



Centre de Disseny d'Equips Industrials
CDEI - UPC



SENSORITZACIÓ DE ROBOT AGRÍCOLA PER A LA MONITORITZACIÓ DE CULTIU EN INSTAL·LACIÓ AGRIVOLTAICA

Treball de Fi de Màster KET4FOOD + BIO



Master in
Key Enabling
Technologies
4 Food and
+ Bioprocesses

Autora: Eva Díaz Barón

Tutors: David Caballero i Fran García

Març 2024

Abstracte

Actualment, l'agricultura es troba davant de reptes significatius, com ara el relleu generacional i la necessitat d'incorporar tecnologies sostenibles i innovadores. Així mateix, la transferència de coneixement de les institucions acadèmiques al sector agrícola és limitada. En aquest context, el projecte SYMBIOSYST busca integrar l'energia solar fotovoltaica amb l'agricultura per aconseguir una relació sinèrgica beneficiosa. Aquest Treball de Final de Màster (TFM) se centra en la sensorització d'un robot mòbil agrícola per monitoritzar els cultius en una instal·lació agrivoltaica al Parc UPC - Agròpolis (Viladecans, Barcelona). Els objectius inclouen la identificació dels paràmetres del cultiu a monitoritzar, la selecció i la implementació dels sensors adequats en un robot mòbil que travessarà les línies del cultiu per prendre les mesures i el post-processat de les dades obtingudes. Es discuteixen els paràmetres crítics com la temperatura del cultiu, l'estrès hídric, la biomassa i la productivitat. A més, s'explora la tecnologia MOBY com a plataforma base per al robot. S'avaluen diverses opcions de sensors, inclosos l'NDVI, la càmera RGB-D i la càmera tèrmica, per determinar la seva idoneïtat per a la monitorització dels cultius i es realitza una selecció de quin es el millor dispositiu entre les diverses marques del mercat actual per aquest projecte i quina és la posició idònia dels sensors al robot. El treball contribueix a la digitalització de l'agricultura i al desenvolupament de solucions sostenibles per a la gestió dels cultius en el marc de l'agricultura solar.

Resumen

Actualmente, la agricultura se encuentra frente a desafíos significativos, como el relevo generacional y la necesidad de incorporar tecnologías sostenibles e innovadoras. Asimismo, la transferencia de conocimiento de las instituciones académicas al sector agrícola es limitada. En este contexto, el proyecto SYMBIOSYST busca integrar la energía solar fotovoltaica con la agricultura para lograr una relación sinérgica beneficiosa. Este Trabajo de Final de Máster (TFM) se centra en la sensorización de un robot móvil agrícola para monitorizar los cultivos en una instalación agrivoltaica en el Parque UPC - Agròpolis (Viladecans, Barcelona). Los objetivos incluyen la identificación de los parámetros del cultivo a monitorizar, la selección e implementación de los sensores adecuados en un robot móvil que recorrerá las líneas del cultivo para tomar las medidas y el post-procesamiento de los datos obtenidos. Se discuten los parámetros críticos como la temperatura del cultivo, el estrés hídrico, la biomasa y la productividad. Además, se explora la tecnología MOBY como plataforma base para el robot. Se evalúan varias opciones de sensores, incluidos el NDVI, la cámara RGB-D y la cámara térmica, para determinar su idoneidad para la monitorización de los cultivos y se realiza una selección de cuál es el mejor dispositivo entre las diversas marcas del mercado actual para este proyecto y cuál es la posición idónea de los sensores en el robot. El trabajo contribuye a la digitalización de la agricultura y al desarrollo de soluciones sostenibles para la gestión de los cultivos en el marco de la agricultura solar.

Abstract

Currently, agriculture faces significant challenges, such as generational turnover and the need to incorporate sustainable and innovative technologies. Similarly, the transfer of knowledge from academic institutions to the agricultural sector is limited. In this context, the SYMBIOSYST project aims to integrate photovoltaic solar energy with agriculture to achieve a beneficial synergistic relationship. This Master's Thesis (TFM) focuses on the sensorization of an agricultural mobile robot to monitor crops in an agrivoltaic installation at the UPC - Agròpolis Park (Viladecans, Barcelona). The objectives include identifying the parameters of the crop to be monitored, selecting and implementing suitable sensors in a mobile robot that will traverse the crop lines to take measurements and post-process the obtained data. Critical parameters such as crop temperature, water stress, biomass, and productivity are discussed. Additionally, the MOBY technology is explored as a base platform for the robot. Various sensor options, including NDVI, RGB-D camera, and thermal camera, are evaluated to determine their suitability for crop monitoring, and a selection is made of the best device among the various brands on the current market for this project and the optimal sensor position on the robot. The work contributes to the digitization of agriculture and the development of sustainable solutions for crop management in the context of solar agriculture.

Taula de Continguts

1.	Introducció	5
1.1.	Estat actual de la digitalització en l'agricultura.....	5
1.2.	Estat de l'art: Monitorització dels cultius en temps real.....	7
2.	Objectius i Abast del treball	15
2.1.	Objectius.....	15
2.2.	Abast.....	15
3.	Materials i mètodes	16
3.1.	Localització dels camps experimentals i estructures auxiliars.....	16
3.2.	Descripció del robot.....	17
3.3.	Procés d'elecció dels paràmetres i elecció definitiva	20
3.3.1.	Humectació en fulla.....	20
3.3.2.	Temperatura del cultiu i estrès hídric.....	20
3.3.3.	Biomassa (NDVI, LAI) i productivitat	21
3.4.	Elecció dels sensors per a monitoritzar la vegetació	22
3.4.1.	Càmera tèrmica (temperatura i CWSI).....	22
3.4.2.	Càmera RGB-D	27
3.4.3.	Sensor NDVI	29
4.	Resultats i Discussió.....	35
4.1.	Implementació dels sensors a la plataforma robòtica	35
4.2.	Proposta de protocols experimentals d'assaig per a la validació dels sensors seleccionats	37
5.	Conclusions.....	41
6.	Bibliografia	43
7.	Annex.....	46
7.1.	Taula comparativa entre el camp de visió (FOV) i la distància de mesura a l'objecte desde la càmera tèrmica Optris Xi 400.....	46
7.2.	Taula comparativa característiques càmeres tèrmiques	47
7.3.	Fitxa tècnica càmera tèrmica Optris Xi 400	48
7.4.	Fitxa tècnica sensor NDVI Crop Circle ACS-211.....	50

1. Introducció

1.1. Estat actual de la digitalització en l'agricultura

Actualment, el sector agrícola es troba en una situació complexa a causa de diversos factors, entre els quals en destaca el repte del relleu generacional.

Des de la comissió de la UE (*Textos Aprobados - Relevo Generacional En Las Futuras Explotaciones Agrícolas de La Unión - Jueves 19 de Octubre de 2023*, n.d.), manifesten que s'ha de reforçar la formació en mètodes de producció sostenibles, pràctiques innovadores i noves tecnologies per promoure la seva adopció per part de persones joves. D'aquesta manera, es podrà millorar la capacitat de respondre de forma positiva als reptes i oportunitats actuals i futures.

A més, els agricultors joves son més propensos a promoure cadenes alimentàries més curtes, aplicar tecnologies i nous mètodes de producció que utilitzen pràctiques d'explotació agrícoles sostenibles (com l'agroecologia o l'agricultura ecològica).

Per tant, cal promoure models innovadors de col·laboració inter-generacional – com les associacions, la masoveria o la intermediació entre els propietaris de les terres i les persones interessades en elles – per tal d'afavorir la instal·lació progressiva de joves agricultors i facilitar la transferència de terres, equips i coneixements agrícoles.

Finalment, els punts essencials per atreure al sector a joves agricultors i agricultores serien: disposar d'una renda digna i justa, utilitzar mitjans de vida sostenibles i estables, propiciar una adequada qualitat de vida entre els agricultors i les seves famílies i, com a conclusió, obtenir un correcte equilibri entre la vida professional i la vida privada.

Un altre factor que agreuja la problemàtica del sector agrícola, és la falta de transferència de coneixement des de les institucions universitàries i centres de recerca cap el sector. Aquest fet fa que els principals actors del sector primari (agricultors/es i empreses) no es beneficiïn dels últims desenvolupaments tecnològics que els poden ajudar a millorar les tasques del seu dia a dia.

Moltes d'aquestes tasques rutinàries, impliquen supervisar i controlar els cultius, especialment en l'actualitat, amb la sequera i el canvi climàtic, en el que els esdeveniments extrems comprometen la productivitat de les explotacions. Això impulsa els agricultors a buscar avenços tecnològics que permetin un ús més sostenible de tots els inputs que s'apliquen a camp, i ho fan a través de les innovacions desenvolupades a les universitats i centres de recerca. No obstant això, encara hi ha feina per fer per que hi hagi una implantació robusta i extensiva de les innovacions, i la transferència del coneixement de les universitats al sector és clau.

Les decisions de maneig agronòmic s'han de prendre en base a dades objectives, i això requereix una monitorització constant i a temps real de l'estat dels cultius, del sòl i del clima com s'ha comentat anteriorment. A més de recollir dades, els sistemes automatitzats i autònoms poden ajudar a millorar les condicions de treball del sector agrari i a incrementar la sostenibilitat econòmica i ambiental de la producció d'aliments.

En el marc d'aquestes premisses, el projecte Europeu SYMBIOSYST (Grant Agreement N° 101096352) té com a objectiu investigar sistemes innovadors per anar més enllà de la idea de la producció d'energia solar i l'agricultura com a dos sectors separats, i trobar una nova sinergia on la terra i els cultius, juntament amb la fotovoltaica, puguin tenir una relació mútuament beneficiosa.

El projecte desenvolupa diferents solucions de fotovoltaica per a l'agricultura en camp obert i en hivernacles, i les demostra en quatre escenaris agrícoles en tres països diferents. A més, pretén adoptar sistemes de monitorització i control, dur a terme agricultura sostenible, digitalitzar eines agrícoles i implicar les organitzacions locals. El projecte està format per un consorci d'empreses i universitats europees, entre elles el CDEI - UPC (Centre de Disseny d'Equips Industrials).

En el marc d'aquest context es desenvolupa el present Treball de Final de Màster (TFM), que busca contribuir en l'adopció de la robòtica i la sensorització a les explotacions agràries mitjançant el desenvolupament de tecnologia robusta i amigable pel sector.

Per tant, l'objectiu principal del Treball de final de Màster és la selecció i implementació dels sensors més adients per a la monitorització de la vegetació en el marc del projecte SYMBIOSYST.

1.2. Estat de l'art: Monitorització dels cultius en temps real

La primera part d'aquest treball es centra en definir i tenir presents els principals paràmetres fisiològics que són d'interès per la gestió dels cultius en general. D'aquesta manera, al projecte SYMBIOSYST s'han considerat els paràmetres següents: l'altura, l'índex d'àrea foliar (Leaf Area Index, LAI en anglès), el volum de vegetació, la quantitat de biomassa i la temperatura de la fulla. Tots aquests paràmetres són importants per a planificar una gestió de la vegetació d'acord a les característiques de la mateixa, per maximitzar la producció i qualitat dels fruits i hortalisses, per calcular les necessitats hídriques dels cultius i planificar les dosis de reg, la coloració dels fruits, etc.

En primer lloc, el LAI (Leaf Area Index) amb el qual es determina la densitat foliar, està estretament relacionat amb la fotosíntesi, la transpiració, l'evapotranspiració i la productivitat de la planta. La vegetació té un impacte important sobre els diferents components hidrològics del cicle de l'aigua, alterant el balanç d'energia a la superfície. La mesura de les característiques de la vegetació, en general, i el LAI en particular s'han portat a terme mitjançant una gran varietat de sensors embarcats en sistemes terrestres i aeris. Entre ells, les càmeres RGB estàndard s'han fet servir per a capturar imatges laterals o zenitals de la vegetació i extreure els paràmetres que la caracteritzen, Li et al. (2023); Raj et al. (2021).

Per exemple, Jia & Wang, (2021) van mesurar el LAI de diverses pomeres mitjançant una càmera reflex digital estàndard equipada amb una lent òptica d'ull de peix. Es capturaven 8 fotografies de cada pomera en cadascun dels estadis vegetatius, i el LAI es va mesurar cada 15 dies durant el període de creixement de les pomes d'abril a setembre dels anys 2019 i 2020.

Els resultats van mostrar que el canvi de LAI als horts de pomeres va mostres un ràpid augment amb una tendència a la disminució d'abril a setembre a la regió muntanyosa de Loess, a la Xina. El rang de variació de LAI va ser de 0,26 a 2,16 [m² m⁻²]. Es va concloure que el LAI es podria utilitzar per estimar el coeficient de cultiu K_c dels horts de pomeres sota un dèficit d'aigua a l'altiplà de Loess, i es podria predir l'evapotranspiració real dels horts de pomeres en aquesta regió.

Una evolució de les càmeres RGB han permès que a més del color es pugui tenir informació de la distància dels objectes a la càmera, o profunditat (depth en anglès). D'aquesta forma, fa ja un parell de dècades apareixen les càmeres estereocàmeres ara anomenades càmeres RGB-D (D de depth). Aquests sensors òptics combinen el color (RGB) amb informació addicional de distància (D). Aquesta informació extra ha permès una millora dels algorismes de detecció de la vegetació, sobre tot en cultius arboris en els que les imatges laterals capturen informació de la fila de vegetació d'interès i de la vegetació que hi ha més enllà de la distància objectiu.

Kitzler et al. (2023) van presentar WE3DS com el primer conjunt de dades d'imatges RGB-D per a la segmentació semàntica de plantes de múltiples classes en l'agricultura de cultius. Inclou 2568 imatges RGB-D i les corresponents màscares o capes anotades manualment.

Les imatges es van capturar sota condicions de llum natural utilitzant un sensor RGB-D amb dues càmeres RGB en una configuració estereoscòpica. També proporcionen una referència per a la segmentació semàntica RGB-D al conjunt de dades WE3DS i la van comparar amb un model basat únicament en RGB. Els seus models entrenats aconseguixen fins a un 70,7% de mitjana de la Unió d'Intersecció (mIoU) per a la discriminació entre el sòl, set espècies de cultius i deu espècies de males herbes.

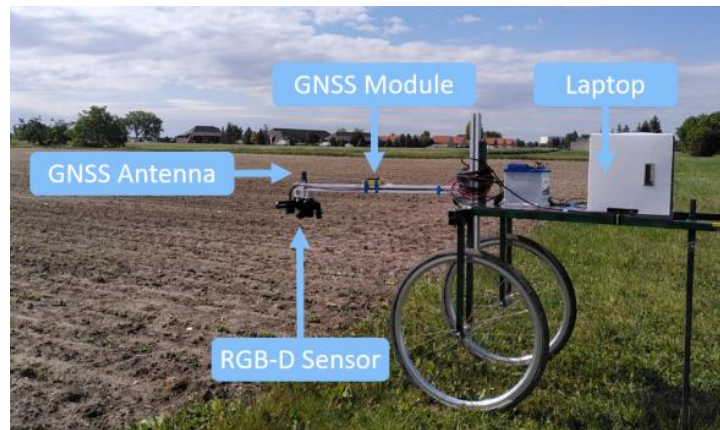


Figura 1. Posició del sensor RGB-D en el carro de mesures equipat amb els altres sensor al camp, Kitzler et al. (2023)

Per una altra banda, en l'estudi de Xia et al. (2015), es va utilitzar una càmera de baix cost RGB-D de tipus Kinect, desenvolupada per Microsoft, amb imatges de profunditat de 640 x 480 píxels. La càmera es va utilitzar per capturar imatges de profunditat i color als camps. Es fa servir l'algoritme de segmentació Mean Shift per segmentar les fulles de les plantes a les imatges de profunditat. Les fulles de les plantes es destaquen del fons natural mitjançant l'examinació de la vegetació en els segments candidats generats pel Mean Shift.

Les imatges es van prendre en estàtic, i la càmera, juntament amb el trípode, va estar posicionada a una distància de 100 cm respecte a les plantes en direcció horitzontal. A més, la posició específica de la càmera va estar a 130 cm d'alçada amb un angle de 30° cap avall com s'observa a la Figura 2, amb l'objectiu de capturar una visió òptima de les plantes durant el procés de segmentació.



Figura 2. Estructura de la monitorització de plantes mitjançant la càmera Kinect en un hivernacle, Xia et al. (2015)

Aproximadament la meitat dels resultats experimentals mostren taxes de segmentació de fulles individuals superiors al 90%. No obstant això, el mètode proposat és capaç de segmentar fulles individuals fins i tot en presència de fortes obstruccions Xia et al. (2015).

En la majoria de cultius, obtenir un alt nivell de biomassa és indicador d'una alta productivitat, qualitat del producte final i creixement de la planta en una situació de no-estrès fisiològic. La biomassa de la vegetació és un paràmetre que s'ha mesurat de diferents formes al llarg dels últims anys, ja sigui per determinacions visuals, o fent servir diferents mètodes indirectes mitjançant sensors òptics.

Un dels paràmetres que més s'han relacionat amb el vigor vegetatiu o quantitat de biomassa ha estat l'índex espectral NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Aquest índex es basa en la diferència normalitzada de la reflectància en les longituds d'ona del visible i l'infraroig mitjà (NIR), Rouse et al. (1973). L'NDVI és un índex que s'ha utilitzat per a multitud d'aplicacions de monitorització de la vegetació i la generació de mapes en el sector de l'agricultura. L'índex NDVI es pot determinar mitjançant sensors òptics tant actius com passius.

En primer lloc, els sensors passius detecten la radiància de la coberta vegetal (radiació reflectida) de la llum solar natural amb un sensor orientat cap avall. La reflectància de la coberta es calibra electrònicament monitoritzant la irradiància (radiació incident) amb un sensor orientat cap amunt. D'aquesta manera, els sensors passius eliminen de manera efectiva els problemes amb la possible coberta nuvolosa i canviant, però no aborden el problema de les ombres.

Per una altra banda, els sensors actius a terra eliminen la necessitat de calibració freqüent i superen els problemes de la coberta nuvolosa i les limitacions de l'hora del dia en què es realitzen les mesures (és a dir, la il·luminació natural i ombres). Això s'aconsegueix generant llum modulada (pulsada) des d'una font de llum auxiliar de manera que els sensors actius puguin funcionar igualment bé en totes les condicions d'il·luminació.

Per exemple, Y. Kim et al. (2012) van fer servir un dels sensors NDVI actius més comuns (GreenSeeker, NTech Industries, Inc., USA) per monitoritzar el cultiu de la pomera. En el seu estudi, va avaluar el rendiment del sensor espectral actiu comercial, GreenSeeker, per estudiar els efectes de varis paràmetres com la desviació del centre de l'objectiu, inclinació de la superfície de l'objectiu o la radiació solar diürna.

En general, aquest tipus de sensors actius consten d'un sistema que emet una longitud d'ona específica, que a l'interactuar amb el cultiu es distorsiona (degut a l'absorció d'aquesta longitud d'ona pels pigments de la fulla) i és captada de nou pel receptor del sensor. Normalment, les longituds d'ona en les que treballen aquests sensors se centren en la banda del vermell ($660 \text{ nm} \pm 12 \text{ nm}$) i a la banda del NIR ($770 \text{ nm} \pm 12 \text{ nm}$). La distància (dissenyada per NTech) a la qual van col·locar el sensor del cultiu va ser entre 81 i 122 cm, i l'amplada d'escaneig va ser de 61 cm, Y. Kim et al. (2012) tal i com es mostra a la Figura 3.

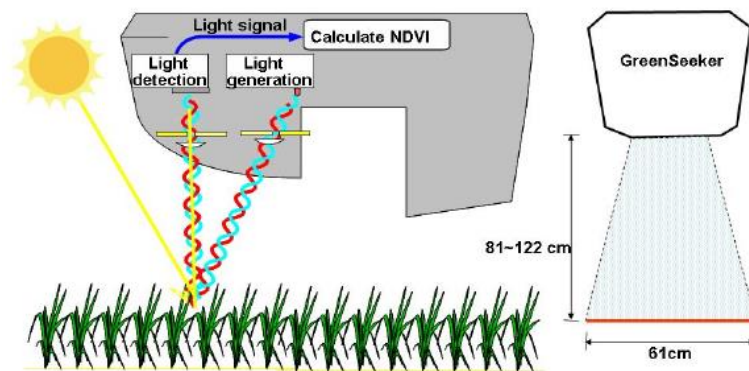


Figura 3. Estructura, distància al cultiu i amplada d'escaneig del sensor actiu òptic GreenSeeker,

Seguint aquesta línia de recerca, Amaral et al. (2015) va comparar tres sensors espectrals actius per identificar l'estat de la biomassa i el contingut de nitrogen en el cultiu de canya de sucre. Entre els tres sensors comparats hi havia el GreenSeeker i dos models de Crop Circle (Holland Scientific Inc., Lincoln, NE, USA). El banc policromàtic de diodes emissors de llum (LEDs) utilitzat al sensor Crop Circle ACS-210 (Holland Scientific, Lincoln, NE) emet llum en dues longituds d'ona, visible (595 nm) i infraroig proper (880 nm). La llum natural no està modulada, de manera que amb una electrònica sofisticada, el circuit de detecció del sensor pot diferenciar entre la radiància (reflectància) generada per la llum natural i la modulada, Stamatiadis et al. (2010).

En particular, el model Crop Circle ACS-210 treballa amb dues longituds d'ona que són la banda àmbar (590 nm) i la banda del NIR (880 nm) per calcular l'NDVI àmbar. D'altra banda, el model ACS-430 utilitza tres longituds d'ona per calcular dos índex de vegetació: la banda del vermell (670 nm) i la banda del red-edge (730 nm) pel càlcul del NDRE i la banda del vermell i la del NIR (780 nm) per calcular l'NDVI.

L'alçada de la tija de les canyes de sucre en el moment de la mesura en l'estudi d'Amaral et al. (2015) era de 0,5 m. En ambdós casos (GreenSeeker i Crop Circle), es van col·locar a una distància de 0,8 m respecte la part alta del cultiu, muntats a la barra d'aplicació de fertilitzants d'un vehicle de gran altura (high-clearance vehicle). Els resultats obtinguts

van demostrar que l'NDVI calculat a partir del sensor Crop Circle ACS-430 utilitzant una banda del red-edge (NDRE) va mostrar els millors resultats, exhibint el major rang de valors mesurats i la sensibilitat més alta com a predictor de biomassa. Tot i utilitzar sensors de coberta vegetal i longituds d'ona diferents (Figura 4), tots els sensors analitzats van demostrar ser bones eines per identificar la variabilitat en el desenvolupament i la vigorositat dels cultius als camps de canya de sucre.



Figura 4. Imatge de a) Sensor GreenSeeker, b) Sensor Crop Circle ACS-210 i c) Sensor Crop Circle ACS-430 muntats en una plataforma d'un vehicle agrícola per l'aplicació de fertilitzants, Amaral et al. (2015)

Degut al context de canvi climàtic i sequera en el que es troba l'arc mediterrani, la gestió eficient de l'aigua és primordial al sector agrícola. Aquells cultius que es cultiven sota condicions de reg depenen de les dosis d'aigua que s'apliquen durant el seu creixement, i per altra banda, els cultius que creixen en condicions de secà requereixen una gestió de la vegetació molt adaptada a les reserves d'aigua que hi ha al sòl. Tot això amb un clar objectiu: ser més eficients en l'ús de l'aigua, i produir més productes amb menys aigua.

L'evapotranspiració (ET) és el paràmetre que expressa la pèrdua d'aigua del sòl per efecte de la transpiració del cultiu i la evaporació directa d'aigua del sòl, Allen (2006). És indicador de la demanda d'aigua de les plantes i, per tant, permet fer una bona gestió de la irrigació, optimitzant els recursos hídrics i la resiliència en front a condicions climàtiques canviants. Els principals factors que afecten l'ET són el clima (temperatura de l'aire, humitat atmosfèrica i velocitat del vent), les característiques del cultiu i la fertilitat, salinitat i mal maneig del sòl poden influir en el valor de l'evapotranspiració.

L'evapotranspiració del cultiu s'ha mesurat amb diferents tecnologies. Una d'elles és la tecnologia aèria mitjançant drons (UAV) i satèl·lits. A més, en els darrers anys, les tecnologies de detecció proximal i remota (en anglès Remote Sensing, RS) s'han utilitzat cada vegada més per avaluar la vegetació en el context de fenotipat a camp. Aquestes tecnologies han demostrat el potencial de reduir les necessitats de mà d'obra en els agricultors i, en alguns casos, poden proporcionar informació més detallada sobre els

paràmetres biofísics del cultiu. Normalment, la majoria dels esforços en aquest camp es centren en l'ús de sensors d'imatge RGB (visible), multiespectral/hiperespectral, detecció de llum i rang (LIDAR) o sensors d'infraroig tèrmic de baix cost, Bellvert et al. (2021).

Com per exemple, durant l'experiment de Bambach et al. (2024) anomenat The Tree-Crop Remote Sensing of Evapotranspiration Experiment (T-REX), ha tingut com a objectiu identificar oportunitats de gestió de l'aigua i de la plantació per a maximitzar l'eficiència en l'ús de l'aigua i el segrest de carboni en ametllers i altres cultius d'arbres perennes llenyosos. El projecte combina tecnologies de satèl·lit, vehicles aeris no tripulats (en anglès unmanned aerial vehicles, UAV) i detecció proximal per recuperar variables clau utilitzades per modelar fluxos de superfície i propietats biofísiques del cultiu.

Tenint en compte la limitada disponibilitat de recursos hídrics i l'augment de la demanda d'aigua per part d'altres sectors i del canvi climàtic, està adquirint una màxima importància utilitzar eficientment els recursos hídrics disponibles per a la productivitat dels cultius en zones de reg Zhou et al. (2021).

L'aigua és un recurs escàs i cal racionar-lo aportant únicament el que sigui necessari per mantenir el cultiu en un estat d'hidratació adequat. En general, les fulles de les plantes són les responsables de la transpiració que, per altra banda, és el factor més important de la pèrdua d'aigua del sòl (juntament amb l'evaporació directa). La fulla, en situacions d'estrès hídric tanca els estomes, para la transpiració i, per tant, la pèrdua d'aigua; Buckley (2019). Això provoca un escalfament de la fulla, que pot ser determinat mitjançant sensors tèrmics.

La temperatura de la planta depèn també d'altres factors (temperatura externa, dèficit de pressió de vapor, humitat relativa, vent, etc.), per això s'ha determinat un índex que permet normalitzar aquestes situacions. L'ús de l'índex d'estrès hídric de les plantes o "crop water stress index" (CWSI), basat en aquesta temperatura, permet quantificar l'estat hídric i ajudar en la programació del reg. Aquest mètode s'ha utilitzat amb èxit per monitoritzar l'estat de les plantes, detectar l'inici de l'estrès causat per la manca d'humitat, predir el rendiment dels cultius i establir programes de reg per a diferents tipus de plantes Bo et al. (2023).

Els paràmetres fisiològics de les plantes, incloent-hi el potencial hídric de les fulles, el potencial hídric dels talls i la conductància estomàtica, s'han utilitzat com a indicadors per avaluar l'estrès hídric dels cultius. Tradicionalment, la programació del reg depenia principalment de la mesura directa d'aquests indicadors fisiològics, com ara l'estimació basada en l'evapotranspiració, la mesura del potencial hídric de les plantes i la mesura de la humitat del sòl; Fernández-Novales et al. (2018).

No obstant això, les mesures tradicionals requereixen una gran quantitat de treball i també personal expert i format per operar els instruments. És necessari un seguiment no destructiu i ràpid de l'estrès hídric dels cultius per donar suport a la gestió de la irrigació de precisió. L'accessibilitat a les imatges tèrmiques IR, ofereixen una alternativa ràpida i fiable per detectar i quantificar l'estrès hídric dels cultius; Zhou et al. (2021).

Pel que fa als mètodes que avaluen l'estrès hídric dels cultius (CWSI), aquests s'han convertit en un requisit previ per realitzar la programació del reg de precisió com s'ha

descriu anteriorment. L'accessibilitat a un sensor tèrmic infraroig (IR) proporciona una eina potent per detectar i quantificar l'estrès hídric dels cultius Zhou et al. (2021).

Un exemple en l'ús d'una càmera tèrmica d'infraroig per determinar el CWSI és en l'estudi de Bo et al. (2023). Es va dur a terme un experiment de camp de dos anys en un camp de blat de moro amb tres nivells d'irrigació i diferents condicions de cobertura amb pel·lícula, és a dir, sense cobertura, amb cobertura de plàstic i amb cobertura de plàstic biodegradable, a la conca del riu Shiyang al nord-oest de la Xina.

L'estudi tenia com a objectiu quantificar els efectes de la cobertura amb pel·lícula sobre la temperatura de la coberta vegetal i el CWSI, així com comparar els valors de CWSI obtinguts de les dades de l'estació meteorològica propera i les mesures preses in situ (a camp). Els resultats van mostrar que la pel·lícula de plàstic i la pel·lícula biodegradable reduïen significativament la temperatura de la coberta vegetal.

Per capturar les imatges de la coberta vegetal del blat de moro de primavera van utilitzar una càmera tèrmica d'infrarojos (UTi160V, UNI-T, Xina) amb una matriu de pla focal de 320×240 píxels i una lent amb un camp de visió de 30×23 graus. Les imatges tèrmiques infraroges es van capturar al migdia solar (12:00-14:00 h) en dies assolellats i sense núvols.

Es van establir punts d'observació fixes al camp i es va utilitzar una cadira d'1 m d'altura per elevar la posició del sensor. La diferència d'altura entre el dossel vegetal dels cultius i la càmera era d'aproximadament 0,5 m amb un angle de 15° respecte a l'horitzó. L'altura de la càmera es va adaptar segons l'etapa de creixement del blat de moro. La diferència màxima d'altura entre el terra i la càmera era d'uns 2,5 m. La càmera es va mantenir en una posició orientada cap a l'est o l'oest per evitar ombres a la zona de mesura, Bo et al. (2023).

En els estudis anteriorment mencionats, els sensors o bé es feien servir de forma manual per a realitzar les mesures o s'implementaven en maquinària agrícola dedicada a fer tractaments al cultiu. La tendència actual és la de muntar aquest tipus de sensors en petits equips lleugers, molts d'ells autònoms.

Un exemple d'èxit que ha posat en pràctica aquesta tecnologia ha estat l'equip de Fernández-Navales et al. (2021). L'objectiu d'aquest treball va ser demostrar la capacitat del VineScout (desenvolupat en el context del projecte EU H2020), un robot terrestre dissenyat per avaluar i mapejar l'estat de l'aigua de les vinyes mitjançant radiometria tèrmica infraroja (veure Figura 5). Les proves es van dur a terme sota diferents tractaments de reg durant les temporades 2019 i 2020 a Douro Superior (Portugal).

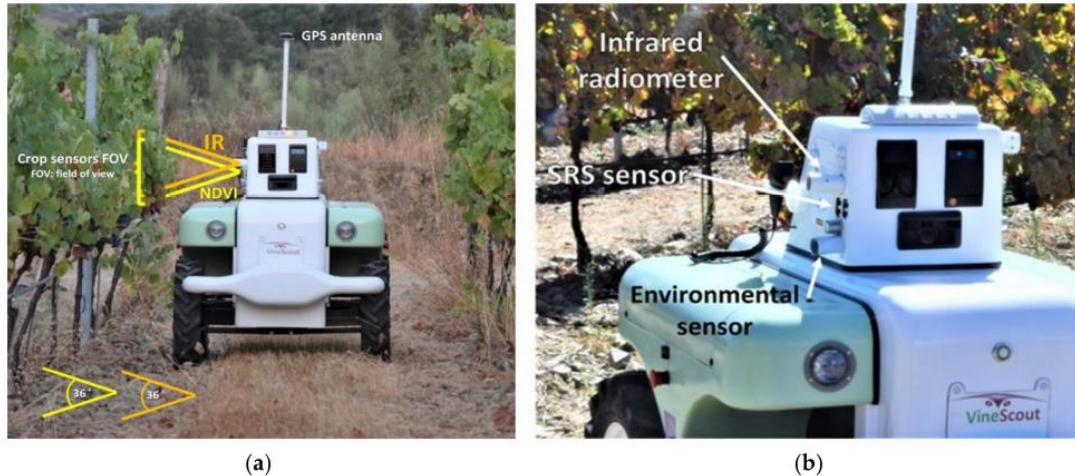


Figura 5. Imatge de a) Vinescout VS-3 vehicle terrestre autònom utilitzat per monitoritzar l'estrés hídric de les vinyes durant la temporada 2020 b) Detall dels sensors del cultiu utilitzats per prendre les mesures en dinàmic de l'estrés hídric, Fernández-Novales et al. (2021).

En aquest estudi, les mesures tèrmiques en moviment es van realitzar a través d'un radiòmetre IR muntat al prototip VineScout per estimar l'estat de l'aigua de la vinya. Es va utilitzar el model de radiòmetre IR SI-421 d'Apogee Instrument Inc. (Logan, Utah, USA) per mesurar la temperatura de la superfície de la coberta vegetal. El seu camp de visió (FOV) va ser de 36 °, és a dir de 0,3 m de diàmetre segons la distància del sensor al cultiu. Aquest sensor de cost baix opera en el rang de longituds d'ona entre 8 i 14 μm amb una incertesa de calibratge i una repetibilitat de mesura de $\pm 2\text{ }^\circ\text{C}$ i inferior a 0,05 $^\circ\text{C}$, respectivament. A més, van utilitzar la càmera tèrmica ThermoCAM Flir P640 amb una resolució IR de 640 x 480 píxels.

En l'estudi de García-Tejero et al. (2016) van monitoritzar l'estat hídric de dues varietats de *Vitis vinifera* al sud de Portugal. La temperatura del dosel (T_c) també va ser mesurada mitjançant termografia. Les mesures es van realitzar periòdicament al llarg del dia amb una càmera tèrmica Flir SC660 (Flir Systems, EUA) amb una resolució de 640 \times 480 píxels.

La càmera es va col·locar perpendicularment a la coberta vegetal, a uns 2 m del costat il·luminat pel sol. Es va fer una imatge per cep, utilitzant dues plantes per varietat, tractament i replicació ($n = 4$).

Les imatges tèrmiques es van analitzar mitjançant el programari 'Flir QuickReport' (Flir Systems, EUA). La T_c es va estimar en funció de la temperatura mitjana de 2-3 regions d'interès (ROI) il·luminades pel sol seleccionades en cada imatge (Figura 6). Això va evitar la selecció de píxels en taques o material de fusta/lignificat de tiges ombrejades.

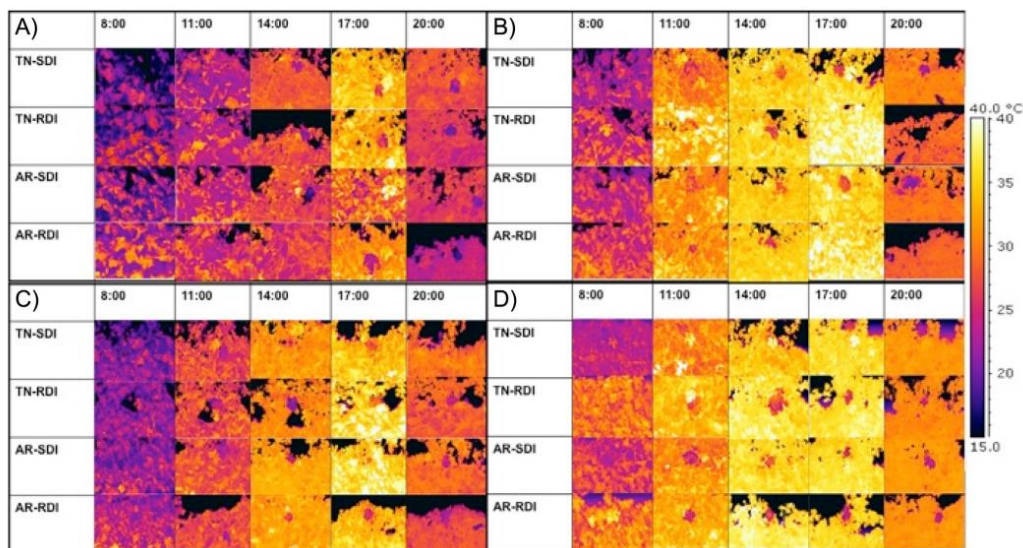


Figura 6. Imatges tèrmiques infrarojes en fals color preses durant l'estudi de García-Tejero et al. (2016) amb la càmera tèrmica Flir SC660.

2. Objectius i Abast del treball

2.1. Objectius

Els objectius d'aquest treball són:

- Identificar quins paràmetres del cultiu es poden monitoritzar en dinàmic amb un robot mòbil per extreure conclusions de salut i productivitat.
- Identificar els mínims paràmetres que cal monitoritzar per treure conclusions precises i fiables.
- Determinar les especificacions tècniques dels diferents sensors a implementar sobre el robot i fer la recerca comercial de les possibilitats ofertades al mercat.
- Treballar amb l'equip d'implementació i disseny del robot mòbil per integrar els sensors al robot seguint les especificacions tècniques descrites.
- Definir el post-processat i l'emmagatzematge de les dades obtingudes pels sensors per tenir valors objectius de l'estat del cultiu.

2.2. Abast

Aquest Treball de Fi de Màster es centrarà específicament en la recerca i l'elecció de diversos sensors per implementar-los en un robot mòbil terrestre.

El disseny d'aquest robot mòbil dins del projecte SYMBIOSYST, és responsabilitat del grup de recerca del Centre de Disseny d'Equips Industrials (CDEI), que seguirà els resultats i conclusions proposades per aquest TFM per incorporar els diferents sensors de monitorització de la vegetació, per determinar les mides, pesos i connexions que tindran els sensors amb l'objectiu que es pugui dimensionar les característiques del robot.

Per tant, queda fora de l'abast del treball fer la implementació dels sensors i la programació d'aquests amb el sistema ROS. Les tasques quedaran acotades en l'obtenció dels dispositius i entendre el codi per poder extreure les dades però sense realitzar la implementació o programació.

3. Materials i mètodes

3.1. Localització dels camps experimentals i estructures auxiliars

Els diferents cultius del projecte SYMBIOSIST es monitoritzaran a les instal·lacions del Parc UPC - Agròpolis (Viladecans, Barcelona). Dins d'aquest recinte s'habilitarà una zona específica per aquest projecte on s'instal·laran els panells solars.

Els cultius considerats dins del projecte son: enciams, carbassó, meló, faves i tomàquets. És important tenir en compte les necessitats o requeriments fisiològics d'aquests cultius, sobretot la radiació solar, ja que en una zona no incidirà la totalitat d'aquesta perquè damunt es trobaran els panells solars com s'ha comentat anteriorment.

Tots els cultius planificats dins del projecte son herbacis i es planten entre els períodes de primavera i estiu, pel que les seves necessitats de llum i aigua son importants. És ben cert que el context de canvi climàtic en el que ens trobem està portant períodes amb una alta irradiació i temperatura, que en molts casos malmeten els fruits, pel que la combinació de les plaques fotovoltaïques com a ombreig parcial es presenta com una oportunitat per a reduir les cremades dels fruits i excessiva transpiració de les plantes.

Tots els cultius del projecte se solen cultivar en condicions de regadiu i majoritàriament el fertilitzant s'aporta en forma de fertirrigació pels canals de reg localitzat. Tots aquests aspectes fan que, sota situacions de falta d'aigua i nutrients, els cultius hortícoles presentin símptomes a les fulles de forma molt ràpida, i que la seva producció se senti ressentida de forma important. Per això, una monitorització i detecció de les anomalies el més aviat possible permetrà una gestió més ràpida per minimitzar els impactes negatius.

Les estructures dels diferents cultius son variades, des de ports baixos i extensos (el meló i el carbassó) fins a ports alçats i emparrats (els tomàquets). Aquest fet requereix una certa flexibilitat per part de la plataforma robòtica i cal planificar de forma molt acurada el posicionament dels sensors de recollida de dades sobre la plataforma per tal de que no presentin problemes pel lliure moviment del robot de SYMBIOSYST a camp.

El projecte SYMBIOSYST té planificat una distribució dels cultius i estructures auxiliars i ha organitzat un plànol de com es distribuïran els cultius i quines mesures haurà de tenir cada zona, com es pot observar en la Figura 11.

En primer lloc, es delimitarà una zona de l'assaig sota els panells solars i una altra zona d'assaig a l'aire lliure. Cada zona d'assaig tindrà una zona de control. Cada bancal de cultiu inclourà 4 línies d'enciam (meló o carbassó) i 2 línies de faves o tomaqueres. Aleshores, el robot mòbil, haurà de circular entre les fileres del cultiu pel passadís de 0,9 m d'amplada. Els panells solars estaran instal·lats a una altura de 2,8 m del sòl. Cada panell tindrà una amplada de 1,45 m com es pot observar a la Figura 11.

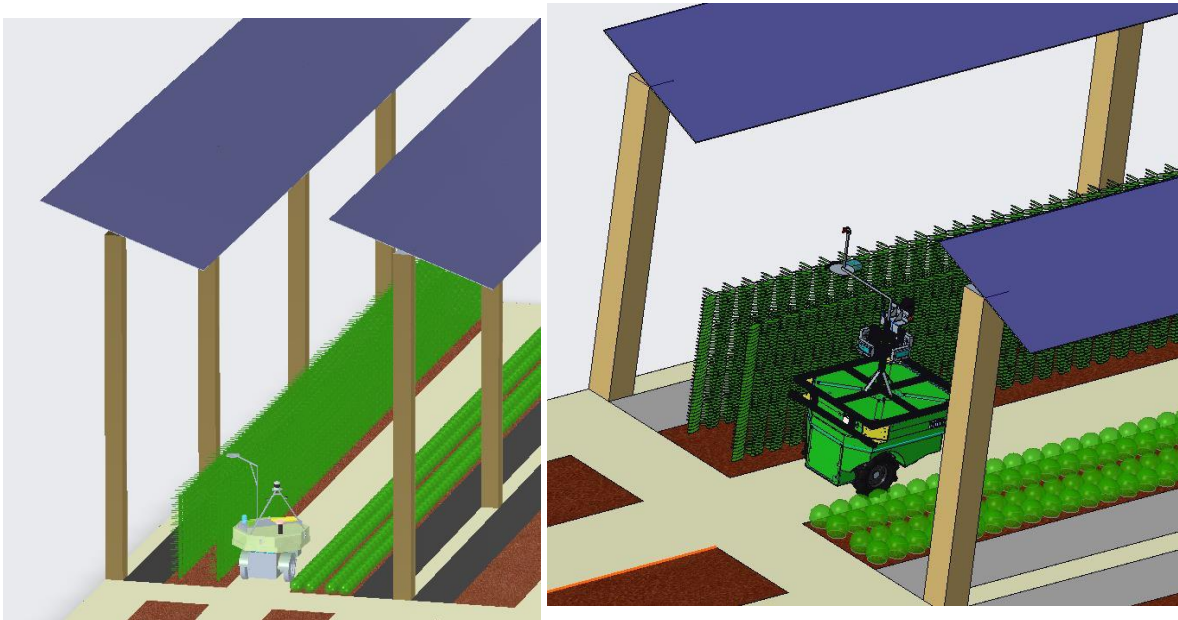


Figura 7. Plànol 3D de la zona d'assaig amb el robot mòbil (esquerra primer plànol 2023 i dreta última actualització 2024).

3.2. Descripció del robot

El dispositiu, dissenyat pel projecte SYMBIOSYST des del CDEI a Barcelona, es basa en una tecnologia desenvolupada a la Universitat Politècnica de Catalunya, MOBY. Actualment, MOBY té una maduresa de mercat i ja ha estat validada pel mateix en un entorn industrial.

La tecnologia MOBY està composta per una part hardware i una part software. La part hardware inclou la tecnologia patentada que permet aconseguir el moviment omnidireccional, tot i utilitzar rodes convencionals. La part software inclou la navegació segura del sistema sense un camí definit prèviament, inclosa la capacitat de detectar i evitar obstacles mòbils. També facilita la integració d'aplicacions robòtiques mitjançant l'API ROS.

El moviment omnidireccional, fins ara inexistent al sector agrícola; redueix els temps de cicle, requereix menys espai de maniobra i augmenta la precisió en operacions com la transferència de càrrega, amb un rendiment molt millor que les tecnologies de la competència.

De fet, els éssers humans es mouen omnidireccionalment. En robòtica col·laborativa, on els robots i els humans coexisteixen en entorns no-diferenciats, la interacció humà-robot és molt importat. En aquest sentit, la omnidireccionalitat permet unes interaccions molt més naturals.

Per al cas d'aplicacions en cultius de filera (com és el cas del projecte SYMBIOSYST), la omnidireccionalitat permet que el robot es desplaci paral·lelament al cultiu, tot mantenint una distància constant (Figura 8). Aquest fet presenta avantatges, com per exemple, en tasques d'inspecció amb visió per computador.

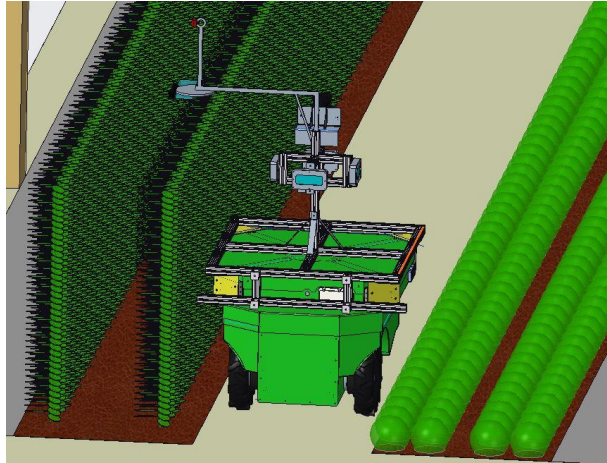


Figura 8. Imatge 3D del robot MOBY circulant entre les fileres dels cultius de faves i enciams, amb el moviment omnidireccional

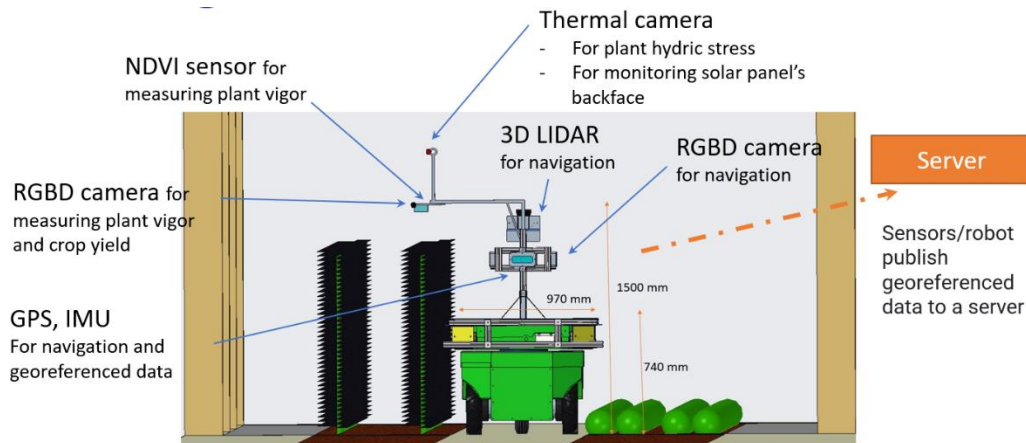


Figura 9. Proves a camp amb la base/plataforma del robot MOBY

A més, la base del robot (Figura 8), resol tota la complexitat del dispositiu robòtic en quant a la mobilitat i la navegació en un entorn agrícola. Gràcies a l'ús de rodes convencionals, la tecnologia no està limitada a funcionar en terrenys llisos, sinó que es pot adaptar a terrenys abruptes o agrícoles, tot i mantenir les capacitats de moviment omnidireccional. Es poden muntar carrosseries personalitzades, convertint el producte en un sistema molt flexible amb una àmplia gamma d'usos durant tota la campanya, augmentant el factor d'ús i reduint el temps de recuperació de la inversió.

Aquesta plataforma robòtica mòbil omnidireccional tot terreny, està dotada de sensors de navegació (GPS, IMUs i LIDAR Ouster 3D) per tal de navegar de forma autònoma i eficient al camp, evitant col·lisions amb obstacles fixos o mòbils (Figura 9). Per establir les comunicacions, conté WiFi, Ethernet, Bluetooth i 4G. A més, té una autonomia de 8

hores i la bateria és de 48 V amb connexions a 24 V, 12 V i 5 V. Assoleix una velocitat màxima de 1,7 m/s i una càrrega màxima de 500 kg.



Robot communications (4G, WiFi, Bluetooth)

Figura 10. Imatge 3D de les posicions dels sensors i mesures de la plataforma robot MOBY

El disseny i l'estructura del robot s'ha realitzat tenint en compte el creixement màxim de cada tipus de cultiu. Si s'observa la Figura 10, en el cas dels enciams i les cucurbitàcies (meló i carbassó), l'alçada màxima de creixement que poden assolir es de 0,25 m. Per una altra banda, les tomaqueres i les faves poden arribar a créixer fins 1 m d'altura.

Per tant, a l'hora de prendre les mesures amb els sensors del robot mòbil, l'extensió de la plataforma o porta-sensors haurà de modificar la seva longitud per adaptar-se a les condicions reals del cultiu pel qual estigui passant. El braç pot arribar a variar la seva longitud fins a $\pm 0,5$ m per dalt o per baix. Des del terra, l'alçada mínima i màxima del robot amb el braç serà entre 1,30 - 1,80 m.

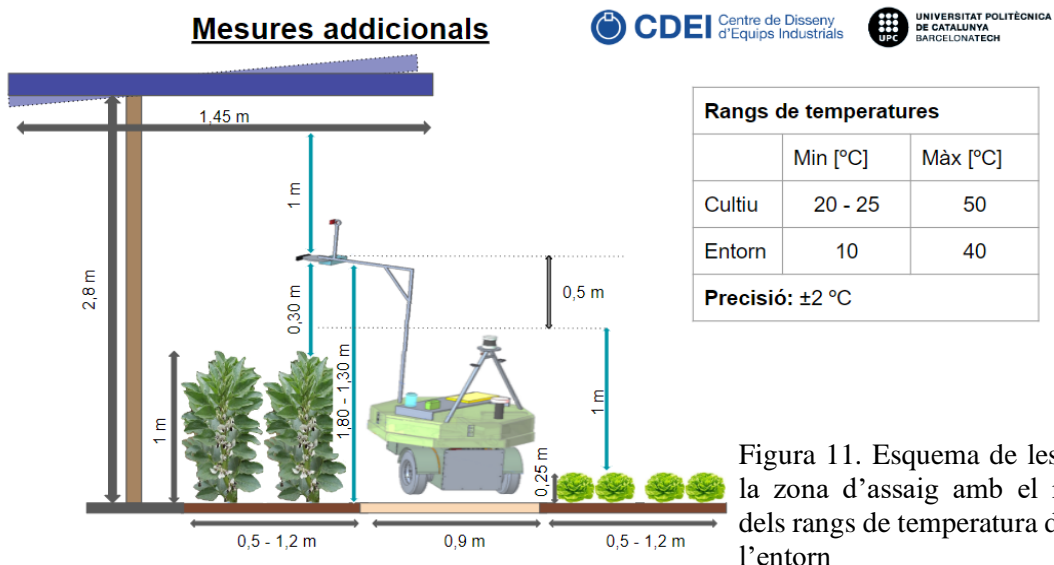


Figura 11. Esquema de les mesures de la zona d'assaig amb el robot mòbil, dels rangs de temperatura del cultiu i de l'entorn

3.3. Procés d'elecció dels paràmetres i elecció definitiva

Dins de la proposta inicial de SYMBIOSYST, els paràmetres que es van considerar com a importants per monitoritzar van ser la temperatura del cultiu, la humitat o humectació en fulla, la biomassa i la productivitat del cultiu. En base a aquest punt de partida, i creuant aquesta informació amb els estudis consultats en la revisió bibliogràfica, en aquesta secció es discuteixen, de forma breu, els paràmetres a monitoritzar, els seus inconvenients i es proposa una elecció definitiva dels mateixos.

3.3.1. Humectació en fulla

En primer lloc, l'equip del projecte SYMBIOSYST va proposar mesurar la humectació en fulla mitjançant un sensor implementat damunt del robot. Conèixer la humectació en fulla és important per tal de poder determinar el risc d'infecció de diferents fongs que es poden reproduir a la superfície de la fulla si les condicions de temperatura i humitat són les idònies. Per mesurar aquest paràmetre, el més comú és fer servir un sensor d'humectació en fulla o "Leaf wetness sensor" (LWS). Aquest sensor mesura el canvi en la impedància elèctrica d'una reixeta de filferro a la fulla, un clip connectat a la fulla o més comunament d'una fulla artificial i produeix una senyal de sortida que varia segons la humitat superficial del sensor; Hornero et al. (2017).

Ràpidament es va descartar aquesta proposta arrel del tipus de sensor que es necessitaria per mesurar la humectació en fulla de cada cultiu. El sensor LWS simula una fulla i es col·loca en el cultiu de forma estàtica, i aquest aspecte el fa incompatible amb la seva implementació en un robot en moviment per a mesures dinàmiques d'aquest paràmetre.

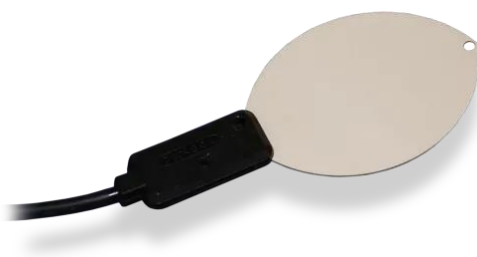


Figura 12. Exemple de sensor d'humectació en fulla del tipus fulla artificial de Campbell Scientific LWS: *Leaf-Wetness Sensor* (n.d.)

3.3.2. Temperatura del cultiu i estrès hídric

Aquest era un dels paràmetres importants descrits en la proposta del SYMBIOSYST i també s'ha vist que és un dels paràmetres més utilitzats per determinar les condicions hídriques del cultiu en la bibliografia consultada. Com ja s'ha explicat anteriorment, quan una planta està ben hidratada, realitza correctament la seva funció de transpiració i manté la seva temperatura interna en un rang pròxim a la temperatura ambiental. Quan la planta té aigua, els estomes estan oberts i la planta fa la fotosíntesi per a produir carbohidrats. En el moment en que la planta entra en estrès hídric, les fulles tanquen els estomes per a no perdre aigua per transpiració, i la planta deixa de fotosintetitzar per la falta de CO₂ (que entra a la fulla a través dels estomes a la vegada que es perd l'aigua). Aquest

tancament dels estomes fa que la planta augmenti la temperatura de la fulla; Fernández-Navales et al. (2021).

La temperatura és un dels factors importants per a determinar l'estrès hídric de la planta, però no l'únic. La temperatura ambiental, el dèficit de pressió de vapor, el vent, o d'altres factors també afecten en gran mesura la temperatura de la fulla. Per aquest motiu, i amb l'objectiu d'estandarditzar aquests paràmetres, s'ha desenvolupat un índex que permet tenir en compte alguns dels factors que afecten a la temperatura de la planta. L'índex d'estrès hídric del cultiu o *Crop Water Stress Index (CWSI)* s'ha utilitzat àmpliament per avaluar el dèficit hídric de diversos cultius de camp com es mostra en l'equació; Zhou et al. (2021):

$$CWSI = \frac{T_{canopy} - T_{wet}}{T_{dry} - T_{wet}}$$

El CWSI té en compte la temperatura del cultiu (T_{canopy}), però la corregeix en funció de la temperatura atmosfèrica (T_{dry}) i d'un panell de calibració (T_{wet}). Aquest panell de calibració ha de ser blanc i estar humit en tot moment.

En el context del projecte SYMBIOSYST, es proposa avaluar aquest paràmetre d'estrès hídric mitjançant una càmera termogràfica que permeti determinar la temperatura del cultiu a temps real. És important establir l'efecte que tindrà la col·locació de plaques fotovoltaïques sobre el cultiu sobre la temperatura de la fulla i sobre l'estrès hídric, però això queda fora de l'abast d'aquest TFM.

3.3.3. Biomassa (NDVI, LAI) i productivitat

Per últim, entre els paràmetres que defineixen les característiques estructurals del cultiu, es troben la biomassa i, en part, la productivitat. Referent al rendiment, s'ha considerat que en aquesta primera fase es deixarà fora de l'estudi degut a que en la majoria de cultius seleccionats en el projecte SYMBIOSYST el producte que marca el rendiment són fruits (e.g. tomàquet, carbassó) o baines (e.g. faves).

En aquest TFM ens centrarem a proposar sistemes per avaluar la biomassa. El control de la biomassa és essencial per tal de determinar que el cultiu evoluciona de forma satisfactòria segons la seva fenologia. A més, un dels objectius principals en qualsevol sistema productiu és poder generar la major biomassa (matèria fotosintèticament activa i fruits) amb els menors inputs possibles (fertilitzants, aigua i pesticides). Per aquest motiu, ajustar els inputs a les característiques dels cultius és important per afavorir la sostenibilitat mediambiental i econòmica de l'activitat agrícola.

La biomassa, expressada com a índex d'àrea foliar, LAI, (m^2 de fulla per m^2 de sòl), o com a quantitat de massa seca, ens determinarà les accions de maneig agronòmic que hem de dur a terme a les parcel·les per tal de maximitzar la producció. Dins de les parcel·les agrícoles existeix variabilitat, per efectes dels diferents tipus de sòl, per diferents microclimes, etc., i cal poder determinar planta a planta les seves condicions de creixement per tal de poder oferir un maneig individualitzat. Això, tot i que ara és una feina complexa, amb el suport de la robòtica i la sensorica avançada serà possible en el futur.

3.4. Elecció dels sensors per a monitoritzar la vegetació

3.4.1. Càmera tèrmica (temperatura i CWSI)

La recerca de càmeres tèrmiques va començar a partir dels dispositius que s'utilitzaven en els estudis de l'estat de l'art prèviament comentats. A més, es van dur a terme una sèrie de reunions presencials a les oficines del CDEI amb comercials de diverses empreses del sector.

Els principals paràmetres que es van acordar per tenir en compte a l'hora de realitzar la millor tria de la càmera tèrmica van ser: resolució, mida i pes del dispositiu per implementar al robot mòbil, rang de temperatura, connectivitat i distància màxima càmera-objecte de mesura (cultiu). A continuació, s'explicarà amb més detalls per cada dispositiu. Finalment, s'inclou una taula a mode resum (Taula 1) de les diferents càmeres revisades per aquest projecte i d'una forma més detallada es pot ampliar la informació amb la taula completa a l'Annex 1.

- **Sensor de temperatura IR Teledyne FLIR A65**

La càmera té una resolució IR de 640×512 píxels i un camp de visió (FOV) de $25^\circ \times 20^\circ$ amb una lent de 25 mm. Les seves dimensions són de $106 \times 47 \times 50$ mm, amb un pes de 0,21 kg. Ofereix un ampli rang de temperatura per a la detecció d'objectes, que va des de -25 a 135 °C i de -40 a 550 °C.



Figura 13. Sensor de temperatura de Teledyne FLIR Model A65

- **Càmera termogràfica de muntatge fix Model A50 29° FLIR**

La càmera té una resolució IR de 464×348 píxels. Les seves dimensions són de $106 \times 47 \times 50$ mm, amb un pes de 519 g (sense la placa inferior de refrigeració). Ofereix un rang de temperatura ampli per a la detecció d'objectes, que va des de -20 a 175 °C i de 175 a 1000 °C.



Figura 14. Càmera termogràfica de muntatge fix de Teledyne FLIR Model A50 29°

No vam trobar la distància màxima de la càmera a l'objecte (en aquest cas, al cultiu) a les especificacions tècniques en cap de les dues opcions de FLIR.

Finalment, aquestes dues càmeres de FLIR com estan dissenyades per aplicacions industrials, es van descartar. Aquestes, tenen un focus fix per optimitzar el control de processos i de qualitat per maximitzar el rendiment, la qualitat del producte el temps de producció i reduir els costos en una planta industrial.

- **Propostes de la reunió amb l'empresa Infaimon**

- **Xenics Ceres T640 series**



Figura 15. Imatge de la càmera Xenics Ceres T640 series (vista frontal i posterior on s'observen les connexions)

La resolució IR de la càmera és de 640 x 480 píxels. En absència de les lents, les seves dimensions són de 45 x 45 x 75 mm (Figura 15), amb un pes de 231 g. Té la capacitat de detectar objectes en un rang de temperatura que oscil·la entre -40 i 70 °C, amb una distància mínima de funcionament de 1500 mm. Per una altra banda, no incorpora software propi, així que l'equip de calibració l'hauria d'implementar (*CERES / Exosens*, n.d.).

- **Teledyne Dalsa Calibir GX**



Figura 16. Imatge de la càmera Teledyne Dalsa Calibir GX (vista frontal i posterior on s'observen les connexions)

La càmera té una resolució IR de 640 x 480 píxels. Sense tenir en compte les lents, les seves dimensions són de 29 x 37 x 59 mm, amb un pes de 66,7 g. És capaç de detectar objectes en un rang de temperatura que oscil·la entre -40 i 65 °C. Inclou funcions flexibles de comptador i temporitzador de propòsit general per a controls interns/externs. Per últim, és possible realitzar el desenvolupament

d'aplicacions amb les biblioteques de programari que conté de Spera LT gratuïtament (*Calibir GX / Teledyne DALSA*, n.d.).

- **Proposta de la reunió amb l'empresa Measurex**

L'empresa Measurex va presentar la següent proposta de càmera tèrmica, la qual ha estat seleccionada pel projecte per la seva òptima adequació als requisits establerts.

La càmera tèrmica que s'ha escollit per implementar al robot mòbil és el model Optris Xi 400 (Figura 17). La càmera ens proporciona la temperatura de cada tipus de cultiu per que, a continuació, es puguin processar les dades i obtenir els valors d'estrès hídric de les plantes. D'aquesta manera podrem conèixer en temps real si la planta està ben hidratada o pel contrari li fa falta més quantitat d'aigua.



Figura 17. Imatges de la càmera tèrmica Optris model Xi 400

L'elecció de la càmera tèrmica s'ha realitzat tenint en compte diversos factors. Un factor determinant ha estat la distància màxima del sensor al cultiu per prendre la mesura de temperatura sense perdre resolució. En aquest cas, tenim un rang de distància entre 0,3 m i 0,8 m en funció del tipus de cultiu (enciams, tomaqueres, faves, carbassó o meló). Per un altre lloc, el dispositiu incorpora un mecanisme d'enfoc motoritzat manual que permet controlar l'enfocament des del propi software (mitjançant PC o l'App per mòbil).

Per una altra banda, és molt important que el rang de temperatura de la càmera IR coincideixi amb el rang de temperatura que pot assolir el cultiu dins de l'hivernacle com s'observa a la Figura 11.

També s'ha tingut en compte que amb la mateixa càmera es pugui mesurar la temperatura per sota de les plaques fotovoltaïques situades al sostre de l'hivernacle. A la Figura 10, es mostren les distàncies i altures de la càmera al cultiu i a les plaques.

Si tenim en compte aquestes distàncies, mitjançant la calculadora que ens proporciona Optris a la seva pàgina web (www.optris.es/calculador-optico), podem determinar la mida del píxel i la resolució que obtindrem segons el tipus de lents que escollim per la nostra càmera tèrmica. Per exemple, amb la distància més desfavorable de 0,8 m i una lent de

80° x 54° obtindríem una mida de píxel de 3,4 mm amb una amplada de mesura de 1,3 m aproximadament (que cobriria el cavalló sencer) com es pot observar a la Figura 18.

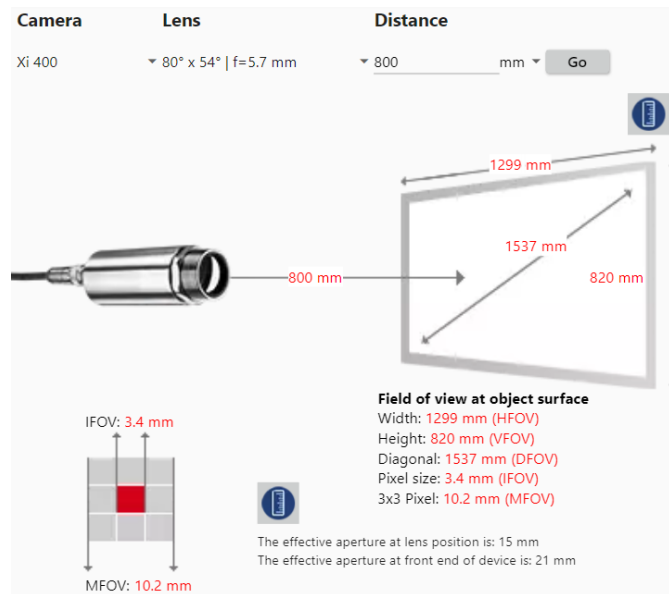


Figura 18. Valors de la mida del píxel i amplada màxima de mesura de la càmera Optris Xi 400 amb una lent de 80° x 54° i amb una distància del sensor al cultiu de 0,8 m

El problema principal amb una lent de 80° x 54° i a més si es va augmentant l'altura del sensor al cultiu, disminueix la resolució. A major òptica, el camp de visió o FOV augmenta, s'obre més i es perd resolució (efecte ull de peix).

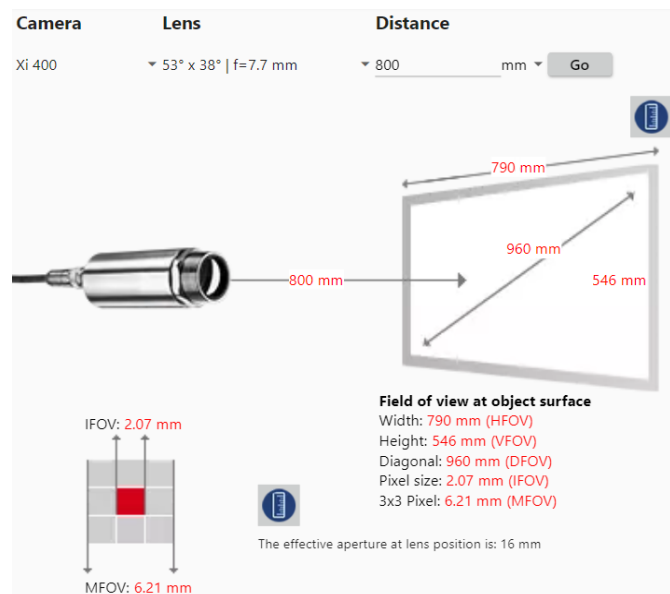


Figura 19. Valors de la mida del píxel i amplada màxima de mesura de la càmera Optris Xi 400 amb una lent de 53° x 38° i amb una distància del sensor al cultiu de 0,8 m

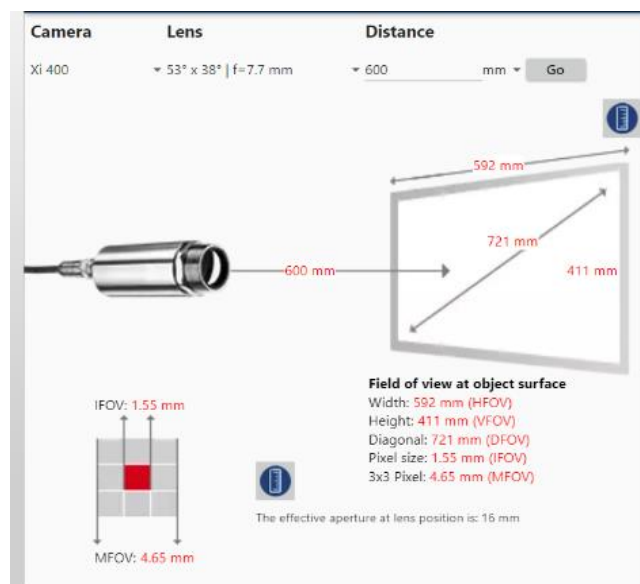


Figura 20. Valors de la mida del píxel i amplada màxima de mesura de la càmera Optris Xi 400 amb una lent de 53° x 38° i amb una distància del sensor al cultiu de 0,6 m

Per tant l'elecció d'una lent més estreta/petita seria la situació ideal (lent de 53° x 38°) per conservar la resolució de 382 x 288 píxels.

Encara que potser no mesuri tota l'extensió del caballó, es podria programar el software de la càmera per a que ens doni la mesura de temperatura de la part central del cultiu (on tindrem les hortalisses o els fruits).

Un cop escollida la lent de la càmera tèrmica (53° x 38°), també s'han tingut en compte diversos paràmetres tècnics fonamentals d'aquest dispositiu.

En primer lloc, es destaca una resolució de 382 x 288 píxels, que proporciona una imatge clara i detallada de les hortalisses sotmeses a l'anàlisi tèrmica. Pel que fa al rang de temperatura, s'estableix un ampli interval que va des de -20 fins a 900 graus Celsius, cobrint així una àmplia gamma de condicions ambientals.

En quant a les característiques físiques de la càmera, cal destacar un pes de 220 g, que la converteix en un dispositiu lleuger i fàcil de manejar en diverses situacions d'ús. A més, les seves dimensions compactes de 36 mm de diàmetre per 100 mm de longitud la fan adequada per a diverses aplicacions en diversos entorns. Amb una classificació IP67, la càmera està protegida contra la intrusió de pols i és resistent a l'aigua en condicions específiques, la qual cosa assegura la seva durabilitat i fiabilitat en diverses situacions i entorns d'ús.

La càmera té una gran flexibilitat de connectivitat, ja que pot enllaçar-se amb altres dispositius mitjançant ports USB 2.0 o USB a GigE (Power over Ethernet), proporcionant una ampla gama d'opcions per a la integració amb altres components del sistema.

A més, la càmera inclou un paquet de software propi anomenat optris PIX Connect, que ofereix funcionalitats avançades per a la captura, anàlisi i processament d'imatges tèrmiques. Aquesta eina proporciona una solució completa i versàtil per a la investigació i aplicacions pràctiques en diversos àmbits científics i industrials.

En resum, la càmera tèrmica seleccionada s'adapta de manera òptima als requisits establerts per al projecte, oferint una combinació equilibrada de prestacions tècniques i característiques físiques que la fan idònia per a les tasques d'anàlisi tèrmica requerides.

Taula 1. Recull de les càmeres tèrmiques revisades durant el projecte i la comparació de les característiques essencials que s'han tingut en compte per realitzar l'elecció final del sensor.

Càmera Tèrmica	Rang de T ^a	Resolució òptica (píxels)	Connectivitat al PC	Preu (€)
Xenics CERES T-1280 GigE 50 mK (60 Hz)	Pack 1: de -20 a 120 °C; Pack 2: de 50 a 400 °C	1280 x 1024	Ethernet GigE	9670
Teledyne-FLIR DALSA Calibir GX	de -35 a 60 °C	20 x 240 / 640 x 480	GigE amb PoE	6996,1
Sensor de temperatura IR FLIR A65	de -25 a 135 °C i de -40 a 550 °C	640 × 512	GigE, protocol GenlCam	
Càmera termogràfica A50 29 ° FLIR	de -20 a 175 °C i de 175 a 1000 °C	464 × 348	GigE, TCP/IP amb endoll FLIR, protocol GenlCam	
OPTRIS Serie Xi 80	de -20 a 100 °C i de 0 a 250 °C	80 x 80	USB 2.0 / Ethernet (100 Mbit/s) / PoE	
OPTRIS Serie Xi 400	de -20 a 100 °C i de 0 a 250 °C	382 x 288	USB 2.0 / USB a GigE (PoE)	1950
OPTRIS Serie Xi 410	de -20 a 100 °C i de 0 a 250 °C	384 x 240	USB 2.0 / Ethernet (100 Mbit/s) / PoE	

3.4.2. Càmera RGB-D

La selecció de la càmera RGB-D per al projecte va ser prèvia a l'inici d'aquest Treball de Fi de Màster. Així que es va treballar per buscar les seves característiques i si realment podria ser una bona elecció per aquest estudi. Es tracta de la INTEL RealSense Depth Camera D455 (*Buy Intel® RealSense™ Depth Camera D455*, n.d.).

Aquesta càmera també ha estat utilitzada durant l'estudi de Li et al. (2021) on s'ha proposat un mètode basat en deep learning per permetre la recol·lecció de fruites de longan (també s'anomenen “ull de drac”) amb UAVs. Aquest mètode utilitza una combinació de tecnologies, com ara pre-processament d'imatges, xarxes neuronals convolucionals i fusió d'informació amb la càmera RGB-D Intel Realsense D455 per localitzar les fruites.

També, Kang et al. (2022) introdueixen una estratègia de percepció i detecció visual basada en la fusió de dades de LiDAR i la càmera RGB-D Intel Realsense D455 per realitzar una localització precisa de les pomes a les pomeres.

- **Field of view (FOV) o Camp de visió**

Primerament, la distància mínima de profunditat requerida per a la captura d'imatges en la resolució màxima és de 0,52 m. Pel que fa al camp de visió (FOV), s'estableix en 87° x 58°.

- **Connectivitat i software**

Pel que fa a la connectivitat, la càmera disposa d'un connector USB-C (com s'observa a la Figura 21), que facilita la integració amb els dispositius i sistemes informàtics del propi robot mòbil. A més, es destaca la inclusió d'un software propi i un paquet de llibreries que permeten l'entrenament i la calibració de la càmera, aportant una flexibilitat i personalització essencials per a les necessitats específiques del projecte.

- **Característiques tècniques**

En quant a les especificacions tècniques de la càmera, es subratlla una resolució del sensor RGB de 1 MP i de la "depth output resolution" (resolució de sortida de profunditat en anglès) fins a 1280 x 720, que proporciona detalls visuals nítids i precisos, així com una taxa de fotogrames de 30 fps, que assegura una captura d'imatges fluida i sense interrupcions.

Finalment, es prenen en consideració les dimensions físiques de la càmera, les quals són de 124 x 26 x 29 mm, garantint una integració compacta i discreta dins del context d'estudi.

La càmera RGB-D inicial va haver de ser substituïda per una altra de nova del mateix model, atès que durant les proves inicials es va observar la presència d'un halo de color porpra/lilós, el qual dificultava notablement la identificació dels cultius i comprometia la qualitat de les imatges obtingudes. Així doncs, es va optar per la substitució per tal de garantir una captura d'imatges òptima i fiable per als propòsits de l'estudi.

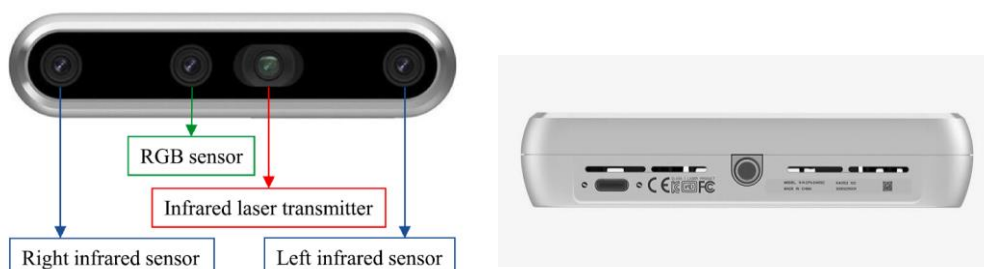


Figura 21. Imatge de la càmera RGB-D INTEL RealSense Depth Camera D455 (vista frontal amb l'estructura i vista posterior on s'observen les connexions); Li et al. (2021), "Intel.(s.d.). Intel RealSense Depth Camera D455". Recuperat de: www.intelrealsense.com/depth-camera-d455/

3.4.3. Sensor NDVI

La selecció del sensor NDVI ha estat crucial per a la realització d'aquest estudi d'anàlisi i monitoratge dels cultius. En aquest apartat, es descriu el procés de selecció, que va incloure una recerca exhaustiva dels principals dispositius del mercat, basada en el coneixement previ de l'estat de l'art. A més, es van mantenir diverses reunions amb distribuïdors de sensors a Espanya, com Lab Ferrer, Infaimon i Mesurex, per a avaluar les necessitats específiques del projecte i seleccionar el millor sensor. Aquesta col·laboració directa va ajudar a identificar el dispositiu més adequat per a les nostres necessitats de recerca.

- **Sensor passiu NDVI Apogee**

Des de l'empresa Lab Ferrer, ens van presentar el seu tipus de sensor NDVI. Es tracta d'un sensor passiu que consta de dues parts: Upward-Looking NDVI sensor i Downward-Looking NDVI sensor.

- **Funcionament**

Sensor passiu digital espectral. Mesura dues longituds d'ona, té un detector pel vermell a 650 nm i pel NIR a 810 nm. La part de dalt o Upward-Looking NDVI sensor funciona com a captador de la llum incident durant el dia. La part de baix o Downward-Looking NDVI sensor capta la radiació que reflexa la planta i per diferència de les dues parts, aconseguix el valor de reflectància. Aquest sensor és passiu ja que necessita l'energia del datalogger per poder funcionar i, a més, només funciona durant les hores del dia que hi ha llum perquè necessita aquesta mesura per fer el càlcul final de reflectància.

- **Connectivitat, grau de protecció IP i tensió d'alimentació**

El sensor conté un protocol de comunicació SDI-12 que permet connectar molts sensors a un mateix port en sèrie, en aquest cas a un mateix datalogger. També inclou un connector de cable amb IP68 d'acer inoxidable. Per últim, necessita una tensió d'alimentació de 5,5 a 24 V DC.

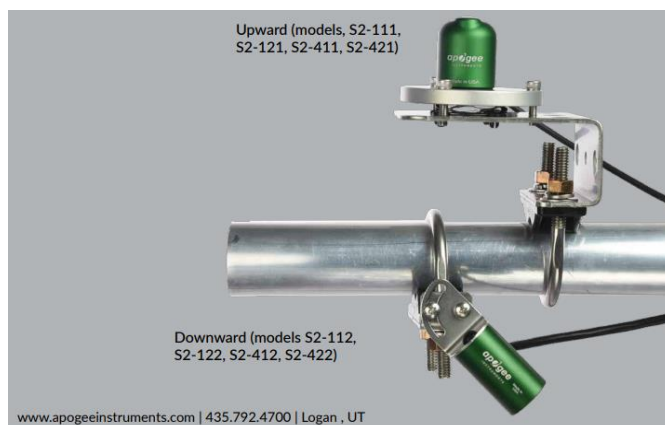


Figura 22. Imatge dels dos models Upward i Downward que conformen el sensor passiu NDVI d'Apogee

- Field of view (FOV) o Camp de visió segons l'angle del sensor

A continuació, utilitzant la calculadora IRR a la seva pàgina web (www.apogeeinstruments.com/irr-calculators/) es determina quin serà el camp de visió o FOV segons l'altura del sensor.

Amb un angle 0° i altura 1 m: $FOV = 0,513 \text{ m}^2$. La mesura no seria del tot correcte perquè només es veuria la zona central del cultiu.

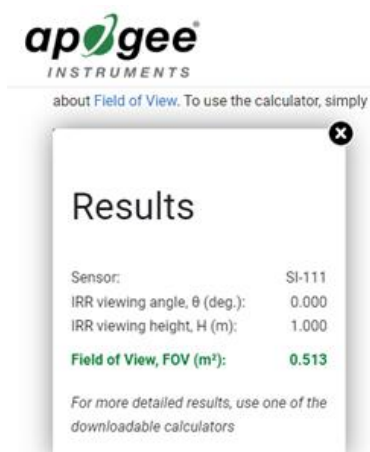


Figura 23. Imatge dels resultats de la calculadora IRR d'Apogee amb angle 0 graus i altura del sensor 1 m.

Amb un angle 0° i 0,5 m d'altura (el pitjor dels casos): $FOV = 0,128 \text{ m}^2$ (spot molt més petit). S'hauria d'acceptar que estem mesurant la part central del cultiu.

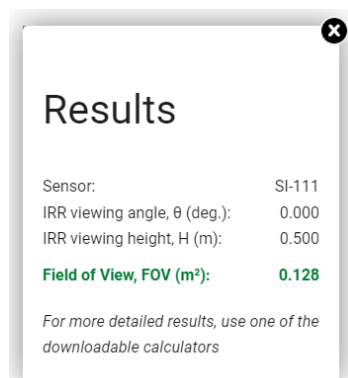


Figura 24. Imatge dels resultats de la calculadora IRR d'Apogee amb angle 0 graus i altura del sensor 0,5 m.

Amb un angle de 45° on el sensor downward estaria tombat (en posició no totalment zenital) i una altura de 0,5 m: s'hauria de baixar el sensor i girar-ho a 45° per augmentar el Field Of View (FOV).

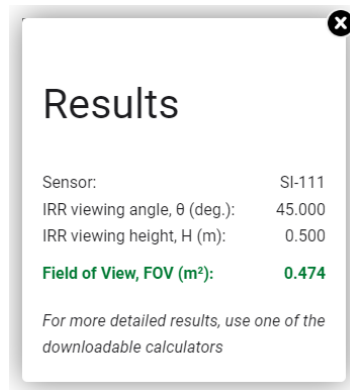


Figura 25. Imatge dels resultats de la calculadora IRR d'Apogee amb angle 45 graus i altura del sensor 0,5 m.

- **Pros i contres sensors passius vs sensors actius NDVI**

Mitjançant el sensor passiu Upward-Looking NDVI, si tinc una malla de sombreig (com el cas dels panells solars), la llum incident varia i ens pot donar informació sobre la radiació que està incidint sobre el cultiu en cada moment. Ex: ens podem trobar zones de l'hivernacle que tenen més irradiació que altres. Això és possible determinar amb sensors passius però no amb sensors actius.

En canvi els sensors actius ens permeten treballar de nit i en condicions meteorològiques amb nuvolositat.

- **Decisió final**

Després d'haver fet una reunió amb l'empresa Lab Ferrer, s'ha arribat a la conclusió que aquest sensor passiu NDVI no és adequat per implementar al robot mòbil del nostre projecte per les següents raons.

Primer, l'empresa exposa que aquest sensor està pensat per deixar-lo en un punt fix coneixent l'angle de mesura per saber l'angle d'instal·lació. Si es va canviant el punt de mesura amb el moviment del robot, també anirà canviant l'alçada i la superfície o camp de mesura. Si va augmentant l'alçada, el sensor tindrà cada cop més superfície de mesura i podria arribar a mesurar l'espai entre les fileres dels cultius. Les dades obtingudes no serien representatives del valor de NDVI final. A més, l'angle de mesura es pot modificar però no automàticament.

Per una altra banda, com es tracta d'un sensor passiu dual, el de la part de dalt o Upward-looking sensor recull la llum incident vermella i NIR. La radiació vermella visible no tindria cap problema en mesurar-la. Però per la banda del NIR, s'hauria de comprovar si el sostre de l'hivernacle i els panells solars deixen passar tota la radiació d'aquesta banda de l'espectre per perquè sinó els valors de NDVI queden modificats. Normalment un hivernacle no es deixa passar tota la radiació.

Per últim, l'empresa no podria donar un bon servei post venda si les dades obtingudes no son les correctes.

- **Sensor actiu NDVI GreenSeeker**

També es va trobar l'empresa Vantage Oeste (Sevilla) que suministren l'exemplar GreenSeeker al nostre país. Les característiques tècniques que ens van facilitar es descriuen a continuació.

- **Funcionament**

Un sensor de gran complexitat ubicat en la part inferior del sistema GreenSeeker emet ràfegues curtes de llum vermella i infraroja, seguidament mesura la quantitat de cada un d'aquests tipus de llum que es reflecteix en el sensor. Aquestes mesures són utilitzades pel sistema GreenSeeker per prendre decisions en temps real sobre la quantitat de fertilitzant a aplicar en un conreu mentre el pulveritzador es desplaça pel camp. La variabilitat dels sòls, així com les discrepàncies en el vigor de les plantes, són sistemàticament quantificades pel sistema GreenSeeker, amb l'objectiu que les plantes puguin rebre la quantitat exacta de fertilitzant necessària per a un desenvolupament òptim.



Figura 26. Sensor GreenSeeker ubicat en una pulveritzadora a camp

- **Connectivitat al vehicle principal**

Conté una pantalla integrada Trimble® TMX-2050™ o FmX® que actua com la interfície del sistema GreenSeeker a la cabina de la pulveritzadora. La mateixa pantalla que dirigeix el vehicle pot controlar la dosi d'aplicació del fertilitzant, eliminant la necessitat de tenir una altra pantalla addicional i deixant més espai lliure a la cabina.

- **Decisió final**

Després d'exposar aquest dispositiu a l'equip de disseny del projecte, es va decidir no realitzar la compra d'aquest sensor ja que amb el següent (Crop Circle) es podria establir una millor connectivitat i integració amb el robot. A més, es un sensor específicament dissenyat per tenir en compte les condicions actuals d'un cultiu i determinar les dosis de

fertilitzant a aplicar mitjançant pulveritzadores que es desplacen pel camp, com s'observa en la Figura 26. D'aquesta manera, es millora el rendiment i augmenta la rendibilitat per hectàrea.

- **Sensor actiu NDVI Crop Circle**

A través de la recerca bibliogràfica, es va trobar l'empresa Holland Scientific (Lincoln, EEUU) on desenvolupen instrumentació de sensors NDVI com la seva línia Crop Circle. Ens van proposar el model Crop Circle ACS-211 Active Canopy Crop Sensor.

- **Funcionament**

Es tracta d'un sensor actiu digital espectral. Aquest instrument calcula directament l'índex NDVI mesurant les bandes espectrals de 670 i 780 nm. A diferència dels sensors de llum radiomètrics passius, el Crop Circle ACS-211 no està limitat per les condicions d'il·luminació ambientals; les mesures es poden realitzar de dia o de nit gràcies a la seva tecnologia de font de llum activa (matriu de LED policromàtica modulada) i de fotodetecció (matriu de fotodíodes de silici de dos canals).

Per a aplicacions en moviment, el sensor Crop Circle ACS-211 es pot muntar en pràcticament qualsevol tipus de vehicle per a detectar o cartografiar remotament la biomassa dels cultius o vegetació mentre es circula pel camp. El disseny compacte i lleuger (pes de permet adaptar fàcilment el Crop Circle ACS-211 per a aplicacions muntades en pals o portàtils. La informació produïda pel sensor pot ser utilitzada per quantificar l'impacte de nutrients, aigua, malalties o altres condicions de creixement en plantes o cultius (*ACTIVE CANOPY CROP SENSOR*, n.d.) (*Buy Crop Circle ACS-211 Active Canopy Crop Sensor Now*, n.d.).

- **Connectivitat, grau de protecció IP i tensió d'alimentació**

Aquest sensor està dissenyat per muntar-se damunt d'un tractor o sobre un rover. La distància de lectura del sensor al dosel vegetal es troba entre 25 - 244 cm en la posició per damunt del cultiu (es pren la mesura des de dalt, perpendicular al terra).

Les dades s'emeten a una velocitat fixa a través del seu port sèrie RS-232. També incorpora el mode RS-485 però és per a ús intern.

El dispositiu necessita una tensió d'alimentació de 7 a 17 V DC - 210 mA. I el seu grau de protecció IP68 li proporciona resistència contra la pols i l'aigua.

- **Field of view (FOV) o Camp de visió segons l'angle del sensor**

El seu FOV correspon a 40° per 8°.

- **Pes, mida i distància sensor-cultiu**

El pes del sensor és de 430 g i les seves dimensions són de 8,9 x 20,1 x 4,8 cm.

Es col·loca damunt dels cultius i pren mesures des de la perspectiva superior, en un rang de distància que va des dels 25 cm fins als 244 cm respecte al cultiu.

Aquestes característiques ofereixen una manejabilitat i adaptabilitat adequades per a una captura de dades precisa i exhaustiva de l'estat vegetatiu dels cultius.



Figura 27. Sensor Crop Circle Model ACS-211

- **Decisió final**

Després de varis intercanvis de correus, preguntant a l'empresa Ecosearch d'Itàlia (proveïdor de Holland Scientific a la UE) totes les característiques mencionades anteriorment, es va arribar a la conclusió que comprar aquest sensor era la millor decisió. En un dels últims correus, ens van enviar l'oferta del preu (total de 3853 €) incloent el preu de l'enviament.

• **Conclusió final de l'elecció del sensor NDVI**

Després d'analitzar diverses opcions de sensors NDVI disponibles al mercat, s'ha pres la decisió de seleccionar el sensor Crop Circle ACS-211 de Holland Scientific, distribuït a Europa per Ecosearch. Aquesta decisió es basa en diverses consideracions tècniques i pràctiques. Primerament, es va descartar el sensor passiu NDVI d'Apogee de Lab Ferrer per les seves limitacions en termes de mobilitat i adaptabilitat a les condicions variables d'un robot mòbil. Seguidament, es va descartar el sensor actiu GreenSeeker de Vantage Oeste per la seva falta de connectivitat i integració amb el robot del projecte. En canvi, el sensor Crop Circle ACS-211 ofereix avantatges significatius, com la seva capacitat per a mesures de dia i nit, la seva adaptabilitat a diversos vehicles i la seva precisió en la quantificació de biomassa vegetal. A més, la seva distribució a través d'Ecosearch a la Unió Europea facilita el procés de compra i suport tècnic. En conclusió, la selecció del sensor Crop Circle ACS-211 s'alinea millor amb les necessitats i objectius del projecte, garantint una recollida de dades precisa i efectiva per a l'anàlisi de l'índex NDVI i la biomassa de tots els cultius de l'estudi SYMBIOSYST.

4. Resultats i Discussió

Els resultats d'aquest projecte s'estructuren en dos grans blocs. Primer es descriuen els sensors escollits a partir de l'estudi de la bibliografia, el contacte amb les empreses i la comparativa de característiques tècniques, funcionalitats i preu. A més, s'especifica la posició a ocupar sobre el robot per tal de recollir les dades de la forma més fiable, tot i assegurant que la mobilitat de la plataforma sigui flexible en els diferents tipus de cultius. En segon lloc, es proposen un seguit de plantejaments experimentals amb l'objectiu de provar la funcionalitat dels sensors escollits a camp.

4.1. Implementació dels sensors a la plataforma robòtica

- Càmera Tèrmica

L'elecció de la càmera tèrmica s'ha basat en la resolució, la mida i el pes del dispositiu per una bona implementació al robot mòbil, el rang de temperatura, la connectivitat i la distància màxima càmera-objecte de mesura sense perdre resolució i per això hem escollit la càmera OPTRIS Serie Xi 400.

Els resultats d'aquest estudi mostren una anàlisi exhaustiva de tres càmeres tèrmiques diferents amb l'objectiu de seleccionar la més adequada per a la implementació en un robot mòbil en un entorn agrícola. Els criteris de selecció inclouen la resolució, la mida i el pes per integrar la càmera al robot, el rang de temperatura, la connectivitat amb el robot i la distància màxima entre la càmera i el cultiu.

En base a aquests criteris, s'ha seleccionat la càmera tèrmica Optris Xi 400 per diverses raons. En primer lloc, la seva resolució ofereix una imatge de gran detall, essencial per a la detecció de petits canvis de temperatura en el camp que poden influir en l'estrès hídric del cultiu. A més, la seva mida i pes són compatibles amb la integració al robot mòbil sense afectar significativament la seva funcionalitat o maniobrabilitat. La seva ampla gamma de temperatures i la seva bona connexió amb el robot proporcionen una versatilitat òptima per a diverses aplicacions agrícoles.

Pel que fa a la posició de la càmera tèrmica envers el cultiu, s'ha determinat que la distància òptima entre la càmera i l'objecte de mesura ha de ser entre 0,3 m (valor mínim de distància al cultiu on la càmera tèrmica pot funcionar correctament com es pot comprovar a les especificacions de la FT de l'Annex 1) i 0,8 m. Aquesta distància permet maximitzar el camp de visió de la imatge sense comprometre la seva resolució. Amb distàncies superiors o inferiors, s'observa una disminució significativa de la qualitat de la imatge i una desviació notable dels resultats de les mesures.

El resultat proporcionat per la càmera tèrmica consistirà en la temperatura del cultiu. No obstant això, per tal d'assolir una funcionalitat òptima, aquest dispositiu requereix una programació específica que incorporant la fórmula de l'estrès hídric CWSI al programa

ROS, capaciti el robot mòbil per calcular un índex d'estrès hídric per a cada planta a partir de les mesures de temperatura preses amb la mencionada càmera tèrmica.

Sobre el rang d'estrès hídric, encara no hi ha un rang correcte per aquests cultius (tomàquet, faves, meló, enciam i carbassó). Cada cultiu en funció de la tolerància a la sequera que tingui i les condicions on es trobi, variarà el seu estrès hídric.

Aleshores, es necessitarà fer un estudi per veure a partir de quin punt les plantes entren en estrès. I encara que existeix bibliografia al respecte (com els valors de CWSI dels tomàquets cultivats al sud de la Xina a l'estudi de Alordzinu et al. 2021), el valor no està normalitzat per tant, no serà vàlid en el nostre cas i s'haurà de determinar el valor correcte de CWSI pel nostre estudi amb les nostres condicions i/o varietats de tomàquets, faves, meló, etc...

La càmera tèrmica ja ha estat adquirida i es troba a les instal·lacions del CDEI, preparada per ser muntada a l'extensió mòbil del robot, juntament amb la posterior calibració amb la càmera RGB-D.

- **Sensor NDVI**

Per una altra banda, d'entre els tres sensors NDVI proposats, la selecció definitiva s'ha decantat pel model Crop Circle ACS-211 per diversos motius.

En primer lloc, cal destacar la seva naturalesa com a sensor actiu, el que implica la capacitat d'efectuar mesures tant diürnes com nocturnes, sense estar subjecte a les fluctuacions de llum ambiental diària.

A més, la seva configuració compacta i lleugera proporciona una idoneïtat per al seu acoblament i muntatge en l'extensió mòbil amb facilitat, aspecte clau en el context de disseny i implementació. Cal subratllar que ha de ser ubicat en l'extensió del robot, alineat sobre els cultius i paral·lel al terra, amb una distància òptima compresa entre 25 i 244 cm.

La informació generada proporcionarà un valor de NDVI, essencialment rellevant en un interval entre 0 i 1 per a una interpretació precisa i fidedigna de la vigorositat dels cultius monitoritzats durant l'estudi.

Finalment, el sensor NDVI Crop Circle ACS-211 ja ha estat adquirit i ha arribat a les instal·lacions del CDEI. Està preparat per ser implementat a l'extensió mòbil del robot quan aquesta estigui dissenyada i muntada en el robot.

- **Càmera RGB-D**

Per últim, l'elecció de la càmera ja estava feta, només calia indicar la posició d'aquesta damunt de la extensió mòbil de la plataforma robòtica. Després de consultar diferents estudis, un d'ells el del projecte de segmentació 3D de fulles individuals de Xia et al. (2015) i determinar la posició dels altres sensors, s'ha arribat a la conclusió que la càmera

RGB-D s'hauria de situar entre 0,8 i 1 m de distància del cultiu. La direcció de la càmera seria paral·lela a les plantes i modificant l'angle de mesura segons l'estadi del creixement de cada planta per obtenir una captura idònia en cada moment.

A més, és imprescindible realitzar una calibració entre la càmera RGB-D i la càmera tèrmica per tal d'obtenir el valor d'estrès hídric individual per a cada planta. L'equip del projecte SYMBIOSYST encarregat de la implementació i programació dels sensors al robot mòbil, assumirà aquesta tasca del projecte.

En conseqüència, els pròxims passos a seguir consistiran en la calibració conjunta de les dues càmeres. D'aquesta manera, mitjançant la segmentació de cada planta del cultiu i la correspondència d'aquests píxels amb el valor de temperatura de cadascun, serà possible determinar el grau d'estrès hídric de la planta. Això es realitzarà incorporant la fórmula d'aquest paràmetre al sistema ROS, permetent així la lectura directa del valor de CWSI a la pantalla del dispositiu en base a les mesures de temperatura.

I per una altra banda, conjuntament amb l'equip de disseny del robot mòbil es proposa la creació d'una extensió del robot o porta-sensors amb mobilitat pròpia d'1 grau de llibertat. Per estalviar complexitat del sistema, aquesta extensió només es podrà moure en un sol eix. Però la plataforma superior del robot també podrà girar sobre si mateixa, donant la possibilitat de prendre mesures de dues línies paral·leles als sensors sense el propi desplaçament del robot pel passadís central.

Tota aquesta estructura, facilitarà als sensors posicionar-se en un rang òptim de distància per a que prenguin una bona mesura dels paràmetres mencionats.

4.2. Proposta de protocols experimentals d'assaig per a la validació dels sensors seleccionats

En primer lloc, és important puntualitzar que en el moment de la presentació d'aquest TFM ja s'han començat a realitzar diverses proves per al registre de la càmera RGB-D i la càmera tèrmica a la oficina del CDEI. Aquestes proves han consistit en col·locar una planta d'interior davant d'una paret blanca i/o llisa sense altres objectes al voltant i seguidament encendre les dues càmeres i els seus corresponents softwares per prendre les primeres instantànies de la planta. S'ha pogut comprovar que tant la càmera RGB-D com la càmera tèrmica funcionen correctament i que detecten les fulles de la planta com la seva temperatura en diferents zones com es poden observar a les Figures 28 i 29.

El pròxim pas és la calibració conjunta de les dues càmeres per a que mentre la càmera RGB-D detecti una fulla (o un conjunt), la càmera tèrmica mesuri la temperatura d'aquella mateixa fulla.

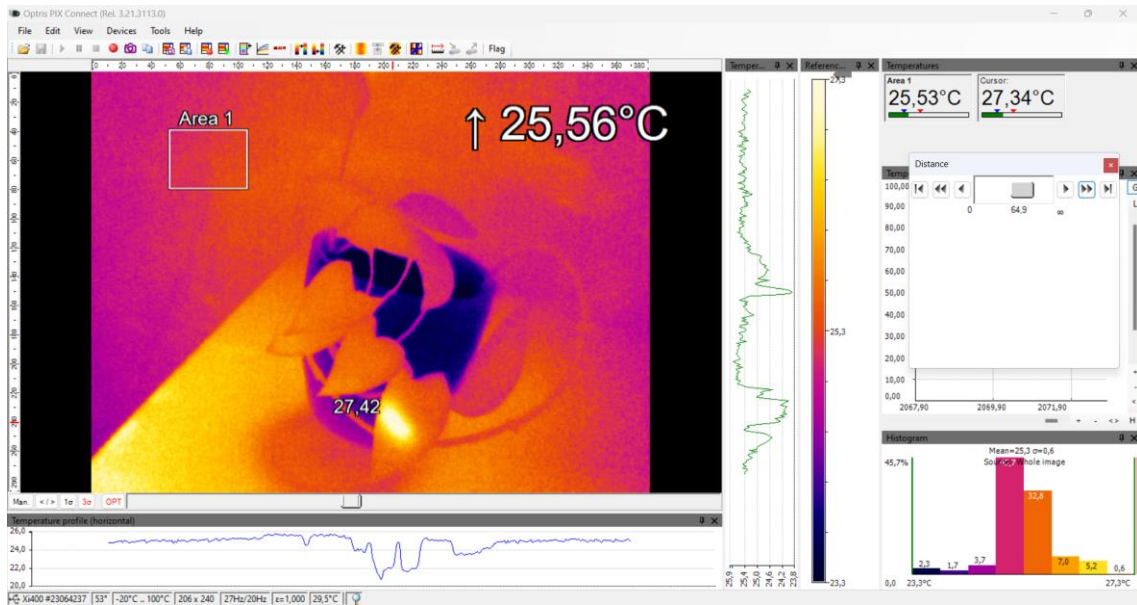


Figura 28. Imatge de la temperatura de la planta en dues zones capturada per la càmera tèrmica mitjançant el seu propi software



Figura 29. Imatge de la segmentació de les fulles de la planta capturada per la càmera RGB-D mitjançant el seu propi software

A continuació, es detallen dos protocols d'assaig per comprovar la correcta validació de les càmeres tèrmica i RGB-D i també la distància correcta de mesura dels tres sensors (càmera tèrmica, sensor NDVI i càmera RGB-D) al cultiu.

- Protocol d'assaig per al registrat de la càmera tèrmica i la càmera RGB-D per la monitorització dels cultius

L'objectiu d'aquest protocol d'assaig és determinar la precisió de la calibració entre la càmera tèrmica i la càmera RGB-D per a la monitorització dels cultius. Es vol verificar la capacitat de la càmera RGB-D per a segmentar la vegetació i obtenir els valors de temperatura de les zones de vegetació desitjades amb la càmera tèrmica. Així mateix, es compararà aquest procés amb la lectura de temperatura proporcionada per un termòmetre NIR col·locat en la mateixa zona del cultiu per avaluar la consistència dels resultats.

Per començar, es delimitarà una àrea experimental amb cinc línies per als diferents cultius a estudiar (tomàquets, faves, melons, carbassons i enciams). En cadascuna d'aquestes línies es plantarà un únic tipus de cultiu, assegurant-nos de mantenir una distància adequada entre les plantes per evitar la interferència entre els cultius.

Seguidament, es procedirà a la calibració de les càmeres tèrmica i RGB-D, col·locant-les en diferents posicions per veure com afecta la distància (a 0,5 m – 0,75 m i a 1 m del cultiu) i adequades per a una captura òptima i realitzant la calibració segons les especificacions del fabricant per assegurar-ne la precisió.

Un cop calibrades les càmeres, es capturaran imatges de la parcel·la experimental utilitzant tant la càmera tèrmica com la càmera RGB-D. S'ha de tenir cura de capturar imatges de cada cultiu individualment, mantenint una distància constant i un angle de captura consistent.

Posteriorment, es processaran les dades obtingudes utilitzant el programari corresponent per a segmentar la vegetació amb la càmera RGB-D i extreure els valors de temperatura de les zones de vegetació desitjades amb la càmera tèrmica. Aquests valors de temperatura es registraran per a cada cultiu.

Per últim, els resultats seran analitzats per determinar la precisió de la calibració entre les càmeres tèrmica i RGB-D en la monitorització dels cultius. Es compararà la capacitat de segmentació de la vegetació i l'exactitud en la mesura de la temperatura amb els resultats proporcionats pel termòmetre. S'avaluarà la coherència dels resultats entre les dues tecnologies i s'identificaran les possibles discrepàncies o errors.

Es conclourà sobre la viabilitat i la precisió de l'ús conjunt de les càmeres tèrmica i RGB-D en la monitorització de cultius, així com la seva comparació amb mètodes de mesura tradicionals com el termòmetre NIR.

A més, com a part final d'aquest protocol d'assaig, es procedirà a comprovar si l'ordinador, mitjançant la programació realitzada amb el sistema ROS (Robot Operating System),

permet calcular un valor d'estrès hídric a partir dels valors de temperatura presos amb la càmera tèrmica. Aquest anàlisi permetrà avaluar la capacitat del sistema per a proporcionar una indicació de l'estat de salut dels cultius basant-se en la informació capturada.

Es desenvoluparan o s'utilitzaran mòduls de programació específics amb ROS per processar les dades obtingudes de la càmera tèrmica. Després s'hauran d'establir algorismes que permetin calcular un índex d'estrès hídric a partir dels valors de temperatura capturats. A continuació, es processaran les dades amb els mòduls de programació de ROS per calcular els valors d'estrès hídric basats en els valors de temperatura. I per últim, es realitzarà la comparació dels valors d'estrès hídric calculats amb ROS amb les condicions reals dels cultius, com ara la presència de símptomes de sequera o estrès.

Els resultats de la comprovació de la capacitat de càlcul d'estrès hídric amb ROS s'interpretaran per determinar la fiabilitat i l'eficàcia del sistema en la monitorització dels cultius. Es discutiran les limitacions i les possibilitats d'ampliació de la programació amb ROS per a millorar la precisió dels càlculs d'estrès hídric.

- Protocol d'Assaig per la comprovació del rang de distància teòric per la presa de mesures amb els tres sensors

Per a la comprovació de la distància teòrica de presa de captures del cultiu, es procedirà a realitzar un protocol d'assaig en el qual s'avaluarà si aquesta distància és la correcta o si cal utilitzar un altre rang més adequat. Tenint en compte que durant el treball de fi de màster s'ha determinat que la millor distància per a prendre les mesures és entre 0,3 i 0,8 m, es procedirà a col·locar les càmeres tèrmiques i RGB-D, així com el sensor NDVI, en tres posicions dins d'aquest rang: 0,5 m – 0,75 m i a 1 m també per veure com afecta a la resolució una distància més gran.

Aquest experiment es realitzarà en una parcel·la experimental que constarà de cinc línies, cada una amb un dels cinc cultius a estudiar (tomàquets, faves, melons, carbassons i enciams). Les càmeres i el sensor es col·locaran a la distància preestablerta de 0,5 m – 0,75 m i a 1 m respecte al cultiu, sense fer servir la plataforma robòtica mòbil.

Un cop les càmeres i el sensor estiguin en posició, es capturaran les imatges i es recolliran les dades corresponents a aquesta distància. Posteriorment, es procedirà a analitzar les imatges i les dades recollides per determinar si el rang de distància teòrica és el correcte per obtenir una mesura òptima.

En cas que els resultats mostressin la necessitat d'ampliar o reduir el rang de distància, es realitzaria una segona sèrie d'assajos ajustant la posició de les càmeres i el sensor en conseqüència. Aquest procés es repetiria fins a assolir una distància que proporcioni una mesura òptima per a la monitorització dels cultius.

5. Conclusions

En aquest TFM s'ha fet una revisió bibliogràfica dels treballs en els que s'ha fet servir una plataforma mòbil per a caracteritzar paràmetres de la vegetació a camp. Amb aquesta informació es volia definir el tipus de sensors que calia utilitzar en cada cas, fer una comparació dels que hi ha al mercat i donar suport al projecte SYMBIOSYST per a la compra i muntatge dels mateixos. D'aquest estudi bibliogràfic es conclou que els paràmetres del cultiu identificats que es poden monitoritzar de forma dinàmica amb un robot mòbil són la temperatura, l'estrès hídric, el NDVI, la densitat foliar (LAI), l'altura i el volum del cultiu. Aquests paràmetres es poden determinar amb els següents sensors: una càmera tèrmica, una càmera RGB-D i un sensor NDVI, tot connectat a un ordinador mitjançant el programa ROS.

A més, s'ha constatat que, de tots aquests paràmetres identificats, tots els treballs tenen en comú que la temperatura del cultiu, el NDVI i el LAI son els factors més importants per descriure les característiques i l'estat del cultiu en cada moment de la seva fase fenològica. Això implica que, per a una monitorització eficaç, és essencial disposar de dades rellevants sobre aquests paràmetres.

Les especificacions tècniques més importants a tenir en compte per a la compra i la posterior implementació dels sensors seleccionats en la plataforma robòtica son:

- Per a la càmera tèrmica: La resolució, la mida i el pes, el rang de temperatura que pot percebre, la connectivitat amb el robot i la distància màxima del sensor al cultiu sense perdre resolució. Després de comparar diferents opcions amb diversos proveïdors, s'ha seleccionat la càmera Optris Xi 400 com la millor opció.
- Pel que fa al sensor d'NDVI: La seva elecció s'ha basat en seleccionar un dispositiu que fos un sensor actiu, lleuger, que es pogués acoblar i muntar fàcilment a l'extensió mòbil del robot i que tingués la màxima distància possible entre el sensor i el cultiu. En conclusió, s'ha escollit el sensor NDVI Crop Circle ACS-21.
- Referent a la càmera RGB-D per a la determinació del LAI: Tenint en compte que el sensor ja estava implementat a la plataforma robòtica, i basant-nos en els diferents estudis consultats, s'ha determinat que les distàncies màximes de presa de mesures entre el sensor i el cultiu han de ser entre 0,8 i 1 m.
- Referent als tres sensors, el conjunt ha d'estar en un rang de distància al cultiu entre 0,3 i 0,8 m. D'aquesta manera ens assegurem que la càmera RGB-D i la càmera tèrmica operen en les millors condicions.

Per últim, cal destacar que durant tot el procés de selecció de sensors, s'ha mantingut una comunicació contínua amb l'equip de disseny i implementació dels sensors del CDEI i s'han realitzat reunions amb l'equip del SYMBIOSYST del CDEI complet. Això ens ha permès assegurar que totes dues parts tinguéssim tota la informació necessària per a comprar els sensors més adequats per a una implementació i muntatge posterior correctes. A més, s'ha definit el post-processament de les dades adquirides pels sensors mitjançant

ROS i s'han establert els rangs de valors adequats per al NDVI (entre 0 i 1), la temperatura (entre 25 i 40 °C) i l'estrès hídric per assegurar-nos del bon creixement de tots els cultius de l'estudi. Aquest enfocament científic ha estat fonamental per a garantir la fiabilitat i la coherència dels resultats obtinguts durant la investigació.

6. Bibliografía

- Allen, R. G. (2006). Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de agua de los cultivos. *Fao*, 297.
- Alordzinu, K. E., Li, J., Lan, Y., Appiah, S. A., Al Aasmi, A., & Wang, H. (2021). Rapid Estimation of Crop Water Stress Index on Tomato Growth. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 21(15). <https://doi.org/10.3390/S21155142>
- Amaral, L. R., Molin, J. P., Portz, G., Finazzi, F. B., & Cortinove, L. (2015). Comparison of crop canopy reflectance sensors used to identify sugarcane biomass and nitrogen status. *Precision Agriculture*, 16(1), 15–28. <https://doi.org/10.1007/S11119-014-9377-2>
- Bambach, N., Knipper, K., McElrone, A. J., Nocco, M., Torres-Rua, A., Kustas, W., Anderson, M., Castro, S., Edwards, E., Duran-Gomez, M., Gal, A., Tolentino, P., Wright, I., Roby, M., Gao, F., Alfieri, J., Prueger, J., Hipps, L., & Saa, S. (2024). The Tree-Crop Remote Sensing of Evapotranspiration Experiment (T-REX): A Science-Based Path for Sustainable Water Management and Climate Resilience. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 105(1), E257–E284. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-22-0118.1>
- Bellvert, J., Nieto, H., Pelechá, A., Jofre-Čekalović, C., Zazurca, L., & Miarnau, X. (2021). Remote Sensing Energy Balance Model for the Assessment of Crop Evapotranspiration and Water Status in an Almond Rootstock Collection. *Frontiers in Plant Science*, 12, 608967. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2021.608967/BIBTEX>
- Bo, L., Guan, H., & Mao, X. (2023). Diagnosing crop water status based on canopy temperature as a function of film mulching and deficit irrigation. *Field Crops Research*, 304, 109154. <https://doi.org/10.1016/J.FCR.2023.109154>
- Buckley, T. N. (2019). How do stomata respond to water status? *New Phytologist*, 224(1), 21–36. <https://doi.org/10.1111/NPH.15899>
- Calculador óptico para cámaras infrarrojas*. (n.d.). Retrieved July 14, 2023, from <https://www.optris.es/calculador-optico>
- Fernández-Navales, J., Saiz-Rubio, V., Barrio, I., Rovira-Más, F., Cuenca-Cuenca, A., Santos Alves, F., Valente, J., Tardáguila, J., & Diago, M. P. (2021). Monitoring and mapping vineyard water status using non-invasive technologies by a ground robot. *Remote Sensing*, 13(14), 2830. <https://doi.org/10.3390/RS13142830/S1>
- Fernández-Navales, J., Tardaguila, J., Gutiérrez, S., Marañón, M., & Diago, M. P. (2018). In field quantification and discrimination of different vineyard water regimes by on-the-go NIR spectroscopy. *Biosystems Engineering*, 165, 47–58. <https://doi.org/10.1016/J.BIOSYSTEMSENG.2017.08.018>
- García-Tejero, I. F., Costa, J. M., Egipto, R., Durán-Zuazo, V. H., Lima, R. S. N., Lopes, C. M., & Chaves, M. M. (2016). Thermal data to monitor crop-water status in irrigated Mediterranean viticulture. *Agricultural Water Management*, 176, 80–90. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2016.05.008>

- Hornero, G., Gaitán-Pitre, J. E., Serrano-Finetti, E., Casas, O., & Pallas-Areny, R. (2017). A novel low-cost smart leaf wetness sensor. *Computers and Electronics in Agriculture*, *143*, 286–292. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.11.001>
- Jia, Q., & Wang, Y. P. (2021). Relationships between leaf area index and evapotranspiration and crop coefficient of hilly apple orchard in the loess Plateau. *Water (Switzerland)*, *13*(14). <https://doi.org/10.3390/W13141957>
- Kang, H., Wang, X., & Chen, C. (2022). Accurate fruit localisation using high resolution LiDAR-camera fusion and instance segmentation. *Computers and Electronics in Agriculture*, *203*, 107450. <https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2022.107450>
- Kitzler, F., Barta, N., Neugschwandtner, R. W., Gronauer, A., & Motsch, V. (2023). WE3DS: An RGB-D Image Dataset for Semantic Segmentation in Agriculture. *Sensors*, *23*(5). <https://doi.org/10.3390/S23052713/S1>
- Li, D., Sun, X., Elkhouchlaa, H., Jia, Y., Yao, Z., Lin, P., Li, J., & Lu, H. (2021). Fast detection and location of longan fruits using UAV images. *Computers and Electronics in Agriculture*, *190*, 106465. <https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2021.106465>
- Li, X., Xu, X., Xiang, S., Chen, M., He, S., Wang, W., Xu, M., Liu, C., Yu, L., Liu, W., & Yang, W. (2023). Soybean leaf estimation based on RGB images and machine learning methods. *Plant Methods*, *19*(1), 1–16. <https://doi.org/10.1186/S13007-023-01023-Z/TABLES/6>
- Raj, R., Walker, J. P., Pingale, R., Nandan, R., Naik, B., & Jagarlapudi, A. (2021). Leaf area index estimation using top-of-canopy airborne RGB images. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, *96*, 102282. <https://doi.org/10.1016/J.JAG.2020.102282>
- Rouse, J., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. (1973). *Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS*.
- Stamatiadis, S., Taskos, D., Tsadila, E., Christofides, C., Tsadilas, C., & Schepers, J. S. (2010). Comparison of passive and active canopy sensors for the estimation of vine biomass production. *Precision Agriculture*, *11*(3), 306–315. <https://doi.org/10.1007/S11119-009-9131-3/FIGURES/4>
- Xia, C., Wang, L., Chung, B. K., & Lee, J. M. (2015). In situ 3D segmentation of individual plant leaves using a RGB-D camera for agricultural automation. *Sensors (Switzerland)*, *15*(8), 20463–20479. <https://doi.org/10.3390/S150820463>
- Y. Kim, D. M. Glenn, J. Park, H. K. Ngugi, & B. L. Lehman. (2012). Characteristics of Active Spectral Sensor for Plant Sensing. *Transactions of the ASABE*, *55*(1), 293–301. <https://doi.org/10.13031/2013.41239>
- Zhou, Z., Majeed, Y., Diverres Naranjo, G., & Gambacorta, E. M. T. (2021). Assessment for crop water stress with infrared thermal imagery in precision agriculture: A review and future prospects for deep learning applications.

Computers and Electronics in Agriculture, 182, 106019.
<https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2021.106019>

7. Annex

7.1. Taula comparativa entre el camp de visió (FOV) i la distància de mesura a l'objecte desde la càmera tèrmica Optris Xi 400

Technical Data

23

Xi 400 382 x 288 px	Focal length [mm]	Minimum measurement distance*	Angle	Distance to measurement object [m]												
					0.05	0.1	0.2	0.3	0.5	1	2	4	6	10	30	100
F13 Standard lens	13	0.35 m	29°	HFOV [m]		0.059	0.111	0.16	0.27	0.53	1.06	2.1	3.2	5.3	15.8	52.5
			22°	VFOV [m]		0.043	0.082	0.12	0.20	0.39	0.78	1.5	2.3	3.9	11.6	38.5
			37°	DFOV [m]		0.073	0.138	0.20	0.34	0.66	1.31	2.6	3.9	6.5	19.5	65.1
			1.5 mrad	IFOV [mm]		0.2	0.3	0.4	0.7	1.4	2.8	5.5	8.3	13.8	41.2	137.4
F20 Telephoto lens	20	0.35 m	18°	HFOV [m]			0.069	0.102	0.17	0.33	0.66	1.30	1.9	3.2	9.7	32.4
			14°	VFOV [m]			0.051	0.076	0.12	0.25	0.49	0.98	1.5	2.5	7.4	24.6
			23°	DFOV [m]			0.086	0.127	0.21	0.41	0.82	1.63	2.4	4.1	12.2	40.7
			0.9 mrad	IFOV [mm]			0.2	0.3	0.4	0.9	1.7	3.4	5.1	8.5	25.4	84.8
F08 Wide angle lens	8	0.25 m	53°	HFOV [m]		0.099	0.20	0.30	0.49	0.99	2.0	4.0	5.9	9.9	29.6	98.6
			38°	VFOV [m]		0.071	0.14	0.21	0.34	0.68	1.4	2.7	4.1	6.8	20.4	68.1
			65°	DFOV [m]		0.122	0.25	0.36	0.60	1.20	2.4	4.8	7.2	12.0	36.0	119.9
			2.6 mrad	IFOV [mm]		0.26	0.53	0.78	1.3	2.6	5.2	10.4	15.5	25.9	77.5	258.2
F06 Super wide angle lens	6	0.2 m	80°	HFOV [m]	0.084	0.16	0.32	0.48	0.81	1.6	3.3	6.5	9.8	16.6	49.9	166.4
			54°	VFOV [m]	0.056	0.11	0.21	0.31	0.51	1.0	2.0	4.1	6.1	10.2	30.6	101.9
			96°	DFOV [m]	0.101	0.19	0.38	0.57	0.96	1.9	3.8	7.7	11.6	19.5	58.5	195.1
			4.3 mrad	IFOV [mm]	0.2	0.4	0.8	1.3	2.1	4.2	8.5	17.0	25.7	43.6	130.7	435.5

* Note: The accuracy of measurement can be outside of the specifications for distances below the defined minimum distance.

7.2. Taula comparativa característiques càmeres tèrmiques

Proveïdor	INFAIMON		Teledyne-FLIR		MESUREX		
Nom	Xenics CERES T-1280 GigE 50 mK (60 Hz)	Teledyne-FLIR DALSA Calibir GX	Sensor de temperatura IR FLIR A65	Càmera termogràfica A50 29 ° FLIR	OPTRIS Serie Xi 80	OPTRIS Serie Xi 400	OPTRIS Serie Xi 410
Pes (g)	636,5 (inclou lent)	67 (sense lent)	210	519	201 - 210	216 - 220	216 - 220
Mida (mm)	36 x 32	29 x 36 x 59	106 × 47 × 50	106 × 47 × 50	36 x 90 (rosca M30)	36 x 100 (rosca M30)	36 x 100 (rosca M30)
Precisió	± 2 °C o ± 2% el que sigui major	± 1 °C des de 25 fins a 45 °C	± 5 °C o ± 5% de lectura	± 2 °C o ± 2% de lectura	± 2 °C o ± 2% el que sigui major	± 2 °C o ± 2% el que sigui major	± 2 °C o ± 2% el que sigui major
Rang de T ^a	Pack 1: de -20 a 120 °C; Pack 2: de 50 a 400 °C	de -35 a 60 °C	de -25 a 135 °C i de -40 a 550 °C	de -20 a 175 °C i de 175 a 1000 °C	de -20 a 100 °C i de 0 a 250 °C	0 a 250 °C; De 150 a 900 °C De 200 a 1500 °C	100 °C i de 0 a 250 °C; De 150 a 900 °C De 200 a 1500 °C
Resolució òptica (píxels)	1280 x 1024	320 x 240 / 640 x 480	640 × 512	464 × 348	80 x 80	382 x 288	384 x 240
Connectivitat al PC	Ethernet GigE	GigE amb PoE	GigE, protocol GenlCam	GigE, TCP/IP amb endoll FLIR, protocol GenlCam	USB 2.0 / Ethernet (100 Mbit/s) / PoE	USB 2.0 / USB a GigE (PoE)	USB 2.0 / Ethernet (100 Mbit/s) / PoE
Format dades	Píxels	Píxels	Píxels	Píxels	Píxels	Píxels	Píxels
Classificació IP	IP40		IP40		IP67	IP67	IP67
Software propi	Software Xeneth (C++) però no està inclòs per 16 bit DV	Si, conté llibreries pròpies del software Sopera	Software GenlCam no inclòs		Sí, paquet de software propi optris PIX Connect	Sí, paquet de software propi optris PIX Connect	Sí, paquet de software propi optris PIX Connect
Preu (€)	9670	6996,1			1950		

7.3. Fitxa tècnica càmera tèrmica Optris Xi 400

optris Xi 400
DATOS TÉCNICOS

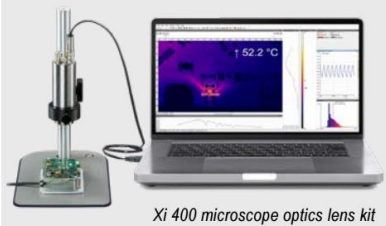
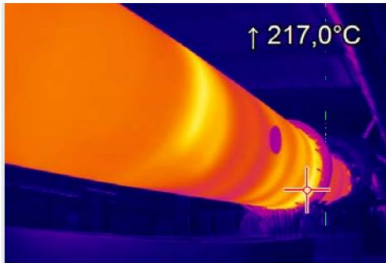


Localizador compacto Cámara IR



Características:

- Cámara industrial con 382 x 288 píxeles para la medición exacta de la temperatura de -20 °C ... 900 °C
- Cámara robusta de tamaño reducido con enfoque motorizado
- Excelente relación distancia/tamaño del punto hasta 390:1 con capacidad de avistamiento
- Frecuencia de imagen de 80 Hz para la supervisión de procesos térmicos rápidos
- Amplio paquete listo para usar a un precio atractivo: incluye un versátil software de procesamiento de imágenes con función de escaneo de líneas y cables de conexión



Xi 400 microscope optics lens kit



Xi 400 CM: paquete de productos específico (Xi 400, cámara VIS, servidor USB Gigabit y carcasa protectora) para la monitorización de condiciones en exteriores y la detección de incendios.

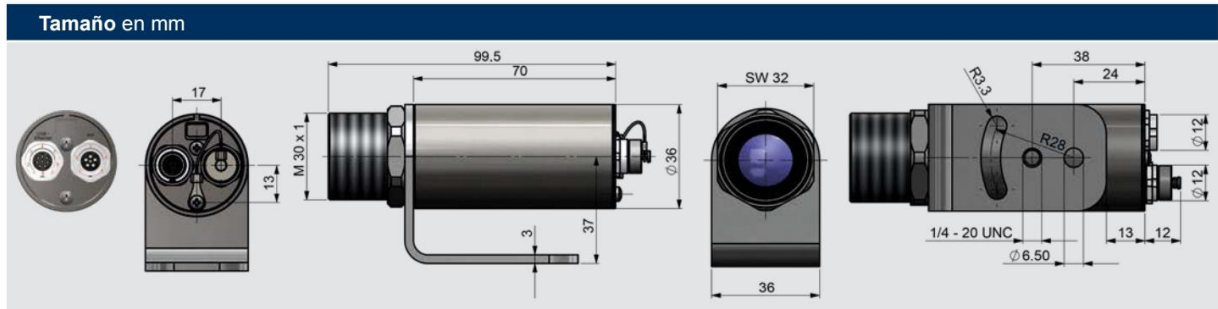
Especificaciones técnicas

Resolución óptica	382 x 288 pixels
Detector	FPA, uncooled (17 µm pitch)
Rango espectral	8 – 14 µm
Rango de temperatura	-20 ... 100 °C; 0 ... 250 °C; (20) 150 ... 900 °C ¹⁾ ; 200 °C ... 1500 °C (option)
Frecuencia de imagen	80 Hz / 27 Hz
Lente (FOV)	18° x 14° (f = 20), 29° x 22° (f = 12,7), 53° x 38° (f = 7,7), 80° x 54° (f = 5,7)
Óptica microscópica (FOV)	18° x 14° (f = 20), smallest measuring spot (IFOV): 80 µm
Enfoque	Enfoque motor manual
Resolución óptica (D:S)	390:1 (lente 18°)
Sensibilidad térmica (NETD)	80 mK
Precisión del sistema (a T _{Amb} 23 ±5 °C)	±2 °C or ±2 %, cualquiera que sea mayor
Interfaces PC	USB 2.0 / interfaz USB a GigE (PoE) en option
Interfaz de procesos (PIF), estándar	0–10 V entrada, entrada digital (max. 24 V), 0–10 V salida
Interfaz de proceso (PIF), industrial	2 x 0–10 V entrada, entrada digital (max. 24 V), 3 x 0/4–20 V salida, 3 x relé (0–30 V / 400 mA), relé a prueba de fallos
Longitud de cable (USB)	1 m (standard), 3 m, 5 m, 10 m, 20 m
Temperatura ambiente (T _{Amb})	0 °C ... 50 °C
Carcasa (tamaño / clasificación):	Ø 36 mm x 100 mm (M30x1 rosca) / IP 67 (NEMA 4)
Peso (sin soporte de montaje)	216 - 220 g, (dependiendo del lente)
Shock ²⁾ / Vibración ²⁾	IEC 60068-2-27 (25G and 50G) / IEC 60068-2-6 (sinusoidale) IEC 60068-2-64 (bruit à large bande)
Fuente de alimentación:	USB
Volumen de suministro	<ul style="list-style-type: none"> • Cámara Xi 400 • Cable USB (1 m) • Cable PIF estándar (1 m), borne de conexión incluido • Soporte de montaje von tuerca • Software optris PIX Connect

¹⁾ Declaración de precisión a partir de 150 °C

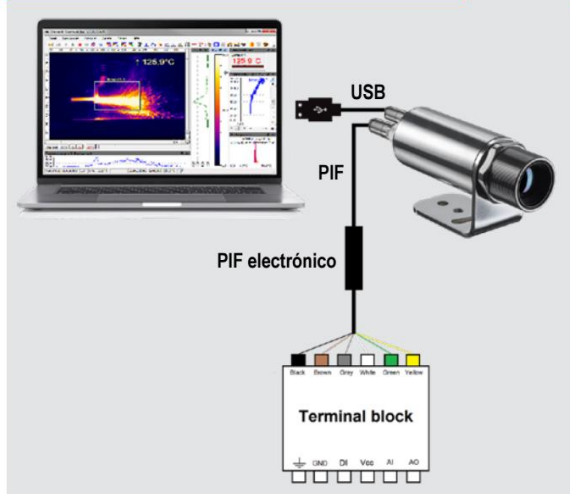
²⁾ Para obtener más detalles, consulte el manual del operador

optris Xi 400

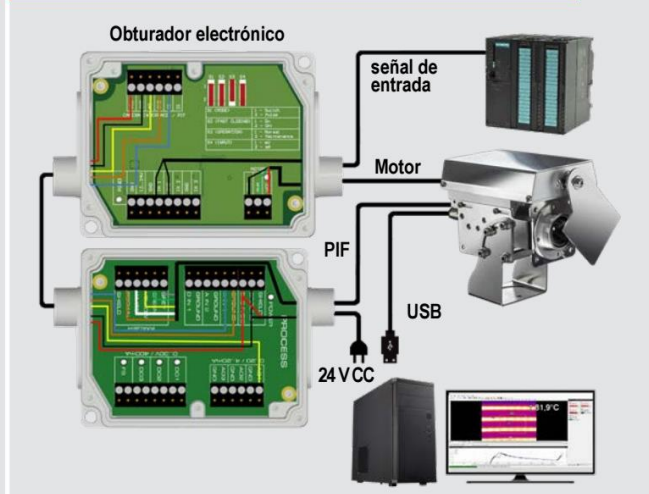


Instalaciones eléctricas

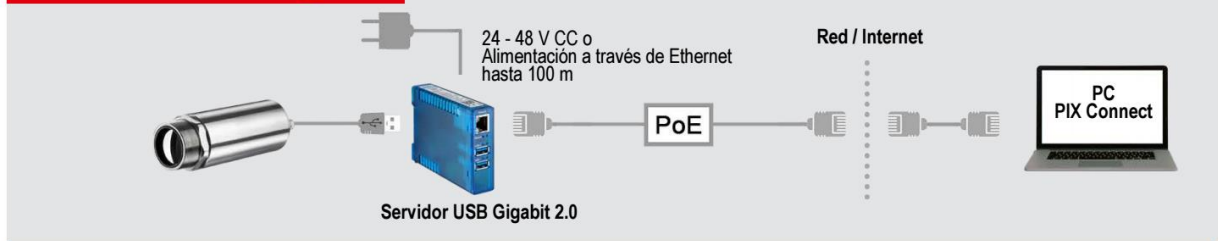
Xi 400 con software PIX Connect + PIF estándar



Xi 400 con PIF industrial y obturador, controlado por un PLC



Xi 400 con servidor USB Gigabit 2.0



Accesorios



Las especificaciones están sujetas a cambios sin previo aviso · Xi 400 DS-ES2023-05-A

7.4. Fitxa tècnica sensor NDVI Crop Circle ACS-211

Crop Circle Model ACS-211



ACTIVE CANOPY CROP SENSOR

The Crop Circle ACS-211 active crop canopy sensor calculates the NDVI vegetation index as well as measuring basic reflectance information from plant canopies and soil.

Unlike passive radiometric light sensors, the Crop Circle ACS-211 is not limited by ambient lighting conditions – measurements can be made day or night due to its unique light source technology.

For on-the-go applications, the Crop Circle ACS-211 sensor can be mounted to virtually any type of vehicle to remotely sense and/or map plant or crop canopy biomass while driving through a field. The compact size and low weight design allows the Crop Circle ACS-211 to be easily adapted for pole-mounted and handheld applications. Information produced by the sensor can be utilized to quantify the impact of nutrients, water, disease or other growing conditions on plants or crops.

3D NDVI MEASUREMENTS

The ACS-211 incorporates two optical measurement channels. The sensor simultaneously measures crop/soil reflectance at 670 nm and 780 nm. A unique feature of the ACS-211 sensor is its ability to make 3D NDVI measurements: an industry first. The sensor accomplishes this by assessing the approximate height of the plant canopy. The height measurement is then used to scale the NDVI measurement, accordingly. This new NDVI measurement technique helps to reduce the saturation effect often encountered when using the classic NDVI measurement at high biomasses.

COLLECT DATA EASILY

Using the Holland Scientific GeoSCOUT X datalogger, data can be easily and quickly recorded. Geospatial sensor data are stored on an internal 4GB SD flash card. All recorded data are saved using a comma-separated-variable text format for easy import into third-party GIS mapping and analysis software.

FEATURES:

- » Two measurement channels
- » 3D NDVI measurement
- » Make measurements day or night
- » Measurements not influenced by fluorescent or other AC light sources
- » Wide measurement range—0.25m to 2.5m
- » Rugged—dust and water resistant
- » Low noise performance
- » Fast data output rate
- » Low power operation



SPECIFICATIONS

Sensor-to-Canopy Range: Typically 10 in (25 cm) to over 96 in (244 cm)

Field-of-View: ~40 degrees by ~8 degrees

Active Light Source: Modulated polychromatic LED array

Photodetection: Two channel silicon photodiode array

Optical Measurement Bands: 670 nm and 780 nm

ELECTRICAL SPECIFICATIONS

Sample Output Rate: 5 samples per second in autosend mode

Operating Range: 0 to 50 °C

Communication Interface: RS-485 multi-drop (bidirectional communication); RS-232 (autosend, output only)

RS-232 Serial Communication: 38400, no parity, 8 data bits, 1 stop bit

Power: 7 to 17V DC @ ~210 mA

EMC Certifications: TBD

MECHANICAL SPECIFICATIONS

Enclosure: Injection molded polycarbonate

Environmental: IP68 for dust and water resistance

Weight: 0.9 lb (430 gm)

Sensor Mount: (2) M6 X 1 threaded holes in base of sensor spaced 1.25 in (3.18 cm)

Dimensions: Width 3.5 in (8.9 cm), Length 7.9 in (20.1 cm), Height 1.9 in (4.8 cm)

Serial/Power Connector: Twelve pin Deutsch, O-ring sealed

ACCESSORIES AND SYSTEM PACKAGES

Crop Circle ACS-211 Handheld System includes: Crop Circle ACS-211, GeoSCOUT X, extension pole apparatus, cables, storage case, charger and user's guide

Crop Circle ACS-211 Mapping System includes: Crop Circle ACS-211, GeoSCOUT X, cables, storage case, mounting plate and user's guide

NOTES:



6001 South 58th Street, Suite D
Lincoln, NE 68516

Tel/Fax: (402) 488-1226

sales@hollandscientific.com

www.hollandscientific.com

