



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Escola d'Enginyeria Agroalimentària
i de Biosistemes de Barcelona

Comparativa d'imatges obtingudes amb satèl·lit i amb dron per la caracterització de la vinya

Treball final de grau
GRAU EN ENGINYERIA DE CIÈNCIES
AGRONÒMIQUES

Autor: Ferran Puyó Masagué

Tutor: Fran Garcia Ruiz

Unitat de Mecanització Agrària
(UMA)

19 / setembre / 2021

Índex	
Resum:	1
Resumen:.....	2
Abstract:	3
Índex d'acrònims	4
1. Introducció.....	5
2. Objectius.....	8
3. Materials i mètodes	9
3.1. Emplaçament dels assaigs	9
3.2. Disseny de mostreig de ceps.....	10
3.3. Mesures manuals de vegetació.....	10
3.4. Adquisició de les imatges.....	11
3.4.1. Característiques del dron i imatges	11
3.4.2. Característiques del satèl·lit i imatges	12
3.5. Extracció dels valors espectrals per cep	12
3.5.1. Extracció de dades dels ceps.....	12
3.5.2. Extracció dels valors d'NDVI, NDRE i àrea projectada	13
3.6. Anàlisi de dades.....	14
3.6.1. Dades pures.....	15
3.6.2. Dades de varietats	15
3.6.3. Dades de mitjanes	15
3.6.4. Dades de màxims.....	15
3.6.5. Test de significació i test de normalitat	16
4. Resultats i discussió.....	17
4.1. Regressions lineals amb les dades pures cep a cep	17
4.1.1. Set de dades complert	17
4.1.2. Ceps amb separació per varietat o BBCH.....	19
4.2. Regressions lineals amb les dades agrupades per parcel·la	20
4.2.1. Resultats de les regressions lineals per mitjanes i màxims.....	21
4.3. Figures representatives per dron	22
4.4. Figures representatives per satèl·lit.....	24
4.5. Prova de normalitat.....	25
4.6. Millores de model	26
5. Conclusions.....	28
6. Bibliografia.....	29

Resum:

Caracteritzar la canòpia vegetal és clau per determinar la quantitat correcta de producte fitosanitari que s'ha d'aplicar en un cultiu. Des de fa unes dècades s'han desenvolupat nous sistemes que permeten reduir l'impacte ambiental d'aquests productes. "Cultius especials" tals com la vinya no han experimentat les millores d'aquesta tendència de la mateixa manera que els cultius extensius. El present estudi pretén trobar una fórmula matemàtica, basada en la correlació entre índexs de vegetació i mesures de vegetació, que pugui fer-se servir en els "cultius especials". Amb la fórmula es busca ajustar la dosi de producte fitosanitari també en aquests tipus de cultius. Els índexs de vegetació s'obtenen a partir de càmeres multiespectrals equipades en drons (UAV) i satèl·lits. Per altra banda, les mesures de vegetació encara es prenen a mà, fet que suposa un clar inconvenient. Amb l'ús de software especialitzat s'ha aconseguit prendre imatges amb les càmeres i determinar el normalised differential vegetation index (NDVI) i el normalized difference red edge (NDRE). La caracterització manual ens permetrà calcular el tree row volume (TRV) i el leaf wall area (LWA), els quals són les principals variables fetes servir en les correlacions. Cinc parcel·les de vinya van ser objecte d'estudi, resultant en un total de quatre varietats de raïm diferent.

Resumen:

Caracterizar el dosel vegetal es clave para determinar la cantidad adecuada de producto fitosanitario que se debe aplicar en un cultivo. Desde hace unas décadas se llevan desarrollando nuevos sistemas que permiten reducir el impacto ambiental de estos productos. “Cultivos especiales” así como el viñedo no han llegado a experimentar las mejoras de esta tendencia de la misma forma que los cultivos extensivos. En el presente estudio se pretende encontrar una fórmula matemática, basada en la correlación entre índices de vegetación y medidas de vegetación, que se pueda usar en los “cultivos especiales”. Con la fórmula se busca ajustar la dosis de producto fitosanitario también en estos cultivos. Los índices de vegetación se obtienen gracias a cámaras multispectrales equipadas en drones (UAV) y satélites. Por otro lado, las medidas de vegetación se siguen realizando a mano, lo cual supone un claro inconveniente. Con el empleo de software especializado se ha conseguido obtener imágenes de las cámaras y determinar el normalised differential vegetation index (NDVI) y el normalized difference red edge (NDRE). La caracterización manual nos permitirá calcular el tree row volume (TRV) y el leaf wall area (LWA), que son las principales variables usadas en las correlaciones. Cinco viñedos fueron objeto de estudio, resultando en un total de cuatro variedades de uva diferentes.

Abstract:

Canopy characterisation is the key to determinate the right amount of pesticide that has to be applied in a crop. Since the last decades new systems have been developed in terms of reducing the environmental impact of those products. "Specialty crops" such as vineyard hasn't experimented those improvements in the same way as the field crops. This study aims to finding a mathematical formula, based on the correlations between vegetation indexes and vegetation measurements, that can be used in the "specialty crops". With this formula we want to adjust the dose of pesticides in those type of crops too. The vegetation indexes are obtained from the multispectral cameras equipped in drons (UAV) and satellites. Meanwhile, the vegetation measurements are done by hand, which is a very big withdrawn. Using specific software and statistical analysis we are capable of taking the images from the cameras and determine the normalised differential vegetation index (NDVI) and the normalized difference red edge (NDRE). The manual characterisation will allow us to calculate the tree row volume (TRV) and the leaf wall area (LWA), which are the main variables used in the correlations. Five different vineyards are involved in this project, containing four different varieties of grapes.

Índex d'acrònims

- SUR: Systematic Uniform Random. Sistema en el que se separa tota la mostra en un període (m) preestablert en base a l'estructura del camp. El període de vinya fa referència al nombre de plantes entre els ceps mostrejats. El període de fileres fa referència al nombre de plantes entre les fileres mostrejades. La filera de ceps a partir de la que es comença a comptar és un valor aleatori entre 1 i (m). El període de vinya es determina en funció de característiques físiques de la parcel·la, tals com (amplada, llargada, orientació, separació entre fileres...).
- SRS: Simple Random Sampling. Sistema pel qual qualsevol participant de la població té la mateixa probabilitat de ser escollit com a mostra.
- BBCH: Escala que permet codificar de forma uniforme l'estadi fenològic en el que es troba qualsevol espècie de planta mono- o dicotiledònia.
- EPPO: Organització Europea i Mediterrània per la Protecció vegetal. Organització que ha produït un gran nombre de normes d'estandardització en termes d'aplicació de fitosanitaris i quarantena de plantes.

1. Introducció

L'agricultura està immersa en un canvi de paradigma productiu on cada cop més, s'estan introduint noves tecnologies que permeten millorar la gestió agronòmica dels conreus arreu del món. Sistemes que en un origen no estaven dissenyats per ser útils en tasques agrícoles, s'han adaptat i millorat per tal d'optimitzar processos, reduir costos i permetre ser més respectuosos amb les emissions de contaminants. La navegació GPS va ser el detonant de l'anomenada agricultura de precisió, van seguir els sensors [1-3] que permeten monitoritzar els sòls i els cultius i recentment s'ha generalitzat la computació al núvol i el desenvolupament d'aplicacions mòbils enfocades a diferents processos agronòmics. En un inici el preu de la tecnologia era substancialment més elevat, però això ha canviat radicalment i ara els components tecnològics comencen a ser abastables pels agricultors.

Tot i la creixent demanda que està experimentant el mercat tecnològic [4,5], l'adopció dels nous sistemes és encara pobra. Hi ha una extensa quantitat d'oferta per suplir diverses tasques però molts agricultors segueixen sense voler donar el pas [6,7]. La utilització de les tecnologies agrícoles depèn en gran mesura del cultiu amb el que s'estigui treballant, la mida de l'explotació i el territori, així com d'altres factors. D'un quant temps ençà, una de les tecnologies que més rellevància ha tingut dins de l'agricultura és la teledetecció, que s'ha fet servir per a la presa d'informació per una millor gestió dels cultius. La seva implementació en el sector es va estenent poc a poc i any rere any va evolucionant de la mà de les necessitats dels agricultors. Va començar amb els satèl·lits [8-10] i segueix a dia d'avui amb els drons [11-13] i els sistemes terrestres.

La teledetecció permet realitzar un monitoratge periòdic dels cultius [14-18]. Analitzant el creixement de les plantes, la seva salut, l'estrès que pateixen... Es pot arribar a entendre com estan progressant els cultius durant la temporada i per tant, quina ha de ser la gestió dels mateixos en les seves diferents etapes. Com més complet sigui el monitoratge més informació es tindrà per fer una gestió més precisa del cultiu. Un dels punts forts de la teledetecció és la capacitat que ens brinda per poder caracteritzar zones agrícoles concretes. Parant atenció a grups de plantes de forma específica i entenent que un cultiu està format per múltiples elements. Cada planta és diferent i no té perquè comportar-se d'igual forma davant dels estímuls exteriors. És erroni tractar un cultiu com a un sol element, no tenint en compte l'heterogeneïtat que sempre existirà en una explotació agrícola [19].

La utilització de satèl·lits per tal d'obtenir ortofotos de parcel·les agrícoles va començar a existir l'any 1970, amb el satèl·lit NOAA i el sensors AVHRR. En els següents anys, satèl·lits com el LANDSAT [20-24], Sentinel [25] i el conjunt de satèl·lits PlanetScope van prendre la davantera i es mantenen a dia d'avui com les opcions més utilitzades. Les imatges que s'obtenen a partir de satèl·lits són en alguns casos de domini públic. Solen ser imatges sense analitzar que necessiten de programes d'anàlisi per tal de poder ser aprofitades com a eina de gestió agrícola. Aquesta necessitat d'anàlisi i interpretació agronòmiques ha fet que apareguin una gran quantitat d'empreses que ofereixen aquests serveis. Això facilita l'ús d'aquests recursos i permet als agricultors introduir-se en el món de la teledetecció.

L'avantatge que presenta el dron respecte el satèl·lit és la mida del píxel o altrament dit resolució espacial. Amb el dron se'n pot obtenir una de molt més petita.. Per tant, la precisió i netedat de les imatges de dron és molt més elevada, el que possibilita la segmentació dels píxels que pertanyen al cultiu, descartant tots aquells que introdueixen soroll a l'anàlisi (ombres, sòl, etc.). En funció de la càmera que es tingui equipada i d'altres paràmetres com: velocitat de creuer, alçada de vol o velocitat del vent, es poden aconseguir mides de píxel de pocs mil·límetres. Amb

els satèl·lits, per altra banda, les resolucions espacials solen estar de l'ordre de 3 a 30 m·píxel⁻¹, el que impossibilita la segmentació de la vegetació del cultiu. Aquesta limitació se supleix amb la facilitat d'adquisició de les imatges, a més de la alta resolució temporal de la que disposen. Tenir en compte tots aquests aspectes és necessari abans de decantar-se per una o altra alternativa, ja que en molts casos la precisió ha d'adaptar-se amb les possibilitats de gestió de la maquinària a camp.

Gràcies a la teledetecció s'ha aconseguit mesurar paràmetres específics de molts cultius. Poder calcular la densitat de les plantes, el dèficit hídric i el índex d'NDVI [19]. són només alguns dels exemples que mostren com de revolucionària ha sigut aquesta tecnologia. Gran quantitat d'estudis s'han fet ressò de la teledetecció en cultius i han demostrat la seva importància en el món modern.

Els mal ús dels productes fitosanitaris i la seva mala dosificació és un dels problemes més important de l'agricultura actual. Molt sovint a l'hora de determinar el volum d'aplicació per una parcel·la i cultiu, no es té en compte un aspecte clau com és el de la mida i característiques de la vegetació [13,26-28]. No només això, sinó que en molts casos, i per un conjunt de parcel·les, no es tenen en compte les diferències d'àrea foliar en cadascuna d'elles. En realitzar una aplicació igual a tot el cultiu i parcel·les s'està fent un mal ús dels fitosanitaris. Algunes plantes reben la dosi adequada però d'altres no. El resultat és resumeix en plantes sobre-dosificades en alguns casos o infra-dosificades en d'altres, el que comporta una pèrdua de producte o un risc d'expansió de la plaga o malaltia depenent del cas. Tot plegat impactarà en la sostenibilitat mediambiental i econòmica de l'explotació. Importants iniciatives tals com el Green Deal Europeu [29] i més en concret l'estratègia Farm to Fork pretenen solucionar aquest i altres conflictes de caire ambiental amb l'ajut de la transformació social i econòmica de la Unió Europea. L'objectiu més important del pacte és reduir la utilització dels productes fitosanitaris químics en un 50% per l'any 2050 [30].

En l'intent de reduir l'aplicació de fitosanitaris i d'adaptar les dosis a les necessitats dels cultius s'han portat a terme múltiples investigacions i estudis tals com el de Campos et al. [11]. Aquests pretenen aconseguir les fites establertes pel Green Deal [29] mitjançant la creació de models que caracteritzin l'estructura de la vegetació i diferenciïn diverses zones de tractament dins de la parcel·la. Un cop més, la teledetecció es presenta com una opció prometedora per ajudar a assolir els objectius de sostenibilitat.

Tot i així, en la viticultura actual, el problema va més enllà d'aconseguir desenvolupar un model per al càlcul del volum d'aplicació òptim. Per tal de poder aprofitar-lo i implementar-lo en les operacions d'aplicació de fitosanitaris, cal disposar de màquina avançada que permeti la lectura dels mapes d'aplicació a més de l'ajust a temps real del volum de caldo desitjat. Explotacions destinades a cultius extensius ja se serveixen d'aquest tipus de maquinària, en canvi, en el cas dels cultius arboris, com per exemple la vinya [15,31], la seva implementació és encara molt incipient. Hi ha poques opcions al mercat, i difícilment les màquines venen equipades de sèrie amb sistemes d'aplicació variable. Amb l'afany d'establir un punt mig entre la gestió convencional de l'aplicació de fitosanitaris en vinya i una gestió completament variable segons les característiques de la vegetació en cada zona del cultiu, aquest treball accepta la situació actual en quant a la situació actual dels viticultors i proposa poder fer una aplicació variable a nivell de finca, on a cada parcel·la es calcularà el seu volum d'aplicació òptim segons la caracterització mitjana de la vegetació per parcel·la. En l'actualitat existeixen aplicacions com per exemple DOSAVIÑA® [32] que requereixen que l'agricultor mostregi intensivament el camp per tal d'aconseguir una primera aproximació de les seves característiques. Encara que les

aplicacions siguin funcionals i puguin ajudar a l'agricultor, molt sovint, aquests no les fan servir degut a l'esforç extra que representa el tenir un mostreig de les plantes representatiu. Tenint en compte aquestes realitats, el fet de tenir un sistema que de forma automàtica i sense la necessitat de recórrer el camp pugui aportar un valor aproximat de volum d'aplicació per parcel·la es considera un avenç significatiu respecte a la situació actual.

Per això aquest treball proposa la creació de diferents regressions lineals que relacionin els valors de teledetecció amb les mesures manuals del tree row volume (TRV) [33-35] i leaf wall area (LWA) [36] com a paràmetres descriptors de les característiques de la vegetació.

2. Objectius

L'objectiu general del treball final de grau és investigar les possibles relacions entre dades extretes a partir de tècniques de teledetecció i mesures de caracterització de vegetació manuals, amb la finalitat de poder proposar una estimació de la caracterització de la vegetació a nivell de parcel·la per diferents estadis fenològics de la vinya.

Els objectius específics d'aquest treball són:

- Implementar un protocol de caracterització de la vegetació mitjançant mesures manuals a camp i informació geomètrica i espectral amb l'ús d'imatges adquirides amb drons i nano satèl·lits.
- Comparar l'aptitud de les imatges derivades d'índexs obtingudes amb càmeres multispectrals equipades a un satèl·lit i a un dron.
- Analitzar quin índex de vegetació -NDVI, NDVIxAP, NDRE o NDRExAP- és el més adequat per caracteritzar les vinyes seleccionades.
- Comprovar que les relacions amb una R^2 elevada compleixen amb els requeriments estadístics i que per tant es poden fer servir per crear un model.
- Trobar de quina forma podríem millorar les relacions presentades per caracteritzar les vinyes.

3. Materials i mètodes

Per la realització d'aquest treball es van realitzar els següents processos en aquest ordre: 1) Vols amb dron i amb satèl·lit a les parcel·les de vinya seleccionades i procés fotogramètric per obtenir les ortofotos. 2) Presa de mesures manuals a camp en el mateix moment del vol de dron. 3) Calibratge d'imatges i extracció dels valors espectrals dels ceps. 4) Anàlisi de les dades. 5) Relació de variables i obtenció de regressions. 6) Selecció i validació estadística dels models. 7) Propostes de millora del model.

3.1. Emplaçament dels assaigs

Els assaigs es van dur a terme en una de les zones de màxima importància vinícola de Catalunya, al Penedès, més concretament als municipis de Torrelavit i el Pla del Penedès (figura 1). Es va comptar amb un total de cinc parcel·les de vinya que en total tenien quatre varietats de raïm (Chardonnay, Merlot, Cabernet Sauvignon i Macabeu) (taula 1). Les parcel·les de la A a la D estaven situades a Torrelavit (Barcelona, Espanya); la parcel·la E estava situada a el Pla del Penedès (Barcelona, Espanya). Tots els ceps es trobaven en plena producció i estaven conduïts en espatllera amb una poda de doble cordó. A més, quan els brots tenien més de 10 cm de llargada és quan s'intervenïa amb una poda en verd. Els ceps es tenien una edat compresa entre els 23 i 33 anys, i no disposaven de sistema d'irrigació. A les parcel·les A-D el terreny tenia una pendent lleugera d'entre 5-10%, d'altra banda, la parcel·la E no tenia pendent amb una inclinació de 0%. El control de les males herbes es realitzava sota els ceps i entre fileres mitjançant llaurades sistemàtiques.

Taula 1. Característiques de les cinc parcel·les objectes d'estudi.

Parcel·la	Varietat	Nº ceps mostra	Dist. Filera (m)	Dist. Ceps (m)	Àrea (ha)	X Coord. (m)	Y Coord. (m)	Sist. de Referència
A	Chardonnay	72	2,2	1,2	2,35	392,194	4,587,999	ETRS 89 UTM31
B	Merlot	52	2,2	1,2	2,97	392,234	4,587,843	
C	C. Sauvignon	32	2,2	1,2	1,53	391,856	4,588,055	
D	C. Sauvignon	58	2,2	1,2	3,14	391,744	4,588,107	
E	Macabeu	81	2,8	1,2	4,90	391,265	4,584,841	

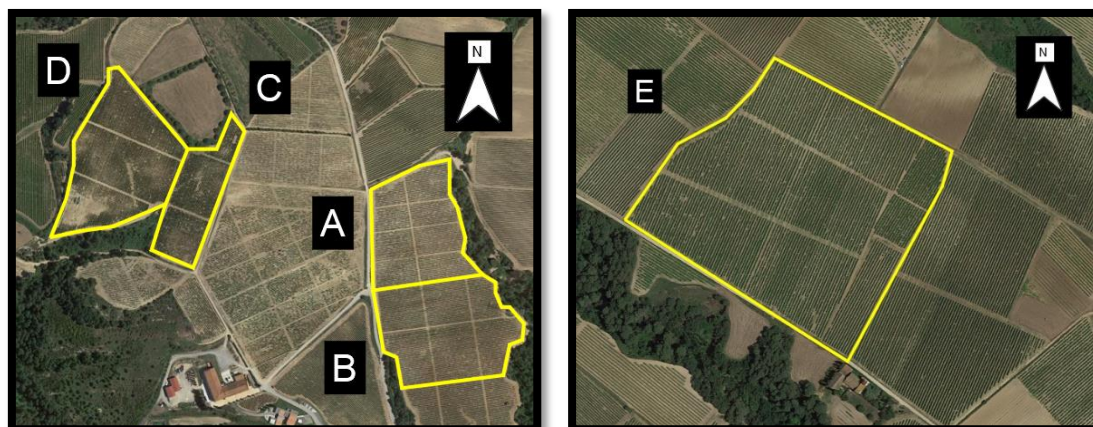


Figura 1. Forma del perímetre de les parcel·les.

3.2. Disseny de mostreig de ceps

Un punt essencial per tal de poder desenvolupar les regressions era la de seleccionar una mostra representativa dels ceps de totes les parcel·les. Seguint el treball de Campos et al. [42], el disseny de mostreig escollit va ser el (SUR) o "systematic uniform random". Aquest mètode és millor que el seu similar (SRS) o "simple random sampling", sobretot quan es tracta d'una població heterogènia. Amb aquest mètode permet distribuir la mostra uniformement de tota la superfície.

Tots els ceps que es van seleccionar per mostrejar, es van marcar amb una cinta distintiva per tal de poder identificar-los durant la temporada i poder fer el seguiment de l'evolució. A més, en el primer mostreig, els ceps seleccionats es van marcar amb una marca de calç al terra per facilitar la seva detecció des de les imatges aèries (figura 2).



Figura 2. Presa de mesures manuals i cep emparrat marcat amb calç i cinta distintiva.

3.3. Mesures manuals de vegetació

Les mesures manuals es van realitzar en tres moments diferent de l'estadi fenològic del cep. Els tres estadis són quan el cep està en BBCH 59 amb la primera floració, BBCH 75 amb els raïms en mida de pèsol i BBCH 81 amb el fruit en inici de verol.

La caracterització de la vegetació s'ha dut a terme mesurant els paràmetres més representatius de les vinyes. Es van prendre mesures d'alçada i amplada segons els estàndards EPPO [37]. Això implica que en el moment de la mesura de la vegetació, es deixava fora el 5% d'aquesta per registrar únicament el 95% de la mesura de la vegetació. En cadascun dels ceps es van realitzar les mesures per dues persones diferents, així doncs, el resultat del valor utilitzat en l'estudi prové de la mitjana dels valors obtinguts pels mesuradors. Amb les mesures d'amplada i alçada de la vegetació es va calcular el tree row volume (TRV) i el leaf wall area (LWA), els qual seran els utilitzats per calcular el volum d'aplicació de producte fitosanitari. Les fórmules de càlcul del TRV [33-35] (fórmula 1) i el LWA [36] (fórmula 2) són:

$$TRV \left(\frac{m^3}{ha} \right) = \frac{Alçada (m) * Amplada (m) * 10000}{Distància entre fileres (m)} \quad (1)$$

$$LWA \left(\frac{m^2}{ha} \right) = \frac{2 * Alçada (m) * 10000}{Distància entre fileres (m)} \quad (2)$$

3.4. Adquisició de les imatges

3.4.1. Característiques del dron i imatges

Per tal d'obtenir informació de l'evolució dels ceps durant la campanya es van realitzar tres vols amb dron, cadascun en un estadi fenològic diferent coincidint amb les dates de les mesures manuals dels ceps. El primer es va fer el dia 12 de maig de 2019, els ceps es trobaven en un estadi fenològic BBCH 59 [38]; el segon vol es va fer el dia 16 de juny de 2019 (BBCH 75); l'últim vol es fer el dia 15 de juliol de 2019 (BBCH 81). El dron que es va fer servir era del tipus hexacòpter (model: CondorBeta, Dronetools SL, Sevilla, Espanya). L'aparell en qüestió estava equipat amb dos bateries de 6000mAh (88.8 Wh) cadascuna, proporcionant-li una autonomia d'uns 25 minuts. La càmera multiespectral equipada al dron era una (Micasense, Seattle, WA, USA) que comptava amb cinc bandes espectrals centrades a les longituds d'ona: 475 nm pel Blau amb una amplada de banda de 20 nm; 560 nm pel Verd amb una amplada de banda de 20 nm; 668 nm pel Vermell amb una amplada de banda de 10 nm; 717 nm pel RedEdge amb una amplada de banda de 10 nm; i 840 nm pel NIR amb una amplada de banda de 40 nm. Amb aquestes bandes espectrals podíem calcular diferents índexs de vegetació en els que estàvem interessats.

L'alçada de vol del dron va ser de 95 m per sobre del nivell del sòl i a una velocitat de creuer de 6 m s^{-1} . Cada fotografia que prenia la càmera s'hauria de ajuntar amb les altres per tal de crear la ortofoto. Per tal d'evitar tenir errors en els límits de les imatges es van realitzar solapaments en aquestes. Es van solapar el 80% dels píxels en la direcció de vol del dron i el 60% dels píxels en la direcció transversal del vol del dron (figura 3). En la següent imatge es mostra com quedaran solapades les fotografies obtingudes pel dron.

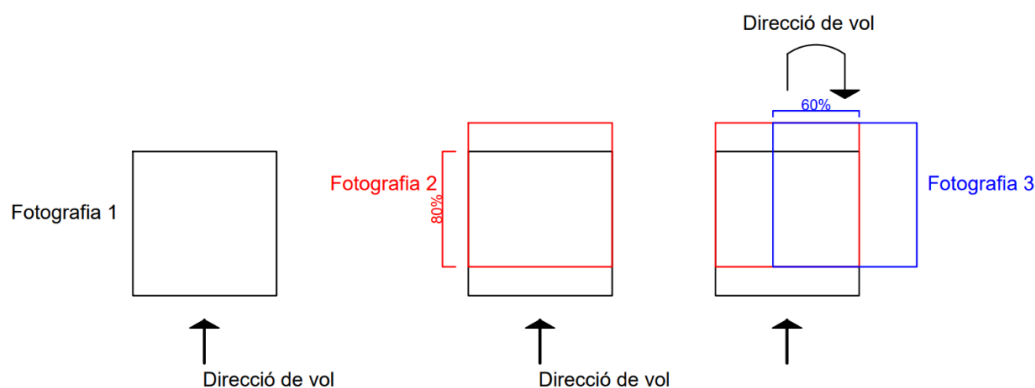


Figura 3. Solapament de les imatges per crear una ortofoto.

Un cop ja es van aconseguir totes les ortofotos o imatges espectrals de les diferents parcel·les era necessari que fossin calibrades radiomètricament per tal de permetre la comparació temporal de les dades extretes. Els vols es van realitzar en diferents moments de l'any i les condicions ambientals eren diferents en cada moment, com també ho era la posició i distància del sol. Aquests i altres paràmetres externs fan que les imatges s'hagin de calibrar per tal de permetre la comparació temporal.

Per calibrar les imatges es van fer servir uns patrons de calibració que es van col·locar al centre de la parcel·la (figura 4) i cadascuna compta amb el seu percentatge de reflectància de grisos corresponent (22, 32, 44 i 51%). Els panells de calibració apareixen a la mateixa escena que la

vegetació, per tant, els paràmetres de llum són iguals. Amb el programari d'anàlisi d'imatge "ImageJ" es va extreure els valors mitjans dels píxels per a cadascun dels patrons de calibració. D'aquesta forma es va poder construir una funció de calibració per a cada banda espectral. La funció de calibració es va establir de tipus potencial, d'aquesta manera, per a cada banda espectral, aplicant la funció de calibració sobre qualsevol píxel de la imatge es va passar de valor digital a un valor calibrat de reflectància de 0 a 100%.

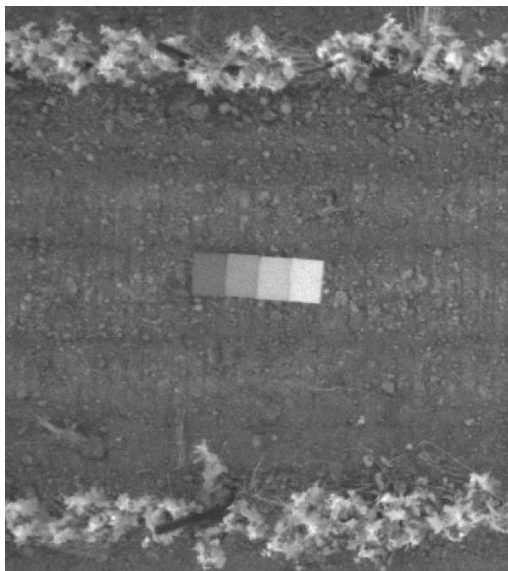


Figura 4. Panells de calibració radiomètrica de les imatges.

Val a dir que cada cop que es realitzava un vol de dron s'havien de col·locar i fotografiar els panells de calibració.

3.4.2. Característiques del satèl·lit i imatges

El satèl·lit amb el que es va treballar era el PlanetScope (PS), un conjunt comercial de nanosatèl·lits (<5gk) amb 130 triple CubeSat anomenats Dove (Planet Labs Inc., San Francisco, CA, USA). Les bandes espectrals del sensor del PlanetScope són: 455-515 nm pel Blau; 500-590 nm pel Verd; 590-670 nm pel Vermell; 780-860 nm pel NIR. Tot i que es tracti d'una companyia privada, hi ha part de les seves dades que ofereixen als investigadors de forma oberta. Els satèl·lits Dove estan equipats amb sensors d'escàner lineals de quatre bandes espectrals: el blau, el verd, el vermell i en NIR. Els satèl·lits prenen imatges pràcticament cada dia i es podrien descarregar al moment. Cada imatge del PS inclou 197 km² de territori. Totes les parcel·les apareixien en una sola imatge, fet que va facilitar l'anàlisi.

En el cas del satèl·lit, la mida del píxel és bastant més gran a la del dron. Els píxels obtinguts amb el satèl·lit tenien una resolució de 3 m*píxel⁻¹. Com la vinya es un cultiu arbori plantat en línies, s'ha de tenir en compte que cada píxel del satèl·lit contenia informació espectral de cultiu, del sòl nu i ombres. Tot i la gran diferència entre la resolució espacial del dron i la del satèl·lit, l'ús de satèl·lits suposa un mètode molt més barat i ràpid que el dron.

3.5. Extracció dels valors espectrals per cep

3.5.1. Extracció de dades dels ceps

Amb les imatges de dron ja calibrades es va procedir a l'extracció dels contorns dels ceps que es van mesurar de forma manual a camp. D'aquesta manera, disposant d'un polígon que delimiti

l'àrea de cada cep mostrejat, es poden extreure els valors mitjans de qualsevol índex espectral o geomètric desitjat. Tots els processos que es descriuran a continuació s'han realitzat amb el programa QGIS [39] i s'han hagut de repetir per cada vol realitzat i per cada parcel·la. A la figura 5 es mostra una representació gràfica del procés d'anàlisi.

- Carregar les capes calibrades i amb la calculadora ràster generar una capa de NDVI [40]. El càlcul de la capa NDVI es realitza amb les capes de reflectància del Vermell i del NIR fent servir la fórmula 3:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (3)$$

- Crear una capa vectorial de punts per tal de tenir localitzat cada cep mostrejat dins de la parcel·la per futurs vols. Aquest procés es va fer de forma manual a partir de les marques de calç que es van fer físicament a la parcel·la i que eren distingibles a la imatge aèria (a).
- Crear un buffer de la mida del marc de plantació que permeti tenir tots els píxels del cep mostra en el seu interior. (b).
- Trobar el valor de transparència de NDVI que ens permeti veure tots els píxels del cep mostrejat que continguin informació. Això serveix per trobar el valor a partir del qual podem discriminar els píxels de sòl dels píxels de cep. El sòl presenta valors de NDVI, però molt baixos. Els valors de NDVI dels ceps són més alts. (c).
- Crear una màscara que discrimini els valors de NDVI que tinguin un valor inferior al valor de NDVI de transparència. Així ens quedem amb una màscara que conté valors de cep únicament. (d).
- Fem un retall de la màscara amb la capa del buffer. Ara tindrem una capa ràster amb només els ceps de mostreig amb la seva informació de NDVI. (e).
- Amb a funció "r-to-vect" vectoritzem la capa raster i aconseguim una capa vectorial en la qual podem accedir a la seva "taula d'atributs".
- Com a resultat tenim el polígon que defineix el contorn de cada cep monitoritzat per a cada data de vol.

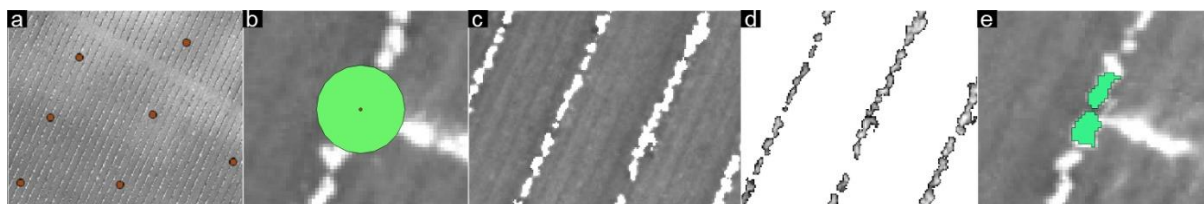


Figura 5. Representació visual del procés d'extracció de dades. a). Punts que indiquen la posició dels ceps mostra; b). Buffer del cep; c). Diferenciació dels píxels que són vegetació i dels que no; d). Aïllament només dels píxels que tenen vegetació; e). Cep de mostra aïllat amb la seva informació.

3.5.2. Extracció dels valors d'NDVI, NDRE i àrea projectada

Un cop tenim el contorn que ocupa cada cep mostrejat, el següent pas consistia en extreure els valors mitjans dels índex espectrals calculats a partir de les imatges dron i satèl·lit. A més del valor d'NDVI, pel cas del dron es va decidir extreure també el valor d'àrea de vegetació projectada o AP. L'AP és un valor que s'obté multiplicant el número de píxels que es troben dins de cada polígon descrit en el pas anterior, per l'àrea de cada píxel, que en aquest cas era coneguda a partir de la resolució espacial de cada píxel. Per tal de poder calcular l'àrea projectada, és necessari disposar d'una resolució de la imatge que et permeti disposar de

suficients píxels dins de cada polígon contorn del cep. En el cas del satèl·lit, i degut a la seva resolució de 3 m* píxel^{-1} , no s'ha pogut calcular.

Amb la intenció de complementar l'índex NDVI es va calcular un nou índex, l'NDRE. Al igual que l'NDVI serveix per determinar l'estat de vigor de la planta en base a la reflectància del NIR i el REdge. La seva fórmula està descrita en la fórmula 4:

$$NDRE = \frac{NIR - REdge}{NIR + REdge} \quad (4)$$

L'NDRE és un indicador més fiable en estadis determinats de la planta, en concret quan es troba enmig del seu desenvolupament i en fases més tardanes. Això s'explica perquè la banda REdge que fa servir és més penetrant que no pas el Vermell normal. En les fulles més crescudes i plenes de clorofil·la el NDRE té més facilitat per arribar a capes més profundes que el NDVI.

El satèl·lit, al no tenir un filtre de REdge en les seves càmeres no és capaç d'obtenir informació de NDRE.

Com a resum: pel set de dades extretes amb el dron, disposàvem d'una matriu amb els diferents ceps per tres estadis vegetatius amb la informació del NDVI, NDRE i àrea projectada per a cadascun d'ells. A més, pel set de dades extret amb satèl·lit, es disposava únicament dels valors de NDVI al no poder-se calcular els valors de NDRE i àrea projectada per les limitacions en resolució.

En cap cas es va fer servir l'àrea projectada com a variable per si sola. Únicament es va fer servir acompanyant a altres variables espectrals com l'NDVI i el NDRE.

3.6. Anàlisi de dades

Un cop la informació de cada cep i estadi vegetatiu va poder ser extreta (mesures manuals, mesures amb dron i mesures amb satèl·lit) es va procedir a cercar relacions entre els diferents paràmetres per tal de complir el principal objectiu d'aquest treball: estimar paràmetres estructurals de la vegetació mitjançant informació espectral amb dron o satèl·lit.

L'anàlisi es va dividir en diferents agrupacions de dades segons convenia i en tots els casos es va treballar amb regressions lineals simples per tal de veure com les diferents variables es relacionaven entre si. El valor de R^2 que s'obtenia en realitzar les regressions va ser el primer indicador per determinar com de bona era la relació entre les variables.

El conjunt de dades de les que partíem eren sempre les mateixes, informació de tots els ceps mostrejats en les cinc parcel·les i per cada un dels tres BBCHs. La informació es tenia tant per dron com per satèl·lit. Per tal d'aprofitar i estudiar tots els ceps es van realitzar diferents agrupacions tot buscant obtenir el major nombre de resultats i regressions possibles.

Tot sovint es va voler mostrar la presència de les dades obtingudes en els tres BBCH per separat i alhora mostrar el conjunt de dades sense separar. En aquests casos es van realitzar les gràfiques en dues fases diferents. La primera, introduint tots els valors de BBCH en la figura, extraient el seu valor de R^2 i la fórmula lineal del conjunt de dades. La segona, separant els tres BBCH dins del propi Excel i introduint-los com a sèries separades de dades. Així es podrien pintar de colors diferents, diferenciant visualment els estadis fenològics presents. Al haver estat introduïts després de la primera fase, els valors de la segona quedarien superposats i per tant ocultarien els de l'anterior. A nivell matemàtic obtindríem els resultats dels tres BBCH junts i a nivell visual obtindríem la informació dels tres BBCH per separat.

En els següents subapartats s'enumeren i expliquen les diferents variables que es faran servir en l'anàlisi tant per dron com per satèl·lit. En les relacions de variables sempre s'enfrontarà una Variable X a una Variable Y.

Pel dron es van relacionar les següents variables:

- Variables espectrals (Variables X): NDVI, NDVIxAP, NDRE, NDRExAP.
- Variables mesurades a mà (Variables Y): TRV i LWA.

Pel satèl·lit es van relacionar les següents variables:

- Variables espectrals (Variable X): NDVI.
- Variables espectrals (Variable Y): TRV i LWA.

En ambdós casos, totes les Variables X van ser enfrontades amb totes les Variables Y una per una, permetent obtenir el màxim de relacions possibles.

A continuació es detallaran els diferents tipus d'anàlisis de dades que s'han realitzat en el treball, en són quatre de diferents en total.

3.6.1. Dades pures

Els valors de les variables no es van modificar en cap cas. Es van prendre els valors de les variables dels 838 ceps alhora i es van realitzar les relacions pertinents.

3.6.2. Dades de varietats

Es van separar els valors de les variables dels 838 ceps en les seves quatre diferents varietats de raïm i es van realitzar les relacions pertinents. Algunes varietats tenien més ceps que d'altres, tot en funció de la grandària de les parcel·les.

3.6.3. Dades de mitjanes

Es van calcular les mitjanes dels valors de les variables (NDVI, NDRE, AP, TRV i LWA) per cada BBCH de cada una de les parcel·les. Al tenir tres BBCH diferents i cinc parcel·les diferents, es va treballar amb quinze (3 BBCH x 5 parcel·les) valors per cada variable.

3.6.4. Dades de màxims

Es van seleccionar els valors màxims de les variables (NDVI, NDRE, AP, TRV i LWA) per cada BBCH de cada una de les parcel·les. Al tenir tres BBCH diferents i cinc parcel·les diferents, es va treballar amb quinze (3 BBCH x 5 parcel·les) valors per cada variable.

Per aquesta última anàlisi es va haver de realitzar una detecció d'outliers. Aquests són els valors que estan anormalment allunyats dels valors de la mostra. Si haguéssim mantingut aquests valors i s'hagués demanat a l'Excel que tragués els valors màxims dels BBCH segurament ens hagués donat els valors outliers, donant així per valors extrem i invalidant l'anàlisi de dades basat en màxims. El test que s'ha fet servir es basa en el Z-score. Gràcies al programa IBM SPSS Statistics es pot realitzar el test de forma automàtica.

Dins del propi programa cal seleccionar totes les dades de la variable que volem analitzar i es calcularà el valor de Z-Score per a cadascun dels punts de mostreig. Posteriorment es classifiquen com a outliers totes aquelles mostres que tinguin un valor de Z-score major a 3.

Tant en l'agrupació de mitjanes com en el de màxims, l'única variable que va seguir el procediment descrit va ser la Variable X. Les variables de TRV i LWA van rebre l'anàlisi de dades de mitjanes en ambdós casos. La raó és que es volia estudiar les diferències en l'anàlisi en les

variables d'índex de vegetació. A més, per tal de poder determinar el volum idoni d'aplicació s'ha de fer sobre el valor de TRV mitjà de la parcel·la, i no té sentit fer-ho sobre el TRV màxim ja que estaríem sobre dosificant la majoria de les plantes.

3.6.5. Test de significació i test de normalitat

Es van realitzar dos comprovacions estadístiques per tal de veure si alguna de les relacions que es van trobar en els apartats anteriors podia arribar a ser un model. El R^2 calculat de les relacions únicament senyalava en quin grau el parell de variables -X i Y- tenien un comportament semblant a una regressió, en aquest cas lineal.

Per dron es va delimitar que una $R^2 > 0,7$ era suficientment prometedora com per acceptar-la i continuar el desenvolupament del model. Per satèl·lit, al no disposar de regressions amb uns paràmetres d'ajust especialment bons, i degut a les limitacions ja conegudes en resolució, es va determinar que una $R^2 > 0,45$ era suficientment bona per continuar en l'estudi. Únicament les regressions lineals que complissin amb aquestes R^2 i que pertanyessin a l'anàlisi de mitjanes o màxims van ser analitzades pels dos tests (significació i normalitat).

El primer pas per poder passar d'una regressió de variables a un model que permeti predir una nova mostra de la població és l'estudi de la significació dels coeficients de la regressió lineal. En aquest test s'avalua estadísticament la hipòtesi nul·la de que el coeficient de la pendent β_1 és igual a zero (no hi ha efecte) o la hipòtesi alternativa (canvis en el la variable X impacten d'una forma lineal sobre la resposta de la variable Y). Com a interval de confiança es va prendre un $\alpha=99\%$.

Pel que fa al test de normalitat, per a cada valor de la variable X, els seus residus tenen una distribució normal amb mitjana 0. Amb l'ajuda del programa IBM SPSS Statistics 27 es va realitzar el test. Per a comprovar la normalitat es va fer servir la prova de contrast de la normalitat Shapiro-Wilks.

Seguint amb el patró del test de significació es va fer servir un interval de confiança de $\alpha=99\%$. Els valors p-valors $> 0,01$ voldrien dir que la distribució dels residus seguia una distribució normal i en canvi els p-valor $< 0,01$ voldrien dir el contrari i per tant es rebutjava la possibilitat de poder construir un model a partir d'aquell parell de variables.

4. Resultats i discussió

En el desenvolupament d'aquest projecte de grau es van estudiar diferents combinacions de dades espectrals adquirides de la vegetació de forma remota mitjançant sistemes dron i satèl·lit amb mesures de caracterització manual del cultiu. Es van realitzar un total de 78 regressions lineals (50+14+14) amb l'objectiu de trobar una fórmula per poder estimar, de forma remota, algun dels paràmetres que caracteritzen la densitat del cultiu (TRV o LWA) a nivell de parcel·la [32,41].

Per tal de poder discriminar i contrastar els resultats obtinguts es van tenir en compte el següent procediment:

- Presentació i discussió dels resultats que es van obtenir en el càlcul de les 50 regressions generades en l'estudi amb les dades cep a cep.
- Desenvolupament de les 28 regressions lineals per valors mitjans i màxims per parcel·la.
- A partir d'aquí, i basant-se en els valors de R^2 , es van seleccionar les regressions que explicaven de forma fiable la relació entre les variables plantejades. Únicament es van prendre relacions que pertanyessin a l'anàlisi de mitjanes o màxims, no pas de les dades cep a cep.
- Test de significació i test de normalitat per tal de demostrar estadísticament que les relacions ja es poden considerar models i que poden ser extrapolades a altres poblacions de dades.

4.1. Regressions lineals amb les dades pures cep a cep

En la generació de les regressions lineals, es va fer servir un set de dades amb tots els ceps de les diferents varietats i estadis fenològics (BBCH), i per una altra banda diferents sets de dades agrupats per varietats (Chardonnay, Merlot, Cabernet Sauvignon i Macabeu).

4.1.1. Set de dades complet

La primera anàlisi va consistir en la generació d'una regressió general que consistia en un total de 838 ceps en el que no es va distingir per varietat ni per BBCH. D'aquí van resultar 50 regressions lineals combinant les diferents variables espectrals (tant de dron com de satèl·lit) i les variables de vegetació mesurades a camp. El rang de valors de R^2 entre aquestes 50 regressions estava entre $R^2=0,059$ i $R^2=0,828$ (figura 6).

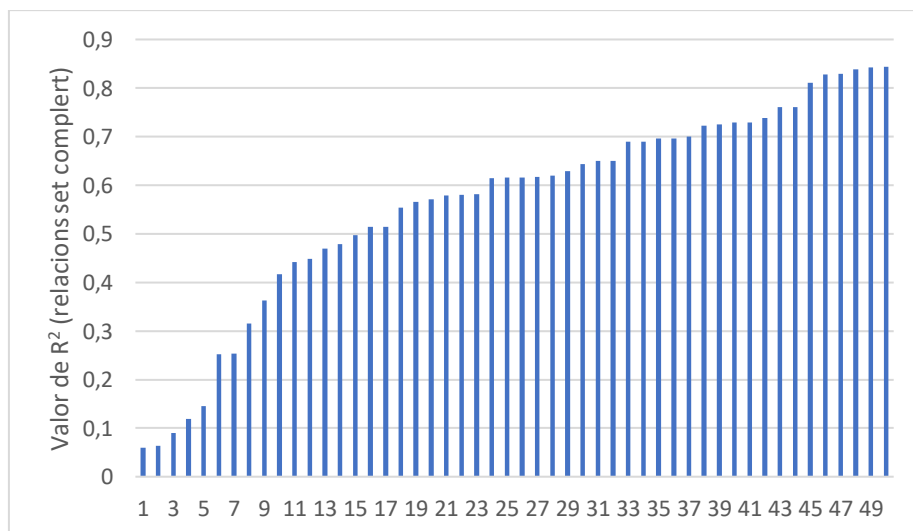


Figura 6. Valors de les R^2 de les 50 regressions lineals dels 838 ceps.

La variable espectral que millor resultats va oferir en termes generals va ser l'NDVI. Per altra banda, la variable de caracterització de vegetació que millors resultats ha donat és el TRV. Sí que s'ha observat que a més dels paràmetres espectrals, un dels factors que més a influït a millorar els valors de R^2 de les regressions estudiades és la incorporació de l'àrea projectada (AP) que incrementa la R^2 des de 0,252 (per NDVI/TRV) a 0,729 (per NDVIxAP/TRV). Aquest fet era esperable ja que es va detectar en estudis anteriors com el de Campos et al. [42].

Amb una $R^2=0,729$ es pot entendre que la mostra està ajustada d'una forma suficientment correcta. Tenint en ment que un dron té una qualitat d'imatge molt alta, el valor de la $R^2=0,729$ seguia sent una mica massa petit.

A més de la utilització del dron, l'altre alternativa com a plataforma de teledetecció és l'ús del satèl·lit. Degut a les característiques del satèl·lit que s'ha fet servir no es pot incloure el valor d'àrea projectada per la limitació amb la resolució espacial i per tant no es pot estudiar com afecta la seva incorporació en la regressió. El rang de R^2 va de 0,145 (per NDVI/TRV a la varietat Macabeu) a 0,573 (per NDVI/TRV a la varietat Cabernet Sauvignon). El resultat que té una R^2 més elevada i mostra els 838 ceps alhora és el que relaciona el NDVI amb el TRV. El valor de la R^2 ajustada en la relació NDVI/TRV amb satèl·lit és de 0,362.

Tot i que el valor de 0,362 del satèl·lit per NDVI/TRV, sigui major al de 0,252 del dron, no es pot comparar amb el 0,729 quan es fa servir l'àrea projectada. Era clar que amb el satèl·lit es tindria una R^2 inferior a la del dron en una mateixa relació de variables. La resolució espacial juga un paper molt important en la qualitat de les regressions obtingudes. Amb el dron podem aïllar el cep però amb el satèl·lit tenim problemes per diferenciar el cep del sòl i les ombres. Tot i així, un $R^2=0,362$ és massa baix.

En la figura 7 es mostra el núvol de punts dels 838 ceps. Es pot observar com la majoria de punts es troben en el centre de la recta de regressió. Això es deu a que el monitoratge va ser més complet en el BBCH 75 i 81. Tant a l'inici de la regressió com al final, hi ha un quants punts que semblen estar més allunyats del grup del centre.

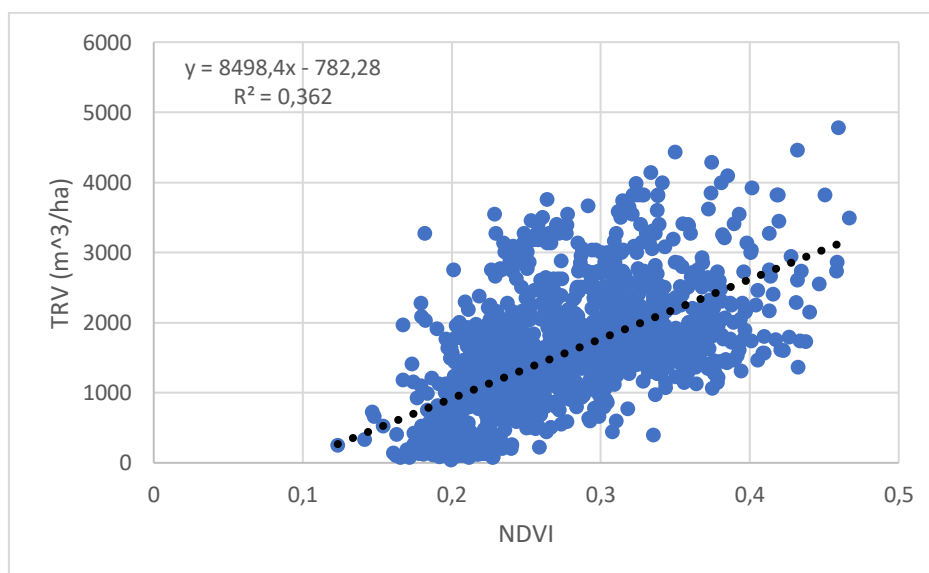


Figura 7. Representació gràfica dels 838 punts amb la $R^2=0,362$ pel satèl·lit.

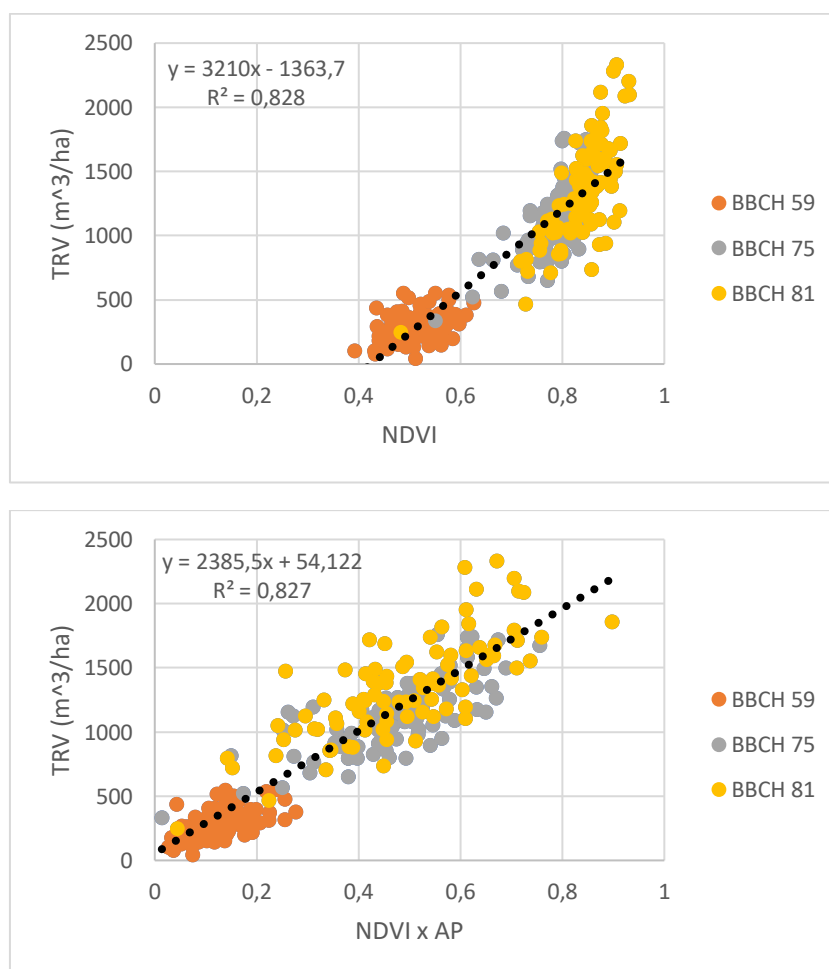
La $R^2=0,362$ no és un valor que es pugui considerar excessivament alt però sí que és veritat que es comença a intuir una relació lineal clara. A partir d'aquí ja se sap que s'haurà de treballar amb

l'àrea projectada si es volen millors resultats. També és clar que falten més dades en la regressió per acabar de completar-la, sobretot en la part dels NDVI/TRV de valor més petit.

4.1.2. Ceps amb separació per varietat o BBCH

El següent pas era veure si separant el ceps per varietat o BBCH, es podria obtenir algun resultat millor als anteriors. Es van realitzar les relacions i es van calcular totes les R^2 necessàries.

En aquest cas es va trobar que els resultats amb una R^2 major eren els que pertanyien a la varietat de Cabernet Sauvignon en fer la relació de NDVI amb TRV per dron. La relació va tenir un resultat encara millor que la seva companya amb àrea projectada inclosa. El valor de R^2 ajustada per NDVI/TRV per Cabernet Sauvignon va ser de 0,828. El valor de R^2 ajustada per NDVIxAP/TRV per Cabernet Sauvignon va ser 0,827. Les figures 8 i 9 mostren els núvols de punts pertanyents a les dues relacions.



Figures 8 i 9. Millors R^2 per dron amb BBCH diferenciats. La Figura 8 és dron NDVI/TRV per la varietat Cab. Sauvignon. La Figura 9 és dron NDVIxAP/TRV per la varietat Cab. Sauvignon.

Es va trobar que el fet d'afegir l'àrea projectada no afectava al valor de la R^2 . La varietat de Cabernet Sauvignon estava plantada en dues parcel·les alhora, anomenades "C" i "D". Una hipòtesi de treball, que caldrà validar incloent més dades d'altres anys i parcel·les a la base de dades, és que la variable àrea projectada ajuda a la regressió a caracteritzar les diferències de vigor entre varietats (BBCH). En canvi, quan es fa l'anàlisi per varietat, el resultat de la R^2 no varia amb tanta importància com quan s'analitzen totes les dades en conjunt (figura 10).

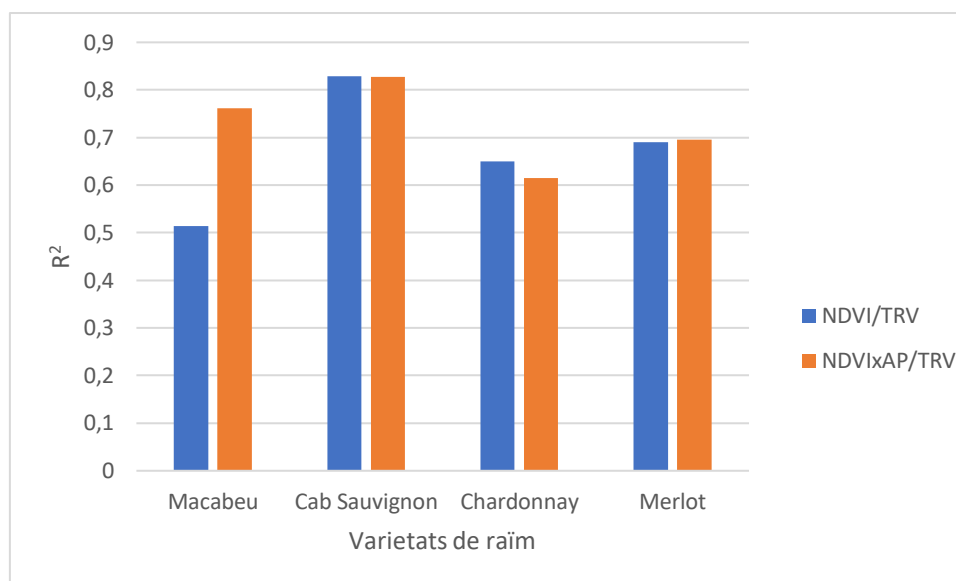


Figura 10. Diferència entre valors de R^2 amb i sense l'àrea projectada en les mateixes varietats.

Un aspecte important a considerar és que quan s'han separat les dades fent l'anàlisi per a cadascuna de les varietats, els resultats de R^2 que s'han obtingut milloren qualsevol de les regressions fetes amb el set de dades de totes les varietats conjuntes ([apartat 4.1.1.](#)). Això fa pensar que realment existeixen diferències de vigor entre parcel·les o varietats que dispersen el núvol de punts en el set de dades conjunt, fent que els residus entre els valors reals i el predits augmentin, tot disminuint la R^2 . En el treball no s'ha arribat a estudiar quina de les parcel·les o BBCH particulars era el que estaven fent baixar el R^2 .

Pel que fa al satèl·lit ens trobem en una situació semblant a la de l'apartat anterior. Al no tenir valors d'àrea projectada, únicament podem comptar amb els resultats de NDVI/TRV. El resultat més prometededor d'entre totes les separacions és, un cop més, el que conté les parcel·les de Cabernet Sauvignon. El valor de R^2 obtingut per la relació NDVI/TRV va ser 0,573.

El valor de R^2 ha augmentat respecte al de l'apartat anterior i amb aquesta regressió podríem arribar a treballar. Abans que res, se li haurien de fer els test de significació i normalitat a la regressió per tal de confirmar si pot ser un model o no. Tot i així, és un bon punt d'inici comptar amb un $R^2=0,573$ per satèl·lit.

Realitzats les primeres anàlisis dels ceps un per un, s'ha vist que el dron funciona de forma més fiable que el satèl·lit. Ara bé, l'interès del treball és el de trobar un model que permeti caracteritzar el cultiu fent servir valors d'índexs de mitjana. De forma complementaria també s'han realitzat les anàlisis per valor d'índex de màxims, pensant que es podria aconseguir algun resultat interessant.

4.2. Regressions lineals amb les dades agrupades per parcel·la

En una segona fase del treball, en comptes de desenvolupar regressions cep a cep, es va treballar amb un valor espectral que caracteritzava la parcel·la com a unitat. Es van fer servir els valors de la mitjana i els valors màxims per parcel·la de cada paràmetre estudiat. Això va donar lloc a 28 regressions, 14 per mitjana i 14 per màxims. Va ser amb aquestes relacions que es van realitzar les anàlisis estadístiques de significació i normalitat.

4.2.1. Resultats de les regressions lineals per mitjanes i màxims

Es va començar amb el dron degut a que potencialment és el mètode que hauria de donar millors resultats. Un cop es va comprovar que es podia treballar amb el dron, es van estudiar les relacions generades amb satèl·lit. El segon mètode és molt més barat i seria excepcional poder-ne obtenir un model funcional.

Per les relacions amb dron es va considerar que els valors de R^2 superiors a 0,70 eren dignes d'estudi. La mida del píxel de la càmera del dron permetia seleccionar amb una precisió molt millor que amb el satèl·lit la part de vegetació. Un cop calculats els valors de la mitjana i el màxim per a cada variable (tant espectral com manual), només aquelles regressions amb una R^2 superior a 0,70 van ser seleccionats. Tant pel paràmetre de la mitjana de la parcel·la com pel del valor màxim de la parcel·la, les millors regressions van ser les que relacionaven NDVIxAP amb TRV i LWA, i la que relacionava NDRExAP amb LWA (taules 2 i 3).

Taula 2. Resultats estadístics en anàlisi de mitjanes i dron. *Tots els resultats són significatius.

Anàlisi: Mitjana	Variables relacionades		
	(NDVIxAP/TRV)	(NDVIxAP/LWA)	(NDRExAP/LWA)
Mètode: Dron			
R^2 ajustada	0,911	0,873	0,737
Valor crític de F ($\alpha=99\%$)	$1,96 \times 10^{-8}$ *	$2,11 \times 10^{-7}$ *	$2,55 \times 10^{-5}$ *
Funció de regressió	$y = 3066,3x - 139,6$	$y = 9376,8x + 1673,8$	$y = 14236x + 2583,2$

Taula 3. Resultats estadístics en anàlisi de màxims i dron. *Tots els resultats són significatius.

Anàlisi: Màxims	Variables relacionades		
	(NDVIxAP/TRV)	(NDVIxAP/LWA)	(NDRExAP/LWA)
Mètode: Dron			
R^2 ajustada	0,903	0,874	0,752
Valor crític de F ($\alpha=99\%$)	$3,59 \times 10^{-8}$ *	$1,92 \times 10^{-7}$ *	$1,71 \times 10^{-5}$ *
Funció de regressió	$y = 2102,9x - 274,1$	$y = 6771,5x + 1088,1$	$y = 9570,7x + 2102,8$

És molt interessant poder comptar amb una regressió de $R^2=0,911$, és un valor sorprenentment alt, tenint en compte que ara mateix la regressió es troba en un primer estadi de desenvolupament. Si s'aconsegüís complementar la regressió amb dades de les futures campanyes existeix la possibilitat que la R^2 augmenti encara més. Es podria dir que aquesta regressió en qüestió té certa facilitat en millorar-se. Una prova d'això és que abans de tenir l'àrea projectada, sent la relació de NDVI/TRV, el seu valor de R^2 era únicament de 0,283. Al afegir-li l'AP va arribar fins a 0,911, sent l'increment més notori d'entre totes les regressions que van passar de no tenir AP a sí tenir-la.

Per les relacions amb satèl·lit es va considerar que valors de R^2 superiors a 0,45 eren possibles bones regressions. La mida del píxel del satèl·lit feia que en un mateix píxel hi hagués informació de vinya però també de sòl nu. De fet, a causa del marc de plantació de les vinyes, en el píxels hi havia molta més informació de sòl nu que no pas de vinya. La immensa majoria de resultats per satèl·lit donaven $R^2 < 0,45$. Alguns arribant a quedar-se per sota del 0,30. En la taula 4 i 5 es mostren les relacions de satèl·lit escollides i el seu comportament davant el test d'hipòtesi. A diferència del dron, cap dels resultats més elevats té l'àrea projectada. L'aparició dels paràmetres vegetatius TRV i LWA es manté.

Taula 4. Resultats estadístics en anàlisi de mitjanes i satèl·lit. *Tots els resultats són significatius.

Anàlisi: Mitjana	Variables relacionades	
Mètode: Satèl·lit	(NDVI/TRV)	(NDVI/LWA)
R ² ajustada	0,587	0,467
Valor crític de F (α=99%)	8,38x10 ⁻⁴ *	4,17x10 ⁻³ *
Funció de regressió	y = 11528x - 1725,7	y = 32839x - 2714,2

Taula 5. Resultats estadístics en anàlisi de màxims i satèl·lit. *Tots els resultats són significatius.

Anàlisi: Màxims	Variables relacionades	
Mètode: Satèl·lit	(NDVI/TRV)	(NDVI/LWA)
R ² ajustada	0,718	0,698
Valor crític de F (α=99%)	7,92x10 ⁻⁴ *	1,21x10 ⁻⁴ *
Funció de regressió	y = 7923,5x - 1489,4	y = 24658x - 2782

Trobar que fent servir el satèl·lit es pot obtenir una R²=0,718 és molt bona notícia, és un valor molt més alt que cap dels seus competidors. Cal pensar en quin és el motiu que únicament canviant l'anàlisi, de mitjana a màxims, s'hagi passat de R²=0,587 a R²=0,718. De la mateixa manera que amb el dron, si aconseguim més dades per la relació de variables NDVI/TRV en màxims, podem aplicar-les a la regressió lineal i veure si encara millora més. Si en un futur podem arribar a tenir un model de satèl·lit vàlid permetria treballar amb un sistema més barat i eficient que el dron.

4.3. Figures representatives per dron

Amb l'intent d'analitzar de forma més completa els resultats mostrats en les taules de l'apartat anterior, s'han elaborat les figures d'aquelles que tenien un valor de R² més gran. En concret s'ha pres la millor relació per mitjana i la millor relació per màxims. En tots els casos s'observarà que el valor de la R² es lleugerament diferent al mostrat en les taules. Això és degut a que el valor indicat a les taules prové d'unes anàlisis de dades de regressió generat per Excel, el qual fa servir el R² ajustat. En canvi, el valor que apareix en les figures prové del propi càlcul que ofereix la figura de dispersió, el qual fa servir el R² sense ajustar. A efectes de comparar el p-valor amb el α=95% s'ha fet servir el de les taules i no el de les figures.

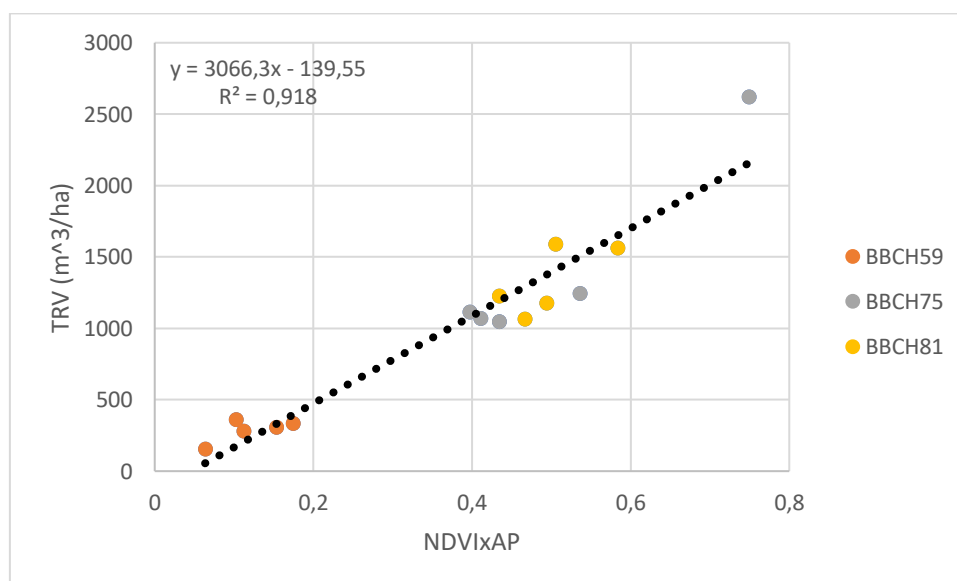


Figura 11. Punts de la mostra i recta de regressió en l'anàlisi de mitjana i dron amb les variables NDVIxAP/TRV.

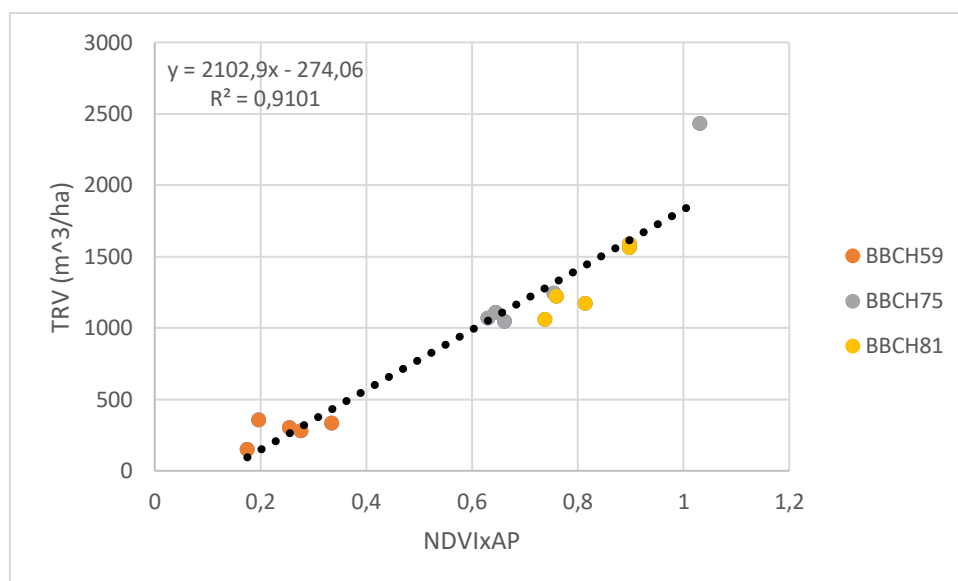


Figura 12. Punts de la mostra i recta de regressió en l'anàlisi de màxim i dron amb les variables NDVIxAP/TRV.

Les dues figures del dron mostren una distribució de punts bastant similar. Els punts es troben agrupats per BBCH i s'ajusten molt a la línia en ambdós casos. La discontinuïtat entre els BBCH 59 i BBCH 75 i 81 es deu a que no es van realitzar monitoratges entre ells. El cep va créixer molt ràpid i no es van poder prendre les mesures necessàries.

Els valors de R^2 són extremadament similars en les dues metodologies i la distribució general de punts també. És important remarcar que podria no ser així. Les dues figures podrien tenir una R^2 idèntica i una distribució de punts totalment diferent. A continuació es mostra la comparació entre els dos agrupacions (figura 13) on es poden observar les diferències entre ells.

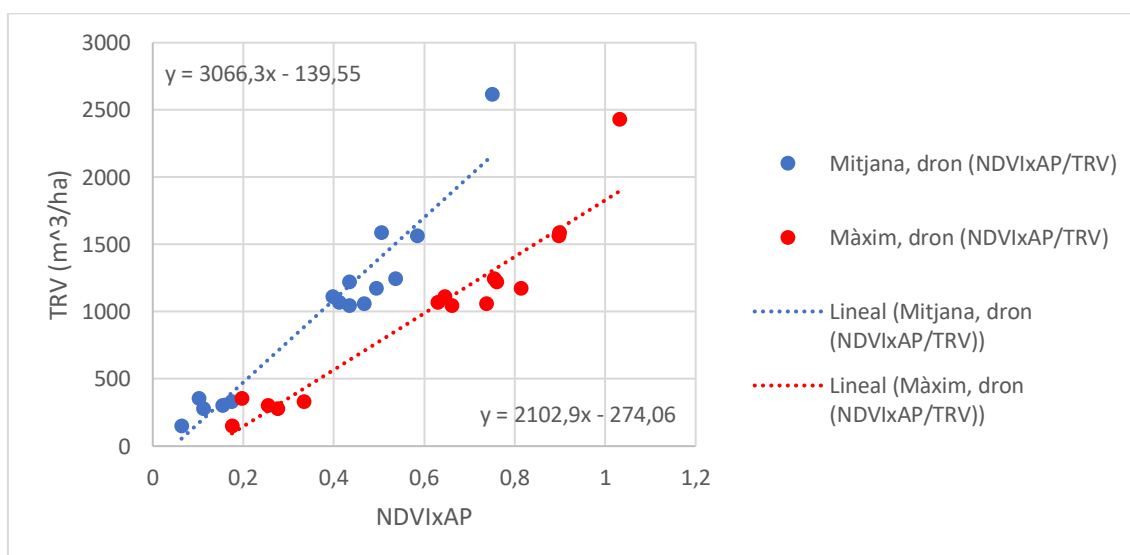


Figura 13. Comparativa entre dos agrupacions per les mateixes relacions de variables per dron.

La distribució de punts manté repartiment bastant semblant però tots els valors de NDVIxAP estan desplaçats de forma lateral. L'anàlisi de màxims compta amb uns valors més elevats. La regressió d'anàlisi de mitjana té una pendent major a la de l'anàlisi de màxims.

4.4. Figures representatives per satèl·lit

A continuació es mostren les figures [14](#) i [15](#) generats per les millors regressions lineals de satèl·lit. La diferència en els valors de R^2 de les figures respecte al de les taules es justifica d'igual forma que com s'ha explicat pel dron. S'ha pres la millor relació de variables per mitjanes i per màxims.

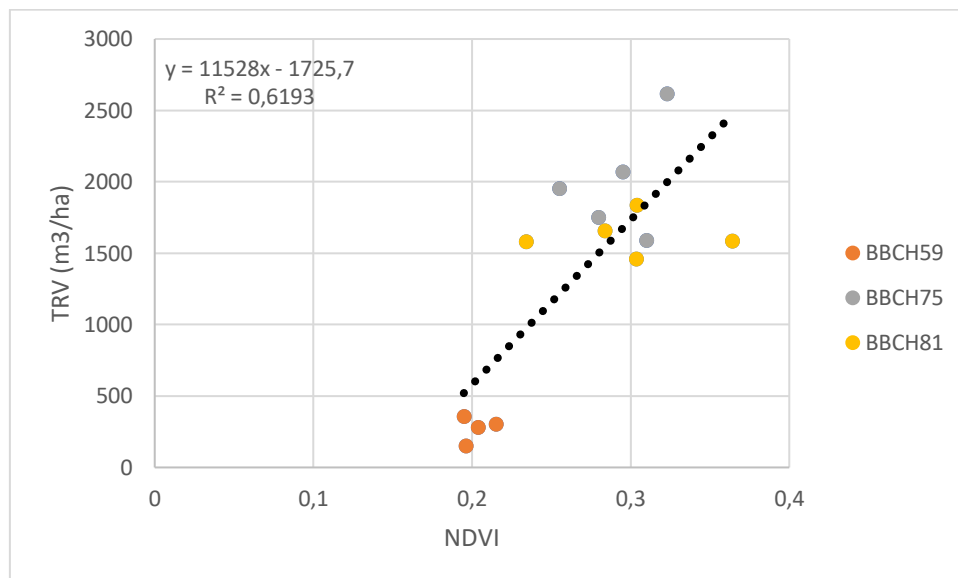


Figura 14. Punts de la mostra i recta de regressió en anàlisi de mitjana i satèl·lit.

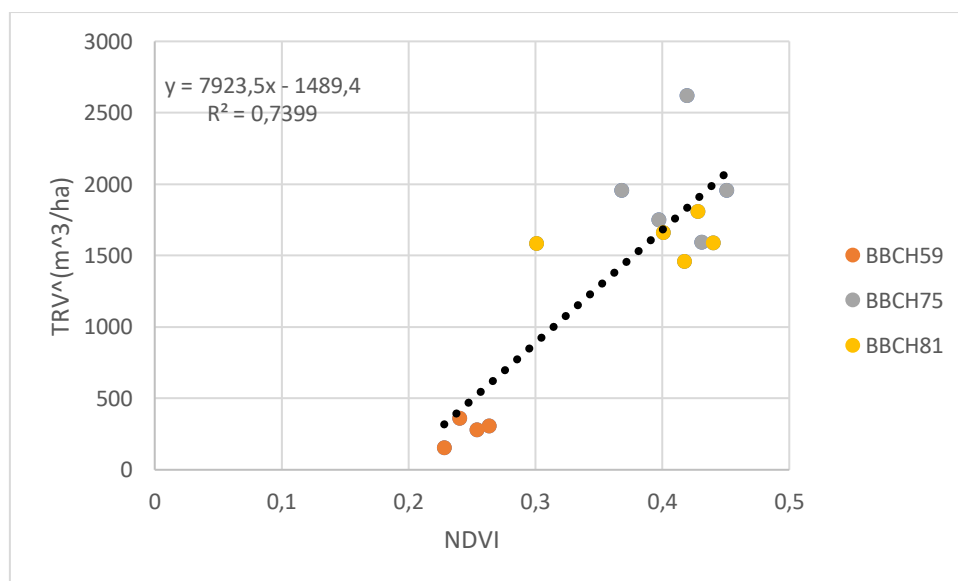


Figura 15. Punts de la mostra i recta de regressió en l'anàlisi de màxim i satèl·lit.

Les dues figures anteriors tenen una estructura bastant similar. Primer de tot, trobem els 4 punts que representen el BBCH 59 i tenen un NDVI i un TRV substancialment inferior als punts representats pels BBCH 75 i 81. Això és degut a que els ceps es troben en un estat vegetatiu més jove. El seu volum de vegetació és inferior perquè encara estan en creixement. Alhora, al tenir una quantitat inferior de fulles, també té una superfície vegetal més reduïda. Tots aquests factors convergeixen en una densitat foliar i en una quantitat de clorofil·la menors en el cep. També val a dir que tots els valors de BBCH 59 per les dues figures són força similars. Indicatiu que el creixement dels quatre punts ha sigut molt igualitari. En passar les setmanes és més fàcil

que comencin a trobar-se ceps que tinguin afeccions particulars i que facin que determinats organismes acabin distanciant-se dels demés en termes de NDVI i TRV. En estadis primigenis és més comú trobar un patró d'homogeneïtat i en estadis més avançats un patró d'estil heterogeni.

També és important remarcar que alguns dels punts de BBCH 75 i 81 es troben allunyats de la regressió. Si observem els punts més allunyats de la recta (figura 16) podem veure com tenen un comportament bastant proper a la linealitat. El que ens portaria a pensar que realment existeix una relació lineal entre les dues variables estudiades.



Figura 16. Detall de les figures 14 i 15 respectivament mostrant la distància de determinats punts dels BBCH 75 i 81 respecte a la recta.

Es pot veure que el punt inicial és del BBCH 75 i els que tenen major TRV i NDVI són els del BBCH 81. Caldria veure estadis de BBCH més avançats per determinar si aquesta tendència té continuïtat o simplement es queda en aquests punts.

Comparant les figures 14 i 15 es pot detectar que els valors de NDVI són lleugerament superiors en l'anàlisi de màxims. En fer servir l'anàlisi de les mitjanes s'està prenent un valor format per tots els valors de la mostra, tant grans com petits. En canvi, per l'anàlisi de màxims, s'està agafant el valor més elevat dins de la pròpia sèrie de cada BBCH i parcel·la. Recordem que s'havien d'eliminar els outliers i per tant no són els valors més elevats de tots, sinó que són els valors més elevats dins d'uns paràmetres determinats. La diferència de valors NDVI entre "màxim" i "mitjana" és de 0,1 punts aproximadament. Per altra banda, els valors de TRV es mantenen gairebé idèntics en les dues agrupacions. Això vol dir que pel que fa al TRV, els valors mitjans i els màxims són els mateixos. Fa pensar que la modificació del fenomen "anàlisi" - mitjanes o màxims- no ha tingut impacte en aquesta comparativa pel que fa als satèl·lits.

4.5. Prova de normalitat

Les regressions lineals que han passat pel test de significació ara rebran el test o prova de normalitat. La prova de normalitat és una garantia que permet poder fer inferències fiables a partir dels models generats.

A continuació es presenten els valors obtinguts amb el SPSS per l'anàlisi de Shapiro-Wilk. Apareixen les relacions de variables en el mateix ordre que les taules de [l'apartat 4.2.1.](#) de les taules 2, 3, 4 i 5. L'interval de confiança era $\alpha=99\%$. Per tant, tots els valor de p-valor que siguin majors que 0,01 indicaran que els residus segueixen una distribució normal.

Taula 6. Resultats estadístics de la prova de normalitat per diferents relacions de variables, metodologies i agrupacions. *Cap dels resultats és significatiu.

Valors Estandaritzats Residuals		Shapiro-Wilk		
Identificació		Estadístic	Graus Llibertat	Significança p-valor
Mitjana + satèl·lit	(NDVI/TRV)	0,956	13	0,662*
	(NDVI/LWA)	0,889	13	0,077*
Màxims + satèl·lit	(NDVI/TRV)	0,841	13	0,017*
	(NDVI/LWA)	0,937	13	0,386*
Mitjana + dron	(NDVIxAP/TRV)	0,946	14	0,469*
	(NDVIxAP/LWA)	0,968	14	0,832*
	(NDRExAP/LWA)	0,856	14	0,021*
Màxims + dron	(NDVIxAP/TRV)	0,843	14	0,014*
	(NDVIxAP/LWA)	0,937	14	0,345*
	(NDRExAP/LWA)	0,938	14	0,356*

Cap dels resultats de p-valor és inferior a 0,01. Sent els resultats no significatius vol dir que els residus segueixen una distribució normal. D'aquesta forma podem confirmar que totes les regressions lineals escollides són vàlides per fer-se servir i seguir treballant amb elles.

S'ha de destacar que si s'hagués treballat amb un $\alpha=95\%$ i el p-valor=0,05, hi hauria tres valors dins de la taula que passarien de tenir uns residus amb una distribució normal a no tenir-los, per lo qual els models no serien vàlids amb les variables estudiades en aquests tres casos. De cara al futur, caldrà avaluar amb més mostres les possibilitats d'aquests models, ja que estan al límit d'acceptació. Els valors en qüestió apareixen marcats de color vermell en la taula 6.

Pel que fa al de "Màxims + satèl·lit (NDVI/TRV)" és sorprenent trobar que aquesta relació podria haver-se quedat fora de l'estudi en l'última part de comprovació estadística. La relació NDVI/TRV va ser la que en l'apartat 4.2.1. tenia una R^2 de major valor, 0,718 en concret. D'haver-se quedat fora de la prova de normalitat segurament s'hagués hagut de realitzar alguna transformació en els valors de les mostres per tal d'intentar trobar una tendència estadística que s'adaptés de forma més correcta.

En el cas de "Mitjana + dron (NDRExAP/LWA)" i "Màxims + dron + (NDVIxAP/TRV)" cap dels dos era la regressió lineal més prometedora dins del mètode de dron. El que pertanyia a màxims era la segon millor regressió. Si s'haguessin quedat fora de l'estudi no hauria passat res tenint en compte que la regressió d' R^2 més elevada no estava en perill de tenir p-valor < 0,01.

Totes aquelles regressions que han superat els dos tests, tant el de significació com el de normalitat, ja es poden considerar models. Per tant, en el moment d'acabar aquest estudi, es compten amb deu models que poden fer-se funcionar a camp. L'èxit dels models dependrà de com d'alta sigui la seva R^2 . És per això que ara s'han buscat formes per tal de millorar els models.

4.6. Millores de model

Una de les millores més important que s'hauria d'implementar en els models per tal de fer-los encara més fiables seria fer un mostreig periòdic de les vinyes. Només es van realitzar 3 vols durant una campanya, és per això que només tenim BBCH 59, 75 i 81. El BBCH 59 és el que es queda més apartat de la resta. El BBCH 75 i 81 es troben molt més propers a nivell fenològic i per tant apareixen més a prop en la figura.

Realitzar un BBCH per sota de 59 no seria una bona opció. BBCH inferiors estarien en un estadi vegetatiu massa inicial, donant valors de NDVI o NDVIxAP ínfims. La planta està generant les

primeres fulles i els primers brots. Pràcticament no té fulles verdaderes i els nivells de clorofil·la són molt baixos.

La zona important és la que apareix entre el BBCH 59 i els BBCH 75 i 81. Seria molt interessant de realitzar vols entre juny i juliol. En aquest temps és quan la planta es troba en un estadi de floració i té un creixement més accelerat. Els seus nivells fotosintètics es troben en el punt més elevat degut a que la planta ja té gran part de les seves fulles i comença a obrir les primeres flors. A partir del BBCH 71 comença el període de floració i tota l'energia del cep es destina a fer créixer els raïms, per tant no hi ha creixement vegetatiu de forma tant important com entre el període BBCH 59 a 75.

Per millorar potencialment els nostres models seria bo de tenir valors de:

- BBCH 62 (20% de les flors no fecundades caigudes)
- BBCH 66 (60% de les flors no fecundades caigudes)
- BBH 71 (Quallat dels fruits)

En una campanya propera es podria començar a fer servir els models que finalment es considerin bons i estadísticament correctes al final d'aquest TFG per agilitzar els processos d'anàlisi dels BBCH extres. Seria un sistema que es retroalimentaria i any rere any seria més complet. És per això que era important detectar uns quants models matemàtics que permetessin seguir les investigacions i amb el temps anar descartant aquells que resultessin ser incorrectes.

De manera gràfica, en realitzar els 3 vols de més, apareixerien una bona quantitat de punts en la següent zona:

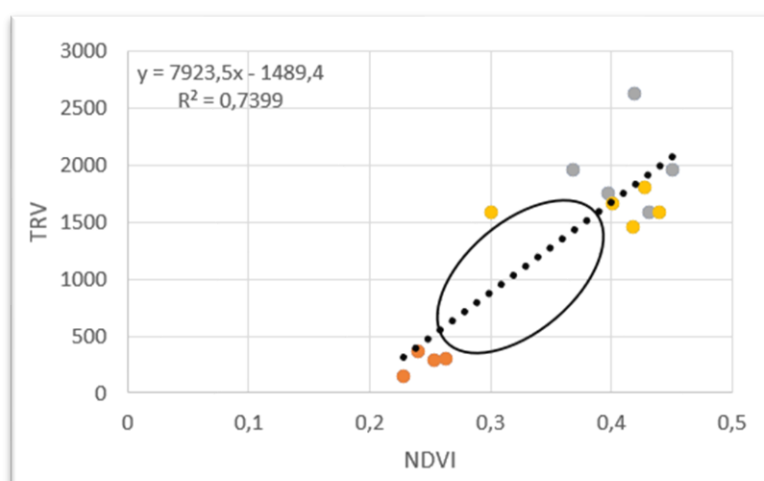


Figura 17. Zona on apareixerien els punts de BBCH entremitjos (59-75).

Havent trobat que la relació de NVDI/TRV per satèl·lit i NDVIxAP/TRV per dron tenen unes R^2 elevades [43], caldria veure com afectaria la incorporació dels nous punts. Podria existir la possibilitat que la R^2 es reduís i per tant s'hauria d'investigar el perquè d'aquest fet.

5. Conclusions

Després d'haver realitzat les anàlisis dels diferents models trobats amb les dades ofertes per les parcel·les de vinya s'han recopilat les següents conclusions:

- S'ha aconseguit un principi de protocol per caracterització de vegetació a partir de les mesures manuals i la informació espectral de les imatges.
- En comparar les imatges del dron i les satèl·lit s'ha pogut veure com les del dron són de més qualitat. La precisió que ofereix la major quantitat de píxels fa que el dron sigui la millor opció en els cultius especials com la vinya. En termes econòmics és superior el satèl·lit degut al reduït cost del monitoratge.
- Amb el satèl·lit es pot tenir una primera aproximació que caldrà validar a camp per veure l'error que es té de la predicció del model amb el que seria la realitat.
- Després d'haver escollit les relacions amb una R^2 de major valor es van realitzar les anàlisis estadístiques. Totes les relacions que van passar el primer test de significació van passar també la prova de normalitat. Per tant, totes les relacions són fiables per fer-se servir.
- Tenint en compte el potencial de millora que tenien algun dels models, la forma més òptima per tal de millorar les relacions serà fer un mostreig més continuat amb BBCHs entremetjos i inicials.
- El model més prometedor és el de NDVIxAP/TRV per dron i mitjana, degut al valor de la R^2 i a la seva resposta més que positiva davant de la incorporació de l'àrea projectada en la variable X.
- El millor índex ha resultat ser l'NDVI, el NDRE ha sigut un competidor prou digne. Els dos són molt més útils en fer-se servir juntament amb l'àrea projectada.
- També es planteja la possibilitat de millorar el model eliminant alguna de les parcel·les que s'han inclòs en l'estudi. Això es va descobrir en realitzar la comparativa entre la relació de tots els ceps alhora i la relació de les varietats. En la segona, la R^2 era substancialment major que en la primera.
- Amb el satèl·lit, a més, si adaptem la presa de mostres a les característiques del píxel de satèl·lit també podem tenir més millora. En comptes d'agafar un sol cep de tot el píxel, intentar agafar més ceps de cada píxel. Això s'està fent ja al projecte Europeu NOVATERRA en el que participa el grup d'investigació de la Unitat de Mecanització Agrària de la UPC amb el que he col·laborat durant aquest projecte.

6. Bibliografia

1. Escolà, A.; Planas, S.; Rosell, J.R.; Pomar, J.; Camp, F.; Solanelles, F.; Gracia, F.; Llorens, J.; Gil, E. Performance of an Ultrasonic Ranging Sensor in Apple Tree Canopies. *Sensors* 2011, 11, 2459–2477.
2. Gamarra-Diezma, J.L.; Miranda-Fuentes, A.; Llorens, J.; Cuenca, A.; Blanco-Roldán, G.L.; Rodríguez-Lizana, A. Testing Accuracy of Long-Range Ultrasonic Sensors for Olive Tree Canopy Measurements. *Sensors* 2015, 15, 2902–2919.
3. Vitali, M.; Tamagnone, M.; La Iacona, T.; Lovisolo, C. Measurement of grapevine canopy leaf area by using an ultrasonic-based method. *OENO One* 2013, 47, 183–189.
4. Borgogno-Mondino, E.; Lessio, A.; Tarricone, L.; Novello, V.; de Palma, L. A Comparison between Multispectral Aerial and Satellite Imagery in Precision Viticulture. *Precis. Agric.* 2018, 19, 195–217.
5. Karakizi, C.; Oikonomou, M.; Karantzalos, K. Spectral Discrimination and Reflectance Properties of Various Vine Varieties from Satellite, UAV and Proximate Sensors. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* 2015, 40, 31–37.
6. D'Amico, M.; Coppola, A.; Chinnici, G.; Di Vita, G.; Pappalardo, G. Agricultural systems in the European Union: An analysis of regional differences. *New Medit.* 2013, 12, 28–34.
7. European Commission. Precision Agriculture: An Opportunity for EU Farmers—Potential Support with the CAP 2014–2020; European Commission Agriculture and Rural Development: Brussels, Belgium, 2014.
8. Johnson, L.F.; Roczen, D.E.; Youkhana, S.K.; Nemani, R.R.; Bosch, D.F. Mapping vineyard leaf area with multispectral satellite imagery. *Comput. Electron. Agric.* 2003, 38, 33–44.
9. Khan, A.; Khan, U.; Waleed, M.; Khan, A.; Kamal, T.; Marwat, S.N.K.; Maqsood, M.; Aadil, F. Remote Sensing: An Automated Methodology for Olive Tree Detection and Counting in Satellite Images. *IEEE Access* 2018, 6, 77816–77828.
10. Martínez-Casasnovas, J.; Agelet-Fernández, J.; Arnó, J.; Ramos, M. Analysis of vineyard differential management zones and relation to vine development, grape maturity and quality. *Span. J. Agric. Res.* 2012, 10, 326–337.
11. Campos, J.; Llop, J.; Gallart, M.; García-Ruiz, F.; Gras, A.; Salcedo, R.; Gil, E. Development of canopy vigour maps using UAV for site-specific management during vineyard spraying process. *Precis. Agric.* 2019, 20, 1136–1156.
12. Mathews, A.J. A Practical UAV Remote Sensing Methodology to Generate Multispectral Orthophotos for Vineyards: Estimation of Spectral Reflectance Using Compact Digital Cameras. *IJAGR* 2015, 6, 65–87.
13. Mathews, A.J.; Jensen, J.L.R. Visualizing and Quantifying Vineyard Canopy LAI Using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Collected High Density Structure from Motion Point Cloud. *Remote Sens.* 2013, 5, 2164–2183.
14. Albetis, J.; Jacquin, A.; Goulard, M.; Poilvé, H.; Rousseau, J.; Clenet, H.; Dedieu, G.; Duthoit, S. On the Potentiality of UAV Multispectral Imagery to Detect Flavescence dorée and Grapevine Trunk Diseases. *Remote Sens.* 2019, 11, 23.
15. De Castro, A.; Jiménez-Brenes, F.M.; Torres-Sánchez, J.; Peña, J.M.; Borra-Serrano, I.; López-Granados, F. 3-D Characterization of Vineyards Using a Novel UAV Imagery-Based OBIA Procedure for Precision Viticulture Applications. *Remote Sens.* 2018, 10, 584.
16. Kerkech, M.; Hafiane, A.; Canals, R. Vine disease detection in UAV multispectral images using optimized image registration and deep learning segmentation approach. *Comput. Electron. Agric.* 2020, 174.

17. Pádua, L.; Marques, P.; Hruška, J.; Adão, T.; Peres, E.; Morais, R.; Sousa, J.J. Multi-Temporal Vineyard Monitoring through UAV-Based RGB Imagery. *Remote Sens.* 2018, 10, 1907.
18. Romero, M.; Luo, Y.C.; Su, B.F.; Fuentes, S. Vineyard water status estimation using multispectral imagery from an UAV platform and machine learning algorithms for irrigation scheduling management. *Comput. Electron. Agric.* 2018, 147, 109–117.
19. Ampatzidis, Y.; Partel, V.; Meyering, B.; Albrecht, U. Citrus rootstock evaluation utilizing UAV-based remote sensing and artificial intelligence. *Comput. Electron. Agric.* 2019, 164, 104900.
20. Cunha, M.; Marçal, A.R.S.; Rodrigues, A. A Comparative Study of Satellite and Ground-Based Vineyard Phenology. In *Imagin[e, G] Europe*; Manakos, I., Kalaitzidis, C., Eds.; IOS Press: Amsterdam, The Netherlands, 2010; pp. 68–77.
21. Devaux, N.; Crestey, T.; Leroux, C.; Tisseyre, B. Potential of Sentinel-2 Satellite Images to Monitor Vine Fields Grown at a Territorial Scale. *OENO One* 2019, 53.
22. Gatti, M.; Garavani, A.; Vercesi, A.; Poni, S. Ground-truthing of remotely sensed within-field variability in a cv. Barbera plot for improving vineyard management. *Aust. J. Grape Wine Res.* 2017, 23, 399–408.
23. Montero, F.J.; Meliá, J.; Brasa, A.; Segarra, D.; Cuesta, A.; Lanjeri, S. Assessment of vine development according to available water resources by using remote sensing in La Mancha, Spain. *Agric. Water Manag.* 1999, 40, 363–375.
24. Sun, L.; Gao, F.; Anderson, M.C.; Kustas, W.P.; Alsina, M.M.; Sanchez, L.; Sams, B.; McKee, L.; Dulaney, W.; White, W.A.; et al. Daily mapping of 30 m LAI and NDVI for grape yield prediction in California vineyards. *Remote Sens.* 2017, 9, 317.
25. Khaliq, A.; Comba, L.; Biglia, A.; Ricauda Aimonino, D.; Chiaberge, M.; Gay, P. Comparison of Satellite and UAV-Based Multispectral Imagery for Vineyard Variability Assessment. *Remote Sens.* 2019, 11, 436.
26. Ballesteros, R.; Ortega, J.F.; Hernández, D.; Moreno, M.Á. Characterization of *Vitis vinifera* L. canopy using unmanned aerial vehicle-based remote sensing and photogrammetry techniques. *Am. J. Enol. Vitic.* 2015, 66, 120–129.
27. Poblete-Echeverría, C.; Olmedo, G.F.; Ingram, B.; Bardeen, M. Detection and segmentation of vine canopy in ultra-high spatial resolution rgb imagery obtained from Unmanned Aerial Vehicle (UAV): A case study in a commercial vineyard. *Remote Sens.* 2017, 9, 268.
28. Weiss, M.; Baret, F. Using 3D point clouds derived from UAV RGB imagery to describe vineyard 3D macro-structure. *Remote Sens.* 2017, 9, 111.
29. COM. Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: European Green Deal COM/2019/640. 2019. Disponible online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/DOC/?uri=CELEX:52019DC0640&from=EN> (consultat el 27 abril 2021).
30. EUROSTAT. The Use of Plant Protection Products in the European Union. Data 1992–1999; Office for Official Publications of the European Communities: Luxembourg, 2002; p. 14.
31. Giles, D.; Billing, R. Deployment and performance of a uav for crop spraying. *Chem. Eng. Trans.* 2015, 44, 307–312.
32. Gil, E.; Campos, J.; Ortega, P.; Llop, J.; Gras, A.; Armengol, E.; Salcedo, R.; Gallart, M. DOSAVIÑA: Tool to calculate the optimal volume rate and pesticide amount in vineyard

- spray applications based on a modified leaf wall area method. *Comput. Electron. Agric.* 2020, 160, 117–130.
33. Byers, R.E.; Hickey, K.D.; Hill, C.H. Base gallonage per acre. *Va. Fruit* 1971, 60, 19–23.
 34. Byers, R.E.; Lyons, C.G., Jr.; Yoder, K.S.; Horsburgh, R.L.; Barden, J.A.; Donohue, S.J. Effect of apple tree size and canopy density on spray chemical deposit. *Hortscience* 1984, 19, 93–94.
 35. Manktelow, D.W.L.; Praat, J.P. The Tree-Row-Volume Spraying System and its Potential use in New Zealand. In *Proceedings of the NZ Plant Protection Conference, Lincoln, New Zealand, 18–21 August 1997*; pp. 119–124.
 36. Walklate, P.; Cross, J. An examination of Leaf-Wall-Area dose expression. *Crop. Prot.* 2012, 35, 132–134.
 37. EPPO. Standard Measurement Procedure in High Growing Crop Trials. Disponible online: https://www.eppo.int/media/uploaded_images/ACTIVITIES/plant_protect_products/Dose_exp_measure_procedure.pdf (consultat el 22 agost 2021).
 38. Meier, U. BBCH-Monograph. In *Growth Stages of Plants-Entwicklungsstadien von Pflanzen—Estadios de Las Plantas-Développement des Plantes*; Blackwell Wissenschaftsverlag: Berlin, Germany; Wien, Austria, 1977; p. 622.
 39. QGIS Development Team. QGIS Geographic Information System. Open-Source Geospatial Foundation. Disponible online: <http://qgis.osgeo.org> (consultat el 15 agost 2021).
 40. Rouse, J.W.; Haas, R.H.; Schell, J.A.; Deering, D.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In *Proceedings of the Third ERTS Symposium, NASA SP-351, Washington, DC, USA, 10–14 December 1973*; pp. 309–317.
 41. Pergher, G.; Petris, R. Canopy structure and deposition efficiency of vineyard sprayers. *J. Agric. Eng.* 2007, 38, 31–38.
 42. Campos, J.; García-Ruíz, F.; Gil, E. Assessment of Vineyard Canopy Characteristics from Vigour Maps Obtained Using UAV and Satellite Imagery. 2021, 20, 2363.
 43. Prions, S.; Haerling, K.A. Making sense of methods and measurement: Spearman-Rho ranked-ordered coefficient. *Clin. Simul. Nurs.* 2014, 10, 535–536.