

ÍNDICE

RESUMEN EN ESPAÑOL	1
RESUMEN EN INGLÉS.....	3
RESUMEN EN VALENCIANO	5
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	7
1.1 INTRODUCCIÓN A LA VITICULTURA DE PRECISIÓN	7
1.1.1 LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN (AP). VARIABILIDAD Y EFICIENCIA	7
1.1.2 LA VITICULTURA DE PRECISIÓN (VP)	12
1.1.3 FINALIDAD DE ESTA INVESTIGACIÓN: ESTUDIO Y APLICACIÓN DE NUEVOS MÉTODOS DE VP	13
1.2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y ESTADO DEL ARTE.....	18
1.3 OBJETIVOS GENERALES Y ESPECÍFICOS	32
1.4 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN PROPUESTA.....	34
1.5 TERMINOLOGÍA	37
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y ENSAYOS.....	43
2.1 SISTEMAS DE PERCEPCIÓN Y LOCALIZACIÓN	43
2.1.1 CIRCUITO AUXILIAR DE ALIMENTACIÓN ELÉCTRICA	44
2.1.2 SISTEMA DE PERCEPCIÓN POR IMAGEN	45
2.1.3 SISTEMA DE LOCALIZACIÓN GLOBAL	49
2.2 MAPAS DE COMPACTACIÓN DE SUELOS	51
2.2.1 PENETRÓMETRO PENETROLOGGER EIJKELKAMP	51
2.2.2 RECEPTOR GPS LEICA GS20	52
2.3 PARCELAS DE ENSAYO.....	53
2.4 MUESTREO DE LA UVA Y ANÁLISIS QUÍMICOS DEL MOSTO	56
2.4.1 DINAMÓMETRO	57
2.4.2 CÁMARA FRIGORÍFICA	57
2.4.3 MEDIDOR DE TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA.....	58
2.4.4 PRENSA MANUAL	59
2.4.5 BALANZA DE PRECISIÓN.....	59
2.4.6 CALIBRE DIGITAL	60
2.4.7 REFRACTÓMETRO DIGITAL	60
2.4.8 AREÓMETRO BAUMÉ	61
2.4.9 VALORADOR DE ACIDEZ Y MEDIDA DE PH DEL MOSTO	62

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA.....	63
3.1 MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA.....	63
3.2 CONSTRUCCIÓN DE MAPAS DE SUELO.....	65
3.2.1 TOMA DE MUESTRAS DE LA COMPACTACIÓN DEL SUELO.....	65
3.2.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DE MAPAS.....	67
3.3 CONSTRUCCIÓN DE MAPAS DE VEGETACIÓN.....	76
3.3.1 METODOLOGÍA EN CAMPO: ADQUISICIÓN AUTOMÁTICA DE DATOS.....	76
3.3.2 MAPAS DE PORCENTAJE DE VEGETACIÓN: VIGOR RELATIVO.....	82
3.4 CONSTRUCCIÓN DE MAPAS DE RENDIMIENTO (PRODUCCIÓN).....	92
3.5 CONSTRUCCIÓN DE MAPAS DE ALTITUD.....	96
3.6 ANÁLISIS QUÍMICO DEL MOSTO DE LAS MUESTRAS DE UVA.....	98
3.6.1 PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS Y OBTENCIÓN DEL MOSTO.....	98
3.6.2 ANÁLISIS DE ACIDEZ Y pH.....	99
3.6.3 ANÁLISIS DE SÓLIDOS SOLUBLES TOTALES (SST).....	102
3.6.4 MEDIDAS DE PESO Y DIÁMETRO MEDIOS.....	104
3.6.5 OTROS ÍNDICES DE CALIDAD.....	105
3.7 CONSTRUCCIÓN DE MAPAS DE PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS.....	106
3.8 ANÁLISIS ESTADÍSTICO Y ELABORACIÓN DE MODELOS PREDICTIVOS.....	106
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	109
4.1 MAPAS DE PARCELA PARA LAS VARIEDADES DE UVA MOSCATEL Y MALVASÍA (Experimentos efectuados en Turís).....	109
4.1.1 MAPAS DE SUELOS.....	110
4.1.2 MAPAS DE ALTITUD.....	112
4.1.3 MAPAS DE VEGETACIÓN.....	113
4.2 MAPAS DE PARCELA PARA LA VARIEDAD CABERNET-SAUVIGNON.....	113
4.2.1 MAPAS DE VEGETACIÓN.....	113
4.2.2 MAPAS DE RENDIMIENTO O PRODUCCIÓN.....	126
4.2.3 MAPAS DE ALTITUD Y DESNIVEL.....	128
4.2.4 MAPAS DE PROPIEDADES FÍSICAS DE LA UVA.....	129
4.2.5 MAPAS DE SUELOS.....	133
4.2.6 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS MAPAS DE PARCELA.....	135
CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN.....	145
5.1 MAPAS DE CULTIVO PARA LAS PARCELAS DE LAS VARIEDADES MOSCATEL Y MALVASÍA (Turís).....	145
5.2 MAPAS DE CULTIVO PARA LA PARCELA DE LA VARIEDAD CABERNET-SAUVIGNON (Requena).....	149

5.3 VENTAJAS DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA FRENTE A OTRAS METODOLOGÍAS EXISTENTES	166
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES	171
6.1 CONCLUSIONES.....	171
6.2 TRABAJO FUTURO.....	173
CAPÍTULO 7. CONTRIBUCIÓN DE ESTA INVESTIGACIÓN: PREMIOS Y ARTÍCULOS DERIVADOS DE LA TESIS DOCTORAL	177
7.1 ARTÍCULOS CIENTÍFICOS PUBLICADOS EN REVISTAS CON REVISIÓN POR PARES	177
7.2 ARTÍCULOS CIENTÍFICOS PRESENTADOS EN CONFERENCIAS.....	178
7.3 PREMIOS NACIONALES	178
7.4 PREMIOS INTERNACIONALES	179
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	181
ANEJOS.....	195

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Ciclo de actuación para la aplicación de técnicas de visión artificial en la producción de cultivos.....	11
Figura 1.2. Disposición lateral de la cámara en técnicas de visión artificial terrestre en viña(a).Dispositivo experimental (Cortesía de Robert Bramley)(b) ..	30
Figura 2.1. Circuito auxiliar de alimentación eléctrica.	44
Figura 2.2. Esquema de funcionamiento del circuito eléctrico secundario.	45
Figura 2.3. Vista frontal y posterior de la cámara JAI CM-140GE-UV.	46
Figura 2.4. Lentes de 6 mm, 8 mm, 12 mm, y 25 mm de distancia focal.	46
Figura 2.5. Filtros ópticos utilizados con la cámara JAI y centros de la banda transmisora de cada filtro.....	48
Figura 2.6. Cobertura del espectro electromagnético de los filtros ópticos empleados en la fase experimental	49
Figura 2.7. Tractor utilizado en las pruebas de campo: detalle de la antena del receptor GPS y pantalla de control e información (GreenStar™)	50
Figura 2.8. Brazo extensible, cámara JAI, y receptores GPS	50
Figura 2.9. Penetrómetro para estimar la compactación del suelo	52
Figura 2.10. Coordenadas globales para mapas de compactación de suelos en viñedos muestreados.....	53

Figura 2.11. Parcela <i>Cabernet Sauvignon</i> de Requena (Visor SIGPAC)	54
Figura 2.12. Parcela <i>Moscatel</i> en Turís (Visor SIGPAC)	55
Figura 2.13. Parcela <i>Malvasía</i> en Turís (Visor SIGPAC)	56
Figura 2.14. Dinamómetro (a) y capazo (b) utilizados para pesar la uva correspondiente a cada celda	57
Figura 2.15. Cámara de almacenamiento refrigerada con muestras de uva	58
Figura 2.16. Medidor digital de temperatura y humedad relativa	58
Figura 2.17. Prensa manual utilizada para la extracción del mosto	59
Figura 2.18. Balanza de precisión KERN 440-33	60
Figura 2.19. Calibre digital midiendo el diámetro de un grano de uva	60
Figura 2.20. Refractómetro digital DR101 Brix	61
Figura 2.21. Areómetro Baumé(a) y su aplicación a una muestra de mosto(b)....	62
Figura 2.22. Valorador de acidez PH-Burette 24 1S	63
Figura 3.1. Definición de coordenadas geodésicas (a) y ECEF (b). (Rovira-Más et al., 2010)	70
Figura 3.2. Sistema de coordenadas LTP (Rovira-Más et al., 2010)	70
Figura 3.3. Gráfica de compactación del suelo (parcela <i>Moscatel</i>)	71
Figura 3.4. Transformación de coordenadas LTP a una malla universal	73
Figura 3.5. Algoritmo de construcción de mapas de suelo	75
Figura 3.6. Trayectorias del tractor en la parcela <i>Cabernet-Sauvignon</i> durante las temporadas 2011 (a) y 2012 (b)	77
Figura 3.7. Interfaz del programa (C++) para capturar información básica de los mapas de vegetación: imagen original (a), imagen segmentada (b), y curva de segmentación (c)	78
Figura 3.8. Panel de calibración para estimar equivalencia píxel-cm	81
Figura 3.9. Ciclo de la vid (Moreno-Vigara y Peinado-Amores, 2010)	83
Figura 3.10. Comparación entre imágenes tomadas lateralmente (a), y desde una posición cenital (b)	85
Figura 3.11. Histogramas superpuestos de imágenes capturadas en cuatro filas	86
Figura 3.12. Imagen típica (a), y su correspondiente <i>perfil de segmentación</i> (b)	87
Figura 3.13. Perfil de segmentación y cálculo automático del umbral μ	90
Figura 3.14. Algoritmo de construcción de mapas de vegetación	93
Figura 3.15. Delimitación de celdas con banderas durante la recogida de uva por tramos	94
Figura 3.16. Algoritmo de construcción de mapas de rendimiento	96
Figura 3.17. Algoritmo de construcción de mapas de altitud	97
Figura 3.18. Caja de corcho con las muestras de uva refrigeradas	98
Figura 3.19. Temperatura y humedad relativa de la cámara frigorífica donde se almacenaron las muestras	99
Figura 3.20. Vaso de precipitados de 250 ml con el mosto recién prensado, vaso de precipitados de 100 ml con 5 ml de mosto y 35 ml de agua destilada, pipeta e imanes	100

Figura 3.21. Obtención del peso de una muestra de 10 bayas	105
Figura 4.1. Puntos de muestreo para las parcelas Moscatel (a) y Malvasía (b) .	110
Figura 4.2. Mapa de suelos para la parcela Moscatel: (a) resistencia media (N/mm ²); y (b) resistencia máxima (N/mm ²)	111
Figura 4.3. Mapa de suelos para la parcela Malvasía: (a) resistencia media (N/mm ²); y (b) resistencia máxima (N/mm ²)	111
Figura 4.4. Mapas de altitud de las parcelas Moscatel (a) y Malvasía (b).....	112
Figura 4.5. Imágenes obtenidas con lentes de 6 mm, 8 mm, 12 mm ó 25 mm de distancia focal.....	116
Figura 4.6. Reflectancia para la vid Cabernet-Sauvignon (Brown et al., 2004) .	117
Figura 4.7. Imagen original con filtro NIR (a) y su correspondiente imagen segmentada por el algoritmo propuesto (b)	119
Figura 4.8. Imágenes con filtro NIR: incorrectamente (a) y correctamente segmentadas (b)	120
Figura 4.9. Imagen original (a) tomada con filtro verde en día soleado y su correspondiente imagen segmentada (b)	121
Figura 4.10. Imagen original (a) tomada con filtro verde en día nublado y su correspondiente imagen segmentada (b)	121
Figura 4.11. Imagen segmentada tomada con el filtro azul (a), e imagen segmentada tomada con el filtro ultravioleta (b)	122
Figura 4.12. Imagen con filtro rojo en día nublado (a) y su correspondiente imagen segmentada (b)	123
Figura 4.13. Imagen original tomada con filtro rojo en día soleado (a), y su correspondiente imagen segmentada (b)	123
Figura 4.14. Imágenes segmentadas con filtro rojo y lente de 8 mm (a) y de 12 mm (b)	124
Figura 4.15. Mapa de vegetación sin corregir el efecto del suelo con lente de 8 mm y filtro NIR.....	125
Figura 4.16. Mapa de vegetación corregido para la lente de 8 mm y filtro NIR .	125
Figura 4.17. Mapa de vegetación con lente de distancia focal 12mm y filtro rojo	126
Figura 4.18. Mapa de rendimiento para las campañas de 2011 (a) y 2012 (b) ..	127
Figura 4.19. Mapa de altitud para la parcela de Cabernet-Sauvignon	128
Figura 4.20. Mapa de azúcares totales (g/l) de la parcela de Cabernet-Sauvignon	130
Figura 4.21. Mapa de azúcares totales (°Be) de la parcela de Cabernet-Sauvignon	130
Figura 4.22. Mapa de alcohol probable (% vol) de la parcela de Cabernet-Sauvignon	130
Figura 4.23. Mapa de pH para la parcela de Cabernet-Sauvignon	131
Figura 4.24. Mapa de acidez total (g/l) para la parcela de Cabernet-Sauvignon	131

Figura 4.25. Mapa de pesos de diez bayas de uva (g) para la parcela de Cabernet-Sauvignon	132
Figura 4.26. Mapa del diámetro medio de baya (mm) en la parcela de Cabernet-Sauvignon	133
Figura 4.27. Mapa de densidad de baya (g/cm ³) en la parcela de Cabernet-Sauvignon	133
Figura 4.28. Medida de resistencia del terreno en la parcela Cabernet-Sauvignon	134
Figura 4.29. Mapas de resistencia media del suelo (a) y de resistencia máxima (b) en parcela Cabernet-Sauvignon	135
Figura 4.30. Mapa de rendimiento futuro calculado a partir de la Ecuación 4.1.	143
Figura 4.31. Mapa de rendimiento futuro calculado a partir de la Ecuación 4.2.	143
Figura 4.32. Mapa de rendimiento futuro a partir de vegetación (8 mm) y celdas de 8 m de lado	144
Figura 5.1. Escaso desarrollo de raíces por compactación que induce un limitado desarrollo de la parte aérea (Infoagro)	147
Figura 5.2. Variación de la calidad frente al rendimiento para diferentes tipos de viñedo (Hidalgo-Togores, 2006)	153
Figura 5.3. Rangos frecuentes de parámetros de calidad del mosto (Basado en Rius, 2005)	157

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Características técnicas de los filtros implementados	48
Tabla 3.1. Caracterización geométrica del modelo WGS84	69
Tabla 3.2. Equivalencias píxel-cm con el panel de calibración de la figura 3.8 ..	82
Tabla 4.1. Condiciones experimentales de los mapas de suelos	109
Tabla 4.2. Pruebas de configuración para realizar los mapas de vigor	113
Tabla 4.3. Campo de visión de las lentes de 6 mm, 8 mm, y 12 mm.....	116
Tabla 4.4. Condiciones experimentales del mapa de rendimiento	127
Tabla 5.1. Valor del coeficiente R ² (%) en modelos de regresión simple según el tamaño de celda	161
Tabla 5.2. Discriminación de resultados por lotes	165

ÍNDICE DE ANEJOS

ANEJO 1: ESPECIFICACIONES DE LA CÁMARA MONOCULAR JAI CM - 140GE-UV...	196
ANEJO 2: ESPECIFICACIONES DE LAS LENTES.....	198
ANEJO 3: ESPECIFICACIONES DE LOS FILTROS	200

ANEJO 4: ALGORITMO DE SITUACIÓN DE PUNTOS EN MUESTREOS MANUALES....	208
ANEJO 5: PRUEBA DE RESISTENCIA DE SUELO. (MATLAB. VERSIÓN R2009B).....	210
ANEJO 6: PROGRAMA PERCEPCIÓN JAI. (VISUAL STUDIO. VERSIÓN 2005)	215
ANEJO 7: MAPAS DE VEGETACIÓN. (MATLAB. VERSIÓN R2009B).....	250
ANEJO 8: PESOS Y COORDENADAS. RECOGIDA MANUAL	254
ANEJO 9: RENDIMIENTO. (MATLAB. VERSIÓN R2009B).....	262
ANEJO 10: ALTITUD. (MATLAB. VERSIÓN R2009B).....	265
ANEJO 11: ACIDEZ (G/L) Y GRADO ALCOHÓLICO (% VOL)	267
ANEJO 12: DATOS DE LABORATORIO. ANÁLISIS QUÍMICOS	275
ANEJO 13: MAPAS_COMPLETO	283
ANEJO 14: DATOS ESTADÍSTICOS (STATGRAPHICS V.XVI)	289

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

AP: Agricultura de Precisión

CCD: Dispositivo de carga acoplada (*Charge-Coupled Device*)

EE: Espectro electromagnético

GB: Gigabyte (10^9 bytes)

GPS: Sistema de posicionamiento global (*Global Positioning System*, operado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos)

HDOP: Horizontal dilution of precision (Dilución horizontal de precisión)

IR: espectro infrarrojo (750 nanómetros hasta los 10.000 nanómetros)

IRT: infrarrojo térmico (8.000 nm a 14.000 nm)

NIR: espectro del infrarrojo cercano (*Near Infrared*, 750 nm a 1.100 nm)

NDVI: Índice normalizado de vegetación o Normalized Difference Vegetation Index. Utilizado para monitorizar el vigor de la planta, la cobertura foliar y la producción de biomasa desde datos por satélite (banda multispectral)

PAR: radiación fotosintéticamente activa (*Photosynthetically active radiation*)

RAM: Random-access Memory. Memoria de acceso aleatorio

RDI: Regulated Deficit Irrigation (Riego deficitario controlado)

SIGPAC: Sistema de información geográfica de parcelas agrícolas (Ministerio del Medio Ambiente y Medio Rural y Marino)

UV: banda ultravioleta del espectro (\approx 200 a 400 nm)

UVA: banda del espectro ultravioleta A (320 nm a 400 nm)

UVB: banda del espectro ultravioleta B (290 nm a 320 nm)

VDOP: Vertical dilution of precision (dilución vertical de precisión)