

**Universidad Pública de Navarra**

*Nafarroako Unibertsitate Publikoa*

**ESCUELA TECNICA SUPERIOR  
DE INGENIEROS AGRONOMOS**

*NEKAZARITZAKO INGENIARIEN  
GOI MAILAKO ESKOLA TEKNIKO*

Evaluación del interés del Índice Vegetativo Diferencial Normalizado (NDVI), Número de Racimos (NR) y Conductividad Eléctrica aparente del suelo (ECa) para la definición de unidades diferenciadas de manejo hídrico en viñedo.

Presentado por

Miguel Bernardo Aguirre De Pablo-*k*

*Aurkeztua*

GRADO EN INGENIERÍA AGROALIMENTARIA Y DEL MEDIO RURAL

*GRADUA NEKAZARITZAKO ELIKAGAIEN ETA LANDA INGURUNEAREN  
INGENIARITZAN*

Junio, 2015 / 2015, *ekaina*

# UNIVERSIDAD PÚBLICA DE NAVARRA

## ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS AGRÓNOMOS

### TRABAJO DE FIN DE GRADO

**“Evaluación del interés del Índice Vegetativo Diferencial Normalizado (NDVI), Número de Racimos (NR) y Conductividad Eléctrica aparente del suelo (ECa) para la definición de unidades diferenciadas de manejo hídrico en viñedo.”**

Trabajo Fin de Grado presentado por D. Miguel Bernardo Aguirre De Pablo al objeto de optar al título de graduado en Ingeniería Agroalimentaria y del Medio Rural. Dirigido por Dr. Luis Gonzaga Santesteban García, profesor titular del departamento de Producción Agraria.

V<sup>0</sup>B<sup>0</sup> El director del trabajo

Presentado por

Dr. Luis Gonzaga Santesteban García

Miguel Bernardo Aguirre De Pablo

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero presentar un especial agradecimiento a mi tutor el Dr. Gonzaga, el cual me ha prestado su ayuda y consejo. Gracias a él he podido aprender e iniciarme en el mundo de la viticultura. Además, desearía agradecer también a los profesores: Mariaje, Bernardo y Carlos por enseñarme tantas cosas sobre la fruticultura y viticultura.

Quisiera agradecer su colaboración y disposición a Bodegas Ochoa, en especial a Daniel, por haber participado y prestado su ayuda en todo momento.

Agradecer a Inés su apoyo y consejo, al igual que al resto de componentes del grupo: Maite, Ibai, Ana, Olatz, Jon, Bea y Mikel por hacer esos días de verano tan amenos.

Finalmente, agradezco a mi familia y amigos todo el apoyo mostrado durante este tiempo.



## RESUMEN

En climas semi-áridos, la gestión del estado hídrico en verano es un factor esencial que condiciona los principales parámetros de calidad. Por este motivo muchas bodegas se plantean la definición de unidades de manejo hídrico diferenciado para la obtención de uva de una calidad homogénea.

El objetivo de este trabajo es la evaluación del interés del empleo del Índice Vegetativo Diferencial Normalizado (NDVI), Número de Racimos (NR) y Conductividad Eléctrica aparente del suelo (ECa), tanto de forma individual como combinada, para la definición de unidades de manejo diferenciadas desde el punto de vista hídrico en viñedo. Se emplean estos índices porque pueden proporcionar información de manera temprana del estado hídrico del viñedo.

El trabajo posee dos partes. En ambas el objetivo es evaluar el interés de tres variables (NDVI, NR y ECa) para delimitar unidades diferenciadas de manejo que se correspondan con niveles hídricos distintos. En la primera parte se han comparado con los resultados del ratio isotópico del carbono ( $\delta^{13}\text{C}$ ), el cual está estrechamente relacionado con el estrés hídrico acumulado durante el verano, más concretamente al final del verano. Los resultados obtenidos en esta parte han mostrado que únicamente el NDVI de forma individual ha permitido la zonificación de tres áreas con un comportamiento hídrico diferente. Sin embargo, la combinación de NDVI+NR+ECa permite una zonificación con menor grado de significación que empleando exclusivamente el NDVI. En los contrastes a posteriori con Test de Tukey se obtienen dos grupos que no coinciden con los grupos formados con el NDVI+NR+ECa.

Mientras que la segunda parte consiste en compararlos con los resultados obtenidos de mediciones directas de potencial xilemático en puntos característicos de la parcela durante el verano, concretamente los potenciales de las 11:00 y 14:00 hora solar entre los meses de julio y septiembre. Tras obtener los resultados se ha podido comprobar que dichos índices no permiten desde el punto de vista estadístico la zonificación para estas condiciones de estudio. Sin embargo se han podido observar de manera visual tendencias en dichos comportamientos hídricos. Destacando la variable NDVI-ECa, que mostraba una estrecha relación con el potencial xilemático.

**Palabras clave:** viticultura de precisión, estado hídrico, NDVI, NR, ECa, ratio isotópico del carbono, potencial xilemático.



## ABSTRACT

In semi-arid climates, the management of water status is an essential factor which conditions the main parameters of quality. This is the reason why many wineries are considering the definition of unities of differentiated water management to obtain grapes of homogeneous quality.

The aim of this study is to evaluate the interest of the employment of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), bunch number (BN) and soil apparent electrical conductivity (ECa), both in an individual and in a combined basis in order to define the differentiated unities of management in terms of water resources in the vineyard. These indexes are used because they are able to provide early information about the water status of the vineyard.

This study is made of two parts. In both parts, the aim is to validate the interest of the three variables (NDVI, BN and ECa) to delimit differentiated unities of management which correspond with different water levels. On that account, they have been compared with different measurements of water stress. In the first part, they have been compared with the results of carbon isotope ratio ( $\delta^{13}\text{C}$ ), which is strongly associated with the water stress accumulated during the summer, more precisely at the end of the summer. The results obtained in this section have shown that only the NDVI in an individual basis has permitted the zonation of three areas with different water behaviour. However, the combination of NDVI+BN+ECa allows a zonation of a lower grade of significance than in case of using the NDVI exclusively. In the a posteriori contrasts with Tukey's test two groups are obtained which do not coincide with the groups formed with the NDVI+BN+ECa.

Concerning the second part, these variables are compared with the results obtained of direct measurements of the water potential in characteristic spots of the smallholding during the summer, exactly the potential between 11.00 and 14.00 solar times in July, August and September. After obtaining these results, it has been proved that from statistical point of view these indexes do not allow the zonation for these conditions of study. Nonetheless, tendencies in these water behaviours have been visually observed. The variable NDVI-ECa is highlighted as it showed a close connection with the xylematic potential.

**Key words:** precision viticulture, water status, NDVI, BN, ECa, carbon isotope ratio, water potential.





## Índice

1.	Antecedentes .....	1
1.1.	Situación actual de la vid .....	1
1.1.1.	La vid en el mundo.....	1
1.1.2.	La vid en España .....	1
1.2.	Botánica.....	3
1.3.	Morfología.....	4
1.3.1.	Parte aérea .....	4
1.3.2.	Parte radicular .....	6
1.4.	Ciclo vegetativo.....	7
1.4.1.	El lloro.....	7
1.4.2.	El desborre.....	8
1.4.3.	El crecimiento .....	9
1.4.4.	La parada de crecimiento .....	9
1.5.	Ciclo reproductor.....	9
1.5.1.	Iniciación floral .....	10
1.5.2.	Floración.....	10
1.5.3.	Polinización.....	10
1.5.4.	Fecundación .....	10
1.5.5.	Cuajado .....	10
1.5.6.	Desarrollo de la baya (crecimiento y maduración).....	11
1.6.	La variabilidad espacial de los factores y su manejo .....	11
1.6.1.	El clima .....	11
1.6.2.	El suelo.....	12
1.7.	La viticultura de precisión.....	12
1.7.1.	Introducción a la viticultura de precisión .....	12
1.7.2.	Funcionamiento de la viticultura de precisión.....	13
1.7.3.	Importancia de la variabilidad intra-parcelar .....	14
1.7.4.	Tecnologías empleadas por la viticultura de precisión.....	14
1.8.	Fuentes de datos empleados en la viticultura de precisión.....	15
1.8.1.	Índices de vegetación .....	15
1.8.2.	Índices de suelo .....	16
1.8.3.	Índices topográficos .....	16
1.8.4.	Medidas realizadas in situ .....	16

1.9.	El agua.....	17
1.9.1.	La importancia del agua en la viticultura .....	17
1.9.2.	El agua en el suelo.....	17
1.9.3.	La necesidad de agua.....	18
1.9.4.	El riego .....	18
1.9.5.	El riego por goteo.....	18
1.10.	Medidas de estrés hídrico en viñedo .....	19
1.10.1.	El potencial xilemático.....	19
1.10.2.	El ratio isotópico del carbono.....	19
2.	Objetivo.....	1
3.	Material y métodos.....	23
3.1.	Situación de la parcela y toma de datos .....	23
3.2.	Puntos de zonificación (PZ) .....	24
3.2.1.	Ubicación de los PZ .....	24
3.2.2.	Toma de datos PZ.....	24
3.2.3.	Proceso de agrupamiento ( <i>Clúster</i> ) .....	25
3.3.	Puntos de seguimiento hídrico (PSH) .....	25
3.3.1.	Ubicación de los PSH.....	25
3.3.2.	Toma de datos de PSH .....	27
3.4.	Tratamiento de resultados .....	27
4.	Resultados y discusión .....	29
4.1.	Variables de zonificación .....	29
4.1.1.	Variables individuales .....	29
4.1.2.	Variables combinadas .....	30
4.2.	Evaluación del $\delta^{13}\text{C}$ .....	31
4.3.	Evaluación del potencial xilemático.....	31
4.3.1.	Evaluación de las variables individuales.....	32
4.3.2.	Evaluación de las variables combinadas .....	33
5.	Conclusiones .....	35
6.	Bibliografía .....	37

## Índice de tablas

Tabla 1.1.Principales índices vegetativos y su cálculo .....	15
Tabla 1.2.Distribución de la superficie en función del sistema de riego en España .....	17
Tabla 4.1.Análisis de varianza para las diferentes variables y combinaciones .....	31

## Índice de figuras

Figura 1.1.Evolución del consumo mundial de vino (millones de hectolitros) durante el periodo 2000-2012 .....	1
Figura 1.2.Evolución de la superficie de viñedo en España durante el periodo 2008-2013 .....	2
Figura 1.3.Evolución de la producción de vino (miles de hectolitros) en España durante el periodo 2008-2013 .....	2
Figura 1.4.Distribución media de la producción de vino y mosto en España durante el periodo 2009-2013 .....	3
Figura 1.5.Nomenclatura de los diferentes órganos de la vid .....	4
Figura 1.6.Nomenclatura de los diferentes partes de la flor.....	6
Figura 1.7.Representación del ciclo vegetativo interanual de la vid.....	7
Figura 1.8.Representación de los estados fenológicos de la vid .....	8
Figura 1.9.Eschema de funcionamiento de la viticultura de precisión.....	13
Figura3.1.Imagen aérea del viñedo de tempranillo donde se ha realizado el estudio .....	23
Figura3.2.Ubicación de los puntos de zonificación (PZ) .....	24
Figura3.3.Conductivímetro modelo EM-38 M.....	25
Figura3.4.Ubicación de los puntos de seguimiento hídrico (PSH) .....	26
Figura3.5.Ubicación sobre el terreno de uno de los PSH.....	26
Figura3.6.Ejemplo de medición del potencial xilemático .....	27
Figura4.1.Mapas de clases de las variables individuales .....	29
Figura4.2.Mapas de clases de las variables combinadas.....	30
Figura4.3.Gráficas de la evolución del potencial xilemático con las variables de zonificación individuales .....	32
Figura4.4.Gráficas de la evolución del potencial xilemático con las variables de zonificación combinadas.....	34



# 1. Antecedentes

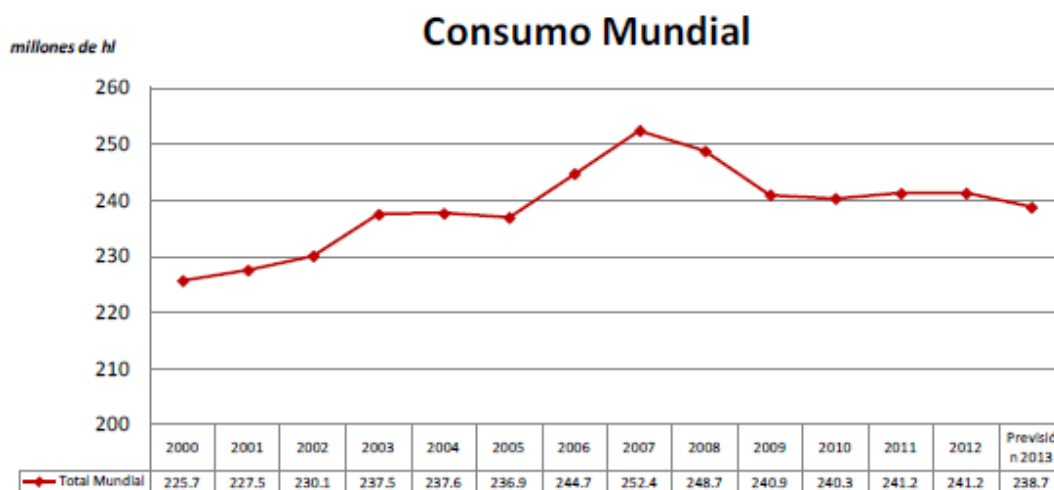
## 1.1. Situación actual de la vid

### 1.1.1. La vid en el mundo

La superficie vitícola a nivel mundial a fecha de 2013 sobrepasaba ligeramente los 7,5 millones de hectáreas, suponiendo el viñedo europeo el 46,3 % de dicha superficie (OIV, 2014).

Sin embargo, a pesar de la continua disminución de la superficie, la producción ha ido en aumento. Concretamente un 17 % desde el año 2000. Este incremento de los rendimientos se debe a unas condiciones climáticas favorables en algunos países y a las mejoras técnicas (OIV, 2014).

En cuanto al consumo de vino en el mundo, este parece que se mantiene constante desde el año 2009, como puede observarse en la Figura 1.1. A pesar del descenso del consumo en los países de la Unión Europea este se mantiene debido al aumento del mismo en los países emergentes, aumentando con ello la importancia del comercio internacional (OIV, 2014).

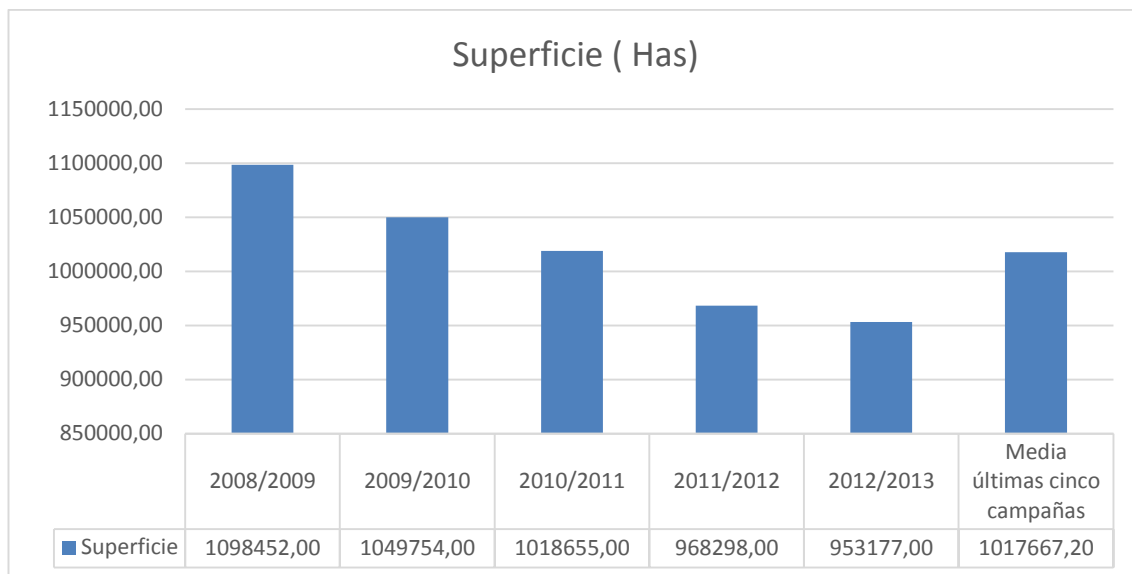


Fuente: Organización Internacional de la Viña y el Vino (2014)

**Figura 1.1: Evolución del consumo mundial de vino (millones de hectolitros) durante el periodo 2000-2012**

### 1.1.2. La vid en España

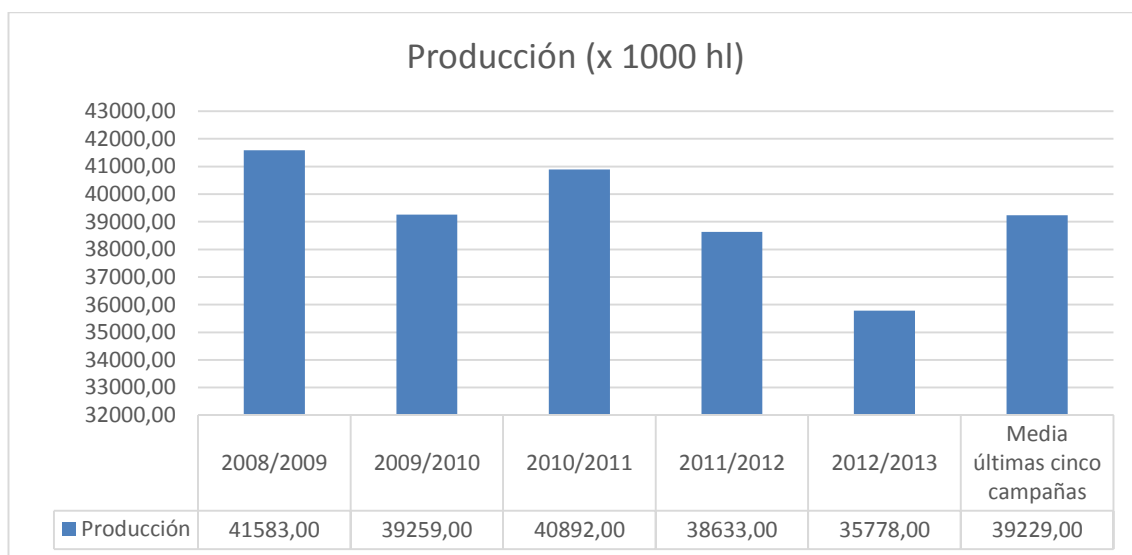
En España la situación coincide con el panorama mundial en cuanto a la reducción de superficie como puede observarse en la Figura 1.2, ocupando actualmente el cultivo de la vid 953.177 hectáreas (MAGRAMA, 2014).



Fuente: elaboración propia a partir de los datos del MAGRAMA (2014)

**Figura 1.2: Evolución de la superficie de viñedo en España durante el periodo 2008-2013**

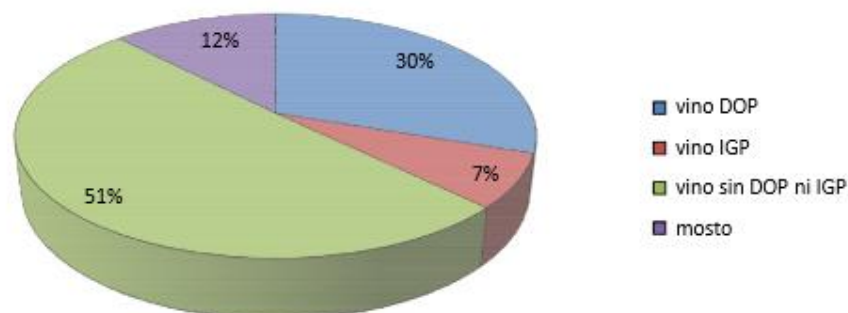
Con respecto a las producciones, estas muestran una tendencia notablemente irregular, debido principalmente a la variabilidad de las condiciones climatológicas (MAGRAMA, 2014). En la Figura 1.3 puede verse la mencionada variabilidad de las últimas cinco temporadas.



Fuente: elaboración propia a partir de los datos del MAGRAMA (2014)

**Figura 1.3: Evolución de la producción de vino (miles de hectolitros) en España durante el periodo 2008-2013**

En cuanto a la distribución de la producción esta tiene lugar de la siguiente manera: un 12 % se destina para mosto, un 51 % corresponde a vinos sin Indicación Geográfica, un 30 % posee Denominación de Origen Protegida y el 7 % restante son vinos con Indicación Geográfica Protegida. En la Figura 1.4 puede verse dicha distribución (MAGRAMA, 2014).



Fuente: MAGRAMA (2014)

**Figura 1.4: Distribución media de la producción de vino y mosto en España durante el periodo 2009-2013**

En cuanto a la importancia del sector cabe destacar que es de gran relevancia económica, supone cerca del 8 % de la Producción Vegetal y casi el 5 % de la Producción Agraria (MAGRAMA, 2014).

Por último mencionar el comercio exterior, en el que la UE supone el 71 % de las exportaciones. Dentro de la UE destaca Francia, con un 20 % del total de las exportaciones. Los principales importadores fuera de la UE son Rusia (5 %), EEUU (4 %) y China (3 %) (MAGRAMA, 2014).

## 1.2. Botánica

La vid es una planta perenne leñosa, perteneciente a la familia de las *Vitáceas* y capaz de trepar sobre un soporte gracias a los zarcillos que desarrolla sobre su estructura sarmentosa. El género *Vitis* apareció en Europa hace unos 26 millones de años, cenozoico (Hidalgo, 2011), iniciándose su cultivo en torno al 6000 a.C (Reynier, 2013).

La vid silvestre es una planta dioica, mientras que la *Vitis vinífera* es hermafrodita. Esto se debe a cruzamientos naturales con las *vitis* hermafroditas de origen asiático y a la selección realizada por el hombre (Reynier, 2013).

La *Vitis vinífera* comprende más de 5000 variedades, aunque relativamente pocas tienen interés para la vinificación (Reynier, 2013), pero todas ellas forman un importante patrimonio varietal (Hidalgo, 2011).

### 1.3. Morfología

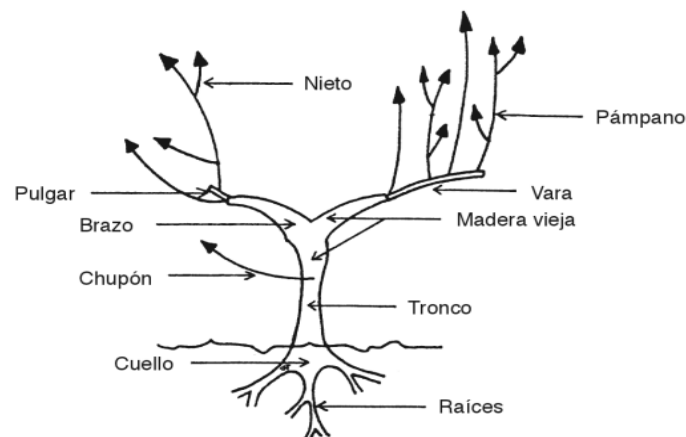
Por lo general la vid cultivada es la simbiosis de dos especies distintas, la parte aérea que es la que tiene cualidades de vinificación y forma parte de la especie *Vitis vinifera* y por otro lado, la parte radicular que pertenece a especies de origen americano e híbridos de ellas.

#### 1.3.1. Parte aérea

La vid es una liana, capaz de trepar sobre un soporte gracias a los zarcillos que desarrolla sobre su estructura sarmentosa.

En el viñedo, ya no posee esa apariencia de árbol sarmentoso y todas las cepas son similares debido a un correcto manejo del viticultor. Poseen un tronco y sobre él se insertan varios brazos, sobre los que se desarrollan los pámpanos. Sobre estos, encontramos hojas, yemas, zarcillos y racimos. En la Figura 1.5 puede verse como se distribuyen los diferentes órganos en la vid.

Todas las estructuras que se desarrollan a lo largo del pámpano lo hacen en un mismo plano (Reynier, 2013)



Fuente: Hidalgo, 2011

**Figura 1.5: Nomenclatura de los diferentes órganos de la vid**

#### A. La hoja

Las hojas se disponen de forma alterna a lo largo del pámpano y se encuentran unidas a este por un peciolo. Sus funciones son de transpiración y fotosíntesis (Reynier, 2013).

El limbo tiene un aspecto laminar y está dividido en cinco lóbulos, con cinco nervios principales (Hidalgo, 2011).

La mayor parte de los estomas se encuentran en el envés, con unas densidades que oscilan entre los 100-300 estomas por mm<sup>2</sup> (Hidalgo, 2011).



## **B. La cepa**

La parte aérea está formada por el tronco y varios brazos. Sobre ellos se insertan ramos cortos (pulgares) o largos (varas) que son sobre los que se desarrolla la madera de poda o pámpanos, que se renueva anualmente. Sobre los pámpanos se encuentran las hojas, zarcillos, racimos y yemas (Hidalgo, 2011).

Sobre la madera vieja pueden desarrollarse brotes, denominados chupones, que generalmente se eliminan (Martínez De Toda, 1991).

La función del tronco y los brazos son las de soportar los pámpanos, respirar, transportar la sabia bruta y nutrir con la sabia elaborada a toda la planta (Hidalgo, 2011).

## **C. Las yemas**

Todas las yemas de la vid se encuentran recubiertas por escamas y albergan en su interior una borra blanquecina cuyo objetivo es el de protección de los conos vegetativos (Hidalgo, 2011).

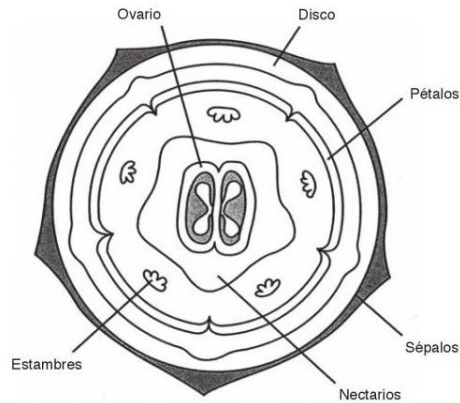
Se pueden encontrar dos tipos de yemas, las yemas latentes y las yemas prontas. Las yemas latentes son aquellas que brotan al año siguiente de su formación; mientras que las yemas prontas, de menor tamaño, si se desarrollaran, lo harían ese mismo año (Martínez De Toda, 1991).

La mayor parte de las yemas poseen varios conos vegetativos, que presentan sus brotes con los órganos en miniatura (Hidalgo, 2011). Es por ello que sobre el mismo nudo pueden desarrollarse varios brotes simultáneamente.

## **D. Las inflorescencias**

La vid posee inflorescencias en racimo y por lo general en un número de dos por yema (Hidalgo, 2011).

La flor que aparece con mayor frecuencia es pentámera y en el caso de la vid cultivada es hermafrodita, anemógama y autógama. En la Figura 1.6 puede verse la distribución de los diferentes órganos de la inflorescencia (Hidalgo, 2011).



Fuente: Hidalgo, 2011

**Figura 1.6: Nomenclatura de los diferentes partes de la flor**

### **E. Los pámpanos**

Los pámpanos son las estructuras productivas en la vid y se renuevan anualmente. Sobre sus nudos se insertan las hojas, racimos, zarcillos y yemas anticipadas, que tienen la posibilidad de brotar si se dan las condiciones adecuadas (Martínez De Toda, 1991).

### **F. El racimo y la baya**

Una vez la flor se ha fecundado, ésta se transforma en baya y comienza a engordar. La baya está formada por el hollejo, la pulpa, las pepitas y el pedúnculo, que la une en última instancia al racimo. Hasta envero, la baya es de color verde y colabora en parte en su propia nutrición (Hidalgo, 2011).

### **1.3.2. Parte radicular**

La morfología de la raíz depende de su origen, si se trata de una planta proveniente de estacilla sus raíces serán adventicias, formándose con el tiempo una cabellera radicular. Mientras que si proviene de semilla su sistema radicular será pivotante (Reynier, 2013).

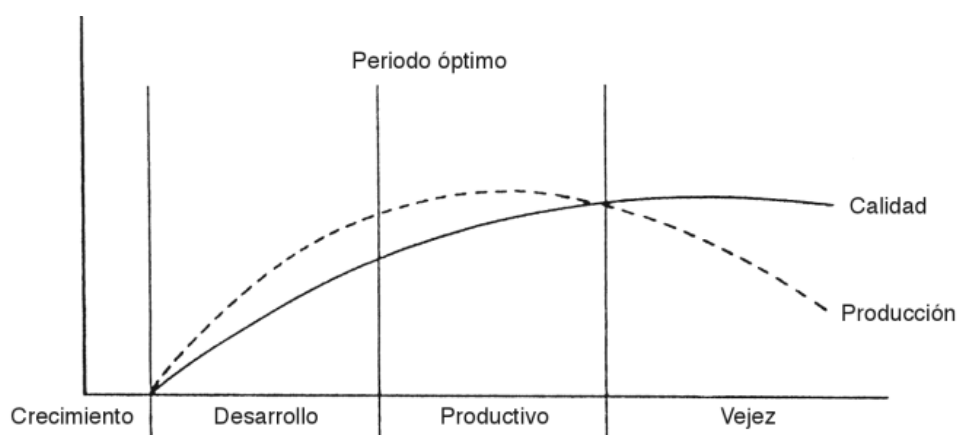
Las funciones de la raíz son las de anclaje al suelo, absorción de agua y nutrientes, formación de hormonas de crecimiento y también como órgano de reserva (Hidalgo, 2011).

## 1.4. Ciclo vegetativo

En la vida de la vid se distinguen claramente cuatro etapas (Figura 1.7). La primera sería una etapa de crecimiento y desarrollo a la que seguiría una etapa de desarrollo, seguidamente vendría una etapa productiva y por último, una etapa de vejez (Hidalgo, 2011).

La vid cultivada se arranca generalmente entre los 30 y 50 años debido a criterios de rentabilidad (Reynier, 2013).

Puesto que la vid es una planta perenne, lo acontecido en un año tiene consecuencias no solo en ese año, sino en años posteriores (Reynier, 2013).



Fuente: Hidalgo, 2011

**Figura 1.7: Representación del ciclo vegetativo interanual de la vid**

En cuanto al ciclo vegetativo anual de la vid en nuestro hemisferio tiene lugar entre primavera (marzo o abril) y otoño (octubre o noviembre). El resto del año, se produce una interrupción del ciclo debido a la acción de las bajas temperaturas (Reynier, 2013).

Dentro del ciclo vegetativo se distinguen las siguientes fases:

### 1.4.1. El lloro

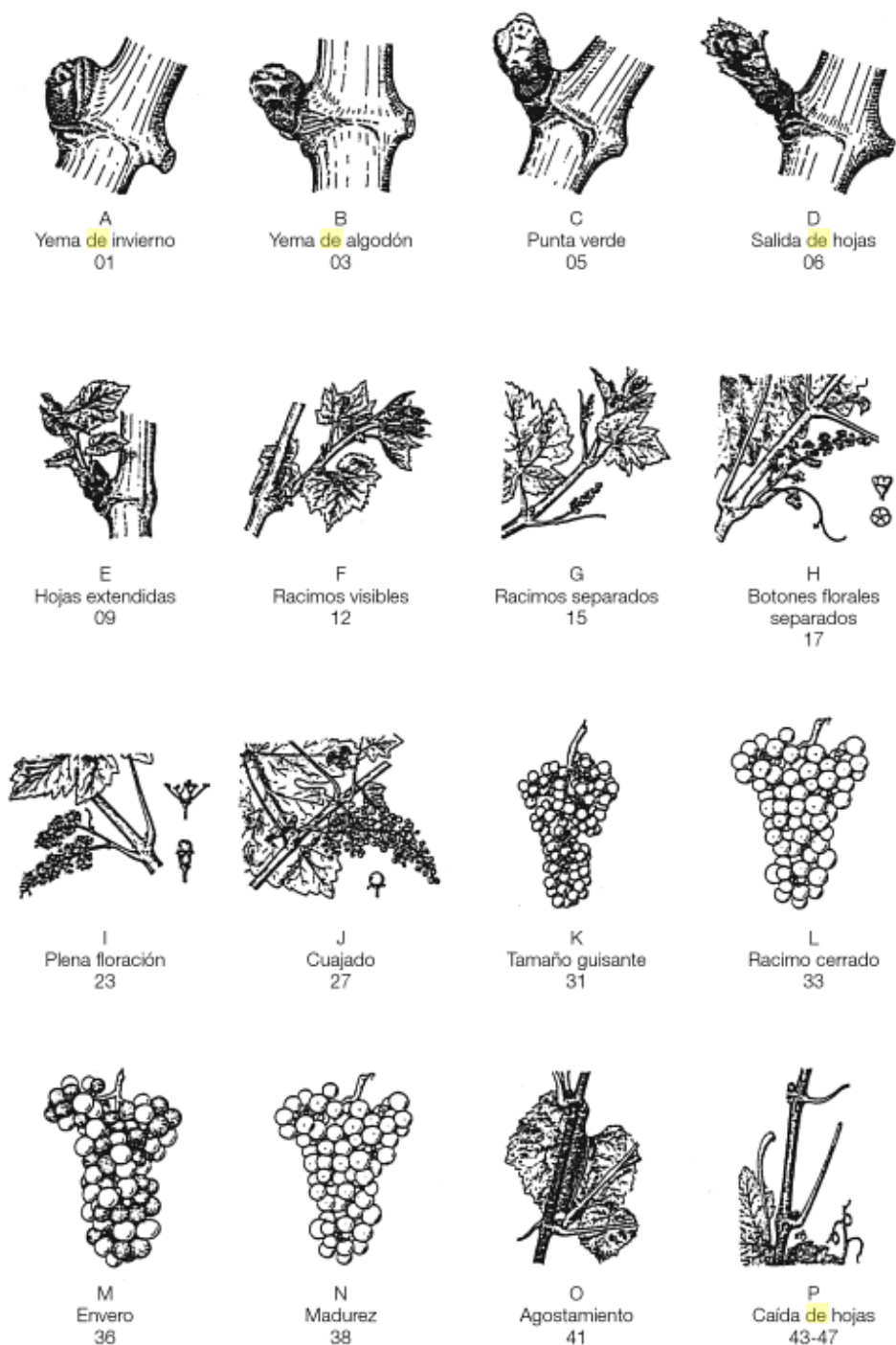
Es la primera manifestación de actividad por parte de la cepa a finales del invierno. Consiste en un bombeo de savia debido a la presión osmótica. Esta savia fluye al exterior por las heridas de poda. La composición del lloro es diferente a la de la savia bruta, siendo más rico en compuestos orgánicos y menos en materias minerales (Reynier, 2013).

La función principal del lloro es la de restablecer las conducciones tras la parada vegetativa del invierno.

### 1.4.2. El desborre

Una vez empieza la primavera y con ella el aumento de las temperaturas, las yemas se hinchan, los yemarios se abren y dejan al descubierto la borra y los órganos verdes (Reynier, 2013).

La escala más empleada para definir los estados fenológicos es la de Baggiolini (Figura 1.8), definida en 1952, posee 16 estados fenológicos (Reynier, 2013).



Fuente: Reynier, 2013

**Figura 1.8: Representación de los estados fenológicos de la vid**

La vid muestra una marcada acrotonía, es decir, brotan primero las yemas que se encuentran en las posiciones más extremas (Reynier, 2013).

Podas tempranas o tardías pueden a su vez retrasar la brotación (Hidalgo, 2011).

### **1.4.3. El crecimiento**

Dentro del crecimiento vamos a distinguir entre el correspondiente al pámpano, a los órganos axilares del pámpano y a la cepa en general (Reynier, 2013).

#### **A) Crecimiento del pámpano**

Se distinguen tres fases: una primera fase tras el desborre, de crecimiento lento; seguida de una fase de rápido crecimiento (mayo-julio), con una parada ligera en floración; y por último, una fase final de crecimiento lento y decreciente.

#### **B) Crecimiento de los órganos axilares del pámpano**

Las hojas, zarcillos y anticipados crecen a la par que el brote en el que se insertan. El crecimiento de los anticipados no tiene lugar hasta que se inhibe la dominancia apical.

#### **C) Crecimiento en la cepa**

El crecimiento de los brotes es mayor cuanto mayor sea la distancia que le separa de la cepa (acrotonía).

### **1.4.4. La parada de crecimiento**

También conocida como agostamiento ya que generalmente tiene lugar en el mes de agosto. Se produce unos 100 a 120 días tras el desborre y depende en gran medida de las condiciones climatológicas y del vigor. El agostamiento comienza con la maduración de las uvas y finaliza después de la vendimia. Actuando en primer lugar sobre los órganos más viejos (Reynier, 2013).

El agostamiento supone la lignificación de los pámpanos, la caída de las hojas al final del mismo y la dormición de las yemas latentes, que quedan en estado de reposo para la siguiente campaña (Reynier, 2013).

## **1.5. Ciclo reproductor**

Comienza en junio o julio del año anterior con la iniciación de las inflorescencias en las yemas y continúa con la floración, polinización, cuajado, crecimiento y maduración de las bayas (Hidalgo, 2011).

### **1.5.1. Iniciación floral**

La iniciación floral posee dos partes. En primer lugar, ha de producirse el fenómeno de la inducción floral que determina la diferenciación de un meristemo en inflorescencia, y en segundo lugar, se produce la iniciación floral propiamente dicha, en la que primeramente se diferencia la inflorescencia y posteriormente las flores (Reynier, 2013).

El rango de las yemas también es determinante en su fertilidad, aumentando esta desde la base del sarmiento (Reynier, 2013).

### **1.5.2. Floración**

Este periodo tiene lugar entre mayo y junio y consiste en la apertura de las flores. Tiene una duración de entre ocho y quince días, siendo muy determinantes las condiciones meteorológicas. Se considera que una floración homogénea es un factor de calidad porque permite una mayor homogeneidad en la maduración (Reynier, 2013).

### **1.5.3. Polinización**

Una vez la flor se abre y después de la caída del capuchón, los estambres se separan del gineceo y liberan el polen, que generalmente poliniza a otra flor (alogamia). Una vez el grano de polen ha germinado se dirige a fecundar el óvulo (Reynier, 2013).

### **1.5.4. Fecundación**

La fecundación es doble, por una parte, un gameto se fusiona con la oosfera y forma el embrión y por otra parte, un segundo gameto se fusiona con los núcleos polares para formar el albumen. La formación de la semilla provoca la transformación del ovario en fruto (Reynier, 2013).

Una baya puede contener desde cero hasta cuatro pepitas, siendo su número un parámetro de calidad, entendiéndose que cuantas más mejor.

### **1.5.5. Cuajado**

Es el término empleado para las flores que llegan a ser fruto, se dicen que esas floreas han cuajado. La tasa de cuajado es la proporción de frutos frente a las flores de la inflorescencia y es muy variable. Depende principalmente de la variedad y del vigor, pero también de la longitud de la inflorescencia (Reynier, 2013).

### **1.5.6. Desarrollo de la baya (crecimiento y maduración)**

Desde el cuajado hasta la recolección, la baya pasa por tres estados en los que sufre grandes transformaciones (Reynier, 2013):

#### **A) Periodo herbáceo**

Durante este periodo, la baya es de color verde y posee una consistencia dura. En esta etapa, se produce un notable incremento de tamaño y debido a su coloración verde actúa como un órgano fotosintético colaborando en parte a su propia nutrición.

#### **B) Periodo de maduración**

El envero, que es el cambio de coloración, marca el comienzo de esta etapa. La baya entonces se transforma en un órgano de almacenamiento.

#### **C) Periodo de sobremaduración**

Una vez alcanzada la maduración, la baya comienza a deshidratarse y se pasifica.

El tamaño de la baya depende de características varietales, de la climatología, de la alimentación hídrica y de la carga de la cepa (Reynier, 2013).

## **1.6. La variabilidad espacial de los factores y su manejo**

De los factores que intervienen en la producción vitícola, vamos a centrarnos en este apartado en el clima y el suelo, que forman parte de los considerados permanentes e impuestos.

El clima y el suelo constituyen el llamado *medio físico*, que junto con el *medio biológico* viene impuesto por la naturaleza (Hidalgo, 2011).

La identificación de dos zonas de calidad en el viñedo, puede ser suficiente a la hora de realizar una gestión diferenciada (Báguena y Barreiro, 2011).

### **1.6.1. El clima**

Es considerado el factor más influyente en la producción vitícola. Las exigencias climáticas de la vid están bien determinadas. Teniendo una especial importancia: las temperaturas, las insolaciones, las lluvias, los mesoclimas y los microclimas (Hidalgo, 2011).

Las temperaturas medias anuales para el cultivo de *Vitis vinifera* han de rondar los 11° y 18°C. Las máximas pueden llegar puntualmente a sobrepasar los 40°C pudiendo traer consigo problemas de desecación de hojas y frutos. Las mínimas pueden llegar a -20°C durante reposo invernal y no traen mayores problemas para la madera, pero sí para las yemas, que son ligeramente más sensibles (Hidalgo, 2011).

Los requerimientos hídricos de la vid no son muy elevados, considerándose unos márgenes de 350 y 600 mm de precipitaciones para poder obtener vinos de calidad (Hidalgo, 2011).

En cuanto a la insolación, la vid es bastante exigente, requiriendo un mínimo de 1500 o 1600 horas anuales (Hidalgo, 2011).

El viticultor puede actuar parcialmente sobre algunos de estos factores con diversas técnicas que van desde la elección del emplazamiento hasta el sistema de conducción, el riego o la poda.

## **1.6.2. El suelo**

La vid se adapta con relativa facilidad a numerosos tipos de suelos, siendo con anterioridad a la aparición de la filoxera una adaptación total. Dicha adaptación se ha visto restringida por los propios requerimientos del porta-injerto (Hidalgo, 2011).

La profundidad del suelo es un factor determinante y limitador, puesto que condiciona el volumen explorable por las raíces; es decir, la cantidad de agua y nutrientes que la planta va a tener a su disposición (Hidalgo, 2011).

La textura del suelo determina la adaptación del sistema radicular y con ello la facilidad para poder aprovechar los recursos hídricos y nutritivos del suelo (Hidalgo, 2011).

Dentro de la fertilidad química del suelo, ausencias o déficits pueden producirse trastornos del desarrollo y situaciones de exceso pueden provocar toxicidades (Hidalgo, 2011).

El laboreo por parte del viticultor tiene como objetivo principal la regeneración de la estructura y la porosidad (Hidalgo, 2011).

## **1.7. La viticultura de precisión**

### **1.7.1. Introducción a la viticultura de precisión**

La agricultura de precisión es aquella que reconoce la variabilidad espacio-temporal de la parcela dentro del sistema suelo-planta-atmósfera (Cook & Bramley, 1998).

El concepto agricultura de precisión surge a finales de los años 80 y los países pioneros fueron: EEUU, Reino Unido y Australia (Báguena et al., 2011).

El desarrollo de la viticultura de precisión fue más tardío, comenzó a finales de los años 90 principalmente en Australia (Báguena et al., 2011), debido a que esta requiere de una mayor resolución de la información procedente de la teledetección, así como de herramientas de procesado de datos más complejas.

Tradicionalmente, las distintas actuaciones que se llevaban a cabo en el viñedo se hacían de una manera homogénea o global para todo el cultivo. Puede darse el caso de que las necesidades no sean las mismas en toda la unidad superficial, debido fundamentalmente a la variabilidad espacial existente, y esto puede traer consigo problemas de déficits o excesos (Hidalgo, 2011).



Surge entonces la viticultura de precisión (VP), que se basa en información fiable, puntual y localizada procedente de las nuevas tecnologías, para mejorar la productividad y calidad, consiguiendo ahorrar costes y logrando un mayor respeto por el medio ambiente (Hidalgo, 2011).

Teniendo en cuenta el valor añadido del producto final y su dependencia de la calidad, los costes de dichas técnicas no resultan prohibitivos. Algunos autores cifran estos costes en valores entorno al 0,5 % del valor de producción del cultivo (Báguena et al., 2011).

La VP está en auge ya que puede ser una fuente de beneficio económico y disminución de costes.

El empleo de fotos, que pueden ser imágenes aéreas o de satélite, realizadas en diferentes longitudes de onda, permite medir múltiples características del terreno (Hidalgo, 2011).

Desde un punto de vista práctico, los principales objetivos vitivinícolas que se han abordado desde la viticultura de precisión son (Tardáguila y Diago, 2008):

- perfeccionar la monitorización del vigor del viñedo,
- determinación del estado nutricional de la planta,
- programación y selección de vendimia en función de su potencial enológico y
- optimización del riego a través de la estimación de la variabilidad del estado hídrico.

### 1.7.2. Funcionamiento de la viticultura de precisión

La viticultura de precisión es un proceso cíclico (Figura 1.9), que comienza con la toma de datos, para seguir con su interpretación y evaluación y finaliza con la implementación del plan de gestión (Proffitt, Bramley, Lamb & Winter, 2006).



Fuente: Proffitt et al., 2006

**Figura 1.9: Esquema de funcionamiento de la viticultura de precisión**

### **1.7.3. Importancia de la variabilidad intra-parcelar**

Se define la variabilidad intra-parcelar como aquella que produce la variación en cualquiera de las tres dimensiones del espacio de alguna característica relevante de la planta (Basso, Sartori, Bertocco, Sierra y Remeses, 2006).

Debido a que se trata de un cultivo permanente, con un marco de plantación fijo, los puntos de muestro pueden geo-referenciarse, lo que permite la comparación de los datos de forma espacial (Báguena et al., 2011).

La variabilidad espacial del viñedo tiene consecuencias tanto en la cantidad como en la calidad de la uva obtenida (Báguena et al., 2011).

Resulta de un mayor interés actuar sobre las zonas en las que la variabilidad está organizada, o posee estructura espacial, ya que dichas zonas son la base para realizar muestreos de calidad dirigidos, optimizar tratamientos o vendimiar de forma selectiva. La variabilidad espacial existente en el viñedo puede estar organizada, es decir, puede tener una estructura espacial que permita su manejo de manera diferenciada (Urretavizcaya, 2013).

### **1.7.4. Tecnologías empleadas por la viticultura de precisión**

La viticultura de precisión cuenta con una serie de tecnologías, de las que tres pueden considerarse como básicas: Sistemas de Posicionamiento Global (GPS), Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la teledetección, que permiten una mejor toma de decisiones (Tardáguila et al., 2008).

#### **A) Sistema de posicionamiento global (GPS)**

El GPS es un sistema de radio navegación por satélite que suministra la situación exacta a través de las coordenadas geográficas. Dentro de estos sistemas hay variedad en cuanto a precisiones; el GPS convencional oscila entre 1 y 10 metros, siendo recomendable para la viticultura los denominados GPS diferenciales (DGPS) que proporcionan una precisión inferior a 1 m.

Una vez geo-referenciadas, se puede asignar a las cepas los valores de los parámetros de interés (vigor, rendimiento, contenido de azúcares, etc.) y así poder obtener los diferentes mapas del viñedo.

#### **B) Sistemas de Información Geográfica (SIG)**

Son software informáticos diseñados para manejar bases de datos que a su vez llevan una referencia espacial asociada, permitiendo con la elaboración de mapas de manejo.

## C) Teledetección

La teledetección es la observación remota por parte de un satélite o una plataforma aérea de una determinada superficie, grabando en forma de imagen multi-espectral las diferentes longitudes de onda.

El satélite Quickbird posee una resolución de 2,4 metros por pixel, con una anchura de barrido de 16,5 km.

## 1.8. Fuentes de datos empleados en la viticultura de precisión

Las fuentes de datos empleadas por la VP en el estudio de la variabilidad del viñedo son múltiples, pudiéndose clasificar en cuatro grupos: índices de vegetación, índices de suelo, índices topográficos y medidas realizadas in situ (Urretavizcaya, 2013).

### 1.8.1. Índices de vegetación

En viticultura el término vigor hace referencia no solo al tamaño de la cepa, sino también de forma indirecta a la densidad de vegetación (Hall, Lamb, Holzapfel & Louis., 2002).

Los índices espectrales de vegetación, son por lo general ratios o relaciones lineales entre la reflectancia en el rojo y en el infrarrojo cercano, íntimamente relacionados con la biomasa y la densidad de vegetación.

El NDVI (índice diferencial de vegetación normalizado) es un claro indicador del vigor y de la densidad foliar (Tardáguila et al., 2008).

Otro de los índices de mayor utilización es el PCD, que muestra la densidad celular de la vegetación (Rodríguez-Pérez, Riaño, Carlisle, Ustin & Smart, 2007).

Las imágenes a partir de las cuales se elaboran estos índices pueden obtenerse a por medio de satélites, que llevan instaladas, cámaras multi-espectrales, aviones o incluso sensores terrestres.

**Tabla 1.1. Principales Índices vegetativos y su cálculo**

<i>Nombre</i>	<i>Cálculo</i>
<i>NDVI – Normalized Difference Vegetation Index</i>	$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)}$
<i>PCD - Plant Cell Density</i>	$PCD = \frac{NIR}{RED}$

NIR, Near Infrared (Infrarrojo cercano)

### **1.8.2. Índices de suelo**

Propiedades del suelo como la profundidad, textura y contenido de elementos gruesos son los condicionantes de mayor importancia en el cultivo de la vid, puesto que condicionan el volumen explorable por las raíces, la disponibilidad de nutrientes y la capacidad de retención de agua.

Para el estudio de la variabilidad del suelo, al igual que para cualquier otro factor, es necesario un número de muestras relativamente alto. Por ello, para el estudio de la variabilidad del suelo se necesitan maneras indirectas que permitan estimar las propiedades mencionadas anteriormente.

La conductividad eléctrica aparente (ECa) medida mediante sensores eléctricos o electromagnéticos proporciona un gran número de datos que a su vez pueden geo-referenciarse con un GPS. En general valores altos de conductividad indican altos valores de salinidad, contenido alto de arcilla y agua acumulada en el suelo. Sin olvidar que estas medidas son relativas (Urretavizcaya, 2013).

### **1.8.3. Índices topográficos**

Las condiciones orográficas de los viñedos condicionan enormemente su cultivo. De entre ellas destaca la pendiente, la orientación y la altitud.

La pendiente está directamente relacionada con el riesgo de erosión hidráulica, que se traduce en una menor profundidad de suelo y en una menor proporción de elementos nutritivos, debido a que estos se encuentran normalmente en las capas más superficiales.

La posibilidad de disponer de modelos digitales del terreno (MDT) aporta de una forma sencilla datos sobre estos parámetros.

### **1.8.4. Medidas realizadas in situ**

Se entiende por medidas in situ aquellas que son tomadas a pie de campo, y pueden agruparse en cuatro tipos: crecimiento, rendimiento, estrés hídrico y calidad de la uva (Urretavizcaya, 2013).

Dentro de las medidas de crecimiento se encuentran la sección de tronco, suma de secciones de pámpanos o superficie folia. Para medir el rendimiento en la actualidad hay disponibles vendimiadoras que miden este parámetro en continuo. Entre las medidas del estrés hídrico destacan dos (ambas evaluadas en este trabajo): por un lado, el potencial xilemático y por otro, el ratio isotópico del carbono.

## 1.9. El agua

El agua es el componente principal de la planta y representa entre el 80 y el 90 % del peso fresco total (Martínez De Toda, 1991).

La vid, cuando se cultiva en regadío o en zonas con elevada pluviometría, puede dar producciones varias veces mayores si se compara con el cultivo en secano (Martínez De Toda, 1991).

### 1.9.1. La importancia del agua en la viticultura

Se considera la barrera de los 400 mm anuales de pluviometría como el mínimo para el buen cultivo de la vid (Hidalgo, 2011).

Por lo general, en nuestro país el viñedo supone el aprovechamiento más idóneo para los terrenos más desfavorable, suelos pobres, poco profundos y para los que no se contempla otro cultivo desde el punto de vista económico (Hidalgo, 2011).

De las 963.644 ha de viñedos de transformación de nuestro país, 352.343 se encuentran en regadío, lo que supone un 35,56 % del total (MAGRAMA, 2014).

**Tabla1.2: Distribución de la superficie en función del sistema de riego en España**

<i>Cultivo</i>	<i>Superficie (ha)</i>			
	Gravedad	Aspersión	Automotriz	Localizado
<i>Viñedo de transformación</i>	7.096 (2,01%)	10.451 (2,97%)	283 (0,08%)	334.513 (94,94%)

Fuente: elaboración propia a partir de los datos de MAGRAMA 2014

### 1.9.2. El agua en el suelo

La sequía es un factor limitador, que tiene lugar generalmente en terrenos poco profundos, puesto que en aquellos sin limitaciones de profundidad, en el fondo, suelen variar las disponibilidades de agua (Hidalgo, 2011).

La distribución de las precipitaciones no ha de ser tampoco uniforme durante todo el ciclo vegetativo, una distribución media sería la siguiente (Hidalgo, 2011):

Abril: 13 %	Julio: 20 %
Mayo: 23 %	Agosto: 17 %
Junio: 14 %	Septiembre: 13 %

Existe también la posibilidad de elegir porta injertos con una mayor resistencia a la humedad, para aquellas zonas que así lo requieran (Hidalgo, 2011).

### **1.9.3. La necesidad de agua**

En situaciones áridas en las que el riego es indispensable para el cultivo, una falta del mismo puede suponer una pérdida de calidad. Sin embargo, si la desecación del suelo es muy rápida, el riego puede resultar favorable en aplicaciones limitadas y previamente al envero. En otras situaciones, como por ejemplo suelos salinos, el riego supone una técnica indispensable para el cultivo (Hidalgo, 2002).

### **1.9.4. El riego**

El riego no se contempla para la obtención de vino de calidad, salvo que sirva para evitar los efectos de sequía extrema y no suponga un aumento del rendimiento (Branas, Bernon y Levadoux, citado por Hidalgo, 2002).

El riego supone un incremento del vigor de la cepa, retardando el periodo de crecimiento y con ello disminuyendo el periodo de maduración (Hidalgo, 2002).

### **1.9.5. El riego por goteo**

Es el sistema más utilizado en la viticultura, consta de unos emisores de riego montados sobre tuberías, que están colocadas longitudinalmente a las filas y proporcionan a la cepa un bulbo húmedo con una humedad prácticamente constante (Hidalgo, 2002).

Una instalación de riego por goteo consta de los siguientes elementos (Hidalgo, 2002):

- cabezal: situado en la salida del hidrante y que realiza funciones de filtrado, aplicación de fertilizantes, control del volumen de agua y coordinación;
- tuberías: fabricadas en PVC o PE y distribuidas en función de su categoría por la parcela y
- goteros: cuya función es la de dosificar el agua a la planta.

El riego por goteo presenta las siguientes ventajas (Hidalgo, 2002 y MAGRAMA, 2014):

- mayor aprovechamiento del agua por parte de la planta;
- mantenimiento de un nivel constante de humedad;
- permite un desarrollo vegetativo más uniforme que conlleva un aumento de la producción y calidad;
- mayor eficacia en la aplicación de fertilizantes con el consecuente ahorro económico;
- permite emplear aguas de peor calidad;
- limita la presencia de malas hierbas al mojar solo una pequeña superficie del terreno;
- riegos de alta frecuencia y
- facilita la automatización.

El riego por goteo presenta los siguientes inconvenientes (Hidalgo, 2002 y MAGRAMA, 2014):

- el viticultor requiere de una mayor especialización;
- peligro de salinización si el manejo no es adecuado;
- requiere personal muy cualificado para el diseño y montaje;
- alto coste de la instalación y mantenimiento;
- requiere de un alto grado de filtración para evitar obturaciones de los goteos y
- necesidad de fertilizantes solubles.

## **1.10. Medidas de estrés hídrico en viñedo**

De las medidas de estrés hídrico se van a desarrollar dos, que son: el potencial xilemático y el ratio isotópico del carbono.

### **1.10.1. El potencial xilemático**

Es una medida directa del estado hídrico de la hoja y se determina con ayuda de la cámara de presión de Scholander. El sistema se basa en la aplicación de presión sobre el limbo de la hoja que se encuentra alojada en el interior de la cámara. La presión se aporta ligeramente, con la ayuda de una bombona de nitrógeno. Una vez se observa la primera gota de agua que sale por el peciolo se anota la medida y esta presión es la inversa a la que la planta retiene en ese momento el agua.

Las medidas se realizan a las 11:00 y a las 14:00 horas, pero previamente ha de equilibrarse el potencial de la hoja con el potencial xilemático. Para ello se meten las hojas en unas bolsas opacas y se espera 90 minutos.

### **1.10.2. El ratio isotópico del carbono**

En la naturaleza se pueden encontrar de manera estable dos isótopos del carbono,  $^{12}\text{C}$  y  $^{13}\text{C}$ , siendo el  $^{12}\text{C}$  el mayoritario (98,93 %) (Hoefs, 2009).

Este método se basa en la existencia en la naturaleza de los dos isótopos del carbono antes mencionados. En las plantas C3 la Rubisco (ribulosa-1,5-bisfosfato carboxilasa-oxigenasa) discrimina a favor de las moléculas de  $\text{CO}_2$  con el isótopo  $^{12}\text{C}$ . De tal forma que cuando la disponibilidad de agua disminuye y las plantas cierran los estomas la proporción de moléculas de  $\text{CO}_2$  con el isótopo  $^{12}\text{C}$  va disminuyendo y como consecuencia de ello la Rubisco comienza a fijar una mayor proporción de  $\text{CO}_2$  con el isótopo  $^{13}\text{C}$  (Urretavizcaya, 2013).

Los valores del ratio isotópico son negativos, de tal forma que cuanto más negativo es el ratio (mayor en valor absoluto), nos indica que el estrés al que ha sido sometido es menor.

El ratio se puede determinar en cualquier tejido, aunque se ha observado que es en las bayas, donde mejores resultados aporta. Por ello en vendimia se seleccionan 50 bayas, se desecan y por último se determina el ratio isotópico de la muestra por medio de un espectrofotómetro. A continuación se muestra la fórmula del ratio isotópico:

$$\delta^{13}\text{C} = \left( \frac{R_s - R_b}{R_b} \right) * 1000$$

Donde:

$\delta^{13}\text{C}$ : ratio isotópico

$R_s$ : ratio  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  de la muestra

$R_b$ : ratio  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  del material de referencia (Pee Dee Belemnite 0,0112372)



## **2. Objetivo**

Evaluación del interés del empleo del Índice Vegetativo Diferencial Normalizado (NDVI), Número de Racimos (NR) y Conductividad Eléctrica aparente del suelo (ECa), tanto de forma individual como combinada, para la definición de unidades de manejo diferenciadas desde el punto de vista hídrico en viñedo.



### 3. Material y métodos

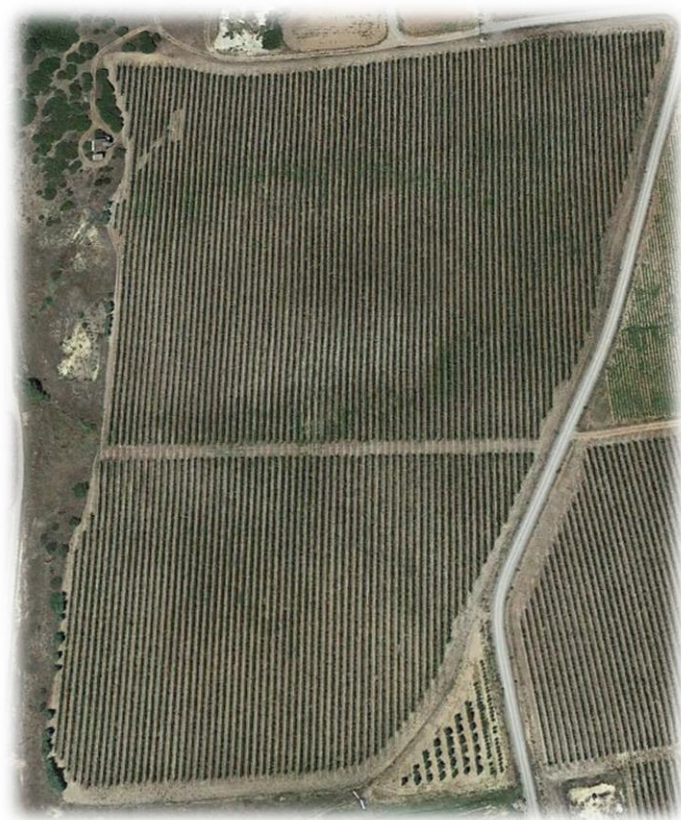
A continuación se muestra de manera cronológica la metodología seguida y el material empleado en cada etapa de la elaboración de este trabajo.

Se han empleado dos variables de validación; por un lado el potencial xilemático, del cual se hacía un seguimiento sobre los puntos de seguimiento hídrico (PSH) y por otro lado el ratio isotópico del carbono ( $\delta^{13}\text{C}$ ), el cual se analizó al final del ciclo sobre los puntos de zonificación (PZ).

#### 3.1. Situación de la parcela y toma de datos

El estudio se ha llevado a cabo en el año 2014 en un viñedo comercial de cv. Tempranillo (*Vitis vinífera* L.) de 7,3 ha ( $42^{\circ}22'21''\text{N}$ ,  $1^{\circ}37'31''\text{W}$ ), propiedad de Bodegas Ochoa en el término municipal de Traibuenas (Navarra).

El viñedo se encuentra dentro de la Denominación de Origen Navarra y cuenta con un marco de plantación de 3 m x 1 m (Figura 3.1).



Fuente: Google Earth.

**Figura 3.1: Imagen aérea del viñedo de tempranillo donde se ha realizado el estudio**

### 3.2. Puntos de zonificación (PZ)

#### 3.2.1. Ubicación de los PZ

Se situaron también 92 PZ (Puntos de Zonificación) siguiendo una distribución regular, en una retícula de 30 x 30 m. Dichos puntos de zonificación estaban formados por 10 cepas de tal forma que cada PZ tenía 5 cepas a cada lado de la calle (Figura 3.2).



**Figura 3.2: Ubicación de los puntos de zonificación (PZ)**

#### 3.2.2. Toma de datos PZ

El NDVI se obtuvo a partir de una imagen multi-espectral proporcionada por el satélite Quickbird en el año 2013.

Sobre los PZ se pasó el conductivímetro. Las mediciones se efectuaron a principios de junio (verde), agosto (envero) y en septiembre (vendimia). Para ello se empleó un conductivímetro EM-38 MK2 (Figura 3.3). Las tres tomas de datos fueron muy similares, pero se escogió la tomada en vendimia por ser la más marcada.



**Figura 3.3: Conductivímetro modelo EM-38 MK2**

Se cogieron muestras de bayas para la determinación del ratio isotópico, concretamente 50 bayas por punto. Las bayas se seleccionaban de manera aleatoria, escogiendo del primer racimo del primer pulgar del brazo derecho de cada cepa cinco bayas.; una baya de cada brazo, dos de la zona central y una de la punta. Posteriormente las bayas se desecaban en una estufa y se enviaban a un laboratorio para la determinación del ratio isotópico del carbono.

El número de racimos (NR) se contabilizó en agosto.

Con estos índices se elaboraron unos mapas para poder observar su estructura espacial a lo largo de la parcela.

### **3.2.3. Proceso de agrupamiento (*Clúster*)**

Para poder realizar los mapas previamente se tuvo que hacer un análisis de agrupamiento (*clúster*). Análisis basados en *fuzzy k-means*. El objetivo de este análisis es clasificar  $n$  objetos en  $k$  ( $k > 1$ ) grupos, en nuestro caso para todas las variables se ha hecho tres grupos (clases). El agrupamiento se hace a partir de la información disponible para cada punto.

El análisis *clúster* normal finaliza con la simple agrupación de los individuos, mientras que la extensión *fuzzy k-means* añade a su vez una probabilidad de pertenencia a dicho grupo. La clasificación se realizó en función del criterio de máxima proximidad (Urretavizcaya, 2013).

## **3.3. Puntos de seguimiento hídrico (PSH)**

### **3.3.1. Ubicación de los PSH**

En la parcela se situaron 11 PSH (Figura 3.4). Los puntos de medición del potencial hídrico se establecieron en función del NDVI obtenido de una imagen del año 2013.

En cada PSH se marcaron 10 cepas (Figura 3.5) y, sobre ellas, se realizó el seguimiento del estado hídrico a las 11:00 y a las 14:00 horas solar durante el periodo de estudio.





**Figura 3.4: Ubicación de los puntos de seguimiento hídrico (PSH)**



**Figura 3.5: Ubicación sobre el terreno de uno de los PSH**

### 3.3.2. Toma de datos de PSH

El proceso de medición del potencial xilemático es el siguiente:

En primer lugar se colocaban las bolsas de cierre hermético sobre las hojas, se seleccionaban cinco hojas de la zona media de la planta. Tras noventa minutos, durante los cuales la hoja se equilibraba con el potencial xilemático de la planta, las bolsas, con las hojas en su interior se retiraban de la planta.

La bolsa se enrollaba y se recortaba de manera uniforme el peciolo, para rápidamente después proceder a su medición en la cámara de presión de Scholander. El procedimiento se realizaba dos veces, una vez a las 11:00 horas y otra vez a las 14:00 horas, en ambos casos el procedimiento era el mismo.

Para medir el potencial xilemático se emplearon los siguientes instrumentos:

- Cámara de presión *Scholander*
- Bisturí
- Bolsas opacas con cierre hermético
- Bombona de nitrógeno



**Figura 3.6: Ejemplo de medición del potencial xilemático**

### 3.4. Tratamiento de resultados

Se compararon los valores de potencial xilemático y ratio isotópico del carbono mediante análisis de varianza (ANOVA) y test de separación de medias, y en los casos en los que se hallaron diferencias significativas se realizó el test de Tukey

Se realizaron gráficas para evaluar las tendencias de comportamiento a partir de datos del potencial xilemático.





## 4. Resultados y discusión

### 4.1. Variables de zonificación

En este apartado se han evaluado las distintas variables, tanto individuales como combinadas, en función de distribución espacial. Para ello se han elaborado siete mapas mediante la realización de los correspondientes análisis clúster y posterior representación gráfica

#### 4.1.1. Variables individuales

En primer lugar, se presentan los mapas A, B y C (Figura 4.1) obtenidos a partir de las variables tratadas de forma individual. El mapa A se ha obtenido a partir del NDVI, el mapa B a partir de del número de racimos (NR) y el mapa C proviene de la conductividad eléctrica aparente del suelo (ECa). Para cada variable se han diferenciado tres clases: 1, 2 y 3, que hacen referencia a valores de la variable, alto, medio y bajo respectivamente.

En el mapa A y C, puede observarse como la variable NDVI y la ECa respectivamente, presentan similitudes en cuando a la zonificación. Además presentan una zonificación organizada. Sin embargo la variable NR presenta una zonificación desorganizada, que impide en la práctica la zonificación. A pie de campo, respecto a los valores del conductímetro, se observó que las zonas con alta conductividad correspondían a una zona fácilmente inundable, mientras que valores bajos pertenecían a las zonas más altas y probablemente aquellas en las que el agua infiltraba con más facilidad. La zona central muestra en general para las tres variables los valores más altos, esta zona coincide con una vaguada.

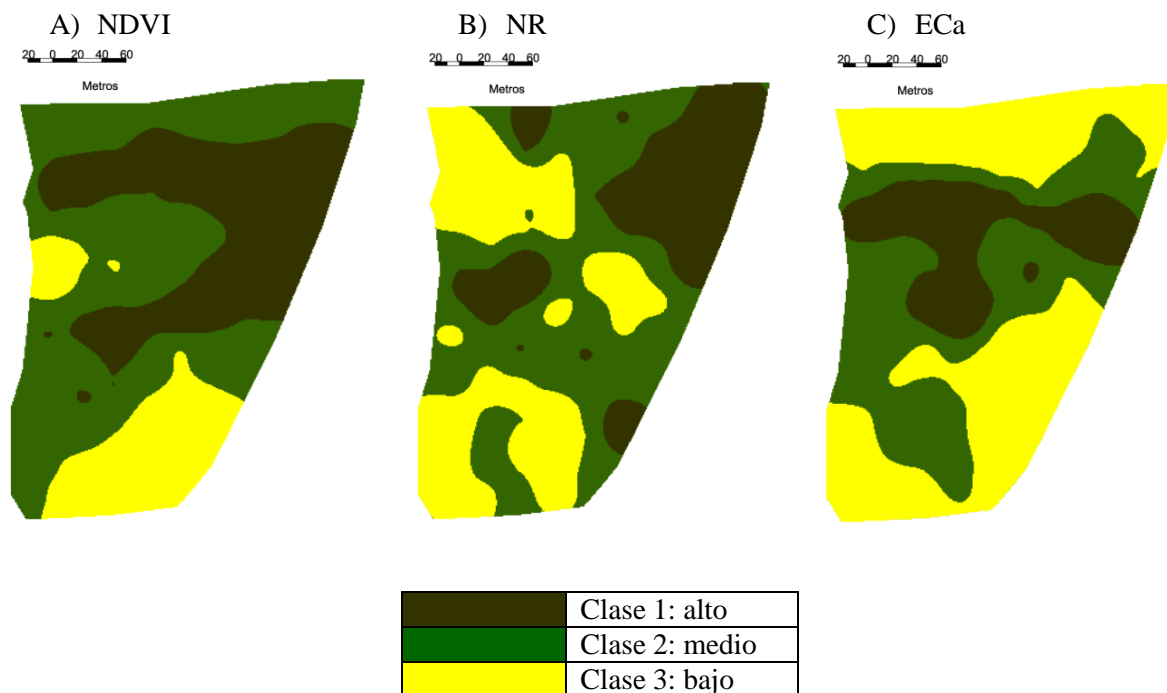


Figura 4.1: Mapas de clases de las variables individuales

#### 4.1.2. Variables combinadas

En cuanto a las combinaciones de los variables tenemos cuatro casos (Figura 4.2); presentamos en primer lugar tres combinaciones dos a dos: el mapa D (NDVI+NR), el mapa E (NDVI+ECa) y el mapa F (ECa+NR), y por último un caso de tres variables combinadas: el mapa G (NDVI+NR+ECa). Para cada variable se han diferenciado tres clases: 1, 2 y 3, que hacen referencia a valores de la variable, alto, medio y bajo respectivamente.

Los cuatro mapas parecen tener una estructura de zonificación organizada. La zona central muestra en general para las tres variables los valores más altos, esta zona coincide con una vaguada.

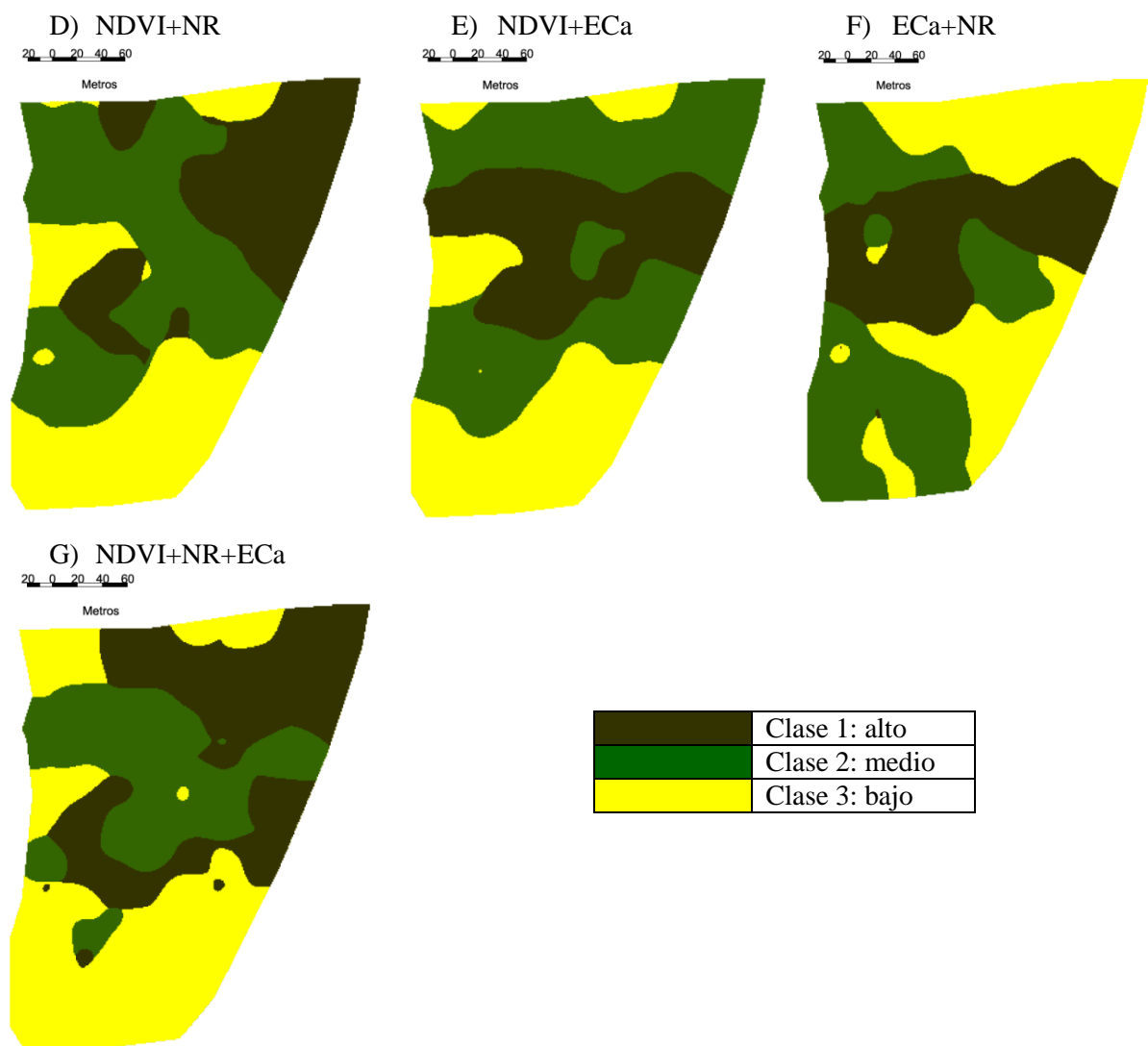


Figura 4.2: Mapas de clases de las variables combinadas

## 4.2. Evaluación del $\delta^{13}\text{C}$

En este apartado se ha comparado para cada punto (PZ), su valor de ratio isotópico con su valor de la variable, a fin de intentar validar si la variable en cuestión era buena indicadora del estado hídrico.

**Tabla 4.1: Análisis de varianza para las diferentes variables y combinaciones**

<i>Clase</i>	<i>NDVI</i>	<i>ECa</i>	<i>NR</i>	<i>NDVI+NR</i>	<i>NDVI+ECa</i>	<i>ECa+NR</i>	<i>NDVI+NR+ECa</i>
<i>1</i>	-27,014 (a)	-26,069	-26,507	-26,021	-26,409	-26,106	-26,552 (a)
<i>2</i>	-25,926 (b)	-26,232	-26,096	-26,163	-25,820	-26,005	-25,661 (b)
<i>3</i>	-25,220 (c)	-26,212	-26,021	-26,428	-26,200	-26,394	-26,254 (ab)
<i>Sign.</i>	0,000	0,853	0,171	0,329	0,162	0,281	0,006

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

De manera individual, el NDVI fue la única variable de las analizadas que permitió separar zonas de comportamiento hídrico distinto. En los contrastes a posteriori con el test de Tukey se obtienen tres grupos con los grupos formados con el NDVI. Puede decirse entonces que cuanto menor sea el ratio isotópico (mayor en valor absoluto) menor habrá sido el estrés sufrido por ese tejido.

La combinación de NDVI+NR+ECa permite una zonificación con menor grado de significación que empleando exclusivamente el NDVI. En los contrastes a posteriori con el test de Tukey se obtienen dos grupos que no coinciden con los grupos formados con el NDVI+NR+ECa.

De manera visual, en la mayoría de los índices, puede apreciarse que el  $\delta^{13}\text{C}$  es menor en aquellas clases de mayor valor.

## 4.3. Evaluación del potencial xilemático

En este apartado se ha representado gráficamente la evolución del potencial xilemático de los 11 PSH. Cada PSH posee a su vez asignado un valor de la variable de estudio en función de sus características. Para ello se han elaborado catorce gráficas. De tal forma que para cada variable está representada la evolución del potencial a las 11:00 horas y a las 14:00 horas.

En general, no hay diferencias significativas entre las zonificaciones de los potenciales y las de las variables, pero se han valorado las tendencias observadas a lo largo del ciclo.

Puede apreciarse con claridad el aumento del potencial conforme transcurren las semanas, puesto que el estrés hídrico va aumentando según va pasando el verano.

### 4.3.1. Evaluación de las variables individuales

En este apartado se van a comentar las tendencias observadas en las variables individuales (Figura 4.3): NDVI, NR y ECa. La variable NDVI parece que separa muy bien una de las clases respecto de las otras dos: En concreto la clase 3.

No obstante, la variable NR parece no afectar a la dinámica hídrica de la zona de estudio, debido probablemente a que la carga (número racimos por cepa o NR) es moderada en esta zona. Si bien esto sí que podría ocurrir en viñedos con zonas de carga más altas o menos variabilidad entre las zonas. La variable ECa es la que mejor permite separar zonas con un comportamiento hídrico distinto, sobre todo a partir de la tercera semana.

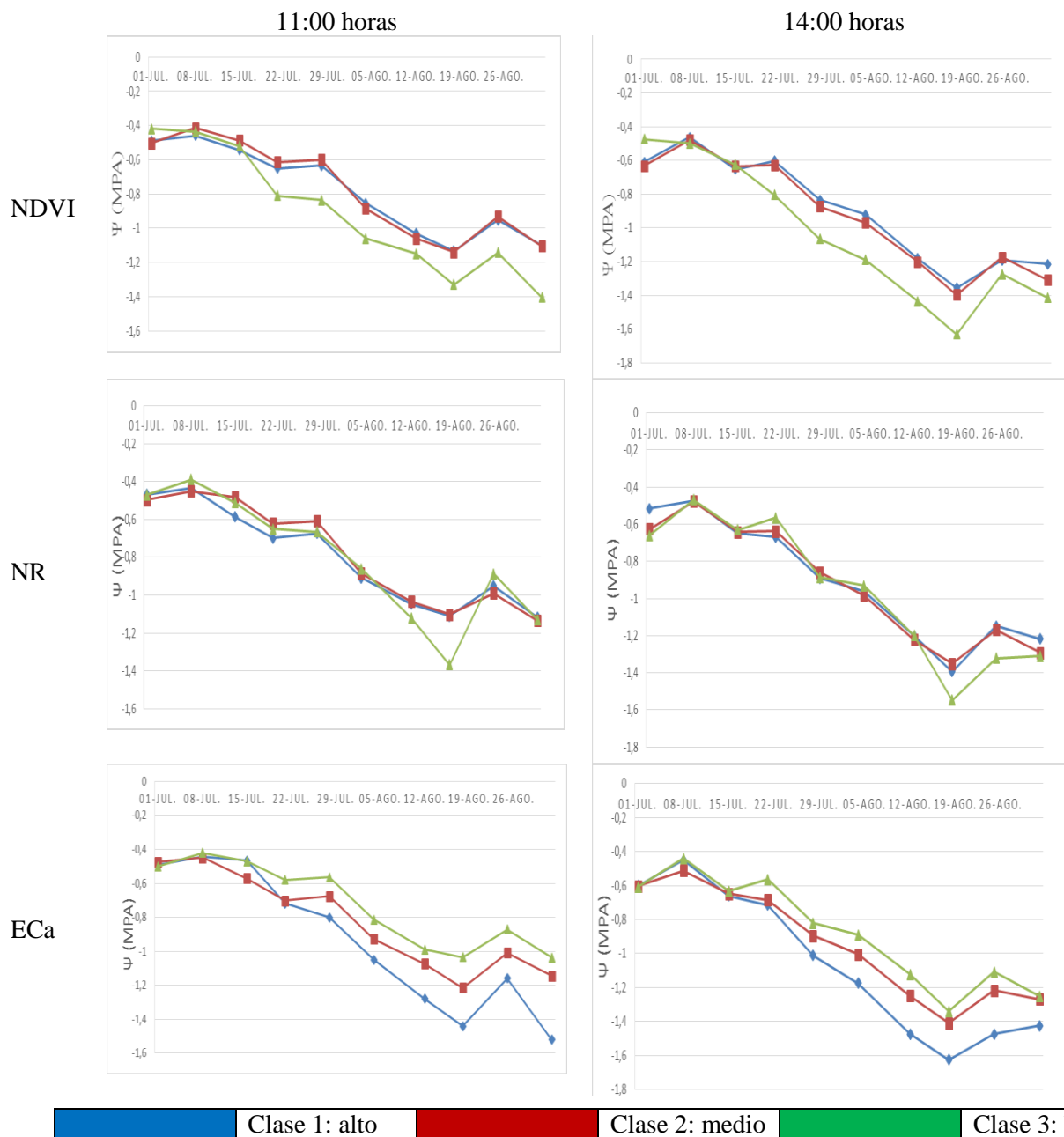


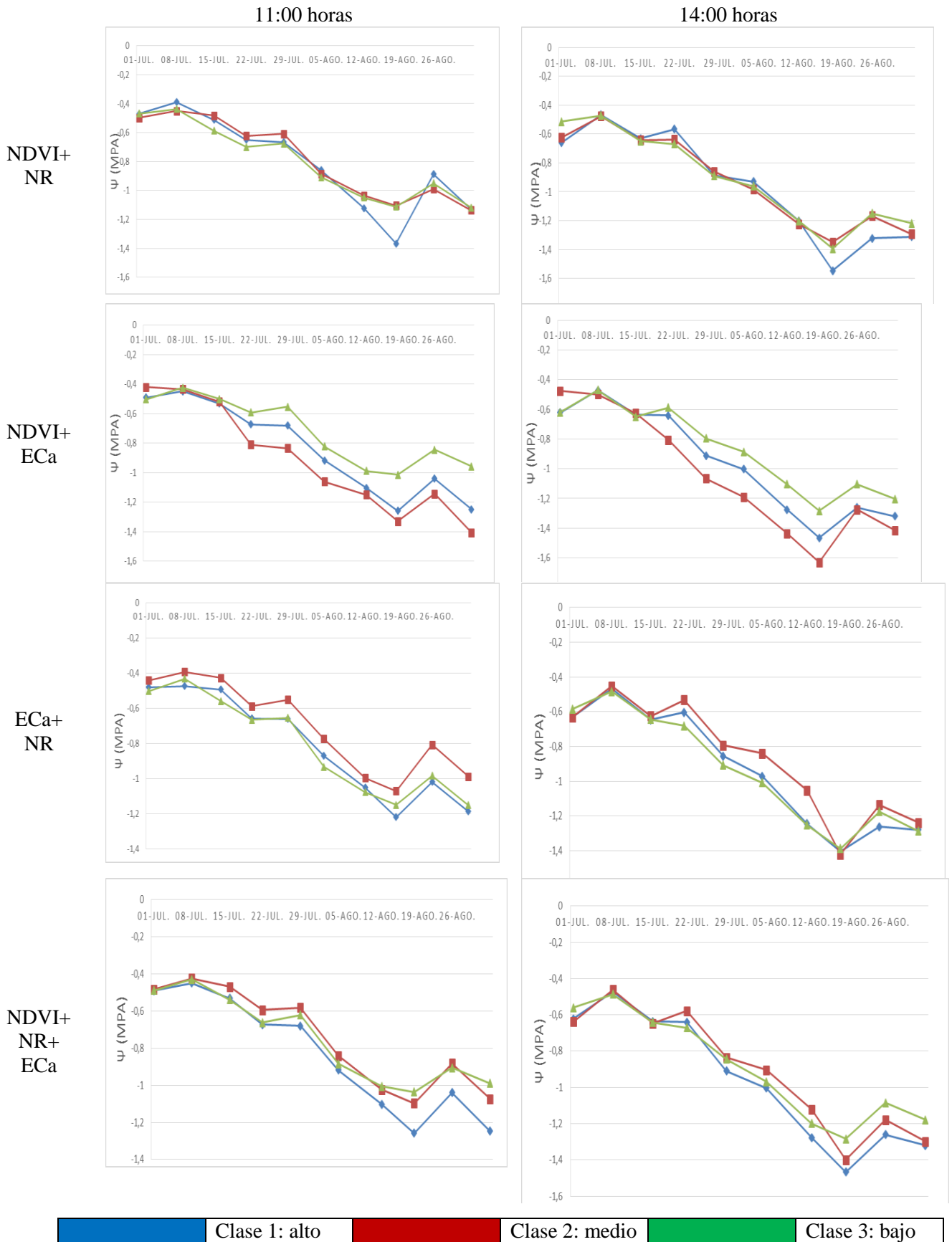
Figura 4.3: Gráficas de la evolución del potencial xilemático con las variables de zonificación individuales

### **4.3.2. Evaluación de las variables combinadas**

Se van a valorar las tendencias observadas en las gráficas de las variables combinadas (Figura 4.4).

Las variables NDVI+NR, ECa+NR y NDVI+NR+ECa no muestran de forma clara ninguna tendencia. Sin embargo, la variable NDVI+ECa muestra, a partir de la tercera semana, una muy clara distinción de zonas con comportamiento hídrico diferente.

Parece ser que las variables que, en las condiciones de estudio, más afectan al comportamiento hídrico son aquellas relacionadas con el suelo y el desarrollo vegetativo, NDI y ECa respectivamente.



**Figura 4.4: Gráficas de la evolución del potencial xilemático con las variables de zonificación combinadas**

## 5. Conclusiones

No existe en general, para las condiciones del estudio, una correspondencia muy clara entre las zonas definidas a partir de las variables NDVI, NR y ECa, ya sea de forma individual o de forma combinada, y el estado hídrico de la parcela.

De las combinaciones empleadas, el NDVI era la variable que más relación mantenía con el  $\delta^{13}\text{C}$ , mientras que la combinación de variables NDVI-ECa era la que mostraba una tendencia más clara al compararla con potencial xilemático medido in situ.

Sería necesario valorar en futuros trabajos la posibilidad de introducir otras variables, o combinaciones de las mismas, que ayuden a determinar el estado hídrico del viñedo y que puedan ser validados por medidas realizadas in situ, y de este modo, poder definir unidades diferenciadas de manejo.





## 6. Bibliografía

- Báguena, E.V., Barreiro, P. (2011). Evolución de la viticultura de precisión a nivel internacional. *Revista Vida Rural*. 15 de mayo de 2011.
- Basso, B., Sartori, L., Bertocco, M., Sierra, J.G., y Remeses, A.S. (2006). *Manual de agricultura de precisión. Conceptos teóricos y aplicaciones prácticas*. Eumedia.
- Cook, S. E., & Bramley, R. G. V. (1998). Precision agriculture. Opportunities, benefits and pitfalls of site-specific crop management in Australia. *Animal Production Science*, 38(7), 753-763.
- Crespy, A. (1991). *Viticultura de hoy*. 1ª edic. Argentina: Hemisferio Sur, ISBN: 950-504-462-3
- Hall, A., Lamb, D., W. Holzapfel & B. Louis, J. (2002), Optical remote sensing applications in viticulture. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 8(1), 36-47
- Hidalgo, L. (2002). *Tratado de viticultura general*. 3ª edic. Madrid: Mundi Prensa, ISBN: 84-7114-802-1
- Hidalgo, L. (2011), *Tratado de viticultura general vol. 1 y 2*. 4ª edic. Madrid: Mundi Prensa. ISBN: 978-84-8476-424-3
- Hoefs, J. (2009), *Theoretical and experimental principles. Stable Isotope Geochemistry*, 5th edition. Germany: Springer, ISBN: 3-540-40227-6
- Martínez De Toda, F. (1991), *Biología de la vid. Fundamentos biológicos de la viticultura*. Madrid: Mundi Prensa, ISBN 84-7114-313-5
- Proffit, T. Bramley, R. Lamb, D. & Winter, E. (2006). *Precision viticulture. A new era in vineyard management and wine production*. Winetitles. Adelaide. ISBN 9780975685044
- Reynier, A. (2013), *Manual de viticultura*. 11ª edic. Barcelona: Omega. ISBN: 978-84-282-1598-5
- Rodríguez-Pérez, J. R., Riaño, D., Carlisle, E., Ustin, S., & Smart, D. R. (2007). Evaluation of Hyperspectral Reflectance Indexes to Detect Grapevine Water Status in Vineyards. *American Journal of Enology and Viticulture*, 58(3), 302-317.
- Tardáguila, J., Diago, M.P. (2008). Viticultura de precisión: principios y tecnologías aplicadas en el viñedo. VI Foro Mundial del Vino. Logroño.
- Tardáguila, J., Diago, M.P., Baluja, J., Balda, P. y Oliveira, M. (2010.) Importancia de la variabilidad espacial del suelo en la viticultura de precisión. *Revista Vida Rural*. 1de junio de 2010.
- Tardáguila, J. Barragán, F., Yanguas, R. y Diago, M.P. (2008). Estimación de la variabilidad del vigor del viñedo a través de un sensor óptico lateral terrestre. *Revista Vida Rural*. 15de junio de 2008

#### Consultas en páginas web:

- Datos meteorológicos de Navarra. [Sitio web]. [Consulta: 12 de mayo de 2014]. Disponible en: <<http://meteo.navarra.es/>>.
- Gobierno de Navarra. “*Coyuntura agraria*”. [Sitio web]. [Consulta: 29 de mayo de 2014]. Disponible en: <http://www.cfnavarra.es/agricultura/coyuntura/coyuntura.htm>.
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Sitio web]. [Consulta: 28 de mayo de 2014]. Disponible en: <<http://www.magrama.gob.es/es/>>.
- Organización Internacional de la Viña y el Vino (OIV). [Sitio web]. [Consulta: 29 de mayo de 2014]. Disponible en: <<http://www.oiv.int/oiv/cms/index?lang=es>>.

#### Otros proyectos:

- Echevarria, N. (2010). “Evaluación del interés del Índice Vegetativo Diferencial Normalizado (NDVI) para la definición de Unidades de Manejo Diferenciado del Viñedo en la Rioja Alavesa”.
- Eraso, J. (2011). “Evaluación de métodos de estimación del estado hídrico de la variedad Tempranillo para la toma de decisiones de riego”.
- García, J. (2010). “Comparación de métodos para la determinación del estado hídrico en viñedos de la variedad Tempranillo”.
- Urretavizcaya, I. (2013). “Delineación de unidades de manejo diferenciado y utilización de modelos de extrapolación espacial como herramientas de gestión de la variabilidad intra-parcelar en viñedos de Rioja Alavesa”