 2002) ha usado esta técnica para identificar áreas de viñedo afectadas con un alto daño de afidos de la viña, la filoxera (*Daktulosphaira vitifoliae*). Este fue logrado por la relación del nivel de filoxera que incide sobre la viña y el vigor. El nivel del vigor de la cepa en el terreno fue cuantificado en términos de peso de poda donde los mayores vigores de las cepas produjeron mayores pesos de vegetación durante la poda siguiente. Las correlaciones establecidas entre los valores de NDVI extraídos de las imágenes y el canopy con el peso de poda son usadas para indicar las áreas sujetas a una infestación de filoxera. Las correlaciones significativas se consiguieron entre el NDVI y el índice de área foliar por superficie y el área foliar por cepa. Estas correlaciones han sido establecidas sobre múltiples viñedos usando imágenes de satélite IKONOS de 4 metros de resolución.

g) Otros

Además de estas aplicaciones utilizables a la hora de manejar y gestionar el viñedo las imágenes aéreas permiten obtener información de las especies de cultivo implantadas. En el caso de la viticultura se ha llevado a cabo por BRAMLEY en los viñedos australianos un estudio de la variabilidad existente entre variedades. En términos generales, la información precisa concerniente a la localización y al tamaño de las áreas que contienen variedades diferentes permite pronosticar la productividad local y la localización de los recursos consecuencia de la viticultura (BRAMLEY, 2001b citado por HALL, 2002). Las diferencias sutiles en el espectro de las hojas y la fenología, pueden permitir discriminar y mapear las diferencias varietales usando la teledetección. A veces, las diferencias pueden ser pequeñas y requerirá un sensor con

una combinación de imagen de resolución métrica y un alto número de longitudes de onda. Hasta la fecha, solo los instrumentos hiperspectrales como el CASI han sido usado para discriminar las diferencias varietales en viñedos y identificar las plantaciones de una variedad contenida en una unidad de viñedo (HALL, 2002)

II.- Objetivo

Este Trabajo de Fin de Carrera evaluar el interés del uso del Índice Vegetativo Diferencial Normalizado (NDVI) para el establecimiento de Unidades de Manejo Diferenciado del viñedo.

III.- Material y método

III.1.- Material

III.1.1.- Material vegetal

El presente trabajo se ha desarrollado en viñedos propiedad de Bodegas Luis Cañas (Villabuena de Álava, Álava) dentro de la Denominación de Origen Rioja Alavesa. Esta zona se caracteriza por poseer una precipitación anual de aproximadamente 500 mm/año, con unas temperaturas medias de 19,6 °C durante el verano siendo la mínima 8,1 °C y la máxima 34 °C.

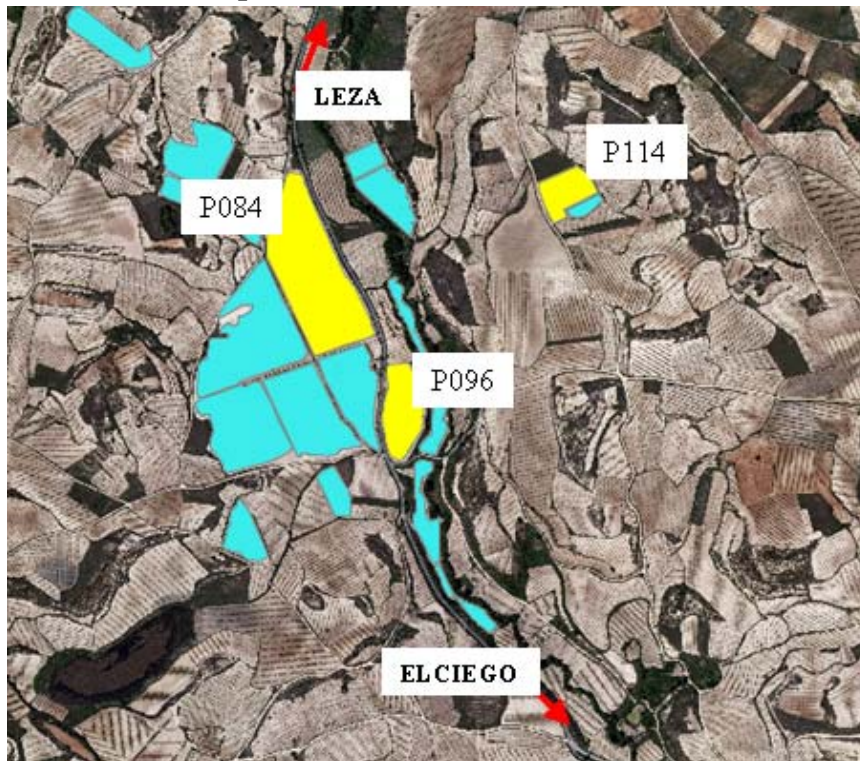
El material vegetativo en el cual se ha realizado el seguimiento consta de 3 parcelas de *Vitis vinifera* cv. “Tempranillo” localizadas en el municipio de Leza (Álava).

A continuación se detalla las características de cada una de las parcelas:

1. Parcela 84 (Polígono: L1, Parcela: 61 B): se trata de un viñedo de 4,52 ha con 16 años formado en vaso. El marco de plantación es 1,20 m x 2,35 m.
2. Parcela 96 (Polígono: L6, Parcela: 63 A): consta de 1,53 ha de viña plantada en el 2000. El sistema de formación establecido es en cordón doble con un marco 1,25 x 2,50 m.
3. Parcela 114 (Polígono: L1, Parcela: 103): compuesta de 0,82 ha presenta una edad de 14 años con una formación en vaso. El marco de plantación es 1,25 x 2,40 m.

En la Figura 5 se muestra la localización de cada una de las parcelas.

Figura 5: Localización las parcelas



III.1.2.- Material instrumental

Para la obtención de los datos de campo se requirió:

- Cámara de presión *Scholander* (mod. P-3100, Soil Mosture, USA)
- Bisturí
- Bolsas con cierre hermético
- Bombona de nitrógeno
- Medidor de relación Clorofila/Flavonoles Dualex (Force-A, Orsay, Francia) (ver Figura 6)
- Calibre digital

Para la elaboración de los planos se empleó el programa gvSig 1.9 (Generalitat Valenciana e IVER T. I. Valencia 2005).

Figura 6: Medidor de la relación Clorofila/Flavonoles Dualex (Force-A, Orsay, Francia)



Fuente: Manual Dualex (Force-A, Orsay, Francia)

III.2.- Método

III.2.1.-Ensayo n° 1

a) Caracterización previa de la parcela

La adquisición de datos sobre la explotación se enmarcó dentro de una campaña de vuelo realizada en verano de 2009, habiéndose realizado la programación de la campaña en el periodo de enero y los días inmediatamente posteriores, al considerarse esta fase fenológica como el momento óptimo para la toma de datos. Las imágenes se tomaron por el satélite QuickBird, que orbita a 450 kilómetros de la superficie terrestre siendo el satélite comercial con mejor capacidad de resolución espacial de entre los disponibles comercialmente. Este sensor cuenta con cuatro canales de recepción de datos: azul, verde, rojo (los tres dentro del espectro visible) e infrarrojo, con una capacidad de discriminación de 2.048 valores.

La resolución espacial de las imágenes (tamaño máximo del objeto más pequeño que se puede distinguir en la imagen) se sitúa en 60 centímetros. Esta resolución permite la discriminación de las zonas ocupadas por la vegetación dentro de la explotación. Estas imágenes fueron tratadas por la empresa Geosys-España.

Con estas imágenes, que reflejan las distintas longitudes de onda de la parcela, se realizó el cálculo del NDVI. Los valores negativos corresponden al suelo desnudo y los positivos a la vegetación presente en la parcela por ello en estos mapas se eliminaron los valores de suelo y se hizo una corrección de las posibles sombras que afecten al valor real del índice. Para la obtención de este índice se utilizó la ecuación para el cálculo del índice por píxel de la imagen.

$$\text{NDVI} = (\text{banda NIR} - \text{banda ROJA}) / (\text{banda NIR} + \text{banda ROJA})$$

La Figura 7 muestra las imágenes trabajadas hasta llegar a la obtención del NDVI.

Figura 7: Conversión de la imagen real (1) a IR (2) y el posterior NDVI (3)

1



2



3



■ NDVI Bajo ■ NDVI Medio ■ NDVI Alto

Fuente: Geosys S.L. (Madrid)

b) Diseño del ensayo

En este ensayo se establecieron puntos en los cuales se realizó un seguimiento hídrico a lo largo del verano denominados Puntos de Seguimiento Hídrico (PSH). Cada uno de estos PSH están formados por 15 cepas cada uno en el caso de las parcelas en vaso (084 y 114) y de 10 cepas en el caso de la parcela 096, por su formación en espaldera.

En total, en la parcela 084 se situaron 9 PSH, y en la 096 y 114, 6 PSH en cada una de ellas. Como se muestra en la Figura 8, estos puntos se distribuyeron de forma que abarcaran la variabilidad de la parcela.

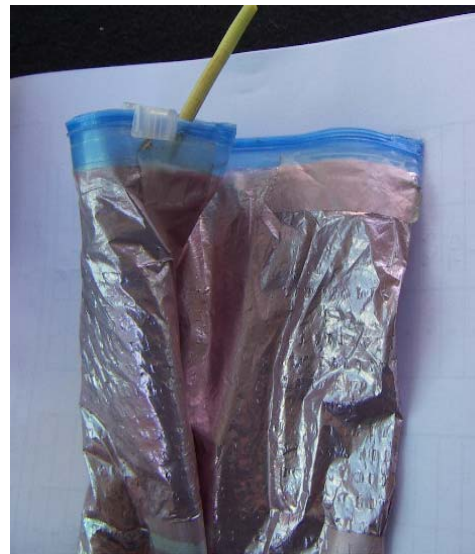
Figura 8: Ubicación de los Puntos de Seguimiento Hídrico (PSH) en la parcela



Figura 9: Proceso de medición del potencial hídrico



Colocación de las bolsas



Recogida de bolsas y preparación para la medida



Enrollado de las bolsas



Renovación del corte



Preparación de la cámara



Introducción de la bolsa y medición

c) Controles realizados

Se realizó la medida del potencial xilemático en cada uno de los PSH establecidos en las parcelas. Para su medición se sometió previamente a la hoja a oscuridad, de forma que cierre sus estomas y equilibre el potencial de la hoja con el del tallo sobre el que se inserta (CARBONNEAU et al. 2004 citado por GALLEINA et al. 2007). Se colocaron un total de 5 bolsas por punto, repartidas entre las 15 o 10 cepas según corresponda por punto. Se escogieron hojas adultas del tercio medio del brote, es decir, ni muy joven o pequeña ni muy vieja o grande. Además esta debía estar sana y en perfecto estado. La colocación se realizó hora y media antes de proceder a la medida. Una vez pasado este tiempo se procedía a la recogida de las hojas comenzando por el primer punto en el que se habían puesto las bolsas, se recogían las 5 muestras y se comenzaba con la medida. Una vez medidas estas muestras se iba a por el siguiente punto, de forma que se mantenía siempre el mismo orden de puesta y medición del punto. Además mantenía un buen cierre de las bolsas de forma que se evite la deshidratación de las hojas restantes. En la Figura 9 se muestra el procedimiento seguido para la medida del potencial hídrico.

Las medidas se llevaron a cabo semanalmente entre el inicio de enero y maduración en dos momentos distintos del día, a las 9:00 y las 12:00 hora solar. Las precipitaciones producidas el 7/9 impidieron la toma de datos a las 9:00 hora solar (hs).

d) Análisis de los resultados

Los PSH definidos para cada una de las parcelas se agruparon en función de su valor de NDVI, de forma que se distinguieron 2 o 3 clases. De esta forma, y tal y como muestra la tabla 1, se obtuvo una clasificación de los puntos.

Tabla 1: Clasificación de los PSH según su valor NDVI.

Parcela	NDVI bajo	NDVI medio	NDVI alto
P084	PSH084_001	PSH084_004	PSH084_007
	PSH084_002	PSH084_005	PSH084_008
	PSH084_003	PSH084_006	PSH084_009
P096	PSH096_001	PSH096_003	PSH096_005
	PSH096_002	PSH096_004	PSH096_006
P114	PSH114_001		PSH114_003
	PSH114_002		PSH114_005
	PSH114_003		PSH114_006

Para evaluar la correspondencia entre las clases establecidas y el comportamiento hídrico del viñedo se realizó un análisis de la varianza, comparando tanto si existían diferencias entre los niveles de potencial hídrico observados en los PSH

pertencientes a distintas clases de NDVI como entre los PSHs incluidos dentro de una misma clase.

III.2.2.- Ensayo n° 2

a) Caracterización previa de la parcela

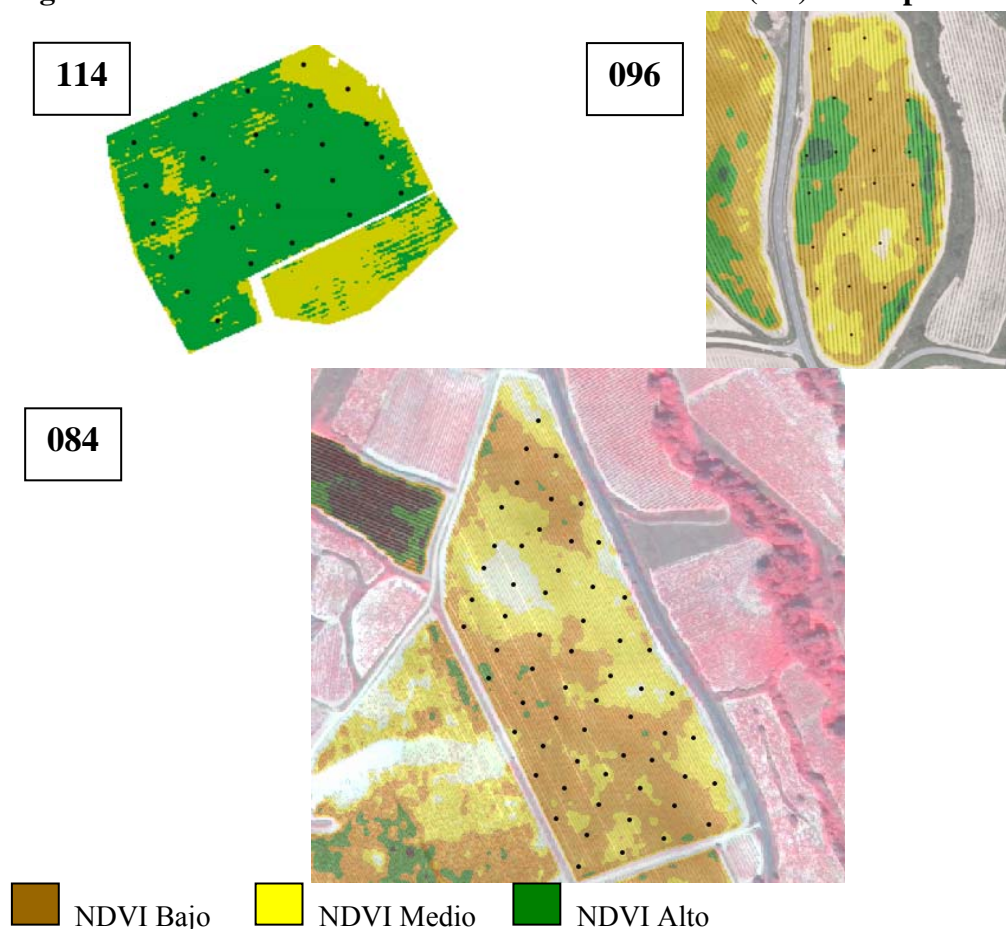
La caracterización de la parcela en este ensayo se realizó de la misma forma que en el ensayo n° 1 por lo que se partió del mismo mapa NDVI.

b) Diseño del ensayo

Se estableció una red de puntos denominados Puntos de Zonificación (PZ) con una densidad de 15 puntos por hectárea (BEST et al. 2007) de forma que, en su conjunto, representen una cuadrícula que cubra completamente la parcela (ver Figura 10). De esta forma, y según su marco de plantación, se situaron los puntos mediante el programa gvSig 1.9 (Generalitat Valenciana, IVER T. I., Valencia). En la parcela 084 se situaron un total de 60 PZs, 21 en la parcela 096 y 25 en la parcela 114.

Cada uno de estos PZ estaba formado por 10 cepas, para el caso del sistema en espaldera, y de 15 cepas para el caso de la formación en vaso.

Figura 10: Distribución de los Puntos de Zonificación (PZ) en las parcelas.



c) Controles realizados

c.1.) Control del crecimiento.

Se midió la sección de pámpanos en cada una de las cepas que componen cada PZ, 15 en el caso del vaso y 10 en el caso de la espaldera. Esta sección, medida con un calibre digital, se tomaba a partir del diámetro del 2º entrenudo en cada uno de los pámpanos de la cepa.

c.2.) Control de la carga.

Se realizó un conteo del número de racimos en las 15 o 10 cepas, según corresponda, de cada PZ.

c.3.) Control del número de hojas secas.

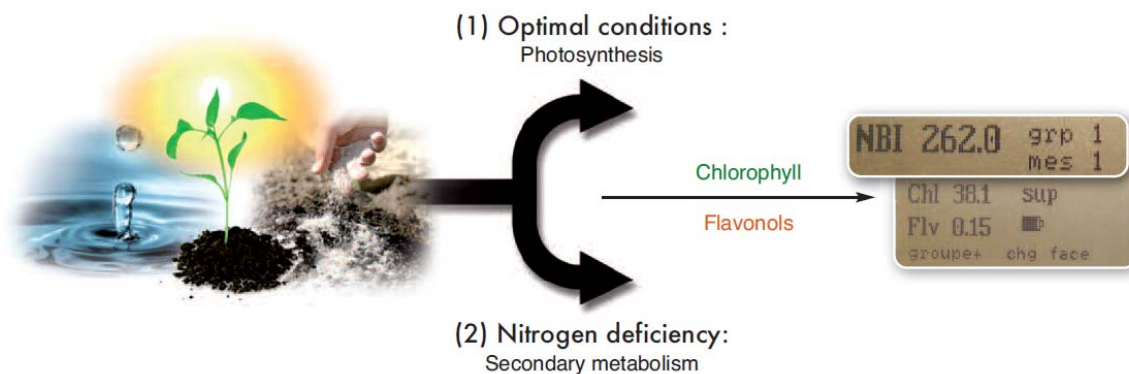
Se llevó a cabo el conteo del número de hojas secas por pámpano en cada una de las cepas que forman un PZ.

c.4.) Control de las características espectrales de la hoja.

Se estimó las características espectrales mediante el medidor Dualex el cual consiste en la obtención de la relación de la clorofila y el contenido en flavonoles en la hoja, señalado como el índice de balance de nitrógeno (NBI). El sistema se basa en la emisión de distintas longitudes de onda y respuesta de la hoja a estas emisiones.

Tal y como quiere presentar la Figura 11, la presencia de una concentración alta de polifenoles es un indicador de la deficiencia de nitrógeno en el cultivo (CHISHAKI y Horiguchi, 1997; Carrelat et al. 2005 citados en Tremblay et al. 2009). Debido al pico de absorbancia de los polifenoles esa en la región de los UV-A y UV-B, el Dualex emite radiación ultravioleta (UV) (longitud de onda de 375 nm) que es parcialmente absorbido por la epidermis de la hoja (debido a la presencia de polifenoles) (Tremblay et al. 2009). El rango de medición de los flavonoles oscila entre 0 y 3 unidades Dualex, mientras que los valores de clorofila lo hacen entre 0 y 150 siempre con un margen del 5 %.

Figura 11: Medición del contenido en clorofila y flavonoles mediante el medidor Dualex (Force-A, París, Francia).



Mediante el empleo de este medidor se realizaron la medida de 20 hojas distintas en cada uno de los Puntos de Zonificación (PZ) anteriormente detallado.

Esta medida se realizó en la 4ª hoja empezando por el ápice, siempre buscando una hoja completamente abierta. Para realizar la medida se procedía a la apertura de la pinza por presión (ver Figura 12) y posteriormente se insertaba la hoja especificando si se trata del haz o del envés de ésta. En cada medida se hacía la lectura por el haz y por el envés, de forma que el medidor ofrece el valor medio de las dos lecturas. El área de medición es de 5 mm de diámetro.

Figura 12: Detalle del medidor de clorofila Dualex ((Force-A, Orsay, Francia)



d) Análisis de resultados

Una vez situados los puntos de muestreo y mediante la medición del valor NDVI, se procedió a la clasificación de los PZ en función de su valor de NDVI.

De esta forma, se obtuvieron la distribución de los PZs en 3 clases en cada una de las parcelas, estableciendo como intervalos: 0-33 % para NDVI bajo, 33- 67 % para NDVI medio y 67- 100 % para NDVI altos. En el caso de la parcela 114 se establecieron 2 clases de NDVI dada la alta uniformidad de la parcela. A continuación se presentan los valores de estos intervalos de NDVI para cada una de las parcelas.

Tabla 1: Intervalos de NDVI que definen cada una de las clases de NDVI en las parcelas estudiadas

Clase de NDVI	Parcela		
	P084	P096	P114
Bajo	0,12-0,22	0,14-0,23	0,15-0,45
Medio	0,22-0,25	0,24-0,27	
Alto	0,26-0,39	0,28-0,51	0,46-0,61

Para evaluar la relación entre las clases de NDVI y las medidas tomadas en campo se realizó una comparativa mediante un ANOVA mediante el programa SPSS (IBM Corporation, Route 100 Somers, NY).

IV.- Resultados y discusión

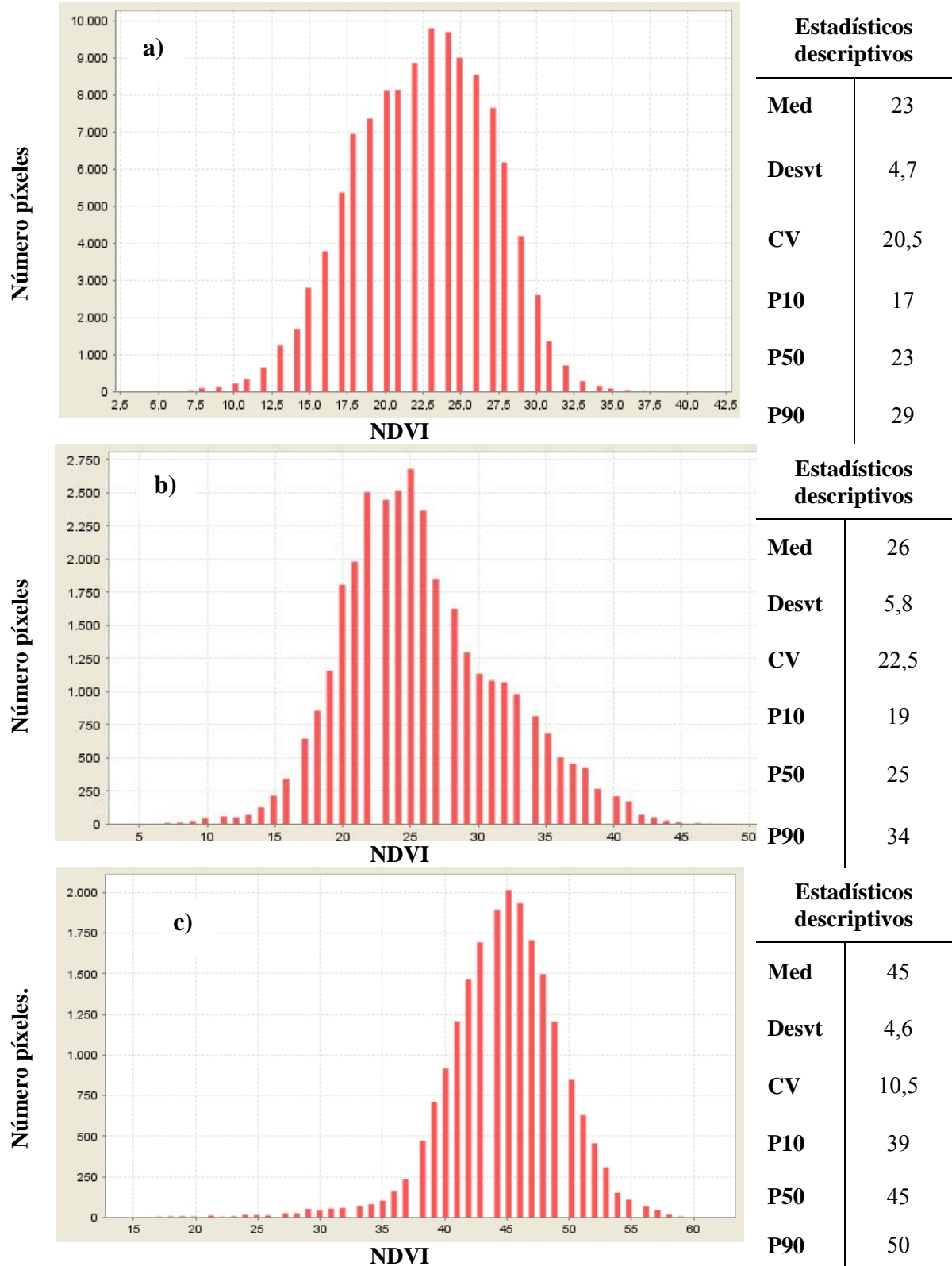
IV.1.-Análisis previo

En la figura 13 se representa el número de unidades o píxeles pertenecientes a un mismo valor de NDVI presentes en cada una de las parcelas. Las parcelas objeto de estudio han presentado diferencias notables en lo relativo a su valor medio de NDVI. Así, las parcelas 084 y 96 presentan un valor medio entorno a 20 – 25 en comparación al valor medio de la 114 el cual es 45.

Los valores del NDVI en la parcela 114 se presentan en un intervalo relativamente pequeño, lo que demuestra la poca variabilidad vegetativa que hay en la parcela y que habrá que tener presente en su análisis. Además su bajo valor de coeficiente de variación expresa la homogeneidad presente en la parcela.

En el caso de las parcelas 084 y 096 por el contrario, se observa una alta variabilidad de valores, (mayores valores de coeficiente de variación) y por tanto de vigor en la parcela.

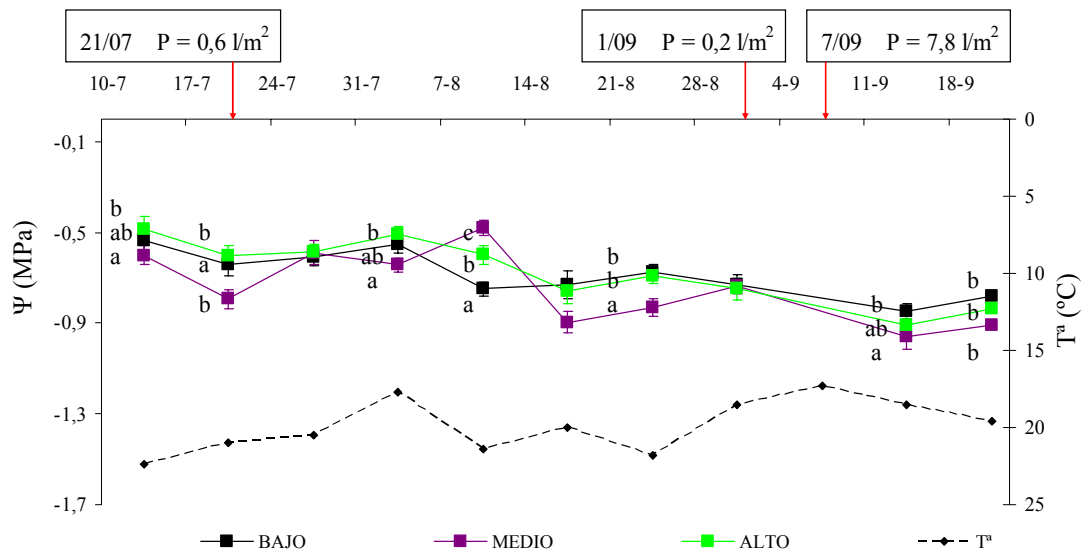
Figura 13: Histograma del NDVI de la parcela 084 (a), en la 096 (b) y en la parcela 114 (c).



VI.2.- Evaluación del interés del NDVI para diferenciar zonas del con similar funcionamiento hídrico (Ensayo 1)

La Figura 14 muestra la evolución del potencial xilemático de la parcela 084 a las 9:00 hora solar (hs).

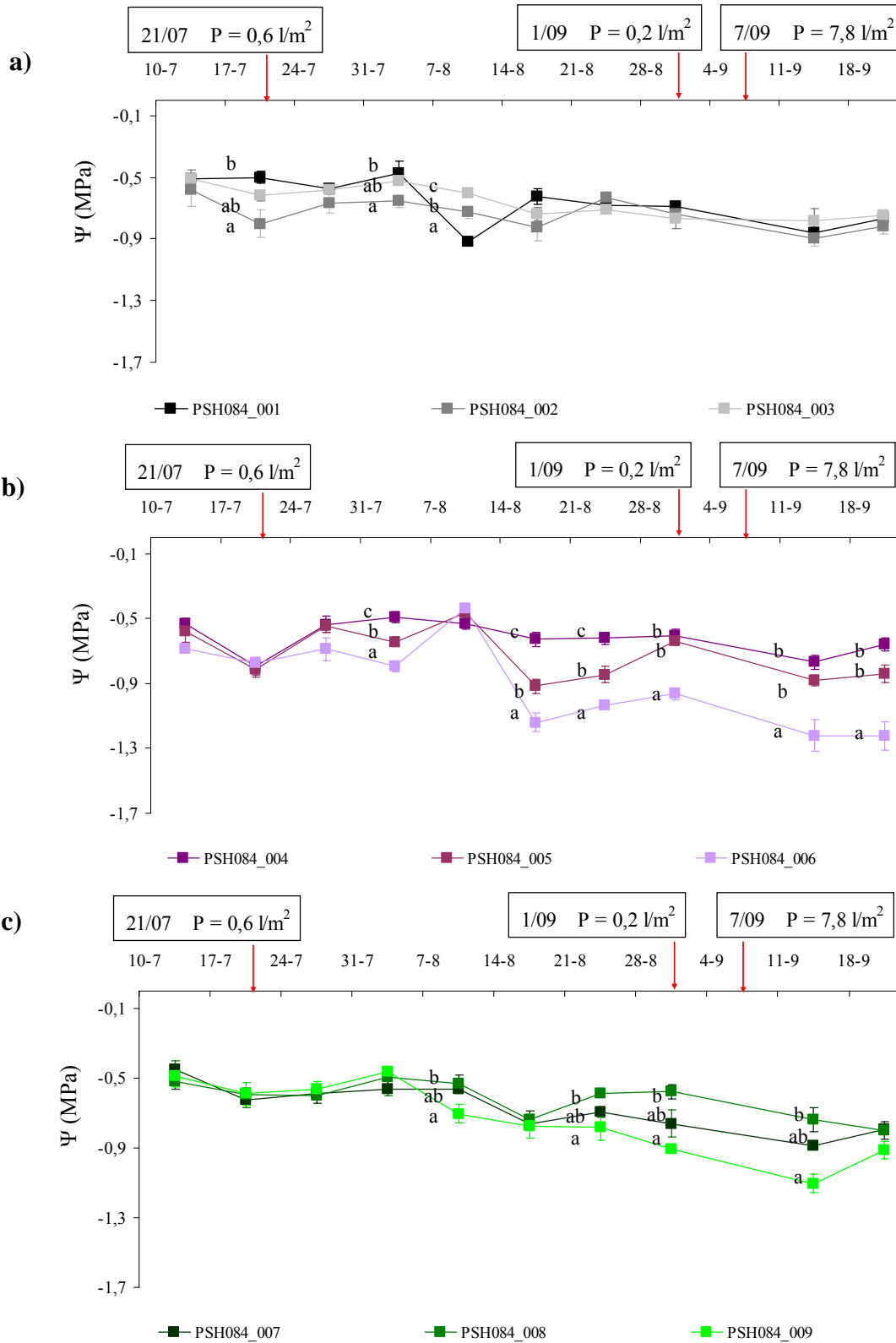
Figura 14: Evolución del potencial xilemático de 3 clases de NDVI en la parcela 084 a las 9:00 hs.



Las letras representan los distintos grupos obtenidos de acuerdo al test de Tukey. La falta de letra demuestra la pertenencia al mismo grupo.

Se comprueba que no existe una clara correspondencia entre las zonas del viñedo diferenciadas a partir de su valor de NDVI y el comportamiento hídrico observado en las mismas. En general, los niveles más negativos de potencial hídrico se observaron en la clase intermedia de NDVI, si bien esta tendencia no fue observada en todas las fechas de medida. De hecho, si se compara la evolución del potencial hídrico de zonas pertenecientes a una misma clase de NDVI (Figura 15), se comprueba que las diferencias observadas entre ellas son a veces mayores que las que se han encontrado como norma entre las distintas clases de NDVI. Es particularmente llamativo el comportamiento observado en los PSH084_006 y PSH084_009, que se destacan por presentar un nivel de estrés hídrico mucho mayor que el resto, siendo estas diferencias más importantes a partir de enero.

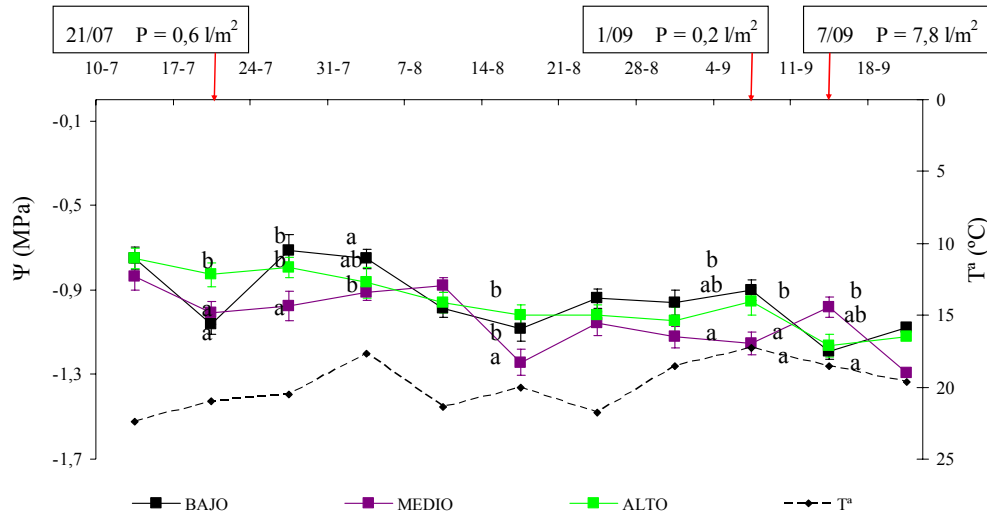
Figura 15: Evolución del potencial hídrico de los puntos de NDVI bajo (a), medio (b) y alto (c) en la parcela 084 a las 9:00 hs.



Las letras representan los distintos grupos obtenidos de acuerdo al test de Tukey. La falta de letra demuestra la pertenencia al mismo grupo.

De manera similar, las diferencias observadas en el potencial hídrico medido a las 12:00 hs fueron menores cuando se compararon las zonas con diferente NDVI que cuando se compararon zonas de la parcela pertenecientes a una misma clase de NDVI (Figuras 16 y 17). Al igual que ocurría a las 9:00 hs, los valores medios de potencial más negativos se encontraron en la clase intermedia de NDVI, seguramente por el hecho de que dentro de dicha clase se encontraba el punto PSH 084_006, que destacaba notablemente del resto por estar sometido a un estrés hídrico mucho mayor.

Figura 16: Evolución del potencial hídrico de 3 clases de NDVI en la parcela 084 a las 12:00 hs.



Las letras representan los distintos grupos obtenidos de acuerdo al test de Tukey. La falta de letra demuestra la pertenencia al mismo grupo.

Figura 17: Evolución del potencial hídrico de los puntos de NDVI bajo (a), medio (b) y alto (c) en la parcela 084 a las 12:00 hs.

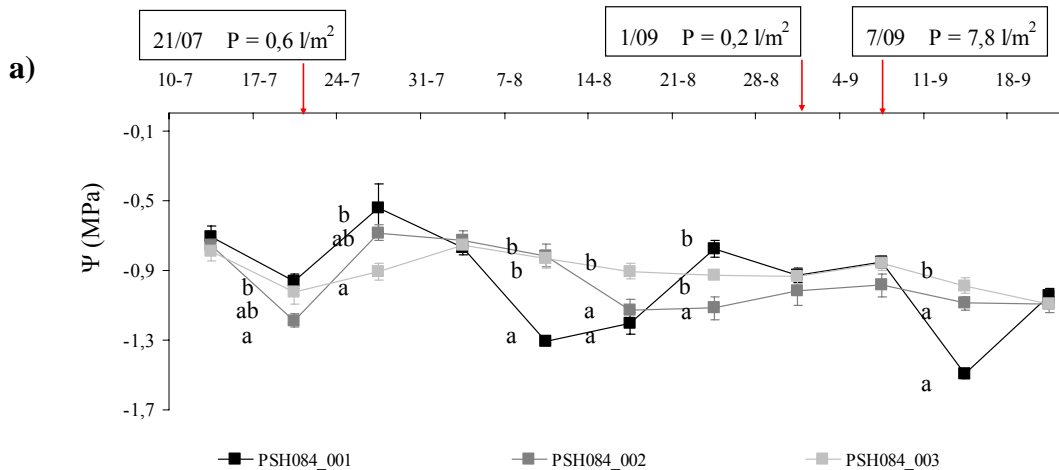
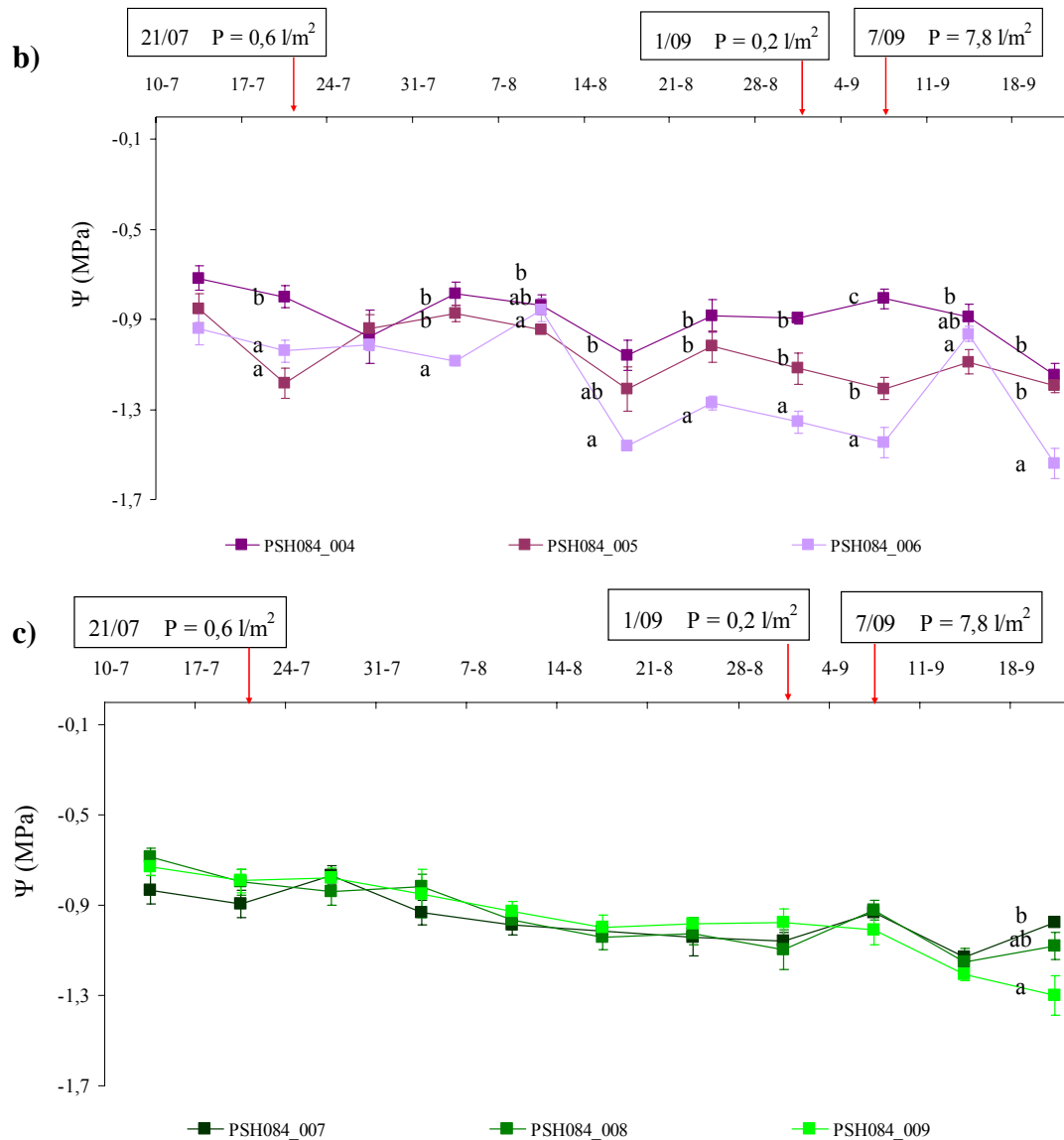


Figura 17: Continuación

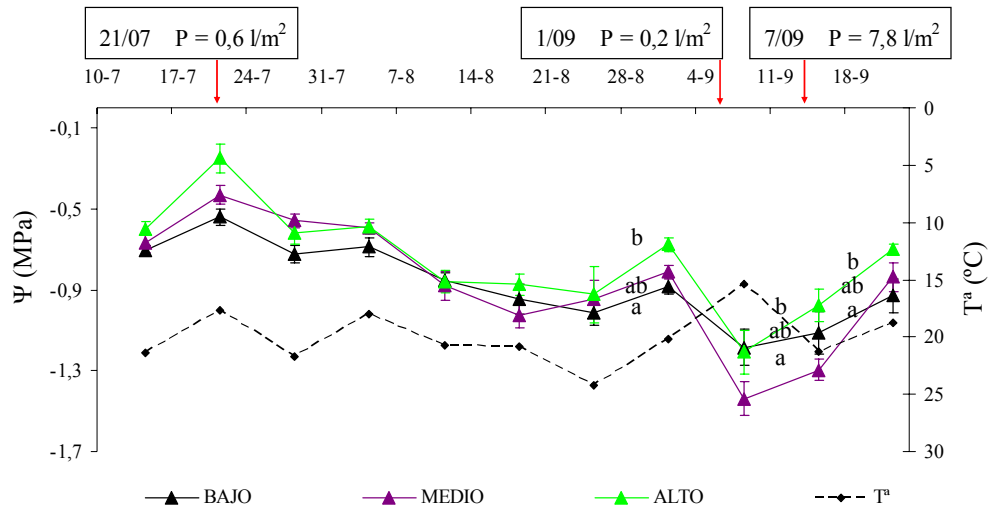


Las letras representan los distintos grupos obtenidos de acuerdo al test de Tukey. La falta de letra demuestra la pertenencia al mismo grupo.

En la Figura 18 se representa la evolución del potencial hídrico a las 9:00 hs observado de media en los PSHs correspondientes con cada clase de NDVI en la parcela 096; mientras que en la Figura 19 se representa dicha evolución para cada uno de los dos PSHs incluidos en cada una de las clases. De manera similar, en las Figuras 20 y 21 se muestra esta misma evolución para las medidas de potencial hídrico realizadas a las 12:00 hs

Al igual que en la parcela 084, las diferencias observadas entre puntos ubicados en una misma zona de NDVI eran frecuentemente mayores que las observadas de media entre puntos ubicados en zonas con distinto NDVI.

Figura 18: Evolución del potencial hídrico de 3 clases de NDVI en la parcela 096 a las 9:00 hs.



Las letras representan los distintos grupos obtenidos de acuerdo al test de Tukey. La falta de letra demuestra la pertenencia al mismo grupo.

Figura 19: Evolución del potencial hídrico de los puntos de NDVI bajo (a), medio (b) y alto (c) en la parcela 096 a las 9:00 hs.

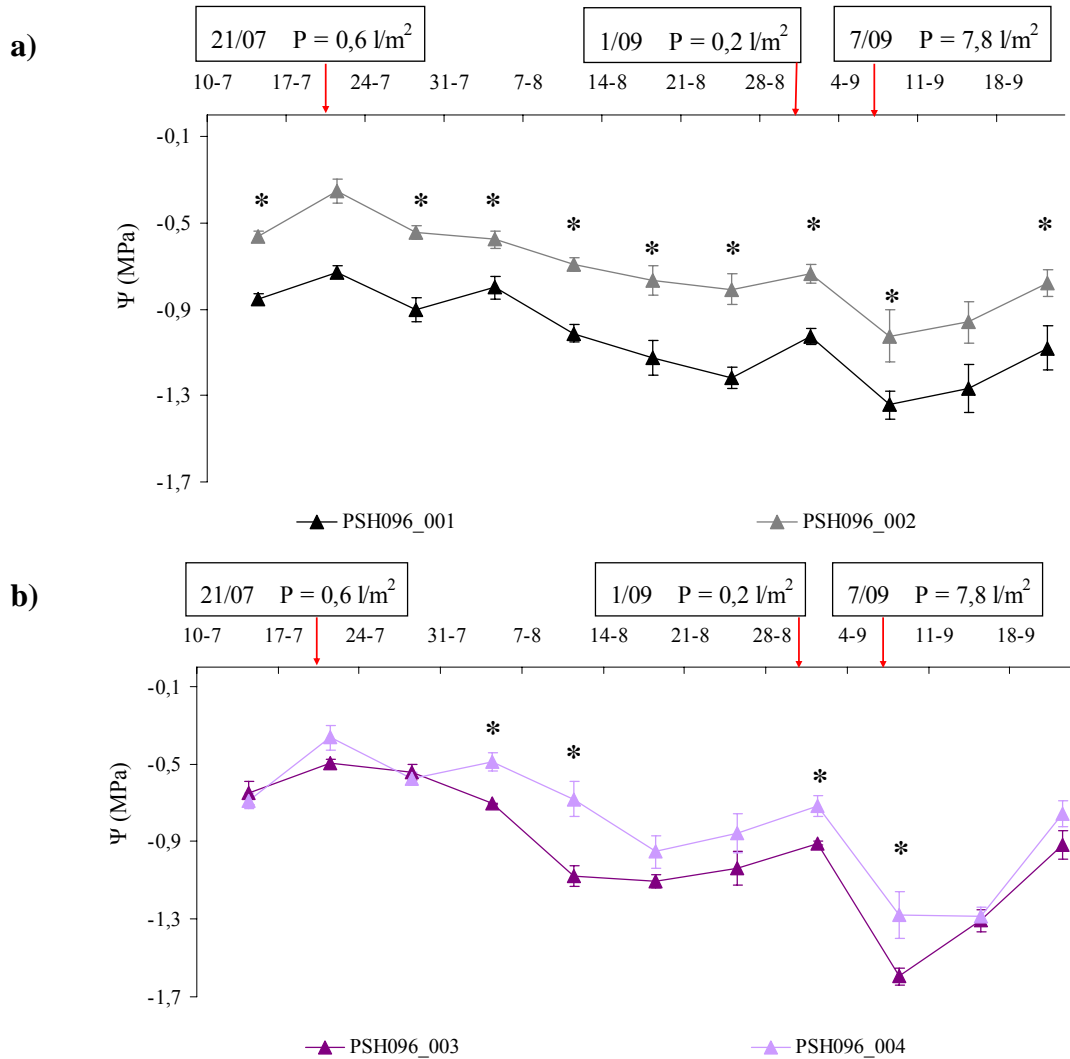
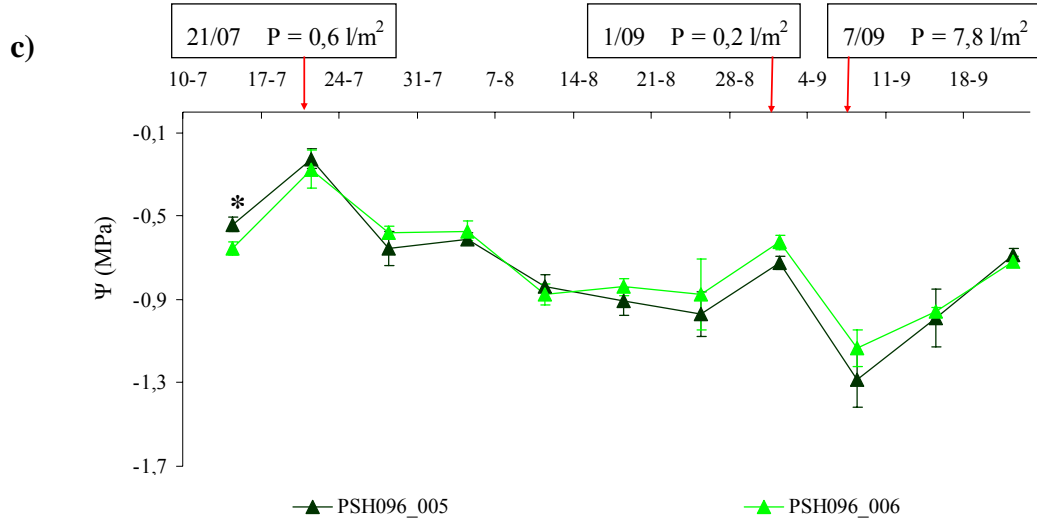
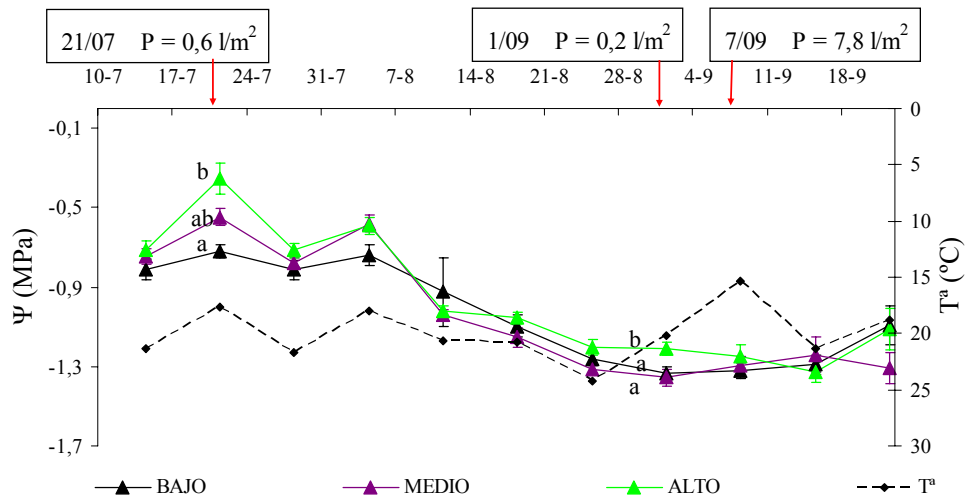


Figura 19: Continuación



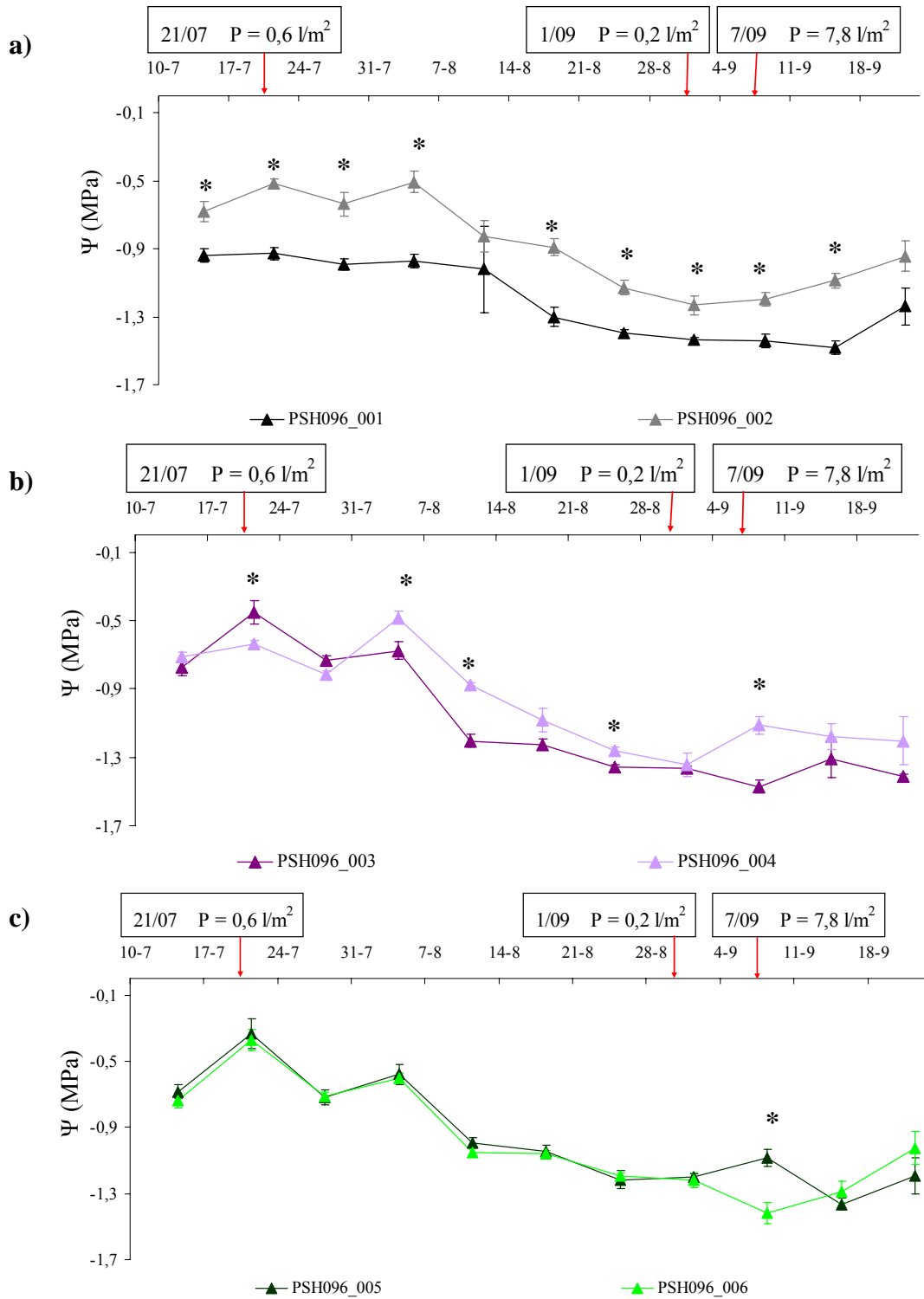
El asterisco representa los grupos diferentes significativamente según el análisis del ANOVA.

Figura 20: Evolución del potencial hídrico de 3 clases de NDVI en la parcela 096 a las 12:00 hs.



Las letras representan los distintos grupos obtenidos de acuerdo al test de Tukey. La falta de letra demuestra la pertenencia al mismo grupo.

Figura 21: Evolución del potencial hídrico de los puntos de NDVI bajo (a), medio (b) y alto (c) en la parcela 096 a las 12:00 hs.

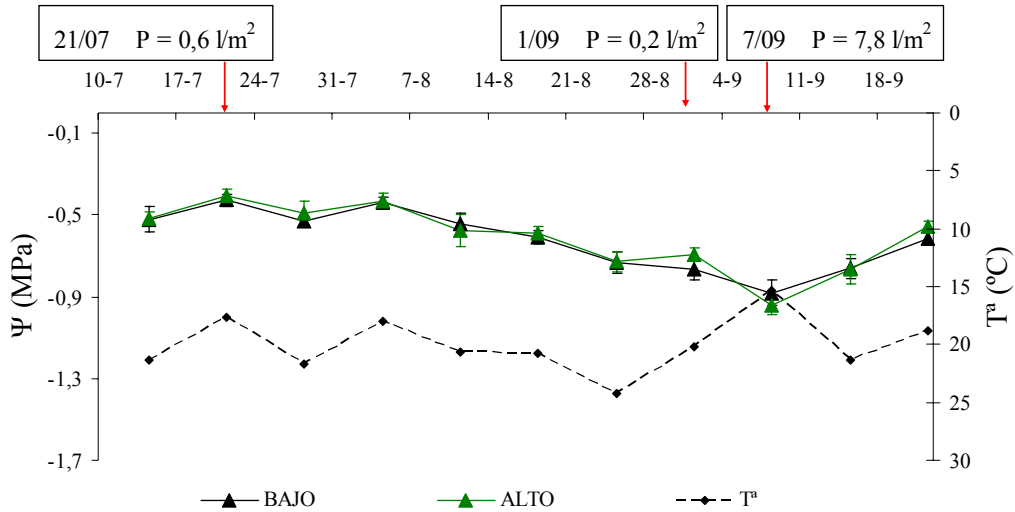


El asterisco representa los grupos diferentes significativamente según el análisis del ANOVA.

Por último, cuando se compara la evolución del potencial hídrico en la parcela 114 (Figuras 22-25), en la que se agruparon los PSHs en dos clases de vigor dada la alta uniformidad de la parcela, se comprueba que no había apenas diferencias de estado

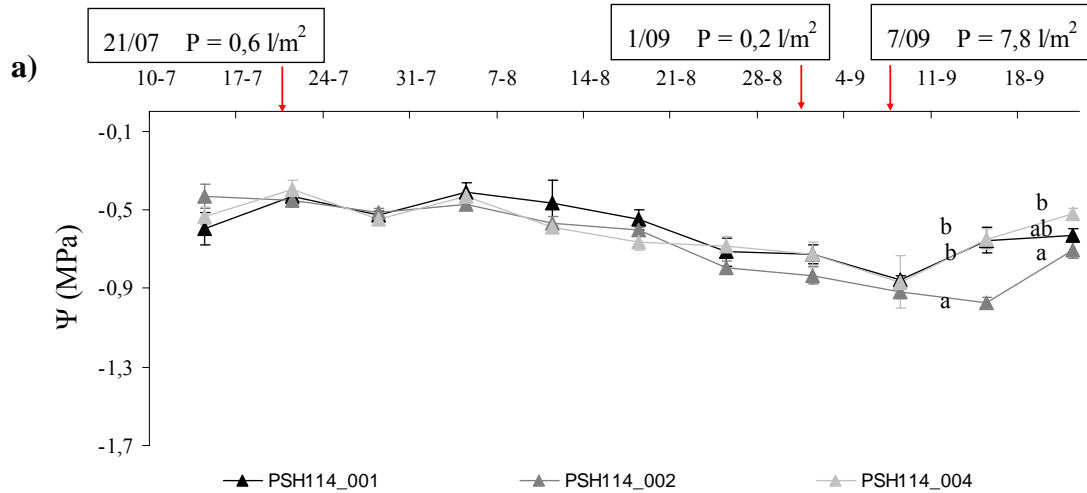
hídrico. La variabilidad de esta parcela en cuanto a su valor de NDVI es muy pequeña por lo que su comportamiento como se esperaba es parecido entre clases de NDVI.

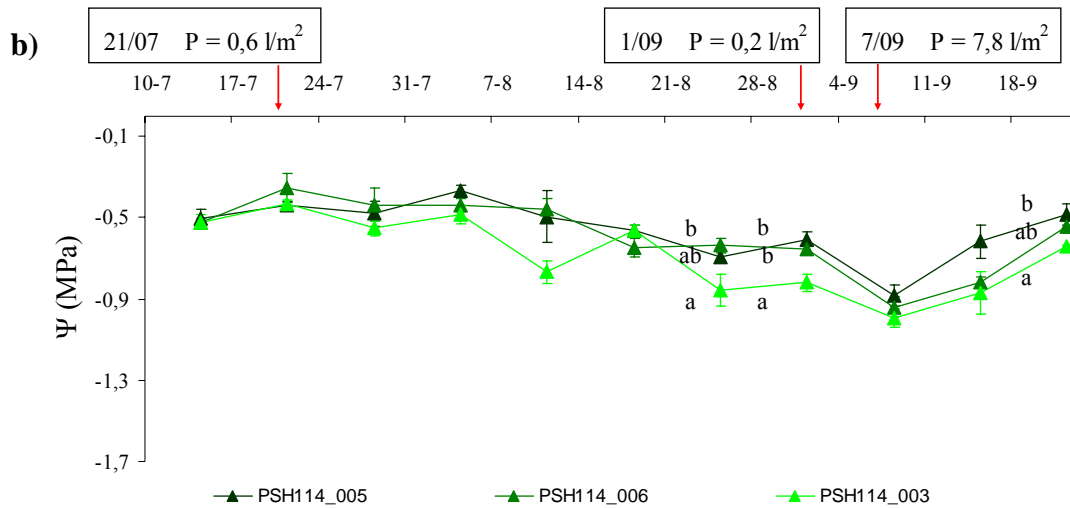
Figura 22: Evolución del potencial hídrico de 2 clases de NDVI en la parcela 114 a las 9:00 hs.



La falta del asterisco representa la igualdad de los grupos según el análisis del ANOVA.

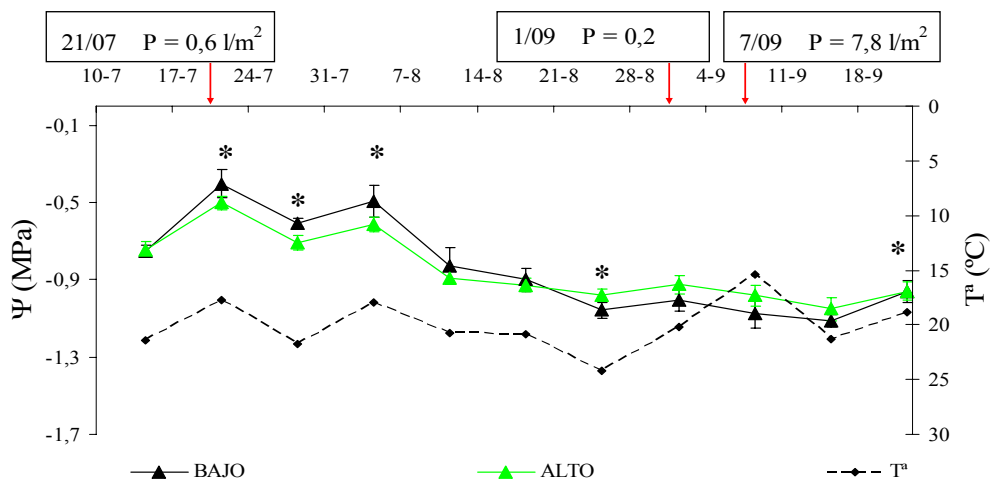
Figura 23: Evolución del potencial hídrico de los puntos de NDVI bajo (a) y alto (b) en la parcela 114 a las 9:00 hs.





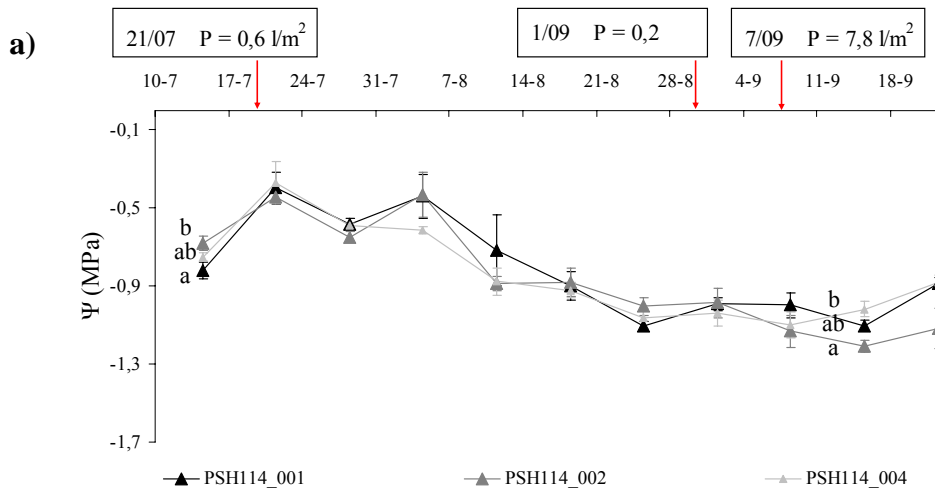
Las letras representan los distintos grupos obtenidos de acuerdo al test de Tukey. La falta de letra demuestra la pertenencia al mismo grupo.

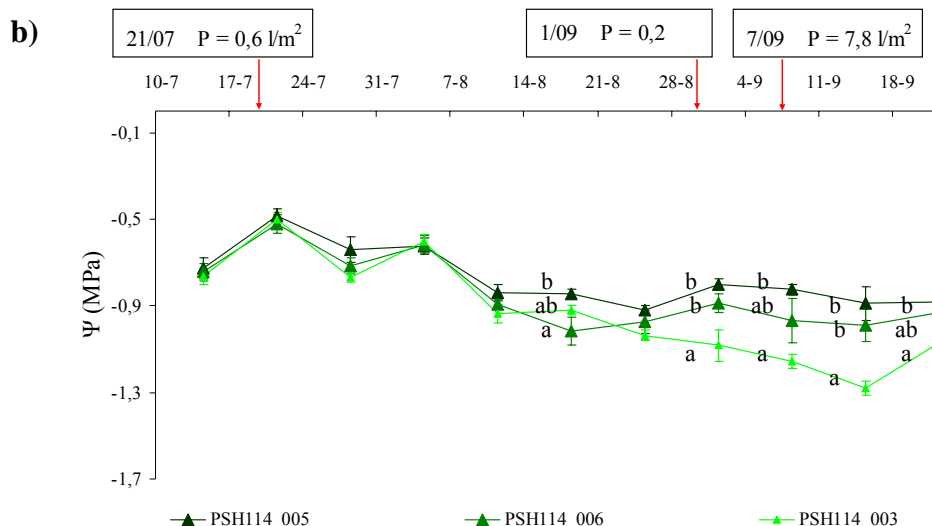
Figura 24: Evolución del potencial hídrico de 2 clases de NDVI en la parcela 114 a las 12:00 hs.



El asterisco representa los grupos diferentes significativamente según el análisis del ANOVA.

Figura 25: Evolución del potencial hídrico de los puntos de NDVI bajo (a) y alto (b) en la parcela 114 a las 12:00 hs.





Las letras representan los distintos grupos obtenidos de acuerdo al test de Tukey. La falta de letra demuestra la pertenencia al mismo grupo.

En su conjunto, los resultados presentados en este apartado ponen de manifiesto la limitada utilidad del NDVI para diferenciar zonas del viñedo con diferente comportamiento hídrico. Así, en las dos parcelas menos vigorosas (P084 y P096) las diferencias entre puntos de una misma zona fueron mayores que las encontradas, de media, entre zonas con distinto NDVI; mientras que en la parcela con más vigor (P114) no se apreciaron diferencias entre zonas de la finca.

El hecho de que el NDVI no haya servido para diferenciar Unidades de Manejo del viñedo en estas condiciones, contrasta con lo referido en ACEVEDO-OPAZO et al. (2008) y TISSEYRE et al. (2005), que encontraron que las zonas con niveles más bajos de NDVI eran las que presentaban un mayor estrés hídrico a lo largo del verano.

Esta falta de coincidencia puede atribuirse a que la zona objeto de estudio es una zona de clima continental mediterráneo, en la que sin necesidad de utilizar riego, las cepas se mantienen en niveles de estrés que no van más allá de moderados (VAN LEEUWEN, 2009), por lo que podría ocurrir que los factores edáficos o de la planta que condicionan el crecimiento en primavera (lo que se traduce en valores distintos de NDVI) no sean los mismos que los que determinan el estado hídrico durante el verano. Así, por ejemplo, podría ocurrir que zonas con un vigor elevado (y por tanto un NDVI alto) el consumo de agua fuera mayor que el que ocurre en otras zonas como consecuencia de su mayor superficie foliar y de la mayor carga, lo que podría resultar en niveles de estrés más negativos. Esto es más probable en el caso de las variedades que, como Tempranillo, tienen una tendencia a comportarse como anisohídricas (SANTESTEBAN, 2009), con un elevado gasto de agua en condiciones favorables.

Por otro lado, hay que tener en cuenta que las imágenes se adquirieron en el año 2009 mientras que las medidas de potencial se han realizado en el año 2010 y, aunque algunos autores han descrito que las zonas definidas a partir del NDVI son estables (ACEVEDO-OPAZO, 2010), no tendría por qué ser así en todos los casos.

IV.3.- Evaluación del interés del NDVI para la diferenciación de Unidades de Manejo del Viñedo (Ensayo 2)

IV.3.1.-Crecimiento vegetativo

En la tabla 2 se recogen los resultados de la comparación del crecimiento vegetativo, estimado como suma de sección de pámpanos, entre las clases de NDVI.

Tabla 2: Análisis comparativo del crecimiento vegetativo según la suma de sección de pámpanos en cada clase de NDVI.

Clase de NDVI	P084	P096	P114
NDVI bajo	457.37 (b)	716.66	753.75
NDVI medio	509.35 (b)	787.58	
NDVI alto	615.84 (a)	807.76	785.71
Sign.	<0.001	0.627	0.408

Valores en una misma columna seguidos de letras distintas se corresponden con grupos distintos de acuerdo al test de Tukey

Se comprueba que en la parcela 084 existen diferencias significativas entre clases de NDVI establecidas para este parámetro de crecimiento. Las parcelas 096 y 114 no muestran diferencias significativas en cuanto a la media de la suma de sección de pámpanos si bien se observa la misma tendencia a encontrar los valores más altos de suma de sección de pámpanos en las clases con NDVI más alto.

El hecho de que no se haya observado una correspondencia muy estrecha entre la clase de NDVI y la suma de sección de pámpanos puede ser debido a la existencia de una alta variabilidad dentro de cada clase. Además, hay que tener en cuenta que el establecimiento de las clases de NDVI se ha basado en el mapa obtenido a partir de imágenes aéreas del 2009 y que, a pesar de que algunos autores lo definen como poco variable entre años (ACEVEDO-OPAZO et al. 2008) , pueden presentar diferencias con respecto a la evolución del crecimiento vegetativo de este año.

IV.3.2.-Carga

En la tabla 3 se muestra la relación de la carga, indicada como número de racimos, con las clases de NDVI establecidas mediante análisis de la varianza.

Tabla 3: Análisis comparativo de la carga según la media del número de racimos en cada clase de NDVI.

Clase de NDVI	P084	P096	P114
NDVI bajo	10.09 (c)	11.61 (b)	11.42
NDVI medio	11.37 (b)	14.55 (a)	
NDVI alto	12.78 (a)	15.50 (a)	11.61
Sign.	<0.001	0.001	0.725

Valores en una misma columna seguidos de letras distintas se corresponden con grupos distintos de acuerdo al test de Tukey

Se observaron diferencias significativas en las parcelas 096 y 084. En la parcela 096 permite la diferenciación de la zona de NDVI bajo.

En la parcela 114 no se observaron diferencias significativas en cuanto a la carga lo que evidencia la uniformidad demostrada ya, tanto en el Ensayo 1 como en las medidas realizadas del crecimiento vegetativo.

IV.3.3.- Número de hojas secas

En la tabla 4 se presenta los resultados obtenidos del ANOVA para el número de hojas secas.

Tabla 4: Análisis comparativo del número de hojas secas en cada clase de NDVI.

Clase de NDVI	P084	P096	P114
NDVI bajo	0.55	1.17	0.45
NDVI medio	0.64	1.17	
NDVI alto	0.54	1.22	0.56
Sign.	0.326	0.978	0.124

Las clases de NDVI establecidas no permiten la diferenciación de zonas según su nivel de hojas secas. Este parámetro podría ser indicador de la velocidad de agostamiento, estado nutricional, etc., si bien en la variedad Tempranillo, está frecuentemente asociado a la presencia de estrés hídrico.

Estos resultados corroboran los descritos en el Ensayo 1 en el cual se ha puesto en evidencia que el NDVI no permite, en las condiciones ensayadas, establecer diferencias en relación con el comportamiento hídrico de las distintas zonas de una parcela.

IV.3.4.- Características espectrales de la hoja

En las tablas 5 y 6 se pueden observar los resultados de la comparación de los niveles de clorofila y flavonoles, así como el índice NBI, encontrados en las distintas clases de NDVI de las parcelas 084 y 096.

Como se observa en la tabla 5 la parcela 084 ha mostrado una diferencia de cada uno de los componentes en función del NDVI., siendo diferenciadas las zonas de NDVI bajo y alto.

Tabla 5: Análisis comparativo del contenido en clorofila y flavonoles según la clase de NDVI en la parcela 084.

Clase de NDVI	Chl	Flav	NBI
NDVI bajo	19,47 (b)	2,92 (a)	6,743 (b)
NDVI medio	20,54 (ab)	2,87 (ab)	7,236 (ab)
NDVI alto	21,23 (a)	2,79 (b)	7,733 (a)
Sign.	0,031	0,003	0,002

Chl: Clorofila Flav: Flavonoles NBI: Chl/Flav Unidades Dualex

Valores en una misma columna seguidos de letras distintas se corresponden con grupos distintos de acuerdo al test de Tukey

En la parcela 096 se muestran también unas diferencias significativas entre clases. De la misma forma que en el caso de la parcela 084, se permite la diferenciación de zonas, en este caso de NDVI alto en el caso de los valores de clorofila, bajo para los flavonoles y el bajo y medio para el caso del parámetro NBI.

Tabla 6: Análisis comparativo del contenido en clorofila y flavonoles según la clase de NDVI en la parcela 096.

Clase de NDVI	Chl	Flav	NBI
NDVI bajo	21,85 (ab)	2,58 (a)	8,545 (b)
NDVI medio	23,92 (a)	2,45 (b)	9,856 (a)
NDVI alto	21,64 (b)	2,38 (b)	9,104 (ab)
Sign.	0,027	0,004	0,010

Chl: Clorofila Flav: Flavonoles NBI: Chl/Flav

Valores en una misma columna seguidos de letras distintas se corresponden con grupos distintos de acuerdo al test de Tukey

En ambas parcelas se demuestra la utilidad y fiabilidad del empleo del NDVI como parámetro para la zonificación de la parcela en función de las características espectrales de las hojas. Estas características espectrales están fuertemente relacionadas con el estado nutricional del viñedo condicionando la reflectividad de las hojas y con ello su valor de NDVI. El estado nutricional del viñedo se plantea como un limitante mayor que la disponibilidad de agua en la zona de estudio.

V.- Conclusiones

Los resultados obtenidos en este Trabajo Fin de Carrera han permitido extraer las siguientes conclusiones:

- El NDVI no permite, en las condiciones de estudio (clima continental mediterráneo y niveles de estrés moderado), delimitar zonas del viñedo con un comportamiento hídrico diferente.
- El NDVI ha permitido diferenciar zonas del viñedo en lo relativo a su crecimiento vegetativo, carga y características espectrales de la hoja. Por ello, este parámetro podría contribuir a racionalizar las prácticas de cultivo (abonado, aclareo de racimos, deshojado, etc.), ajustando la intensidad de las mismas a las necesidades de cada zona del viñedo
- Es necesario valorar en futuros trabajos qué otros factores condicionan el estado hídrico del viñedo en las condiciones de la zona estudiada, para establecer métodos que combinando los valores de NDVI con otras medidas realizadas in situ, permitan establecer zonas de comportamiento hídrico similar dentro de cada parcela.
- Así mismo, es necesario comprobar la estabilidad de las clases establecidas con el NDVI a lo largo de los años.

VI.- Bibliografía

- ACEVEDO-OPAZO, C. TISSEYRE, B. TAYLOR, J. A. OJEDA, H. (2010) A model for the spatial prediction of water status in vines (*Vitis vinifera* L.) *Precision Agric.* 11, 358-378
- ACEVEDO-OPAZO, C. TISSEYRE, B. GUILLAUME, S. OJEDA, H. (2008) The potencial of high spatial resolution information to define within-vineyard zones related to vine water status *Precision Agriculture* 9 285-302
- ARKUN, S. HONEY, F. JOHNSON, L. LAMB, D. LIEFF, W. MORGAN, G. (2000) Airborne remote sensing of the vine canopy. *Vineyard monitoring and management beyond 2000- Wagga-Wagga*, 7-8-00.
- ARNÓ, J. MARTINEZ-CASASNOVAS, J. A. RIBES-DASI, M. ROSELL, J. R. (2009) Review. Precision Viticulture. Research topics, challenges and opportunities in site-specific vineyard management. *Spanish Journal of Agricultural Research* 7, 779-790.
- ARNÓ, J. (2008) *Variabilidad intraparcelsaria en viña y el uso de sensores láser en viticultura de precisión*. Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agraria, Universidad de Lleida. p.262
- ARNÓ, J. MARTINEZ-CASASNOVAS, J.A. BLANCO, R. BORDES, X. ESTEVE, J. (2005) Viticultura de precisión en Raimat (Lleida): experiencias durante el periodo 2002-2004. *ACE-Revista de Enología* nº 64
- BALLESTA, A. ARÁN, M. VILLAR, P. (2000) Influencia de la variabilidad del suelo en la agricultura de precisión. *Vida rural*. Nº 109, pg. 30-35
- BASSO, B. SARTORI, L. BERTOCCO, M. (2006) Manual de Agricultura de Precisión. *Ed Eumedia y Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación*. Madrid.
- BATTISTELLA, M. SILVA, S. M. ALDAY, S. LIOTTA, M. (2007) Utilización de fotografías aéreas multiespectrales en viticultura de precisión *Teledetección* 421-426
- BEST, S. LEÓN, L. (2007) Uso de herramientas de viticultura de precisión para optimizar la cosecha de uvas de mejor calidad. *Serie Actas INIA Seminario Internacional. Manejo de riego y suelo en vides para vino y mesa* nº 39, pg. 159-165.
- BEST, S. LEÓN, L. CLARET, M. (2006) Capítulo II: Elementos de vitivinicultura de precisión (VP) *Boletín Instituto de Investigaciones Agropecuarias de Chile*, 136, 90 p.

- BEST, S. LEÓN, L. CLARET, M. (2006) Capítulo III: Implementación de esquema de vitivinicultura de precisión (VP) *Boletín Instituto de Investigaciones Agropecuarias de Chile*, 136, 90 p.
- BRAMLEY, R. G. V. LAMB, D. (2003) Making sense of vineyard variability in Australia. *IX Congreso Latinoamericano de Viticultura y Enología, Chile*. Pp 35-54.
- BRAMLEY, R. WILLIAMS, S. (2001) A protocol for the construction of yield maps from data collected using commercially available grape yield monitors. *Cooperative Research Centre for Viticulture*
- BRAMLEY, R. G. V. (2000) Measuring within vineyard variability in yield and quality attributes. *Vineyard monitoring and management beyond 2000- Wagga-Wagga*, 7-8-00.
- CASTERAD, M. A. LÓPEZ-LOZANO, R. (2007) Seguimiento de viñas en espaldera mediante índices de vegetación y mapas de índice de área foliar derivados de imágenes de satélite de muy alta resolución espacial. *Revista Enología* 4, pg. 1-9
- CEROVIC, Z. G. GOUTOULY, J. HILBERT, G. DESTAC-IRVINE, A. MARTINON, V. MOISE, N. (2009) Mapping winegrape quality using portable fluorescence-based sensors. *In FRUTIC 09. Concepcion, Chile. (Ed. S Best) (Progap INIA, Chillian, Chile)* ,301-310
- CHUVIECO, E. (2002) *Teledetección ambiental: La observación de la Tierra desde el Espacio*. Ed. Ariel Ciencia. Barcelona
- FAILLA, O. MARIANI, L. BRANCADORO, L. MINELLI, R. SCIENZA, A. MURADA, G. MANCINI, S. (2004) Spatial distribution of solar radiation and its effects on vine phenology and grape ripening in an alpine environment. *Am. J. Enol. Vitic.* 55:2 pp. 128-138.
- FLORES, L. A. BEST, S. (2003) Medición De propiedades del suelo utilizando un sensor de conductividad eléctrica. *Informativo Instituto de Investigaciones Agropecuarias Centro Regional de Investigación Raihuén, Chile*
- GALLEINA, M. REQUENA, A. (2007) Cómo medir el estado hídrico de una planta de vid. *Fruticultura y diversificación* 51, 36-41
- GANDIA, S. MELIÁ, J. (1991) *La teledetección en el seguimiento de los fenómenos naturales. Recursos renovables: Agricultura*. Unidad de Investigación de Teledetección. Departamento de Termodinámica. Universidad de Valencia.

- GAO, B. (1996) NDWI- A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote sens. Environ.* 38: 257 – 266
- GOVENDER, M. DYE, P. J. WELERSBYE, I. M. WITKOWSKI, E. T. F. AHMED, F. (2009) Review of commonly used remote sensing and ground-based technologies to measure plant water stress *Water SA* 5, pg 741-752
- HALL, A. LAMB, D. W. HOLZAPFEL , B. LOUIS, J. (2002) Optical remote sensing applications in viticulture- a review resolution *Australian journal of grape and wine research* 8, 36-47
- HIDALGO, L. (2002) *Tratado de viticultura general*. Ed. Mundi-Prensa. Madrid.
- JOHNSON, L. F. ROCZEN, D. E. YOUKHANA, S. K. NEMANI, R. R. BOSCH, D. F. (2003) Mapping vineyard leaf area with multispectral satellite imagery *Computers and Electronics in Agriculture* 38, 33-44
- LAMB, D. W. WEEDON, M. M. BRAMLEY, R. G. V. (2004) Using remote sensing to predict grape phenolics and colour at harvest in a Cabernet Sauvignon vineyard: Timing observations against vine phenology and optimising image resolution *Australian journal of grape and wine research* 10, 46-54
- MARTINEZ-CASASNOVAS, J. A. AGELET, J. ARNÓ, J. BORDES, X. RAMOS, M. C. (2010) Protocolo para la zonificación intraparcelsaria de la viña para vendimia selectiva a partir de imágenes multiespectrales. *Revista de Teledetección* 33, 47-52
- MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J. A. RAMOS, M. C. VALLÉS, D. (2009) Análisis de la relación entre las propiedades del suelo, el índice de vigor del cultivo y el rendimiento en un viñedo de la D. O. Costers del Segre (Lleida). *Teledetección: Agua y desarrollo sostenible. XIII Congreso de la Asociación Española de Teledetección* pp. 37- 40
- MARTINEZ-CASASNOVAS, J. A. BORDES, X. (2005) Viticultura de precisión: Predicción de cosecha a partir de variables del cultivo e índices de vegetación *Revista de Teledetección* 24, 67-71
- MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE, MEDIO RURAL Y MARINO. *Informe VCPRD 2008-2009*.
- MORARI, F. CASTRIGNANÓ, A. PAGLIARIN, C. (2009) Application of multivariate geostatistics in delineating management zones within a gravelly vineyard using geo – electrical sensors. *Computers and Electronics in Agriculture*, 60 pg. 97- 107

- OJEDA, H. ANDARY, C. KRAEVA, E. (2002) Influence of pre and postveraison water deficit on synthesis and concentration of skin phenolic compounds during berry growth of *Vitis vinifera* cv. Shiraz. *Am. J. Enol. Vitic.* 53:4, pg. 261-267
- ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DE LA VIÑA Y EL VINO (2006) *Situación y estadísticas del sector vitivinícola mundial.*
- PROFFIT, T. MALCOM, A. (2005) Zonal vineyard management through airborne remote sensing. *The Australian and New Zealand Grape grower and Winemaker* 502, Pp. 22 – 27
- REYNIER, A. (2002) *Manual de Viticultura. Guía técnica de Viticultura.* Ed. Mundi-Prensa. Madrid.
- RIBÉREAU-GAYON, J. PEYNAUD, E. (1982) *Ciencias y Técnicas de la viña: Tomo I: Biología de la viña. Suelos de viñedos.* Editorial Hemisferio sur.
- RODRIGUEZ-PÉREZ, J. R. RIAÑO, D. CARLISLE, E. USTIN, S. SAMRT, D. R. (2007) Evaluation of hyperspectral reflectance indexes to detect grapevine water status in vineyards. *Am. J. Enol. Vitic.* 58; 3
- ROYO, B. SANTESTEBAN, L. G. (2007) *Apuntes de Viticultura.* Departamento de Producción Agraria, UPNA.
- SANTESTEBAN, L. G. MIRANDA, C. JIMENEZ, C. FUENTEMILLA, M. URRETAVIZCAYA, I. TISSEYRE, B. GUILLAUME, S. ROYO, J. B. (2010) Evaluación del interés del índice NDVI para la delimitación de unidades de manejo diferenciado en una explotación vitícola *Revista de Teledetección* 33, 11-16
- SANTESTEBAN, L. G. MIRANDA, C. ROYO, J. B. (2009) Effect of water deficit and rewatering on leaf gas Exchange and transpiration decline of excised leaves of four grapevine (*Vitis vinifera* L.) cultivars. *Scientia Horticulturae* 121, pgs. 434 – 439.
- SCHULTZ, H. R. MATTHEWS, M. A. (1988) Vegetative growth distribution during water deficits in *Vitis vinifera* L. *Aust. J. Plant Physiol.* 15, 641-56
- STAMATIADIS, S. TASKOS, D. TSADILAS, C. CHRISTOFIDES, C. TSADILA, E. SCHEPERS, J. S. (2006) Relation of ground-sensor canopy reflectance to biomass production and grape colour in two Merlot vineyards. *Am. J. Enol.* 57: 4, pp 415-422.
- TARDÁGUILA, J. BARRAGÁN, F. YANGUAS, R. DIAGO, M. P. (2008) Estimación de la variabilidad del vigor del viñedo a través de un sensor óptico

lateral terrestre. Aplicación en la viticultura de precisión. *VI Foro Mundial del Vino, Logroño*.

- TAYLOR, J. A. ACEVEDO-OPAZO, C. OJEDA, H. TISSEYRE, B. (2010) Identification and significance of resources of spatial variation in grapevine water status *Australian Journal of Grape and Wine Research* 16, 218-226
- TREMBLAY, N. WANG, Z. VÉLEC, C. (2010) Performance of Dualex in spring wheat for crop nitrogen status assessment, yield prediction and estimation of soil nitrate content. *Journal of Plant Nutrition*, 33; 57-70.
- TREMBLAY, N. BÉLEC, C. JENNI, S. FORTIER, É. MELLGRE, R. (2009) The Dualex-a new tool to determine nitrogen sufficiency in broccoli. *Acta Hort.* (ISHS) 824:121-132 http://www.actahort.org/books/824/824_13.htm
- TREMBLAY, N. WANG, Z. BÉLEC, Q. (2007) Evaluation of the Dualex for the assessment of corn nitrogen status. *Journal of Plan Nutrition*, 30; 1355-1369.
- TYSSEYRE, B. OJEDA, H. CARILLO, N. DEIS, L. HEYWANG, M. (2005) Precision viticulture and water status: Mapping the predawn water potential to define within vineyard zones. *Information and Technology for Sustainable Fruit and Vegetables Production Frutic 05*, 12-16 September, Montpellier France.
- VAN LEEUWEN, C. TREGOAT, O. CHONÉ, X. BOIS, B. PERNET, D. GAUDILLÈRE, J. P. (2009) Vine water status is a key factor in grape ripening and vintage quality for red Bordeaux wine. How can it be assessed for vineyard management purposes? *J. Int. Sci. Vigne Vin*, 43. n° 3, pgs. 121 – 134.
- VILLA, P. (2006) *Cultivar la vid*. E. De Vecchi. Barcelona
- VITHARANA, U. VAN MEIRVENNE, M. SIMPSON, D. COCKX, L. DE BAERDEMAEKER, J. (2007) Key soil and topographic properties to delineate potencial Management classes for precision agriculture in the European loess area. *Geoderma* 143, pp. 206-215.
- ZARCO-TEJADA, P. J. BERJÓN, A. LÓPEZ-LOZANO, R. MILLER, J. R. MARTÍN, P. CACHORRO, V. GONZÁLEZ, M. R. DE FRUTOS, A. (2005) Assessing vineyard condition with hyperspectral indices: Leaf and canopy reflectance simulation in a row-structured discontinuous canopy. *Remote Sensing of Enviroment* 99, 271-287.

VII.- Anexos

VII.1.- Anexo 1: Índices vegetativos

Table 1 Vegetation indexes (VI) at specific reflectance wavelengths (R_i) tested in this study.

Index (abbreviation)	Equation	Reference
Greenness (GI)	$GI = \frac{R_{554}}{R_{677}}$	Zarco-Tejada et al. 2005a, 2005b
Zarco-Tejada and Miller (ZTM)	$ZM = \frac{R_{750}}{R_{710}}$	Zarco-Tejada et al. 2001, 2005a
Red/Green (RGI)	$RGI = \frac{R_{695}}{R_{554}}$	after Fuentes et al. 2001, Gamon and Surfus 1999
Red/Green (RGI1)	$RGI1 = \frac{R_{690}}{R_{550}}$	Zarco-Tejada et al. 2005a,b
Blue/Green (BGI)	$BGI = \frac{R_{400}}{R_{550}}$	after Zarco-Tejada et al. 2005a,b
Blue/Green (BGI1)	$BGI1 = \frac{R_{420}}{R_{554}}$	after Zarco-Tejada et al. 2005a,b
Blue/Green (BGI2)	$BGI2 = \frac{R_{400}}{R_{550}}$	Zarco-Tejada et al. 2005a,b
Blue/Red (BRI)	$BRI = \frac{R_{400}}{R_{690}}$	Zarco-Tejada et al. 2005a,b
Blue/Red (BRI1)	$BRI1 = \frac{R_{450}}{R_{690}}$	Zarco-Tejada et al. 2005a,b
Blue/Red (BRI2)	$BRI2 = \frac{R_{440}}{R_{690}}$	This study
Green/Red Ratio (GRR)	$GRR = \frac{R_{554}}{R_{673}}$	Fuentes et al. 2001
Normalized Green/Red Ratio (NGRR)	$NGRR = \frac{R_{673} - R_{554}}{R_{673} + R_{554}}$	This study
Normalized Green/Red Ratio (NGRR1)	$NGRR_1 = \frac{R_{673} + R_{554}}{R_{673} - R_{554}}$	This study
Simple Ratio (SR1)	$SR = \frac{R_{695}}{R_{645}}$	after Broge and Mortensen 2002
Simple Ratio (SR1)	$SR1 = \frac{R_{695}}{R_{760}}$	This study
Simple Ratio (SR2)	$SR2 = \frac{R_{1070}}{R_{1340}}$	This study
Simple Ratio (SR3)	$SR3 = \frac{R_{678}}{R_{880}}$	This study
Simple Ratio (SR4)	$SR4 = \frac{R_{678}}{R_{1070}}$	This study
Red/Blue (RBI)	$RBI = \frac{R_{695}}{R_{445}}$	This study
Difference Vegetation (DVI)	$DVI = R_{680} - R_{673}$	after Broge and Mortensen 2002
Moisture Stress (MSI)	$MSI = \frac{R_{1650}}{R_{835}}$	after Hunt and Rock 1989
Moisture Stress (MSI1)	$MSI1 = \frac{R_{170}}{R_{1350}}$	This study
Normalized Difference VI (NDVI)	$NDVI = \frac{R_{645} - R_{685}}{R_{645} + R_{685}}$	after Rouse et al. 1974
Normalized Difference VI (NDVI1)	$NDVI1 = \frac{R_{885} - R_{673}}{R_{885} + R_{673}}$	Zhao et al. 2005
Normalized Difference VI (NDVI2)	$NDVI2 = \frac{R_{858.5} - R_{645}}{R_{858.5} + R_{645}}$	This study

Index (abbreviation)	Equation	Reference
Normalized Difference VI (NDVI3)	$\text{NDVI3} = \frac{R_{870} - R_{673}}{R_{870} + R_{673}}$	This study
Normalized Difference Vegetation (NDVI4)	$\text{NDVI4} = \frac{R_{884} - R_{680}}{R_{884} + R_{680}}$	This study
Modified NDVI (mNDVI)	$\text{mNDVI} = \frac{R_{750} - R_{705}}{R_{750} + R_{705}}$	Fuentes et al. 2001, Gitelson et al. 1996
Photochemical Reflectance (PRI)	$\text{PRI} = \frac{R_{531} - R_{570}}{R_{531} + R_{570}}$	Fuentes et al. 2001, Gamon and Surfus 1999
Photochemical Reflectance (PRI1)	$\text{PRI1} = \frac{R_{528} - R_{567}}{R_{528} + R_{567}}$	after Gamon et al. 1992
Photochemical Reflectance (PRI2)	$\text{PRI2} = \frac{R_{531} - R_{570}}{R_{531} + R_{570}}$	after Gamon et al. 1992, Peñuelas et al. 1997b
Photochemical Reflectance (PRI3)	$\text{PRI3} = \frac{R_{570} - R_{539}}{R_{570} + R_{539}}$	after Gamon et al. 1992
Normalized Pigments Chlorophyll Ratio (NPCl)	$\text{NPCl} = \frac{R_{680} - R_{430}}{R_{680} + R_{430}}$	Peñuelas et al. 1994
Simple Ratio Pigment (SRPI)	$\text{SRPI} = \frac{R_{680}}{R_{880}}$	Peñuelas et al. 1995a
Normalized Phaeophytinization (NPQI)	$\text{NPQI} = \frac{R_{415} - R_{435}}{R_{415} + R_{435}}$	Barnes 1992; Peñuelas et al. 1995a
Structure Intensive Pigment (SIPI)	$\text{SIPI} = \frac{R_{800} - R_{680}}{R_{800} + R_{680}}$	after Peñuelas et al. 1995b, Zarco-Tejada et al. 2005a
Structure Intensive Pigment (SIPI1)	$\text{SIPI1} = \frac{R_{800} - R_{650}}{R_{800} + R_{650}}$	after Peñuelas et al. 1995b, Zarco-Tejada et al. 2005a
Normalized Difference Nitrogen (NDNI)	$\text{NDNI} = \frac{\log(1/R_{510}) - \log(1/R_{680})}{\log(1/R_{510}) + \log(1/R_{680})}$	Serrano et al. 2002
Normalized Difference Lignin (NDLI)	$\text{NDLI} = \frac{\log(1/R_{754}) - \log(1/R_{680})}{\log(1/R_{754}) + \log(1/R_{680})}$	Serrano et al. 2002
Cellulose Absorption (CAI)	$\text{CAI} = 0.5 * (R_{2000} + R_{2200}) - R_{2100}$	Nagler et al. 2000
Normalized Difference Water (NDWI)	$\text{NDWI} = \frac{R_{860} - R_{1240}}{R_{860} + R_{1240}}$	Gao 1996, Zarco-Tejada et al. 200
Normalized Difference Water (NDWI1)	$\text{NDWI1} = \frac{R_{858.5} - R_{1240}}{R_{858.5} + R_{1240}}$	Gao 1996
Normalized Difference Water (NDWI2)	$\text{NDWI2} = \frac{R_{870} - R_{1260}}{R_{870} + R_{1260}}$	This study
Water Band (WBI)	$\text{WBI} = \frac{R_{970}}{R_{900}}$	Peñuelas et al. 1993
Water (WI)	$\text{WI} = \frac{R_{900}}{R_{970}}$	Peñuelas et al. 1997a
Floating Position Water Band (fWBI)	$\text{fWBI} = \frac{R_{900}}{\min(R_{930-980})}$	Strachan et al. 2002
Simple Ratio Water (SRWI)	$\text{SRWI} = \frac{R_{858}}{R_{1240}}$	Zarco-Tejada et al. 2003
Simple Ratio Water (SRWI1)	$\text{SRWI1} = \frac{R_{880}}{R_{1265}}$	This study
Simple Ratio Water (SRWI2)	$\text{SRWI2} = \frac{R_{1350}}{R_{870}}$	This study
Simple Ratio Water (SRWI3)	$\text{SRWI3} = \frac{R_{880}}{R_{1265}}$	This study
Transformed Chlorophyll Absorption in Reflectance (TCARI)	$\text{TCARI} = 3 * [(R_{700} - R_{670}) - 0.2 * (R_{700} - R_{550})] * (R_{700} / R_{670})$	Haboudane et al. 2002
Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance (MCARI)	$\text{MCARI} = [(R_{700} - R_{670}) - 0.2 * (R_{700} - R_{550})] * (R_{700} / R_{670})$	Daughtry et al. 2000
Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance (MCARI1)	$\text{MCARI}_1 = 1.2 * [2.5 * (R_{800} - R_{670}) - 1.3 * (R_{800} - R_{550})]$	Haboudane et al. 2004

Index (abbreviation)	Equation	Reference
Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance (MCARI2)	$MCARI_2 = \frac{1.5 * [2.5 * (R_{900} - R_{670}) - 1.3 * (R_{800} - R_{550})]}{\sqrt{(2 * R_{900} + 1)^2 - (6 * R_{900} - 5 * R_{670}) - 0.5}}$	Haboudane et al. 2004
Modified triangular VI (MTVI1)	$MTVI3 = 1.2 * [1.2 * (R_{900} - R_{550}) - 2.5 * (R_{670} - R_{550})]$	Haboudane et al. 2004
Modified triangular VI (MTVI2)	$MTVI2 = \frac{1.5 * [1.2 * (R_{900} - R_{550}) - 2.5 * (R_{670} - R_{550})]}{\sqrt{(2 * R_{900} + 1)^2 - (6 * R_{900} - 5 * R_{670}) - 0.5}}$	Haboudane et al. 2004
Modified triangular VI (MTVI3)	$MTVI3 = 1.2 * [1.2 * (R_{880} - R_{554}) - 2.5 * (R_{718} - R_{554})]$	This study
Renormalized Difference VI (RDVI)	$RDVI = \sqrt{\frac{R_{880} - R_{672} * (R_{880} - R_{673})}{R_{880} + R_{673}}}$	Reujean and Breon 1995
Modified Simple Ratio (MSR)	$MSR = \frac{R_{845}/R_{665} - 1}{(R_{845}/R_{665})^{0.5} + 1}$	after Chen 1996
Triangular VI (TVI)	$TVI = 0.5 * [120 * (R_{750} - R_{550}) - 200 * (R_{670} - R_{550})]$	Broge and Leblanc 2001
Triangular VI (TVI1)	$TVI1 = 0.5 * [120 * (R_{718} - R_{554}) - 200 * (R_{674} - R_{554})]$	This study
Carter (Crt1)	$Crt1 = \frac{R_{691}}{R_{420}}$	Carter 1994
Carter (Crt2)	$Crt2 = \frac{R_{691}}{R_{740}}$	Carter et al. 1996
Carter (Crt3)	$Crt3 = \frac{R_{700}}{R_{420}}$	This study
Lichtenthaler (Lic)	$Lic = \frac{R_{800} - R_{680}}{R_{800} + R_{680}}$	Lichtenthaler et al. 1996
Lichtenthaler (Lic1)	$Lic1 = \frac{R_{440}}{R_{690}}$	Lichtenthaler et al. 1996
Lichtenthaler (Lic2)	$Lic2 = \frac{R_{440}}{R_{740}}$	Lichtenthaler et al. 1996
Vogelmann (Vog)	$Vog = \frac{R_{740}}{R_{720}}$	Vogelmann 1993, Zarco-Tejada et al. 1999
Vogelmann (Vog1)	$Vog1 = \frac{R_{734} * R_{747}}{R_{715} + R_{728}}$	Vogelmann 1993, Zarco-Tejada et al. 1999
Vogelmann (Vog2)	$Vog2 = \frac{R_{734} - R_{747}}{R_{715} + R_{720}}$	Vogelmann 1993, Zarco-Tejada et al. 1999
Gitelson and Merzlyak (GM1)	$GM1 = \frac{R_{720}}{R_{750}}$	Gitelson and Merzlyak 1997
Gitelson and Merzlyak (GM2)	$GM2 = \frac{R_{720}}{R_{730}}$	Gitelson and Merzlyak 1997
Curvature (CUR)	$CUR = \frac{R_{673} * R_{805}}{R_{483}^2}$	Zarco-Tejada et al. 2000
Normalized Difference IR (NDII)	$NDII = \frac{R_{835} - R_{1650}}{R_{835} + R_{1650}}$	Hardisky et al. 1983; van Niel 2003
Chlorophyll Absorption Ratio (CARI)	$CARI = CAR \frac{R_{700}}{R_{670}}$	Kim et al. 1994, Broge and Leblanc 2001
Enhanced VI (EVI)	$EVI = 2.5 * \frac{R_{855} - R_{645}}{R_{855} + 6 * R_{645} - 7.5 * R_{480} + 1}$	Huete et al. 2002
Shortwave Infrared Water Stress (SIWSI)	$SIWSI = \frac{R_{858.5} - R_{1640}}{R_{858.5} + R_{1640}}$	Fensholt and Sandholt 2003
Chlorophyll Absorption Ratio (CAR)	$CAR = \frac{a * 670 + R_{670} + b}{\sqrt{a^2 + 1}}; a = R_{700} - R_{550}; b = R_{550} - (a * 550)$	Broge and Leblanc 2001

Fuente: RODRIGUEZ- PÉREZ, (2007)