

Agrifotónica: Agricultura de Precisión y Fotónica como piedra angular en su Desarrollo

Diana Paulina Moreno Miranda¹, Perla Maria Vidal Huichapan², Paulo César Rodríguez Cuevas³

^{1,2,3}Alumnos de Licenciatura en Ingeniería en Comunicaciones y Electrónica (LICE), División de Ingenierías del Campus Irapuato-Salamanca (DICIS), Universidad de Guanajuato
dpmorenomiranda@ugto.mx¹, pm.vidalhuichapan@ugto.mx², pc.rodriguezcuevas@ugto.mx³

Resumen

La agricultura tradicional presenta deficiencias con respecto al aprovechamiento de recursos, cada vez es mayor su demanda de insumos y de capital humano, en la investigación se presentan problemáticas que las nuevas tecnologías fotónicas pueden ayudar a resolver como el aprovechamiento del espacio, mediciones más precisas (agricultura de precisión), detección de enfermedades. Este artículo tiene como objetivo una consulta sobre diversas técnicas ópticas que pueden darnos información importante acerca del campo agrícola y su gestión e incluso detectar en los suelos contaminantes debido al uso excesivo de fertilización y pesticidas. La ventaja la fotónica es el muestreo en el menor tiempo posible por cámaras espectrales y la poca invasión sobre una muestra pudiendo brindar la oportunidad de acceder a la información de una planta viva para poder atacar sus necesidades posteriormente y dañarla lo menos posible. Se logró entender el comportamiento de una muestra heterogénea como la hoja de una planta y comprender como la luz es absorbida a través de ella comparando espectros de varias hojas con diferentes condiciones de salud.

Palabras clave: palabras clave; palabras clave.

Introducción

Tiene como objetivo identificar como las tecnologías ópticas pueden ayudarnos a resolver las problemáticas actuales en la agricultura. La búsqueda y aplicación de tecnologías ópticas para el sector agrícola equivale a precisión y solución. La fotónica es una gran herramienta rápida y a gran escala de monitoreo y análisis de laboratorio, es capaz de detectar parámetros de importancia en la agricultura como humedad, muestreo foliar, incluso detectar enfermedades y contaminantes con la misma eficacia que métodos fisicoquímicos establecidos, al tratarse de seres vivos tenemos la ventaja de que son métodos no destructivos y la facilidad de detección sin llevar el material a digerir al laboratorio.

En los próximos años se generará una alta demanda de alimentos debido al aumento demográfico: se calcula para el año 2050 la población ascienda a 10000 millones de personas. La tecnología está presente en el sector agrícola en países con poca densidad territorial y han tenido que buscar como optimizar sus cultivos y tener una agricultura más inteligente. La posible solución es monitoreo óptico que equivale a una producción mayor, más precisa, poco gasto de insumos todo gracias a un constante monitoreo. La espectroscopia en particular es una gran herramienta ya que con ella se pueden obtener imágenes a través de los sistemas ópticos a una gran escala, dejando atrás las mediciones solo de laboratorio, con la ayuda de cámaras RGB que son capaces de tomar mediciones de humedad, detección de patógenos, muestreo foliar de las plantas y a través de la óptica detectar enfermedades posibles o deficiencias y utilizar la menor cantidad de fertilizantes, así como insecticidas. En la agricultura al tratarse de seres vivos debemos tomar en cuenta de utilizar métodos no invasivos para su monitoreo para no dañar los cultivos ni ecosistema en sí y si es a distancia mucho mejor.

La óptica y fotónica ha estado presente en el campo agrícola en las últimas décadas encontrando aplicaciones muy benéficas para una agricultura más precisa, obteniendo mayor eficiencia y distribución de los recursos. Sin embargo, en el Estado de Guanajuato en particular se tiene poca experiencia de uso de tecnologías ópticas en el campo. En su etapa de desarrollo de tecnología podemos decir que es muy baja. Entonces aquí podríamos empezar a aplicar e instruir a las personas que trabajan en la agricultura acerca de estas nuevas herramientas de principio físico: la espectroscopia. Además, solo 9 especies de cultivos representan el 66 %

de la producción mundial de alimentos. Estos números presentan grandes desafíos, pero también tremendas oportunidades para que la agrifotónica tenga impacto inmediato. Identificando parámetros críticos (contenido de agua, glucosa, potasio y fósforo, por ejemplo) y fenotipo eficiente (el físico expresión de las propiedades individuales de las plantas correspondientes a un perfil genético específico) son necesarios para minimizar desperdiciar y mejorar la utilización de recursos a través del uso de tecnologías ópticas [1]. Se han hecho avances recientes en técnicas ópticas para el análisis detallado y la comprensión de mecanismos de manejo del estrés vegetal incluyendo imágenes con espectroscopia de fluorescencia seguidas de tinción y la espectroscopia de terahercios. Estas técnicas han demostrado ser prometedoras en cuantificación de la salinidad del suelo y el estrés oxidativo en las raíces de las plantas.

Problemas actuales en la agricultura en Guanajuato: El caso particular de la ciudad de Salamanca

Los principales problemas en la agricultura son los altos precios de insumos, las plagas, la falta de agua (debido a que los agricultores no la cuidan o por la razón de que no llueve), en la Fig.1 podemos observar el déficit de crecimiento adecuado por falta de lluvia, la inseguridad que se vive actualmente es otro factor importante debido a que durante las noches muchos agricultores deciden no salir a cerrar el agua de riego por miedo a que durante el trayecto les suceda algo, por lo que el agua suele salirse de los terrenos e inundar los caminos cercanos como se observa en la Fig. 2, así mismo, la guerra en Ucrania es otro factor importante, ya que es el principal productor de sorgo y exportador de fertilizantes, por lo que sigue presionando los precios de los fertilizantes.



Figura 1. Maíz sin desarrollar por falta de lluvias.

En la agricultura en el estado de Guanajuato se siembra de todo, pero principalmente maíz, trigo, sorgo, brócoli, coliflor, frambuesas y alfalfa. Debido a las actuales fechas, se analizó un cultivo de maíz en los cuales hay distintas fechas de siembra, algunas plantas fueron sembradas hacía 45 días, otras estaban recién sembradas y otras ya tenían la madurez para tener cosecha, el maíz tarda de 6 a 7 meses en alcanzar su madurez, pero esto depende de la variedad de maíz sembrada en el cultivo.



Figura 2. Inundación de caminos por exceso de agua de riego.



Figura 3. Cultivos de maíz con distintas etapas de crecimiento.

En el estado el principal método de riego usado es agua rodada o riego por gravedad, en este sistema el agua se mueve por gravedad, es decir, el agua se desliza siguiendo la pendiente de los surcos y no requiere de energía extra para darle movimiento. La mejor hora para sembrar es durante la noche, pero, según los agricultores, la noche no es suficiente para regar por completo el cultivo, por lo que es necesario usar las 24 horas del día [3].



Figura 4. Riego por gravedad [3].

Algunas enfermedades y plagas que atacan a este tipo de cultivo (maíz) son el gusano cogollero, fusarium y trips.

Los fertilizantes más usados son el nitrógeno principalmente, aunque también se agrega potasio y calcio.

- **Nitrógeno (N).** La fertilización nitrogenada tiene como objetivo satisfacer las necesidades nutricionales del cultivo mediante los aportes orgánicos o minerales necesarios para complementar lo que el mismo suelo es capaz de suministrar gracias a su fertilidad.
- **Potasio (K).** Ejerce una serie de funciones para el crecimiento y desarrollo de las plantas, en particular está involucrado en la fotosíntesis y regula la actividad de enzimas.
- **Calcio (Ca).** El calcio es el responsable de crear y mantener la estructura de los suelos agrícolas. Con una correcta agrupación de partículas, el aire y el agua pueden entrar a través de los poros y favorecer el crecimiento y desarrollo de las raíces, ayudando a absorber los nutrientes y el agua del suelo.

Existen 2 métodos, el tradicional y el tecnificado, ambos son buenos, pero es de acuerdo a las posibilidades de cada agricultor, tradicional (abierto, uso de maquinaria agrícola, de semillas mejoradas y de productos fertilizantes para el control de las plagas), tecnificado (túneles o invernaderos) más complicado (incorpora tecnología y herramientas avanzadas para aumentar la producción y optimizar el cultivo).

La rotación de cultivos consiste en alternar plantas de diferentes familias y con diferentes necesidades nutritivas en un mismo lugar durante distintos ciclos, evitando que el suelo se agote y que las enfermedades que afectan a un tipo de plantas se perpetúen en un tiempo determinado. Es conveniente usarlo, porque ahorita es más conveniente sembrar maíz o sorgo ya que hay una mejor producción y después trigo o cebada. De acuerdo a cada época es distinto el cultivo. Si siembras trigo ahorita o cuando en temporada de trigo siembras maíz, no produce. Ciclo de diciembre a mayo se siembra trigo y cebada. Ciclo de mayo a diciembre maíz y sorgo.

Las maneras de identificar plantas enfermas que se usan habitualmente son las siguientes. Se nota a simple vista, el monitoreo de las plantas (revisión constante) para evitar plagas y enfermedades, se ven más raquíticas las plantas enfermas en comparación con las sanas, se le notan lesiones en las hojas, mazorcas sin desarrollar [4].



Figura 5. Principales enfermedades en plantas de maíz [4].

Las mazorcas sin desarrollar pueden ser por las siguientes razones [5]:

- Malas aplicaciones de herbicidas, sobre todo previo a floración del maíz Mala aplicación de fungicidas.
- Condiciones ambientales adversas, en especial durante la emisión de estigmas.
- Daños por plagas.
- Presión por enfermedades.
- Factores abióticos diversos como granizo e inundaciones (mal olor).



Figura 6. Malformaciones en mazorcas [5].

Fotosíntesis

Tomar en cuenta la fotosíntesis es importante en este aspecto de la toma de mediciones con radiación electromagnética (Luz) porque las plantas realizan este proceso debidamente para el crecimiento y también sucede la respiración de ellas. Las plantas de color verde contienen cloroplastos, la fotosíntesis ocurre en ellos en las células mesofilo y pasa por 3 principales procesos, el primero es la absorción de la luz por pigmentos fotosintéticos, la segunda; transporte de electrones y bioenergía y la tercera es la fijación y metabolismo de carbono [5].

Las plantas realizan una serie de reacciones y transformación de energía en las membranas tilacoides de los cloroplastos esto con el fin de convertir esa energía transitoria en energía química. En la parte superior de la planta, el proceso comienza con la captura de luz por la matriz de antenas que contienen las clorofilas y carotenoides que son los responsables de absorber la luz que dará impulso al proceso de fotosíntesis, como tal las plantas contienen más clorofilas y absorben con gran intensidad la radiación luz roja (650nm) y azul(450nm). Los carotenoides absorben la luz azul, lo que permite al cloroplasto una fracción mayor de energía luminosa, las clorofilas y los carotenoides aislados transmiten la luz verde. La dispersión de la luz es un fenómeno óptico que influye dentro de las propiedades de absorción de una hoja, la dispersión ocurre principalmente por reflexión entre los espacios de aire intercelulares y las células. La reflexión interna

aumenta la posibilidad de captura y absorción de la luz. Las hojas absorben más del 90% de la luz roja y azul y también alrededor del 70% de la luz verde [5].

La luz roja y azul se absorben principalmente por el lado iluminado de la hoja debido a la alta absorción que ese lado posee, mientras que la luz verde penetra más profundamente en la hoja, aumentando la probabilidad de absorción ya que recorre un camino más largo con múltiples reflejos en la pared celular. En la figura se muestra que las longitudes de onda roja (650 nm) es más efectiva para la fotosíntesis, pero la mayor parte de la luz dentro de la región fotosintéticamente activa del espectro, el rango de 400 a 700nm es utilizado en las hojas [5].

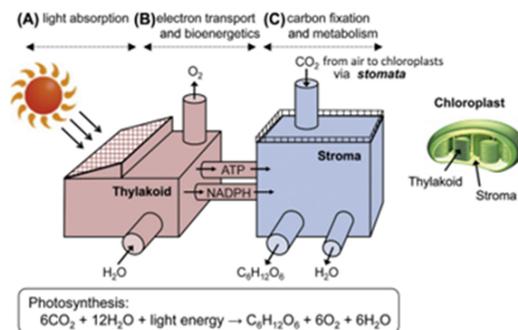


Figura 7. Vista simplificada de las reacciones fotosintéticas en los cloroplastos [11]. Ocurre una absorción de la luz por pigmentos fotosintéticos, un transporte de electrones y al final una fijación del carbono.

LED y su estimulación en el crecimiento en las plantas

En la actualidad los cultivos de crecimiento más lento y que requieran de mucha luz se ha optado por cultivarlos en invernadero, donde parte de la luz que necesitan la proporciona la radiación solar, aunque muchos de estos cultivos se han cultivado de forma que solo la radiación sea proporcionada artificialmente es decir en lugares cerrados donde también pueden tener un mejor control de plagas, pero los costos de energía para su iluminación siguen estando en desbalance entre su producción entonces sigue siendo un gran desafío [1]. Hay dos características que se usan en discusión del tema de estimulación de crecimiento de las plantas, son PAR y PPF. PAR viene de Photosynthetically Active Radiation, o, en español, la Radiación Fotosintéticamente Activa, es la parte del espectro de radiación óptica que es útil para que las plantas activen la fotosíntesis [2]. El PPF – Photosynthetic Photon Flux Density o, en español, la Densidad de Flujo de Fotones Fotosintéticos, es un parámetro que mide la cantidad de PAR que realmente llega a la planta, el número de fotones fotosintéticamente activos que caen sobre una superficie dada cada segundo.

En seguida discutimos los rangos espectrales que potencian las cosechas.

Luz roja (600-700 nm) es la longitud de onda principal que es elegida para cultivos de interiores, funciona para la mayoría de las etapas del ciclo de cultivo, es la banda de onda que ancla cada conjunto de LED utilizado para el apoyo de crecimiento de las plantas, de los 3 principales componentes del espectro, los fotones de la longitud de onda situada en el rojo tiene el contenido de energía intrínseco, esta longitud de onda es la más eficiente al momento de que la planta requiere energía para impulsar su fotosíntesis. Además del papel que ejerce la luz roja en la conducción de la fotosíntesis, promueve el aumento de peso de la planta, el alargamiento del tallo, así como la expansión de sus hojas. El crecimiento de la lechuga responde particularmente a esta longitud de onda por la característica de tener grandes hojas, además de que a la luz roja se le tiene más confianza porque es con la que iniciaron la experimentación de siembras en interiores.

Luz azul (400-500 nm) está en el extremo de longitud de onda corta/alta (260 KJ/mol) el azul es 25% menos eficiente que el rojo. Los primeros leds azules no eran lo suficientemente eficientes para incluirlos en los primeros conjuntos LED para el crecimiento de las plantas. Por lo que primero se utilizó pequeñas lámparas fluorescentes así determinaron que las plantas crecían adecuadamente solo con leds rojos, pero lo hacían mejor si se les añadía un pequeño componente azul. Se descubrió que la luz azul es importante para iniciar la síntesis de clorofila en algunas especies y promover el grosor de las hojas, un tercio de la luz azul del medio día consiste en la banda de onda azul, la proporción de luz azul que requiere la planta tiende a ser menor de lo que reciben de una iluminación solar al día naturalmente. La PPF total que es utilizada para

impulsar el crecimiento de las plantas generalmente se mantiene en el rango lineal de limitación de luz inferior de una curva de saturación de luz fotosintética, para evitar el desperdicio de luz en el nivel de saturación. La luz azul ayuda especialmente en el alargamiento del tallo, apertura estomática, aumento de clorofila. Los contenidos de carotenoides, luteína, glucosinolatos, minerales y otros Fito nutrientes también se mejoran en tejidos de hojas verdes.

Luz verde (500-600 nm) constituye la tercera parte del espectro PAR (RAF en español). Tiene una eficacia Fotónica (230 KJ/mol) entre azul y rojo. Los primeros investigadores querían probar la eficacia de los LED, los rojos ya habían sido probados lo suficiente y estaban disponibles, el azul aun no era lo suficiente eficiente y lo mismo ocurría con el verde. No fue tomado en cuenta debido a que se creía erróneamente que no era importante para la fotosíntesis, la luz verde integrada en toda su banda espectral no es mala para la fotosíntesis de las hojas, no es menos eficiente que la luz azul de banda ancha, en realidad tiene mayor eficiencia cuántica para la fotosíntesis que algunas longitudes de onda dentro del azul.

De las primeras funciones para la luz verde según los investigadores del centro espacial Kennedy de la NASA, la luz verde participa en la conducción de la fotosíntesis y a la regulación del crecimiento de las plantas, luz verde añadida a la luz led R-B hizo que la lechuga pareciera normal, pero no tuvo un efecto significativo en el crecimiento de la fotosíntesis.[1]

El RGB es percibido por nuestros ojos como luz blanca y las plantas parecían normales con un cierto porcentaje de verde, al utilizar un 24% de luz verde indicaron un aumento de la biomasa y la productividad de las plantas en comparación con otras fuentes de luz, también utilizaron un 50% y un 100% y este redujo el crecimiento de las plantas.

Si las copas de las hojas están cerca de la luz, la luz roja y azul son absorbidas fuertemente por las capas superiores de las hojas, mientras que la luz verde penetra fuertemente en las copas de las hojas antes de ser absorbidas y finalmente impulsa la fotosíntesis. Mejora la productividad fotosintética general, se ocupa en el tercer lugar de la escala PAR, una característica más de la longitud de onda en el verde es que ayuda principalmente a la fotosíntesis de las hojas sombreadas por otras en la planta.

La Luz verde induce síntomas de elongación para evitar la sombra en las plantas. Aunque la eficiencia del verde está por debajo de los Leds rojos y azules debido a que la radiación verde que emiten los dispositivos LED comerciales proviene generalmente de LED blancos emisores de banda ancha.

Esta no es una respuesta de todo o nada, por supuesto, y los verdaderos efectos sobre el crecimiento y desarrollo de las plantas generalmente se determinan calibrando la intensidad instantánea de esta banda de ondas contra otras bandas. A medida que las plantas crecen bajo la irradiación solar de banda ancha que contiene una mezcla de bandas de onda activadas por plantas, existen más respuestas de plantas para detectar.

Radiación Ultravioleta. La radiación solar en la superficie de la tierra incluye bandas de onda ultravioleta (UV) – B (280-320 nm) y (UV) – A (320-400 nm) que las plantas se han adaptado con el tiempo. Al cultivarse en interior sin componente UV, la apariencia y calidad de estas no son exactamente como las conocemos siendo cultivadas a la luz del sol naturalmente. Se observan con deficiencia de Fito nutrientes para que se observen verdes y frondosas, y la pregunta es si hacía falta algún componente de UV, es un tema analizado y complejo cuando se toca el punto de la seguridad de los trabajadores que estuvieran en los cultivos, se habla de sustituir esta radiación ultravioleta UV por sustituciones de azul.[1]

Los rayos UV activan el metabolismo, creando una mejor resistencia a la sequía y los parásitos, reduciendo así la necesidad de pesticidas hasta en un 50%. Las plantas sin radiación UV muestran intumescencia algo similar a callos (edemas) en las hojas, los peciolos y las puntas de sesión, se han hecho experimentos con el azul y puede prevenir este defecto, pero no tanto como se espera [1].

Técnicas espectroscópicas en la agricultura

Se clasifican según el tipo de interacción entre la fuente de luz y la muestra cuando se realiza la medición espectroscópica. Las técnicas espectroscópicas comúnmente utilizadas en el campo agrícola son la

espectroscopia ultravioleta-visible (UV-VIS), la espectroscopia de fluorescencia, la espectroscopia infrarroja (IR) y la espectroscopia Raman.

1. **Espectroscopia UV- Visible.** La espectroscopia en el Ultravioleta- visible está basada en el proceso de absorción por las moléculas de la radiación ultravioleta-visible entre 190 nm y 780 nm, la absorción de moléculas en las regiones ultravioleta y visible del espectro depende de la estructura electrónica de la molécula. La absorción de energía se cuantifica, lo que da como resultado la elevación de los electrones del orbital del estado fundamental al orbital de mayor energía del estado excitado. La absorción no ocurre en una porción fácilmente accesible de la región ultravioleta [21]. Una ventaja de trabajar con el UV-Vis es que las transiciones electrónicas ocurren en el rango VIS, que van desde 400 a 780 nm. Las moléculas con muchos enlaces dobles conjugados, como la clorofila y los carotenoides que dan un color distinto al verde común, absorben este rango de energía, por lo que las propiedades de absorción se pueden usar para determinar propiedades como el color de los alimentos siendo pieza clave en la cosecha es una de las técnicas cuantitativas más usadas en los laboratorios.[57] Otra dedicación de la espectroscopia UV-Vis es la delimitación de los componentes de los fertilizantes, como nitratos y fosfatos, en muestras de suelo. Los fertilizantes, aunque son necesarios solo se deben suministrar la cantidad adecuada. [22].

Espectroscopia de Fluorescencia. Tiene la distinción de ser espectroscopia de emisión, es decir cuando los rayos incidentes de una fuente de luz ultravioleta o visible son absorbidos por las moléculas fluorescentes de una muestra, para que ocurra fluorescencia es la excitación de la muestra desde el estado fundamental S_0 a los estados electrónicos S_1 y S_2 tras la absorción de la luz, la molécula alcanza el estado S_2 se producirá una conversión interna o relajación vibratoria, devolviendo la molécula al estado inferior S_1 sin emisión de radiación, luego la molécula volverá de nuevo al S_0 mientras emitiendo luz que tiene la misma energía que la diferencia de la energía entre S_0 y S_1 así se produce la fluorescencia [24-25]. La espectroscopia de fluorescencia es una solución que está presente en el área. La fluorescencia se utiliza para analizar la calidad de la fruta, diagnosticar enfermedades de las plantas y obtener información sobre los efectos de los factores estresantes ambientales en la concentración de clorofila de las hojas de cultivo [23]. El espectro de fluorescencia de las principales enfermedades de los cultivos frutales es ciertamente interesante no solo desde un punto de vista científico, sino también para resolver muchos problemas aplicados en la agricultura. El objetivo principal son los cultivos de frutas y hortalizas.

Espectroscopia NIR. Va desde los 780 nm a los 5 micrómetros, la absorción en esta espectroscopia suceden debido a sobre tonos y combinaciones de las vibraciones fundamentales, los sobretonos son frecuencias más altas que son múltiplos de la frecuencia fundamental, las combinaciones implican interacciones entre dos o más vibraciones que ocurren simultáneamente, lo que da como resultado una frecuencia que es la suma de múltiplos de las respectivas frecuencias, es una espectroscopia que tiene gran sensibilidad con las vibraciones de las moléculas orgánicas C-H, O-H, N-H [2]. Los compuestos orgánicos son los componentes principales de los tejidos vivos, incluidas las plantas, lo que hace que NIR sea adecuado para uso agrícola [27]. Además, las plantas no utilizan el espectro infrarrojo para la fotosíntesis u otras funciones vegetales, por lo que no "interfieren" con la generación de firmas espectrales [28]. La espectroscopia NIR se puede utilizar para el análisis cualitativo y cuantitativo de agua, proteínas, grasas, almidón, azúcar, fibra y cenizas de productos agrícolas. En las mediciones puntuales, el dispositivo dirige un haz de luz NIR de un espectro particular a un objeto. Dependiendo de los compuestos y sus concentraciones, el espectro de luz absorbida, reflejada y transmitida será diferente [27].

2. **Espectroscopia Raman.** Es otra técnica de vibraciones moleculares, la información espectral se obtiene por efectos de dispersión que ocurren cuando interactúan con la materia, las interacciones elásticas o dispersión Rayleigh, los fotones que son excitados no experimentan cambios en su energía al regresar a su estado fundamental. En cambio, en la dispersión inelástica o Raman, los fotones excitados pueden perder o ganar energía (Stokes y anti- Stokes) equivalente a los cambios de energía vibratoria en los átomos de las moléculas [30]. La espectroscopia Raman puede identificar herbicidas presentes en la corteza de las hojas como el glifosato que es un herbicida muy utilizado en la agricultura, también en análisis estructural, control de seguridad, clasificación y cuantificación de frutas y verduras [31]. FT-Raman para detectar y clasificar microorganismos transmitidos por los alimentos en toda la superficie de una manzana y encontró *scherechia coli* la causante de la diarrea en los seres humanos, entonces también nos sirve para identificar microorganismos dañinos. En la clasificación de los frutos Una porción muy pequeña de frutas malas puede arruinar todo el lote.

A continuación, se describe la metodología a emplear para poder conocer el estado fisiológico/nutricional/sanitario de los cultivos en función de la información presente en las imágenes tomadas desde drones y/o satélites.

3. Fundamento

Los componentes utilizados son:

- a) El primer requerimiento supone disponer de una fuente de energía que ilumine o provea energía al objeto de interés (cultivo, bosque, mar, ciudad, etc.). El caso más habitual consiste en que esa fuente sea el Sol, aunque dependiendo del tipo de sensor utilizado, podría utilizarse una fuente de radiación artificial.
- b) La radiación, en su 'viaje' hacia la Tierra, atraviesa e interacciona con la atmósfera, que es el segundo componente.
- c) Una vez alcanza la superficie terrestre interactúa con los objetos que en ella se encuentran. La radiación reflejada dependerá de las características de esos objetos, permitiendo distinguir a unos de otros.
- d) Un sensor a bordo de un satélite, avión o cualquier aeronave, recoge y graba esa radiación reflejada por la superficie terrestre y la propia atmósfera.
- e) La energía captada por el sensor se transmite a una estación de recepción y procesamiento donde los datos se convierten en imágenes digitales.
- f) La imagen procesada se interpreta, visualmente y/o digitalmente, para extraer información acerca de los objetos que fueron iluminados.
- g) El paso final consiste en aplicar la información extraída de la imagen para conseguir un mejor conocimiento del cultivo de estudio, revelando nuevas informaciones o ayudándonos a resolver un problema particular.

4. Selección de plataforma

Se entiende por plataforma de teledetección, los satélites (LANDSAT, METEOSAT, NOAA, SPOT) o aviones y drones que transportan los aparatos necesarios para captar, almacenar y transmitir imágenes a distancia.

En función de su distancia al suelo podemos distinguir diferentes tipos de plataformas:

Nivel del suelo o a pocos metros de altura: grúas, vehículos que transportan radiómetros o aparatos fotográficos.

Entre diez metros y diez kilómetros de altitud: drones, aviones, helicópteros y globos aerostáticos.

Entre diez y cien kilómetros de altitud: globos estratosféricos.

Entre 200 km y 40.000 km tenemos los satélites: habitados (como la Estación Espacial Internacional) y los satélites automáticos de teledetección.

5. Sensores a utilizar.

Los sensores de teledetección son instrumentos que transforman la radiación electromagnética en información perceptible y analizable.

Se pueden distinguir dos tipos básicos de sensores: captadores pasivos: detectan la radiación electromagnética emitida o reflejada de fuentes naturales.

Captadores activos: poseen fuentes internas que generan artificialmente la radiación. Estos sensores pueden operar por la noche, o incluso penetrar nubes.

Los sensores utilizados en teledetección son capaces de detectar y grabar radiaciones de las regiones visibles y no visibles del espectro electromagnético, desde el ultravioleta hasta las microondas [6].

La agricultura de precisión ha tenido un desarrollo vertiginoso en el mundo en los últimos años. Entre las principales herramientas que utiliza la misma está la fotogrametría multispectral donde la banda espectral NIR es la fundamental, para realizar el cálculo de los índices vegetativos que permiten obtener de forma rápida y altamente fiable el vigor, el estrés por sequía. Las enfermedades y la productividad de las plantaciones. El sistema de procesamiento de imágenes NIR e IR con vistas a calcular índices de vegetación está formado por tres elementos fundamentales: el UAV y el sensor multispectral para la captura de las imágenes y el software de procesamiento para el cálculo de los índices [7].

El empleo de VANT (Vehículos aéreos no tripulados) para la toma de imágenes aéreas de una elevada resolución posee múltiples beneficios sobre el uso de aviones tripulados y satélites con iguales fines, ya que estos pueden brindar una calidad superior en los mapas, operan en el ámbito local y logran sobrevolar áreas inaccesibles. Las ventajas generales de las plataformas para VANT son expuestas por diversos autores: tales como el aumento de la producción respecto a otros métodos tradicionales de trabajo, bajo coste, notable reducción en el tiempo empleado para la recolección de datos permite la realización de trabajos en zonas de

accesibilidad reducida y tienen la capacidad de volar a poca altura posibilitando capturar imágenes con una gran resolución. Otras aplicaciones de los VANT se tienen en el campo de defensa y seguridad, usos civiles y medioambientales como el monitoreo de la erosión del suelo, morfodinámica de cauces y mapeo rápido de zonas afectadas por desastres naturales. Estas plataformas pueden ser capaces de proporcionar fotos con una elevada resolución, necesarias para el manejo de sitios específicos en los cultivos, siendo empleadas también en la investigación agronómica, manejo de cultivos especiales y análisis de variabilidad dentro del campo. Con ellos los agricultores pueden identificar las zonas dentro del campo donde los rendimientos pueden ser incrementados, o áreas donde se requieran ajustes en los insumos para mejorar la rentabilidad de las explotaciones y/o la calidad del medio ambiente. La captura de imágenes del terreno se realiza simultáneamente en varios rangos del espectro electromagnético llamados bandas. La necesidad de su adquisición radica en las propiedades espectrales (reflectancia, transmitancia y absorbancia, entre otras) del suelo y de las plantas en sus diferentes etapas de desarrollo, las que van ligadas estrechamente a factores como actividad fotosintética, cantidad de agua, clorofila, biomasa, entre otros. Estas imágenes han sido utilizadas con éxito en agricultura de precisión, ejemplo de ello es su análisis para estimar contenido de carotenoides en hojas de viñedos, su utilización para determinar estrés hídrico en las plantas, la generación de modelos de superficie para estimación de rendimiento en cultivos de maíz. La clorofila no absorbe toda la luz del sol uniformemente, las moléculas de clorofila preferentemente absorben la luz roja y azul para usar en la fotosíntesis. En el borde del espectro visible la absorción de la luz roja por los pigmentos de clorofila empieza a disminuir, y la reflectancia se incrementa abruptamente. Entonces, si la reflectancia es considerada no sólo en el visible, pero a través del visible e infrarrojo cercano (NIR), la reflectancia pico de la vegetación viva no está en el verde sino en el infrarrojo cercano, Figura 8. Este comportamiento explica la gran utilidad del espectro NIR para los estudios de vegetación y, por supuesto, simplifica la separación de los sectores con vegetación de los sectores sin vegetación, que son usualmente muy oscuros en el infrarrojo cercano. Con la madurez o estrés en la vegetación por enfermedad, ataques de insectos, o bajos niveles de humedad, las características espectrales de la hoja deben variar. En general estos cambios aparentemente suceden simultáneamente en ambas regiones, visible e infrarrojo, pero los cambios de reflectancia en el infrarrojo son más notables [8].

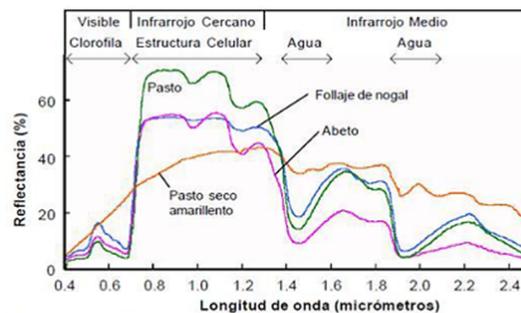


Figura 8. Reflectancia de la vegetación en dependencia de la variedad y el nivel de salud [8]

Con la madurez o estrés en la vegetación por enfermedad, ataques de insectos, o bajos niveles de humedad, las características espectrales de la hoja deben variar. En general estos cambios aparentemente suceden simultáneamente en ambas regiones, visible e infrarrojo, pero los cambios de reflectancia en el infrarrojo son más notables [9].

Cámaras multispectral. Muchos de los drones que se comercializan actualmente ya montan una cámara RGB de serie. Este tipo de cámaras montan un sensor que mide la capacidad de luz dentro del espectro visible, es decir, el espectro que el ojo humano es capaz de ver. Con una cámara RGB solamente vamos a poder captar e interpretar los colores tal y como nosotros los vemos. Por tanto, solamente podremos detectar problemas que ya se vean a simple vista desde una vista aérea como, por ejemplo: zonas con poca vegetación, daños en los cultivos, detectar zonas de inundables, etc. Existen otro tipo de radiaciones que van más allá del RGB y que son de mucha importancia para la agricultura de precisión. Para poder ver este tipo de radiaciones (el ojo humano es incapaz de verlas) necesitamos un sensor multispectral. Las cámaras multispectrales son las que montan este tipo de sensores, este es el tipo de cámara adecuada para poder prestar servicios de análisis en la agricultura de precisión. Con este tipo de cámaras vamos a ser capaces de captar el red edge (0,68 a 0,75 micras) y el infrarrojo cercano (0,75 a 1,7 micras) que son las bandas de más interés para el sector agrícola. Una vista a esta imagen puede darnos una idea de cómo se ve con una cámara multispectral NDVI [10].



Figura 9. Comparación entre sensores RGB y NDVI [10]

Láser para eliminar malezas en los cultivos. Un proyecto coordinado por investigadores del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) usará el láser para eliminar las malas hierbas de los cultivos y ofrecerá así una alternativa sostenible al uso de productos químicos como pesticidas y plaguicidas. Se trata del proyecto denominado Welaser, financiado por la UE dentro del programa Horizonte 2020 y que cuenta con un presupuesto de 5,4 millones de euros. El prototipo consistirá en un vehículo o robot autónomo con un sistema de visión con inteligencia artificial que discriminará las malas hierbas de los cultivos. Luego detectará los meristemas de las malas hierbas (responsables de su crecimiento) y les aplicará un láser de alta potencia para matar las plantas. Este prototipo será desarrollado por un equipo multidisciplinar coordinado por investigadores del Centro de Automática y Robótica, un centro mixto del CSIC y la Universidad Politécnica de Madrid (CAR-CSIC-UPM). Las malas hierbas que crecen en los cultivos agrícolas se caracterizan por su alta capacidad de dispersión, una gran persistencia y por disminuir el rendimiento de las plantaciones. Para eliminarlas se suele usar productos químicos, pero deterioran las propiedades del suelo y dañan sus organismos beneficiosos. Acabar con el uso de plaguicidas y pesticidas es un objetivo clave de la Unión Europea (UE). El proyecto Welaser propone una alternativa sostenible al uso de pesticidas y plaguicidas y prevé contar con un prototipo en 2023, que luego tendrá que comercializarse [12].

El robot autónomo que usa láser para eliminar 100.000 “malas hierbas” por hora. La empresa Carbon Robotics ha lanzado un robot autónomo que tiene a estas molestas plantas en el punto de mira, usando una combinación de visión por ordenador y láseres de alta potencia para peinar los campos y eliminar miles de malas hierbas por hora. Tanto si eres un agricultor profesional que cuida de extensos cultivos de los que depende su sustento como si eres un jardinero aficionado que intenta cultivar tomates, las malas hierbas pueden ser un problema grave que requiere mucho tiempo de trabajo.

Los avances de la robótica han abierto algunas posibilidades interesantes en el ámbito del control de las malas hierbas, donde las soluciones tradicionales siempre han implicado un intenso trabajo manual o el uso de productos químicos que pueden ser caros y conllevar riesgos medioambientales. Al dotar a las máquinas automatizadas del equipo y los conocimientos necesarios para buscar plantas invasoras e indeseables, se espera que gran parte de este proceso pueda automatizarse, dejando los cultivos sanos y a los agricultores con más dinero y tiempo en sus manos. Para su solución, Carbon Robotics ha diseñado un robot de 4.300 kg con cuatro ruedas que usa el GPS y la visión por ordenador para recorrer los cultivos en busca de malas hierbas. Incorpora un superordenador a bordo y cámaras de alta resolución para identificar las plantas no deseadas y, a continuación, ocho láseres de 150 W que funcionan simultáneamente las eliminan con energía térmica apuntando a sus meristemas, a un ritmo de más de 100.000 malas hierbas por hora. La máquina, totalmente autónoma, puede trabajar las 24 horas del día, cubriendo de 6 a 8 hectáreas al día; mientras sus láseres dejan el suelo circundante intacto para preservar su microbiología [13].

Nivelación de suelos. Un nivel láser es una herramienta de nivelación muy utilizada tanto en trabajos profesionales como en trabajos de bricolaje, ya que nos permite nivelar de forma fácil y precisa. Aunque los hay de muchos tipos, el funcionamiento básico de un nivel láser consiste en que contiene un péndulo en su interior que es la base de la nivelación, ya que cuando este deja de oscilar el nivel interpreta que está nivelado. El péndulo normalmente está unido a un imán para conseguir la nivelación de forma más rápida y a un diodo que se encarga de emitir la luz láser para proyectar el nivel. El uso de un nivel láser, aunque pueda parecer difícil en la mayoría de los niveles resulta muy fácil e intuitivo. Explicar el uso concreto es difícil, ya que hay muchos modelos y marcas en el mercado donde cada uno tiene unas características, tipo de funcionamiento y uso distinto. No obstante, hay unos pasos básicos de cómo se usa para realizar cualquier nivelación correcta, los cuales vamos a detallar a continuación. El primer paso como es lógico es encender el nivel láser,

cosa que habitualmente se hará pulsando un simple botón. Posteriormente deberemos colocar el aparato sobre una superficie plana y estable, ya sea mediante el soporte del nivel láser o un trípode para niveles láser. La mayoría de los niveles láser son autonivelantes, de modo que se auto nivelarán y en caso de que no se pueda nivelar emitirá una alarma. Una vez nivelado, seguramente deberemos elegir la función del nivel láser en función del tipo de nivel y los modos o funciones que ofrezca. Una vez el nivel emita la luz láser, deberemos dirigir la luz hacia el plano que deseamos nivelar, para sí poder realizar las correspondientes marcas de nivelación o realizar el trabajo con el láser encendido. Finalmente, una vez realizado el trabajo y la nivelación deberemos apagar el nivel para evitar gastar las pilas o la batería innecesariamente [14].

Ventajas de la Nivelación Láser Agrícola:

- Elevada eficiencia de aplicación y de uniformidad del riego.
- Menor consumo de agua. Se reduce notablemente la cantidad de agua necesaria para irrigar una parcela de terreno, así como también el tiempo que se requiere para realizar esta actividad.
- Mejora el drenaje superficial.
- Eliminación de los efectos negativos de la erosión, por lo tanto, una mayor conservación del suelo.
- Mayor eficiencia en el uso de fertilizantes.
- Operación eficiente de maquinaria.
- Incrementa notablemente la producción. Todas las plantas reciben la misma cantidad de agua, como también fertilizantes, por tal razón la plantación crece uniforme.

La nivelación con sistema láser no es una técnica muy difundida, pero seguramente está en camino de serlo porque son notables sus ventajas. [16].

Nuevos sensores ópticos permiten detectar contaminantes en el agua con alta precisión.

Este nuevo tipo de sensor fotónico se ha fabricado sobre una superficie transparente -de vidrio- y se basa en la excitación infrarroja de polaritones plasmónicos superficiales, un tipo de onda electromagnética que permite detectar pequeñas concentraciones de sustancias contaminantes en el agua. El sensor aprovecha la existencia de resonancias moleculares en la región espectral infrarroja para diferenciar sustancias contaminantes del agua. Es decir, la luz infrarroja utilizada en este trabajo es absorbida por las moléculas de la sustancia con la que entra en contacto. Una misma sustancia puede absorber radiación con longitudes de onda diversas -de acuerdo con su composición molecular- y cada porción del espectro que se absorbe se debe a una composición molecular específica. El hecho de que diferentes sustancias tengan resonancias diferentes sirve para detectar concentraciones de sustancias determinadas a través de diferentes técnicas, como la del sensor que ahora han desarrollado. En el trabajo, el resultado del cuál se acaba de publicar en la revista *Optics Letters*, se demuestra experimentalmente, por ejemplo, la detección de un mínimo de 0.02 % de volumen de alcohol en agua pura.

Este es uno de los resultados del prototipo actual, pero las simulaciones que ha hecho el grupo de investigación Física y Cristalografía de Materiales de la URV prevén que la sensibilidad del sensor se pueda aumentar todavía más. Este nivel de precisión en la detección óptica de contaminantes en el agua sobre una superficie de dimensiones milimétricas puede tener un gran interés tecnológico puesto que este sensor, conectado mediante fibras ópticas, es capaz de incorporarse en cualquier elemento de vidrio, como por ejemplo probetas, puertas de microscopio o, incluso sobre pantallas de smartphones, ya que el sensor químico está diseñado en una plataforma transparente. La novedad del trabajo recae tanto en el mecanismo de detección como en su integralidad [19].

El control de los contaminantes y patógenos en el agua normalmente requiere tomar muestras y llevarlas a laboratorio. Esto supone tiempo, y no es una buena estrategia si lo que se necesita es saber, en el mismo momento, si el agua se puede beber o si se deben tomar decisiones rápidas para evitar desastres ambientales.

En los últimos años se han empezado a desarrollar sistemas portátiles que permiten el análisis en el mismo lugar y en poco tiempo, pero no siempre cubren todos los contaminantes. O bien, otro posible problema, requieren instrumentos portátiles económicamente costosos o relativamente voluminosos y pesados.

Una forma de abordar este reto son los biosensores. Los biosensores incorporan alguna molécula u organismo, la reacción del que revela la presencia de lo que se quiere detectar. En este caso, los investigadores del IMB-CNM trabajan con bacterias que son de la misma familia que los que están presentes

en el sistema digestivo humano. Si la muestra es tóxica para las bacterias del sensor, también lo será para los de nuestra flora intestinal y, también, para nosotros. [20]

Experimento propio

Se realizaron distintas mediciones haciendo uso de un espectrómetro y láseres He-Ne y Thorlabs modelo SLS202. Primero se eligieron las plantas que serían analizadas, las cuales fueron *Ocimum basilicum* y *Tradescantia pallida*, se cortaron distintas hojas con diferentes estados de salud en cada una de ellas.

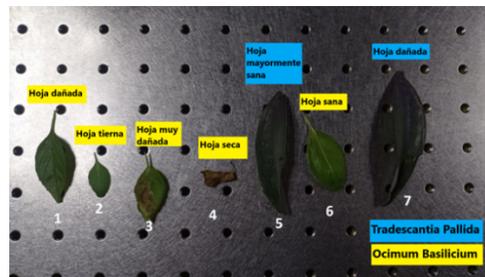


Figura 10. Muestras de hojas. (1) Hoja dañada (2) hoja tierna (3) hoja muy dañada (4) hoja seca (5) hoja mayormente sana (6) hoja sana (7) hoja dañada.

Por consiguiente, se preparó el espectrómetro, conectando la fibra óptica y verificando que el software usado por el espectrómetro funcionara correctamente. Una vez verificado esto se realizó el primer arreglo con lentes haciendo uso del láser He-Ne. Se ajustaron el tiempo de integración (20), escaneos promedio (5) y suavidad (0) con la finalidad de reducir el ruido y creando un espectro de frecuencia con dichos datos para cada una de las hojas analizadas.

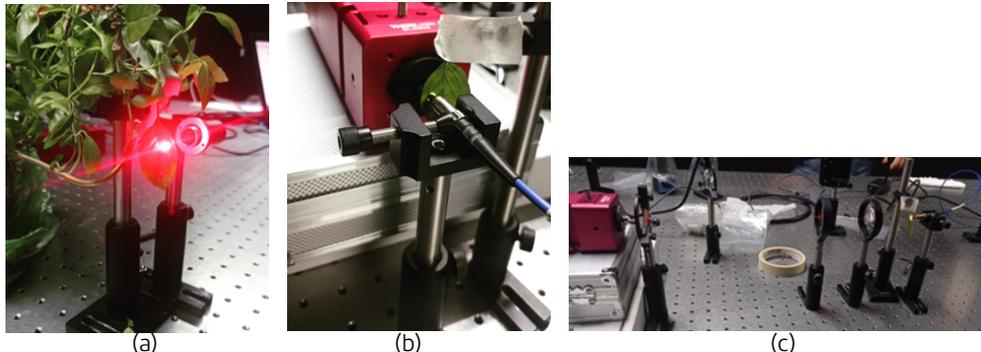


Figura 11. (a) Arreglo con laser He-Ne; (b) Arreglo directo con lámpara Thorlabs SLS202, (c) Arreglo Indirecto con lámpara Thorlabs SLS202

Se realizó el segundo arreglo con lentes haciendo uso del láser Thorlabs SLS202. Se ajustaron el tiempo de integración (100), escaneos promedio (25) y suavidad (1) con la finalidad de reducir el ruido y creando un espectro de frecuencia con dichos datos para cada una de las hojas analizadas.

Finalmente se aplicó directamente el láser Thorlabs SLS202 a cada una de las hojas, para posteriormente realizar los ajustes necesarios respecto al tiempo de integración (500), escaneos promedio (1) y suavidad (2) creando los espectros de frecuencia para cada una de las muestras analizadas.

Cada uno de los espectros medidos fue nombrado de acuerdo a su respectivo número asignado de prueba y láser utilizado. A través de los datos se realizó la gráfica del espectro de radiación transmitida de cada una de las muestras.

Los espectros medidos en diferentes arreglos se muestran en la Fig. 12

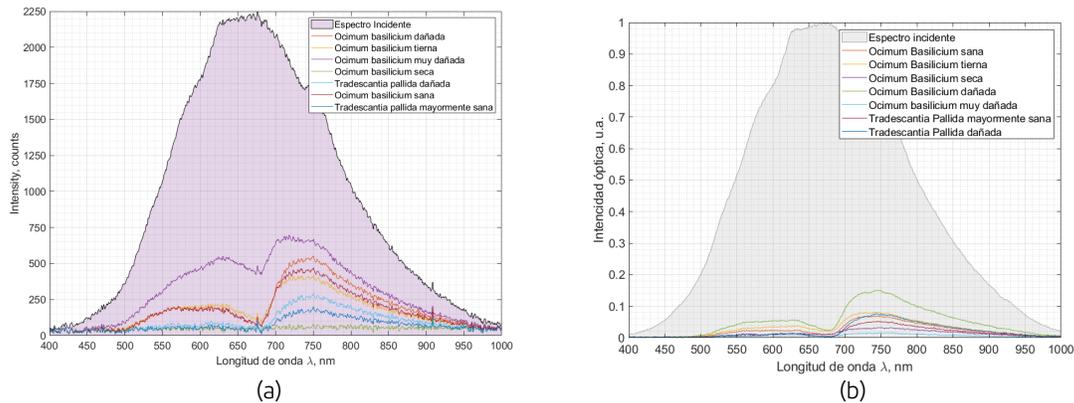


Figura 12. Espectros VIS-NIR medidos en (a) el arreglo indirecto; (b) arreglo directo .

Comparación de las señales obtenidas.

Se propuso un método que permita cuantificar el grado de salud de las plantas a través de los espectros de frecuencia obtenidos anteriormente, haciendo uso de la correlación; La correlación tiene como objetivo el cálculo de la similitud de dos señales dicha propiedad nos permitirá comparar el grado de similitud que existe entre dos especímenes , en nuestro caso tomamos como muestra de control la hoja sana, para establecer su grado de similitud de forma gráfica, esto se llevó a cabo con las muestras de hojas tiernas, parcialmente dañada , muy dañada y seca, además para obtener un solo valor que permitiera determinar la relación entre las longitudes de onda obtenidas y su salud se propuso trabajar con el coeficiente de correlación de Pearson.

Coefficiente de correlación de Pearson

En estadística, el coeficiente de correlación de Pearson es una medida de dependencia lineal entre dos variables aleatorias cuantitativas. A diferencia de la covarianza, la correlación de Pearson es independiente de la escala de medida de las variables.

De manera menos formal, podemos definir el coeficiente de correlación de Pearson como un índice que puede utilizarse para medir el grado de relación de dos variables siempre y cuando ambas sean cuantitativas y continuas.

Para una muestra el coeficiente de Pearson se suele denotar por:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) - (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

Tabla 1. Coeficientes de Pearson de las muestras de *Ocimum Basilicum*

Estado de la hoja	He-Ne	Thorlabs SLS202 directo	Thorlabs SLS202 arreglo óptico
dañada	0.9897	0.9979	0.9971
tierna	0.9903	0.9880	0.9913
Muy dañada	0.9855	0.9778	0.8953
seca	0.9809	0.9738	0.6490
sana	1	1	1

Tabla 2. Coeficientes de Pearson para las muestras de *Tradescantia Pallida*

Estado de la hoja	He-Ne	Thorlabs SLS202 directo	Thorlabs SLS202 arreglo óptico
dañada	0.9139	0.9966	0.9907
mayormente sana	1	1	1

Con respecto a la información obtenida de los coeficientes de correlación podemos observar que en los casos en los que la hoja estaba seca se aprecia la menor similitud, seguida por la hoja muy dañada, la hoja dañada y por último la tierna, salvo por los casos en los que se usó el Thorlabs SLS202 en la cual se puede apreciar una menor similitud entre la hoja tierna y la sana con respecto a la dañada con la sana, sin embargo no es significativa.

Referencias

1. Artículo : Chapter 10 LED advancements for plant factory artificial lighting (Cary A. Mitchell, Fatemeh Sheibani, 2020) <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816691-8.00010-8>
2. <https://es.lisungroup.com/news/technology-news/about-par-ppf-and-ppfd.html> PAR Y PPF
3. Agua rodada <https://www.hidraulicafacil.com/2017/07/cuales-son-las-regantes-o-laterales-de.html>
4. Detectar enfermedades en maíz <https://www.agrofertil.com.py/cigarrita-del-maiz-plaga-del-maiz-en-paraguay/>
5. Malformaciones en mazorcas de maíz <https://www.intagri.com/articulos/cereales/por-que-hay-malformaciones-en-las-mazorcas-de-maiz>
6. Utilización de imágenes de satélite y drones en horticultura <https://www.interempresas.net/Horticola/Articulos/206464-Utilizacion-de-imagenes-de-satelite-y-drones-en-horticultura.html>
7. Sistema de procesamiento de imágenes NIR e IR aéreas para agricultura de precisión <https://dspace.uclv.edu.cu/handle/123456789/6355>
8. Análisis de imágenes multispectrales adquiridas con vehículos aéreos no tripulados <https://rielac.cujae.edu.cu/index.php/rieac/article/view/669/336>
9. Detección de variedad y estado de maduración del ciruelo japonés utilizando imágenes hiperespectrales y aprendizaje profundo
10. Cámaras multispectral <https://www.agrotools.net/post/c%C3%A1maras-multiespectral#:~:text=Una%20c%C3%A1mara%20multiespectral%2C%20como%20su,de%20hasta%206%20bandas%20espectrales.>
11. Wataru Yamori "Photosynthesis and respiration" Institute for Sustainable Agro-ecosystem Services, Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo, Nishitokyo, Tokyo, Japan (2020)
12. Láser para eliminar malas hierbas de los cultivos <https://www.ambientum.com/ambientum/ciencia/laser-para-eliminar-malas-hierbas-de-los-cultivos.asp>
13. El robot autónomo que usa láser para eliminar "malas hierbas" <https://www.portalfruticola.com/noticias/2021/04/29/el-robot-autonomo-que-usa-laser-para-eliminar-malas-hierbas/>
14. ¿Cómo usar un nivel láser? Claves de uso y su funcionamiento <https://www.comercturro.com/blog/herramientas/como-usar-un-nivel-laser-claves-de-uso-y-su-funcionamiento.html>
15. Maquinas y herramientas para nivelación de suelos <https://www.demaquinasyherramientas.com/herramientas-de-medicion/niveles-laser-nivelacion-como>
16. Nivelación Agrícola <https://www.agroservicios.com.ar/nivelacion-agricola/2-sin-categoria#:~:text=Ventajas%20de%20la%20Nivelaci%C3%B3n%20L%C3%A1ser,Mejora%20el%20drenaje%20superficial.>
17. Sensores ópticos <https://sensordeproximidad.com/tipos-de-sensores/sensores-opticos/>

18. ¿Qué es un sensor y que hace? <https://dewesoft.com/es/daq/que-es-un-sensor#types-of-sensors>
19. Nuevos sensores ópticos permiten detectar contaminantes en el agua con alta precisión <http://biotech-spain.com/es/articulos/nuevos-sensores-oticos-permiten-detectar-contaminantes-en-el-agua-con-alta-precisi-n/>
20. Biosensores ópticos para la determinación de toxicidad en muestras de agua <https://rdcsic.dicat.csic.es/tecnologias-fisicas-2/117-proyectos/373-biosensores-opticos-para-la-determinacion-de-toxicidad-en-muestras-de-agua>
21. Apuntes para Espectrometría de Radiación Ultravioleta Visible (UV/VIS)" M. en C. A Ma. Magdalena García Fabila , UNIVERSIDAD AUTONOMA DEL ESTADO DE MÉXICO FACULTAD DE QUÍMICA POSGRADO EN CIENCIAS QUÍMICA (Octubre 2016.)
22. Desarrollo de métodos rápidos basados en espectroscopía UV-VIS-NIR para el análisis de vinos , Martelo Vidal, María José (2016) Tesis Doctoral
23. The Use of Fluorescence Spectra for the Detection of Scab and Rot in Fruit and Vegetable Crops , AUTHOR= Sarimov Ruslan M., Lednev Vasily N., Sibirev Alexey V., Gudkov Sergey V., JOURNAL=Frontiers in Physics , YEAR=2021 ,
24. Ellis, D. W., 1966. Luminescence instrumentation and experimental details. En: Hercules, D.(Ed.), Fluorescence and phosphorescence analysis principles and applications. Interscience Publ., USA, pp. 41-79
25. Applications of Photonics in Agriculture Sector: A Review
26. Ball D.W. "Field guide to spectroscopy", SPIE Press (2006)
27. Daniel Cozzolino, D., Porker, K., & Laws, M. (2015). Una visión general sobre el uso de sensores infrarrojos para el monitoreo en campo, proximal y en la cosecha de cultivos de cereales. Agricultura, 5:713-722; doi:10.3390/agricultura5030713
28. Alomar, Daniel & Fuchslocher, Rita. (1998). FUNDAMENTOS DE LA ESPECTROSCOPIA DE REFLECTANCIA EN EL INFRAROJO CERCANO (NIRS) COMO MÉTODO DE ANÁLISIS DE FORRAJES. Agro Sur. 26. 88-104. 10.4206/agrosur.1998.v26n1-1
29. url: (PDF) FUNDAMENTOS DE LA ESPECTROSCOPIA DE REFLECTANCIA EN EL INFRAROJO CERCANO (NIRS) COMO MÉTODO DE ANÁLISIS DE FORRAJES
30. Otero, Javier & Cano, Vanessa. (2015). Espectroscopía Raman: Fundamento y aplicaciones. 10.13140/RG.2.1.5015.5362. URI: https://www.researchgate.net/publication/280720782_Espectroscopia_Raman_Fundamento_y_aplicaciones
31. Applications of Raman Spectroscopy in Agricultural Products and Food Analysis: A Review,
32. DANTING YANG AND YIBIN YING , College of Biosystems Engineering and Food Science DOI: 10.1080/05704928.2011.593216
33. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-07052014000200006
34. https://es.wikipedia.org/wiki/Coeficiente_de_correlaci%C3%B3n_de_Pearson
35. Metodología de la investigación, Hernandez,Fernandez & Baptista pag 305-306.