Universidad
Politécnica
de Cartagena

Universidad
Politécnica
de Cartagena | Campus
de Excelencia
Internacional

TITULO TESIS

Contribución al Desarrollo de Sistemas Inteligentes de Monitorización y Control de Microclimas Lumínicos basados en el Internet de las Cosas y en las nuevas tecnologías SSL (Solid State Lighting). Aplicación a entornos agrícolas para el estudio del efecto sobre la germinación y crecimiento vegetal in vitro.

Programa de Doctorado

Tecnologías Industriales

Autor:

D. Cristóbal Javier Solano Navarro

Directores:

**Dr. D. Juan Suardíaz Muro
Dr. D. José Antonio Hernández Cortes
Dr. D. Gregorio Barba-Espín**

2020

**CONFORMIDAD DE SOLICITUD DE AUTORIZACIÓN DE DEPÓSITO DE
TESIS DOCTORAL POR EL DIRECTOR DE LA TESIS**

D. Juan Suardíaz Muro Director de la Tesis doctoral “*Contribución al Desarrollo de Sistemas Inteligentes de Monitorización y Control de Microclimas Lumínicos basados en el Internet de las Cosas y en las nuevas tecnologías SSL (Solid State Lighting). Aplicación a entornos agrícolas para el estudio del efecto sobre la germinación y crecimiento vegetal “in vitro”*”.

INFORMA:

Que la referida Tesis Doctoral, ha sido realizada por D. Cristóbal Javier Solano Navarro, dentro del Programa de Doctorado Tecnologías Industriales, dando mi conformidad para que sea presentada ante el Comité de Dirección de la Escuela Internacional de Doctorado para ser autorizado su depósito.

☒ Informe positivo sobre el plan de investigación y documento de actividades del doctorando/a emitido por el Director/ Tutor (**RAPI**).

La rama de conocimiento en la que esta tesis ha sido desarrollada es:

- ☐ Ciencias
- ☐ Ciencias Sociales y Jurídicas
- ☒ Ingeniería y Arquitectura

En Cartagena, a 17 de septiembre de 2020

EL DIRECTOR DE LA TESIS

JUAN|
SUARDIA|
Z|MURO|

Firmado
digitalmente
por JUAN|
SUARDIAZ|
MURO

Fdo.: Juan Suardíaz Muro

COMITÉ DE DIRECCIÓN ESCUELA INTERNACIONAL DE DOCTORADO

**CONFORMIDAD DE SOLICITUD DE AUTORIZACIÓN DE DEPÓSITO DE
TESIS DOCTORAL POR EL DIRECTOR DE LA TESIS**

D. José Antonio Hernández Cortes Director de la Tesis doctoral Contribución al Desarrollo de Sistemas Inteligentes de Monitorización y Control de Microclimas Lumínicos basados en el Internet de las Cosas y en las nuevas tecnologías SSL (Solid State Lighting). Aplicación a entornos agrícolas para el estudio del efecto sobre la germinación y crecimiento vegetal “*in vitro*”.

INFORMA:

Que la referida Tesis Doctoral, ha sido realizada por D. Cristóbal Javier Solano Navarro, dentro del Programa de Doctorado Tecnologías Industriales, dando mi conformidad para que sea presentada ante el Comité de Dirección de la Escuela Internacional de Doctorado para ser autorizado su depósito.

☒ Informe positivo sobre el plan de investigación y documento de actividades del doctorando/a emitido por el Director/ Tutor (RAPI).

La rama de conocimiento en la que esta tesis ha sido desarrollada es:

- ☐ Ciencias
- ☐ Ciencias Sociales y Jurídicas
- ☒ Ingeniería y Arquitectura

En Cartagena, a 20 de Julio de 2020

EL DIRECTOR DE LA TESIS

HERNANDEZ CORTES
JOSE ANTONIO - DNI

Fdo.: José Antonio Hernández Cortes

COMITÉ DE DIRECCIÓN ESCUELA INTERNACIONAL DE DOCTORADO

**CONFORMIDAD DE SOLICITUD DE AUTORIZACIÓN DE DEPÓSITO DE
TESIS DOCTORAL POR EL DIRECTOR DE LA TESIS**

D. Gregorio Barba Espín Director de la Tesis doctoral Contribución al Desarrollo de Sistemas Inteligentes de Monitorización y Control de Microclimas Lumínicos basados en el Internet de las Cosas y en las nuevas tecnologías SSL (Solid State Lighting). Aplicación a entornos agrícolas para el estudio del efecto sobre la germinación y crecimiento vegetal “in vitro.

INFORMA:

Que la referida Tesis Doctoral, ha sido realizada por D. Cristóbal Javier Solano Navarro, dentro del Programa de Doctorado Tecnologías Industriales, dando mi conformidad para que sea presentada ante el Comité de Dirección de la Escuela Internacional de Doctorado para ser autorizado su depósito.

☒ Informe positivo sobre el plan de investigación y documento de actividades del doctorando/a emitido por el Director/ Tutor (**RAPI**).

La rama de conocimiento en la que esta tesis ha sido desarrollada es:

- ☐ Ciencias
- ☐ Ciencias Sociales y Jurídicas
- ☒ Ingeniería y Arquitectura

En Cartagena, a 6 de septiembre de 2020

EL DIRECTOR DE LA TESIS

Firmado por BARBA ESPIN GREGORIO -
[Redacted Signature] el día 07/09/2020 con un
certificado emitido por AC FNMT
Usuarios

Fdo.: Gregorio Barba Espín

COMITÉ DE DIRECCIÓN ESCUELA INTERNACIONAL DE DOCTORADO

CONFORMIDAD DE DEPÓSITO DE TESIS DOCTORAL
POR LA COMISIÓN ACADÉMICA DEL PROGRAMA

D/D^a. Sonia Busquier Sáez, Secretaria de la Comisión Académica del Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales.

INFORMA:

Que la Tesis Doctoral titulada, “*Contribución al Desarrollo de Sistemas Inteligentes de Monitorización y Control de Microclimas Lumínicos basados en el Internet de las Cosas y en las nuevas tecnologías SSL (Solid State Lighting). Aplicación a entornos agrícolas para el estudio del efecto sobre la germinación y crecimiento vegetal “in vitro”*”, ha sido realizada, dentro del mencionado Programa de Doctorado, por D. Cristóbal Javier Solano Navarro, bajo la dirección y supervisión de los investigadores Dr. Juan Suardíaz Muro, Dr. José Antonio Hernández Cortes y Dr. Gregorio Barba Espín.

En reunión de la Comisión Académica, visto que en la misma se acreditan los indicios de calidad correspondientes y la autorización del Director de la misma, se acordó dar la conformidad, con la finalidad de que sea autorizado su depósito por el Comité de Dirección de la Escuela Internacional de Doctorado.

☒ Evaluación positiva del plan de investigación y documento de actividades por el Presidente de la Comisión Académica del programa (RAPI).

La Rama de conocimiento por la que esta tesis ha sido desarrollada es:

- ☐ Ciencias
- ☐ Ciencias Sociales y Jurídicas
- ☒ Ingeniería y Arquitectura

En Cartagena, a 17 de septiembre de 2020

LA SECRETARIA DE LA COMISIÓN ACADÉMICA

Fdo: _____

COMITÉ DE DIRECCIÓN ESCUELA INTERNACIONAL DE DOCTORADO

AGRADECIMIENTO

A mi mujer Noelia, a mi hija Olaya y a todos los que han estado trabajando y ayudándome durante todo este tiempo y que han compartido sus conocimientos, su tiempo y su paciencia.

INDICE

1.	Capítulo I. Introducción	31
1.1.	Naturaleza de la luz	31
1.1.1.	Teoría ondulatoria	31
1.1.2.	Teoría corpuscular	32
1.1.3.	Dualidad onda-partícula:	33
1.1.4.	Espectro electromagnético:	33
1.1.5.	Espectro luminoso	34
1.1.6.	El cuerpo negro:	34
1.2.	Propiedades de la luz	35
1.2.1.	Reflexión	35
1.2.2.	Refracción	36
1.2.3.	Absorción	36
1.2.4.	Transmisión	36
1.3.	Iluminación	37
1.3.1.	Conceptos, magnitudes fotométricas y colorimétricas de las luminarias..	37
1.3.2.	Magnitudes fotométricas	38
1.3.3.	Magnitudes colorimétricas	42
1.4.	Tecnología Solid State Lighting (SSL)	43
1.4.1.	LEDs empleados en el solid-state lighting	44
1.4.2.	Aplicaciones de la tecnología SSL	45

1.5.	Cámaras de experimentación vegetal: estado del arte, desarrollo y aplicaciones.....	46
1.6.	La luz LED y su influencia sobre la fisiología de las plantas.....	60
1.6.1.	Impacto de la iluminación LED en el desarrollo y la fisiología de plantas de interés agronómico	61
1.6.2.	Aplicación de iluminación LED en cámaras de crecimiento	62
1.6.3.	Aplicación de la iluminación LED en invernaderos	63
1.6.4.	Aplicación de la iluminación LED en sistemas agrícolas verticales.....	63
1.6.5.	Aplicación de la iluminación LED para mantener la calidad pos-cosecha de frutas y verduras	64
1.6.6.	La importancia de la luz durante la germinación y el uso de LEDs	65
1.6.7.	Raíces pilosas: una herramienta biotecnológica para la producción de metabolitos secundarios	67
1.7.	Internet de las cosas (IoT)	70
1.7.1.	Modelos de Arduino y Raspberry Pi y similares.....	73
2.	Capítulo II. Objetivos.....	75
3.	Capítulo III. Materiales y Métodos	77
3.1.	Componentes hardware.....	77
3.1.1.	Iluminación LED	77
3.1.1.1.	LED rojo con espectro comprendido entre 646-666 nm	77
3.1.1.2.	LED Rojo lejano con espectro comprendido entre 710-740 nm	79
3.1.1.3.	LED azul con espectro comprendido entre 439-461 nm	80
3.1.1.4.	LED verde con espectro comprendido entre 513 – 543 nm	81
3.1.1.5.	LED blanco con espectro comprendido entre 439-700	83

3.1.1.6.	LED UV-B con espectro comprendido entre 305-315 nm	84
3.1.1.7.	Luminaria experimental con LEDs rojos.....	85
3.1.1.8.	Luminaria experimental con LEDs azules	86
3.1.1.9.	Luminaria experimental con LEDs verdes.....	87
3.1.1.10.	Luminaria experimental con LEDs blancos	88
3.1.1.11.	Luminaria experimental con LEDs rojo lejano.....	89
3.1.1.12.	Luminaria experimental con LEDs UV-B.....	91
3.1.1.13.	Luminaria experimental de espectro modulable.....	91
3.1.2.	Arduino.....	92
3.1.3.	Sensores.....	94
3.1.3.1.	Sensor de temperatura y humedad DHT11 / DHT22	94
3.1.3.2.	Sensor de iluminación TSL2591	97
3.1.3.3.	Sensor de radiación fotosintéticamente activa (PAR)	98
3.1.3.4.	Sensor UV	100
3.1.3.5.	Raspberry Pi.....	101
3.1.4.	Cuadro eléctrico de mando y control	103
3.1.5.	Chasis	105
3.1.6.	Sistema de climatización	105
3.1.7.	Esfera de Ulbricht.....	106
3.1.8.	Cámara termográfica.....	109
3.2.	Componentes software	111
3.2.1.	Instalación y configuración del sistema operativo Raspbian en la Raspberry Pi.....	111

3.2.2.	Instalación y configuración de rclone en la Raspberry Pi.....	112
3.2.3.	Instalación y configuración de Node-RED en la Raspberry Pi	114
3.2.3.1.	Proceso de instalación de Node-RED desde la terminal de la Raspberry Pi.....	115
3.2.4.	Configuración del archivo crontab del usuario de la Raspberry Pi.	116
3.2.5.	IDE Arduino.....	117
3.2.6.	Instalación de la biblioteca del sensor DHT22	117
3.2.7.	Instalación de la biblioteca del sensor TSL2591	118
3.2.7.1.	Código TSL2591.....	119
3.2.8.	Fog Computing.....	120
3.3.	Ensayo fisiológico I: tratamiento de semillas.....	121
3.3.1.	Material vegetal y tratamiento de luz roja (LR).....	121
3.3.2.	Preparación de muestras y determinación de actividades enzimáticas.....	122
3.3.3.	Análisis estadísticos	123
3.4.	Ensayo fisiológico II: tratamiento de raíces pilosas (RP).....	124
3.4.1.	Material vegetal y preparación de cultivos	124
3.4.2.	Tratamiento de luz ultravioleta-B (UV-B)	124
3.4.3.	Toma de muestras, procesado y medida de pesos	125
3.4.4.	Extracción ácida y medida de antocianinas monoméricas totales (AMT).	125
3.4.5.	Análisis estadístico	126
4.	Capítulo IV. Resultados	129
4.1.	Integración de la cámara experimental	129

4.2. Evaluación de la Cámara experimental: toma de medidas y determinaciones teóricas	137
4.2.1. MATLAB.....	137
4.2.1.1. Distribución espacial de la radiación fotosintéticamente activa (PAR)	138
4.2.1.1.1. Distribución espacial del nivel PAR para el espectro de luz roja..	138
4.2.1.1.1.1 Código M para la representación gráfica en 2D y 3D del nivel PAR de luz roja.	139
4.2.1.1.1.2 Distribución espacial del nivel PAR para el espectro de luz azul	142
4.2.1.1.1.3 Código M para la representación gráfica en 2D y 3D del nivel PAR de Luz Azul.....	144
4.2.1.1.1.4 Distribución espacial del nivel PAR para el espectro de luz verde	145
4.2.1.1.1.5 Código M para la representación gráfica en 2D y 3D del nivel PAR de Luz Verde.	147
4.2.1.1.1.6 Distribución espacial del nivel PAR para el espectro de luz blanca	148
4.2.1.1.1.7 Código M para la representación gráfica en 2D y 3D del nivel PAR de luz blanca.....	150
4.2.2. Estimación matemática del factor de interconversión de lux a $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de la luminaria experimental	151
4.2.2.1. Factor de interconversión de lux a $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ para LEDs rojos ..	152
4.2.2.2. Factor de interconversión de lux a $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ para LEDs azules	153

4.2.2.3. Factor de interconversión de lux a $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ para LEDs verdes	154
4.2.2.4. Factor de interconversión de lux a $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ para LEDs blancos...	154
4.2.2.5. Factor de interconversión de lux a $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ para LEDs rojo lejano	155
4.2.3. Relux.....	156
4.3. Ensayos luminarias experimentales LEDs en la esfera de Ulbricht.....	160
4.3.1. Ensayo luminaria experimental con 10 LEDs rojos con óptica de 120° en la esfera de Ulbricht.....	160
4.3.2. Ensayo con una luminaria experimental compuesta por 10 LEDs rojos y una óptica de 16° en la esfera de Ulbricht.....	162
4.3.3. Ensayo con una luminaria experimental compuesta por 10 LEDs azules y una óptica de 16° en la esfera de Ulbricht.....	164
4.3.4. Ensayo con una luminaria experimental compuesta por 10 LEDs verdes y una óptica de 16° en la esfera de Ulbricht.....	166
4.3.5. Ensayo con una luminaria experimental compuesta por 10 LEDs blancos y una óptica de 16° en la esfera de Ulbricht.....	168
4.3.6. Ensayo con una luminaria experimental compuesta por 10 LEDs rojo lejano y una óptica de 16° en la esfera de Ulbricht	170
4.3.7. Ensayo luminaria experimental con 4 LEDs UV-B con óptica de 120° en la esfera de Ulbricht.....	172
4.3.8. Ensayo luminaria experimental de espectro modulable con óptica de 16° en la esfera de Ulbricht.....	172
4.3.9. Ensayo de 1 LED rojo con óptica de 16° en la esfera de Ulbricht	174

4.3.10.	Ensayo de 1 LED verde con óptica de 16° en la esfera de Ulbricht .	176
4.3.11.	Ensayo de 1 LED azul con óptica de 16° en la esfera de Ulbricht....	178
4.3.12.	Ensayo de 1 LED blanco con óptica de 16° en la esfera de Ulbricht	180
4.3.13.	Ensayo de 1 LED rojo lejano con óptica de 16° en la esfera de Ulbricht	182
4.4.	Ensayos de las luminarias experimentales LEDs en la cámara termográfica	184
4.4.1.	Ensayo de la luminaria experimental compuesta por 10 LEDs rojos con la cámara termográfica	184
4.4.2.	Ensayo de la luminaria experimental compuesta por 10 LEDs azules con la cámara termográfica	185
4.4.3.	Ensayo de la luminaria experimental compuesta por 10 LEDs verdes con la cámara termográfica	186
4.4.4.	Ensayo de la luminaria experimental compuesta por 10 LEDs blancos con la cámara termográfica	187
4.4.5.	Ensayo de la luminaria experimental compuesta por 10 LEDs rojo lejano con la cámara termográfica	188
4.4.6.	Ensayo de la luminaria experimental de espectro modulable con la cámara termográfica.....	189
4.4.7.	Ensayo de la luminaria experimental compuesta por LEDs UV-B con la cámara termográfica.....	190
4.4.8.	Ensayo de un LED rojo con la cámara termográfica	191
4.4.9.	Ensayo de un LED verde con la cámara termográfica	192
4.4.10.	Ensayo de un LED azul con la cámara termográfica	193
4.4.11.	Ensayo de un LED rojo lejano con la cámara termográfica.....	194

4.4.12.	Ensayo de un LED blanco con la cámara termográfica	195
4.5.	Implementación práctica (I): efecto de la iluminación LED en la franja del rojo en la germinación de semillas de guisante y melón	196
4.5.1.	Resultados	196
4.6.	Implementación práctica (II): efecto de la iluminación LED en la franja del ultravioleta-B en el crecimiento y acumulación de pigmentos de raíces pilosas de zanahoria morada.....	210
4.6.1.	Resultados	210
5.	Capítulo V. Discusión.....	215
5.1.	Tecnología SSL	215
5.2.	Cámara de crecimiento (software y hardware).....	217
5.3.	Efecto de la iluminación LED en la franja del rojo en la germinación de semillas de guisante y melón.....	219
5.4.	Efecto de la iluminación LED en la franja del ultravioleta-B en el crecimiento y acumulación de pigmentos de raíces pilosas de zanahoria morada... ..	221
6.	Capítulo VI. Conclusión	225
6.1.	Conclusión general	225
6.2	Conclusiones parciales	225
7.	REFERENCIAS	227
8.	ANEXO	245

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Clasificación del IRC según su calidad	42
Tabla 1.2 Ventajas y desventajas de los LEDs.	44
Tabla 1.3 Información detallada sobre las diferentes cámaras de crecimiento vegetal.	53
Tabla 1.4 Modelos de Arduino y similares	73
Tabla 1.5 Características de los últimos modelos de Raspberry Pi.....	73
Tabla 3.1 Parámetros luminotécnicos y eléctricos del LED rojo.....	78
Tabla 3.2 Parámetros luminotécnicos y eléctricos del LED rojo lejano	79
Tabla 3.3 Parámetros luminotécnicos y eléctricos del LED azul	81
Tabla 3.4 Parámetros luminotécnicos y eléctricos del LED verde	82
Tabla 3.5 Parámetros luminotécnicos y eléctricos del LED blanco.	83
Tabla 3.6 Parámetros luminotécnicos y eléctricos del LED UV-B.	85
Tabla 3.7 Consumo de energía (W), máximo valor de luminancia (lux) y radiación fotosintéticamente activa (PAR, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) en función del número de LEDs rojos y de su óptica.	86
Tabla 3.8 Consumo de energía (W), máximo valor de luminancia (lux) y radiación fotosintéticamente activa (PAR, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) en función del número de LEDs azules y de su óptica.	87
Tabla 3.9 Consumo de energía (W), máximo valor de luminancia (lux) y radiación fotosintéticamente activa (PAR, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) en función del número de LEDs verdes y de su óptica.	88
Tabla 3.10 Consumo de energía (W), máximo valor de luminancia (lux) y radiación fotosintéticamente activa (PAR, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) en función del número de LEDs blancos y de su óptica.	89
Tabla 3.11 Consumo de energía (W), máximo valor de luminancia (lux) y radiación fotosintéticamente activa (PAR, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) en función del número de LEDs rojo lejano y de su óptica.	90

Tabla 3.12 Consumo de energía (W), máximo valor de energía en Julios por segundo en función del número de LEDs UV-B.....	91
Tabla 3.13 Consumo de energía (W), máximo valor de luminancia (lux) y radiación fotosintéticamente activa (PAR, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) en función del color del LEDs.....	92
Tabla 3.14 Características de los sensores DHT11 y DHT22	95
Tabla 3.15 Especificaciones del sensor TSL2591.....	97
Tabla 3.16 Conexión del sensor TSL2561 a la placa Arduino UNO	98
Tabla 3.17 Características técnicas de la esfera de Ulbricht.....	108
Tabla 3.18 Características técnicas de la cámara termográfica.	109
Tabla 4.1 Relación de entradas / salidas virtuales y físicas empleadas entre la Raspberry Pi y Arduino.....	135
Tabla 4.2 Distribución de Potencias de cada dispositivo electrónico del sistema.....	136
Tabla 4.3 Nivel PAR del espectro de luz roja sobre la superficie de la CEEM en función del número de LEDs.....	138
Tabla 4.4 Nivel PAR del espectro de luz azul sobre la superficie de la CEEM en función del número de LEDs.....	143
Tabla 4.5 Nivel PAR del espectro de luz verde sobre la superficie de la CEEM en función del número de LEDs	146
Tabla 4.6 Nivel PAR del espectro de luz blanca sobre la superficie de la CEEM en función del número de LEDs.....	149

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Espectro de radiación electromagnética (Moro, 2013).....	34
Figura 1.2 Curvas de sensibilidad $V'(\lambda)$ condiciones escotópicas y $V(\lambda)$ condiciones fotópicas	38
Figura 1.3 Diagrama de cromaticidad (CIE, 1931).....	43
Figura 1.4 Impacto del sector agroalimentario en la Región de Murcia	58
Figura 1.5 Evolución tecnológica de los últimos 50 años de los sistemas de crecimiento vegetal en el espacio (Zabel et al., 2016).....	59
Figura 1.6 Raíces de zanahoria morada (i) y cultivo de raíces pilosas de la misma (d) crecido en medio sólido (Barba-Espin et al. 2020).	68
Figura 1.7 Estructura básica de las antocianidinas (i) y la cianidina (d) (Adaptada de Khoo et al., 2017).....	69
Figura 3.1 A) Apariencia física del chip LED rojo y B) Dimensiones del chip montado sobre una superficie cerámica. (OSRAM, Munich, Alemania).	78
Figura 3.2 Curva espectral del LED rojo, (OSRAM, Munich, Alemania).....	79
Figura 3.3 A) Apariencia física del chip LED rojo lejano y B) Dimensiones del chip montado sobre una superficie cerámica, (OSRAM, Munich, Alemania)	79
Figura 3.4 Curva espectral del LED rojo lejano, (OSRAM, Munich, Alemania)	80
Figura 3.5 A) Apariencia física del chip LED azul y B) Dimensiones del chip montado sobre una superficie cerámica,. (OSRAM, Munich, Alemania)	80
Figura 3.6 Curva espectral del LED azul, (OSRAM, Munich, Alemania).....	81
Figura 3.7 A) Apariencia física del chip LED verde y B) Dimensiones del chip montado sobre una superficie cerámica, (OSRAM, Munich, Alemania)	82
Figura 3.8 Curva espectral del LED verde, (OSRAM, Munich, Alemania).....	83
Figura 3.9 A) Apariencia física del chip LED blanco y B) Dimensiones del chip montado sobre una superficie cerámica, (OSRAM, Munich, Alemania).	83
Figura 3.10 Curva espectral del LED blanco, (OSRAM, Munich, Alemania).	84

Figura 3.11 A) Apariencia física del chip LED UV-B y B) Dimensiones del chip montado sobre una superficie cerámica (UVphotonic NT GmbH, Berlin, Alemania).	84
Figura 3.12 Curva espectral del LED UV-B (UVphotonic NT GmbH, Berlin, Alemania).	85
Figura 3.13 A) Diseño PCB de la luminaria experimental de LEDs rojos B) Diseño del circuito electrónico en Tina-TI.	86
Figura 3.14 A) Diseño PCB de la luminaria experimental de LEDs azules B) diseño del circuito electrónico en Tina-TI.	87
Figura 3.15 A) Diseño PCB de la luminaria experimental de LEDs verdes B) Diseño del circuito electrónico en Tina-TI.	88
Figura 3.16 A) Diseño PCB de la luminaria experimental de LEDs blancos B) Diseño del circuito electrónico en Tina-TI.	89
Figura 3.17 A) Diseño PCB de la luminaria experimental de LEDs rojo lejano B) Diseño del circuito electrónico en Tina-TI.	90
Figura 3.18 A) Diseño PCB de la luminaria experimental de LEDs UV-B B) Diseño del circuito electrónico en Tina-TI.	91
Figura 3.19 A) Diseño PCB de la luminaria experimental de LEDs B) Diseño del circuito electrónico en Tina-TI.	92
Figura 3.20 Modelo de placa Arduino UNO (Arduino, Torino, Italia).	93
Figura 3.21 . GPIO Arduino Uno (Arduino, Torino, Italia).....	94
Figura 3.22 Sensor DHT discreto e integrado en placa (Adafruit Industries, Nueva York, EE.UU).....	95
Figura 3.23 Conexionado del sensor DHT11/22 a una placa Arduino, el cable rojo se conecta a Vcc (3,3 – 5 V), el cable verde es la salida de datos que se conecta a una entrada digital de Arduino y el cable negro conecta a GND, (Adafruit Industries, Nueva York, EE.UU).....	96
Figura 3.24 Sensor TSL2591 (Adafruit Industries, Nueva York, EE.UU).....	97
Figura 3.25 Conexionado del sensor TSL2591 a la placa Arduino UNO (Adafruit Industries, Nueva York, EE.UU).	98

Figura 3.26 Sensor PAR y sus dimensiones (Apogee Instruments, UT, EEUU).	100
Figura 3.27 Sensor UV y sus dimensiones (Apogee Instruments, UT, EEUU).....	101
Figura 3.28 A) Raspberry Pi Zero W. B) Raspberry Pi 4 B. (Raspberry Pi Foundation, Cambridge, Inglaterra).	103
Figura 3.29 GPIO Raspberry Pi (Raspberry Pi Foundation, Cambridge, Inglaterra).	103
Figura 3.30 Esquema unifilar del cuadro de mando y control de la CEEM realizado con el software de diseño técnico CADE-SIMU	104
Figura 3.31 Sistema de climatización de la CEEM.	105
Figura 3.32 Diagrama que muestra la estructura interna de una celda Peltier, donde se observan los elementos semiconductores dispuestos eléctricamente en serie y térmicamente en paralelo (Patterson et al. 2007).....	106
Figura 3.33 Esfera de Ulbricht empleada para la realización de los ensayos (Laboratorio del fabricante Cifra import, Murcia, España).	108
Figura 3.34 Cámara termográfica empleada durante los ensayos, cedida por el Colegio de Ingenieros Técnicos Industriales de la Región de Murcia.....	111
Figura 3.35 Interfaz de programación basada en un navegador web.	115
Figura 3.36 Niveles de computación (Cisco Systems, Inc. CA. EEUU)	121
Figura 3.37 Esquema del tratamiento en la cámara experimental de espectro modulable (CEEM) de las raíces pilosas y las semillas de guisante y melón, la posterior toma de muestras y análisis bioquímicos realizados.....	127
Figura 4.1 Flujograma de operación de la cámara experimental para el desarrollo de los experimentos en el espectro rojo basado en una estructura Fog Computing.	129
Figura 4.2 A) Arquitectura interna de la integración de la unidad de control en el sistema B) Integración de la Unidad de Control.	131
Figura 4.3 La CEEM y la UC instalada en el laboratorio del CEBAS-CSIC durante la realización de los ensayos.	132
Figura 4.4 Flujograma de operación de la cámara experimental de espectro modulable basado en una estructura Fog Computing.	133

Figura 4.5 Interfaz gráfica hombre-máquina mostrada en la pantalla táctil de la Unidad de Control del Sistema A) Versión inicial para la realización del experimento de melón y guisante B) Versión mejorada C) Versión mejorada mostrando valores y estado de sensores e interruptores.....	135
Figura 4.6 Esquema de conexionado de las salidas de Arduino con los dispositivos electrónicos que se encuentran en la CEEM.....	136
Figura 4.7 Distribución espacial de la radiación fotosintéticamente activa (PAR, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) en la superficie interior de la CEEM para las luminarias con 1 (A), 5 (B) y 10 (C) LED R. La imagen (D) representa el montaje en 3D de las 3 luminarias.	142
Figura 4.8 Distribución espacial de la radiación fotosintéticamente activa (PAR, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) en la superficie interior de la CEEM para las luminarias con 1 (A), 5 (B) y 10 (C) LED A. La imagen (D) representa el montaje en 3D de las 3 luminarias.	145
Figura 4.9 Distribución espacial de la radiación fotosintéticamente activa (PAR, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) en la superficie interior de la CEEM para las luminarias 1 (A), 5 (B) y 10 (C) LED V. La imagen (D) representa el montaje en 3D de las 3 luminarias.	148
Figura 4.10 Distribución espacial de la radiación fotosintéticamente activa (PAR, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) en la superficie interior de la CEEM para las luminarias 1 (A), 5 (B) y 10 (C) LED B. La imagen (D) representa el montaje en 3D de las 3 luminarias.	151
Figura 4.11 Distribución 3D de la luz en el interior de la CEEM y valores de iluminancia (lux)máximo, mínimo, medio e índices de uniformidad en la superficie de la CEEM en función del número y tipo de LEDs para (A)1 LED rojo (B) valores de iluminancia para (A), (C) 5 LEDs rojos (D) Valores de iluminancia para (C), (E) 10 LEDs rojos (F) Valores de iluminancia para (E), (G) 1 LED azul (H) Valores de iluminancia para (G), (I) 5 LEDs azules(J) Valores de iluminancia para (I), (K) 10 LEDs azules (L) Valores de iluminancia para (K), (M) 1 LED verde (N) Valores de iluminancia para (M), (Ñ) 5 LEDs verdes (O) Valores de iluminancia para (Ñ), (P) 10 LEDs verdes (Q) Valores de iluminancia para (P), (R) 1 LED blanco (S) Valores de iluminancia para (R), (T) 5 LEDs blancos (U) Valores de iluminancia para (T), (V) 10 LEDs blancos (W) Valores de iluminancia para (V)	160

Figura 4.12 Captura de pantalla del programa de cálculo luminotécnico HPLED durante el ensayo de la luminaria experimental de 10 LEDs rojos con óptica de 120° en la esfera de Ulbricht.....	161
Figura 4.13 A) Instalación de la luminaria experimental con 10 LEDs rojos con óptica de 120° en el interior de la esfera de Ulbricht B) Encendido y calibración de la luminaria en el interior de la esfera de Ulbricht C) Esfera de Ulbricht cerrada para la toma de datos con el programa de cálculo HPLED. (Cifra import, Murcia, España).....	162
Figura 4.14 Captura de pantalla del programa de cálculo luminotécnico HPLED durante el ensayo de la luminaria experimental de 10 LEDs rojos con óptica de 16° en la esfera de Ulbricht.....	163
Figura 4.15 A) Instalación de la luminaria experimental con 10 LEDs rojos con óptica de 16° en el interior de la esfera de Ulbricht B) Encendido y calibración de la luminaria en el interior de la esfera de Ulbricht C) Esfera de Ulbricht cerrada para la toma de datos con el programa de cálculo HPLED. (Cifra import, Murcia, España).....	164
Figura 4.16 Captura de pantalla del programa de cálculo luminotécnico HPLED durante el ensayo de la luminaria experimental de 10 LEDs azules con óptica de 16° en la esfera de Ulbricht.....	165
Figura 4.17 A) Instalación de la luminaria experimental con 10 LEDs azules con óptica de 16° en el interior de la esfera de Ulbricht B) Encendido y calibración de la luminaria en el interior de la esfera de Ulbricht C) Esfera de Ulbricht cerrada para la toma de datos con el programa de cálculo HPLED. (Cifra import, Murcia, España).....	166
Figura 4.18 Captura de pantalla del programa de cálculo luminotécnico HPLED durante el ensayo de la luminaria experimental de 10 LEDs verdes con óptica de 16° en la esfera de Ulbricht.....	167
Figura 4.19 A) Instalación de la luminaria experimental con 10 LEDs verdes con óptica de 16° en el interior de la esfera de Ulbricht B) Encendido y calibración de la luminaria en el interior de la esfera de Ulbricht C) Esfera de Ulbricht cerrada para la toma de datos con el programa de cálculo HPLED. (Cifra import, Murcia, España).....	168

Figura 4.20 Captura de pantalla del programa de cálculo luminotécnico HPLED durante el ensayo de la luminaria experimental de 10 LEDs blancos con óptica de 16° en la esfera de Ulbricht.....	169
Figura 4.21 A) Instalación de la luminaria experimental con 10 LEDs blancos con óptica de 16° en el interior de la esfera de Ulbricht B) Encendido y calibración de la luminaria en el interior de la esfera de Ulbricht C) Esfera de Ulbricht cerrada para la toma de datos con el programa de cálculo HPLED. (Cifra import, Murcia, España).....	170
Figura 4.22 Captura de pantalla del programa de cálculo luminotécnico HPLED durante el ensayo de la luminaria experimental de 10 LEDs rojo lejano con óptica de 16° en la esfera de Ulbricht.....	171
Figura 4.23 A) Instalación de la luminaria experimental con 10 LEDs rojo lejano con óptica de 16° en el interior de la esfera de Ulbricht B) Encendido y calibración de la luminaria en el interior de la esfera de Ulbricht C) Esfera de Ulbricht cerrada para la toma de datos con el programa de cálculo HPLED. (Cifra import, Murcia, España).....	172
Figura 4.24 Captura de pantalla del programa de cálculo luminotécnico HPLED durante el ensayo de la luminaria experimental de espectro modulable con óptica de 16° en la esfera de Ulbricht.....	173
Figura 4.25 A) Instalación de la luminaria experimental de espectro modulable con óptica de 16° en el interior de la esfera de Ulbricht B) Encendido y calibración de la luminaria en el interior de la esfera de Ulbricht C) Esfera de Ulbricht cerrada para la toma de datos con el programa de cálculo HPLED. (Cifra import, Murcia, España).....	174
Figura 4.26 Captura de pantalla del programa de cálculo luminotécnico HPLED durante el ensayo de 1 LED rojo con óptica de 16° en la esfera de Ulbricht	175
Figura 4.27 A) Instalación, encendido y calibración de la luminaria experimental con 1 LED rojo con óptica de 16° en el interior de la esfera de Ulbricht B) Esfera de Ulbricht cerrada para la toma de datos con el programa de cálculo HPLED (Cifra import, Murcia, España).	176

Figura 4.28 Captura de pantalla del programa de cálculo luminotécnico HPLED durante el ensayo de 1 LED verde con óptica de 16° en la esfera de Ulbricht.	177
Figura 4.29 A) Instalación de la luminaria en el interior de la esfera de Ulbricht B) Encendido y calibración de la luminaria experimental con 1 LED verde con óptica de 16° en el interior de la esfera de Ulbricht C) Esfera de Ulbricht cerrada para la toma de datos con el programa de cálculo HPLED. (Cifra import, Murcia, España).	178
Figura 4.30 Captura de pantalla del programa de cálculo luminotécnico HPLED durante el ensayo de 1 LED azul con óptica de 16° en la esfera de Ulbricht.	179
Figura 4.31 A) Instalación de la luminaria en el interior de la esfera de Ulbricht B) Encendido y calibración de la luminaria experimental con 1 LED azul con óptica de 16° en el interior de la esfera de Ulbricht C) Esfera de Ulbricht cerrada para la toma de datos con el programa de cálculo HPLED. (Cifra import, Murcia, España).	180
Figura 4.32 Captura de pantalla del programa de cálculo luminotécnico HPLED durante el ensayo de 1 LED blanco con óptica de 16° en la esfera de Ulbricht.	181
Figura 4.33 A) Instalación de la luminaria en el interior de la esfera de Ulbricht B) Encendido y calibración de la luminaria experimental con 1 LED blanco con óptica de 16° en el interior de la esfera de Ulbricht C) Esfera de Ulbricht cerrada para la toma de datos con el programa de cálculo HPLED. (Cifra import, Murcia, España).	182
Figura 4.34 Captura de pantalla del programa de cálculo luminotécnico HPLED durante el ensayo de 1 LED rojo lejano con óptica de 16° en la esfera de Ulbricht.	183
Figura 4.35 A) Instalación, encendido y calibración de la luminaria experimental con 1 LED rojo lejano con óptica de 16° en el interior de la esfera de Ulbricht B) Esfera de Ulbricht cerrada para la toma de datos con el programa de cálculo HPLED (Cifra import, Murcia, España).	184
Figura 4.36 A) Imagen termográfica de la parte frontal de la luminaria con LEDs rojos B) Imagen termográfica de la parte trasera de la luminaria con disipador de aluminio.	185
Figura 4.37 A) Imagen termográfica de la parte frontal de la luminaria con LEDs azules B) Imagen termográfica de la parte trasera de la luminaria con disipador de aluminio.	186

Figura 4.38 A) Imagen termográfica de la parte frontal de la luminaria con LEDs verdes. B) Imagen termográfica de la parte trasera de la luminaria con disipador de aluminio.....	187
Figura 4.39 A) Imagen termográfica de la parte frontal de la luminaria con LEDs blancos B) Imagen termográfica de la parte trasera de la luminaria con disipador de aluminio.....	188
Figura 4.40 A) Imagen termográfica de la parte frontal de la luminaria con LEDs rojo lejano B) Imagen termográfica de la parte trasera de la luminaria con disipador de aluminio	189
Figura 4.41 A) Imagen termográfica de la parte frontal de la luminaria con LEDs rojo, azul, verde, blanco, rojo lejano, B) Imagen termográfica de la parte trasera de la luminaria con disipador de aluminio.	190
Figura 4.42 A) Imagen termográfica de los LEDs sobre chapa de aluminio de 3mm de espesor B) Imagen termográfica de los LEDs sobre chapa de aluminio de 3mm de espesor más disipador C) Imagen termográfica de los LEDs sobre chapa de aluminio de 3mm de espesor más disipador y ventilador.	191
Figura 4.43 A) Imagen termográfica de la parte frontal de la luminaria con un LED rojo. B) Imagen termográfica de la parte trasera de la luminaria con disipador de aluminio.....	192
Figura 4.44 A) Imagen termográfica de la parte frontal de la luminaria con un lado LED verde. B) Imagen termográfica de la parte trasera de la luminaria con disipador de aluminio.	193
Figura 4.45 A) Imagen termográfica de la parte frontal de la luminaria con un LED azul B) Imagen termográfica de la parte trasera de la luminaria con disipador de aluminio.....	194
Figura 4.46 A) Imagen termográfica de la parte frontal de la luminaria con un LED rojo lejano. B) Imagen termográfica de la parte trasera de la luminaria con disipador de aluminio.	195
Figura 4.47 A) Imagen termográfica de la parte frontal de la luminaria con un LED blanco B) Imagen termográfica de la parte trasera de la luminaria con disipador de aluminio.....	196
Figura 4.48 (A) Efecto de la exposición a la luz roja de baja intensidad ($13 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) sobre el peso fresco de las plántulas de melón a los cuatro días del tratamiento. B) Imagen que muestra las diferencias en la longitud de las plántulas y en las raíces secundarias. Los	

datos representan la media $\pm$ SE de al menos diez mediciones. Letras diferentes indican diferencias significativas según el Test estadístico de Tukey ($p \leq 0.05$).	197
Figura 4.49 Efecto de la exposición a la luz roja de baja intensidad ($13 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) en la longitud (A) y en el peso fresco (B) de las plántulas de melón a los 5 días del tratamiento. C) Imagen que muestra las diferencias en la longitud de las plántulas y en las raíces secundarias. Los datos representan la media $\pm$ SE de al menos diez mediciones. Letras diferentes indican diferencias significativas según el test de Tukey ($p \leq 0.05$).	199
Figura 4.50 Efecto del tratamiento con luz roja de baja intensidad ($13 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) sobre la germinación de semillas de guisante (cv. Alaska).	200
Figura 4.51 Efecto de la exposición a la luz roja de intensidad moderada ($50 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) sobre el peso fresco (A) y la longitud (B) de las plántulas de melón a los 4 días del tratamiento. Los datos representan la media $\pm$ SE de al menos diez mediciones. Letras diferentes indican diferencias significativas según el test de Tukey ($p \leq 0.05$).	201
Figura 4.52 Efecto de la exposición a la luz roja de alta intensidad ($100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) sobre el peso fresco (A) y la longitud (B) de las plántulas de melón a los 3 días del tratamiento. Los datos representan la media $\pm$ SE de al menos diez mediciones. Letras diferentes indican diferencias significativas según el test de Tukey ($p \leq 0.05$).	203
Figura 4.53 Imagen que muestra el efecto de la exposición a LR de intensidad elevada ($100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) en la longitud y en las raíces secundarias de las plántulas de melón	204
Figura 4.54 Efecto de la exposición a la luz roja de intensidad moderada ($50 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) sobre el peso fresco (A) y la longitud (B) de las plántulas de guisante a los 4 días del tratamiento. Los datos representan la media $\pm$ SE de al menos diez mediciones. Letras diferentes indican diferencias significativas según el test de Tukey ($p \leq 0.05$).	205
Figura 4.55 Imagen que muestra el efecto de la luz roja de intensidad moderada ($50 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) sobre la germinación de semillas de guisante a 24 (A) y a 72 h (B) después del tratamiento.	206
Figura 4.56 Efecto de la exposición a la luz roja de intensidad elevada ($100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) sobre el peso fresco (A) y la longitud (B) de las plántulas de guisante a los 3 días del	

tratamiento. Los datos representan la media $\pm$ SE de al menos diez mediciones. Letras diferentes indican diferencias significativas según el test de Tukey ($p \leq 0,05$).	207
Figura 4.57 Imagen que muestra el efecto de la luz roja de intensidad elevada ($100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) sobre el crecimiento de plántulas de guisante a los 3 días del tratamiento.	208
Figura 4.58 Efecto de la luz roja de intensidad elevada ($100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) sobre el desarrollo de pelos radicales en guisante a los 3 días del tratamiento.	208
Figura 4.59 Efecto del tratamiento con luz roja de elevada intensidad ($100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) sobre el crecimiento de plantas de guisante en cultivos hidropónicos a las tres semanas del tratamiento. A: Plantas control. B: Plantas procedentes de semillas tratadas con luz roja durante 15 minutos.	209
Figura 4.60 Efecto del tratamiento con luz ultravioleta-B de baja intensidad ($8\text{W m}^{-2} \text{s}^{-1}$) sobre el crecimiento de raíces pilosas de zanahoria morada a las tres semanas del tratamiento. Las placas Petri conteniendo las raíces pilosas se trataron en el día 10 de cultivo durante 0 (A), 1(B), 10 (C) ó 45 min (D). En el día 17, parte de las placas tratadas se sometieron al mismo tratamiento de 1 (E), 10 (F) ó 45 min (G).	213
Figura 4.61 Efecto de la radiación ultravioleta-B (UV-B, $8\text{W m}^{-2} \text{s}^{-1}$) en el crecimiento y acumulación de antocianinas de raíces pilosas de zanahoria morada. Las placas Petri conteniendo las raíces pilosas se trataron en el día 10 de cultivo durante 0, 1, 10 ó 45 min. En el día 17, parte de las placas tratadas se sometieron al mismo tratamiento. El día 21, las raíces pilosas se muestrearon. (A): Peso fresco. (B): Materia seca. (C): Antocianinas por unidad de peso fresco. (D): Antocianinas por unidad de peso seco. (E) Rendimiento de antocianinas por muestra. Se presentan los valores medios de las réplicas biológicas $\pm$ el error estándar, $n = 4$. Las letras indican los subconjuntos generados a partir de las diferencias significativas entre los datos según el test de Duncan ($p \leq 0,05$).	214

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

λ	Longitud de Onda
A	Azul
ABRS	<i>Advanced Biological Research System</i>
ADVASC	<i>Advanced Astroculture</i>
ASC	<i>Astroculture</i>
B	Blanca
CAB-CSIC	Centro de Astrobiología- Consejo Superior de Investigaciones Científicas
CCD	<i>Charged Coupled Device</i>
CE	Columna Europeo
CEA	<i>Controlled Enviroment Agriculture</i>
CFB	Combinación de lámparas fluorescentes de luz blanca fría
DLR	Centro Aeroespacial Alemán
EEI	Estación Espacial Internacional
EMCS	<i>European Modular Cultivation System</i>
EMS	<i>Enviromental Measurement System</i>
ERO	Especies Reactivas del Oxígeno
F	Lámpara fluorescente
FL	Tubos Fluorescentes
G	<i>Green</i>
GMES	<i>Gas Measurement Enviroment System</i>
HACCP	<i>Hazard Analysis and Critical Control Points</i>
HMI	<i>Human Machine Interface</i>
HPS	<i>High Pressure Sodium</i>
IR	<i>Infrared</i>
IRC	Indice de Reproducción Cromática
ISS	<i>International Space Station</i>

JAXA	<i>Japan Aerospace Exploration Agency</i>
LED	<i>Light-Emitting Diode</i>
MIR	Estación Espacial Rusa
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
ORBITEC	<i>Orbital Technologies Corporation</i>
PAR	<i>Photosintetically Active Radiation</i>
PEU	<i>Plant Experiment Unit</i>
PGU	<i>Plant Growth Unit</i>
PYMES	Pequeñas y Medianas Empresas
R	Rojo
RL	Rojo Lejano
RP	Raíces Pilosas
SSL	<i>Solid State Lighting</i>
TI	<i>Texas Instrument</i>
UV	Ultravioleta
UV-A	Ultravioleta-A
UV-B	Ultravioleta–B
V	Verde
VSAP	Vapor de Sodio a Alta Presión
W	<i>White</i>
Y	<i>Yellow</i>

RESUMEN

Garantizar la producción de alimentos es el mayor desafío de las próximas décadas para alcanzar la sostenibilidad a escala global. El cambio climático, el aumento de la población, la reducción de recursos hídricos y el aumento de los costos de transporte, entre otros, suponen dificultades en la producción de cultivos que requieren de soluciones innovadoras. En este contexto, la agricultura de interior y la agricultura vertical suponen alternativas cada vez más populares. Además, la introducción y el desarrollo de iluminación basada en la tecnología LED está permitiendo una mayor eficiencia energética. Sin embargo, la variedad de cultivos crecidos en estos sistemas es escasa hasta el momento, y se deben investigar las condiciones ambientales (espectro e intensidad luminoso, temperatura, humedad, nutrientes, etc.) específicos para cada especie vegetal de interés.

En la presente Tesis, se presenta una cámara de experimentación basada en un sistema modular de bajo coste, constituido por diferentes unidades modulares, en las que cada una realiza una función específica. Una unidad está compuesta por un grupo de sensores para medir la temperatura, la humedad, la iluminación, la radiación fotosintéticamente activa (PAR) y la radiación ultravioleta-B (UV-B). Otra unidad, conocida como microcontrolador, es la encargada de procesar la información proveniente de los sensores en tiempo real y enviarla a un microcomputador, programado con código abierto para la automatización de la información para su procesado y envío a la nube. La información se muestra al usuario u operador del equipo en tiempo real a través de un interfaz gráfico conocido como HMI (*Human Machine Interface*). Otra unidad es la encargada de proporcionar el espectro de luz deseado a las muestras biológicas, y una última unidad es la encargada de controlar la temperatura y humedad en el interior de la cámara de experimentación a través de un sistema de climatización basado en celdas de Peltier. Para el sistema de iluminación se desarrollaron varios prototipos de luminarias con tecnología LED. Para el modelado y simulación de las diferentes luminarias patrón se seleccionaron chips LEDs para los espectros del UV-B, azul, verde, rojo y rojo lejano. Los parámetros físicos de estas luminarias se analizaron y ensayaron en la esfera de Ulbricht del

laboratorio del fabricante Cifra, para garantizar la funcionalidad y fiabilidad de las mismas. Mediante el sistema inteligente para la monitorización, el control y el registro de parámetros ambientales de la cámara de crecimiento, basado en el internet de las cosas, se ha conseguido la autonomía de la cámara. El propio sistema es capaz de ejecutarse mostrando al usuario la interfaz gráfica con la monitorización de las variables, registrando y sincronizándose automáticamente con los servicios en la nube seleccionados.

El prototipo fabricado se ensayó en muestras biológicas mediante dos implementaciones prácticas realizadas en el Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura (CEBAS-CSIC). En la primera se suministró radiación monocromática roja a semillas de guisante y melón, para conocer su efecto sobre la germinación, la longitud, el peso fresco, el peso seco, y la actividad de determinadas enzimas antioxidantes. Se observó que la luz roja favorecía el crecimiento de las plantas procedentes de semillas tratadas durante 15 minutos con una intensidad de $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de luz roja. En la segunda implementación práctica se suministró radiación UV-B a cultivos *in vitro* de raíces pilosas de zanahoria morada, para evaluar su incidencia en la acumulación de biomasa y antocianinas de las mismas. En este caso, se determinó que la luz UV-B favorecía la acumulación de antocianinas en hasta un 46% con respecto al control.

En conjunto, la presente Tesis Doctoral contribuyen al desarrollo de la agricultura basada en la iluminación LED, al proporcionar una cámara de crecimiento autónoma que controla de manera fiable las condiciones ambientales. El sistema ha demostrado su utilidad al estimular el crecimiento de dos especies de plantas (guisante y melón) y de material vegetal *in vitro* (raíces pilosas de zanahoria morada). Esto abre la posibilidad de su aplicación a otras especies en condiciones variables, para lo cual serán necesarias futuras investigaciones.

ABSTRACT

Ensuring a sufficient crop production is the main challenge of agriculture in the next decades worldwide. Climate change, increased population and reduction of water resources bring difficulties in crop production that demands innovative approaches. In this context, indoor and vertical agricultures are alternatives becoming more important. Moreover, the introduction and development of LED-based technology has led a higher energetic efficiency of the lighting technology. However, the variety of crops grown under these systems is scarce so far, and further investigations regarding the specific environmental conditions (light spectra and Intensity, temperatura, humidity, nutrients, etc.) for each plant species need to be conducted. This thesis presents an experimental growth chamber based on a low-cost modular system, made up of different modular units, in which each one performs a specific function. One of the units consists of a group of sensors to measure temperature, humidity, illumination, photosynthetically active radiation (PAR) and UV-B radiation. Another unit, known as a microcontroller, is in charge of processing the information from the sensors in real time and sending it to a microcomputer, which is programmed with open source for the automation of information for processing and sending it to the cloud. The information is displayed to the user or operator of the equipment in real time through a graphical interface known as HMI (Human Machine Interface). Another unit is in charge of providing the desired light spectrum to the biological samples, and a last unit is in charge of controlling the temperature and humidity inside the experimental chamber through an air conditioning system based on a Peltier cell. Several prototypes of luminaires with LED technology were developed for the lighting system. For the modeling and simulation of the different standard luminaires, LED chips were selected for UV-B, blue, green, red and far red spectra. The physical parameters of these lights were analyzed and tested in the Ulbrich area to ensure their functionality and viability (Cifra import, Murcia, Spain). On the other hand, the monitoring, control and recording of environmental parameters of the camera based on the Internet of Things has allowed the total autonomy of the system. The system itself is capable

of being executed by showing the user the graphical interface with the monitoring of the variables, registering and automatically synchronizing with the selected cloud services.

The manufactured prototype was tested in biological samples by conducting two practical implementations at CEBAS-CSIC. In the first one, monochromatic red light was applied to pea and melon seeds to determine its effect on germination, seedling length, fresh and dry weights, and the activity of some antioxidant enzymes. It was observed that red light increased growth of plants originated from seeds treated for 15 min at $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ red light intensity. In the second practical implementation, light radiation in the UV-B light spectrum was applied to *in vitro* hairy roots from black carrots to know its incidence in plant growth, fresh and dry weight and concentration of anthocyanins. As a result, UV-B was observed to increase anthocyanin accumulation up to 46% with respect to control hairy roots.

Overall, the present Doctoral Thesis contribute to the development of agriculture based on a LED lightning system, by providing an autonomous growth chamber that register the main environmental conditions. The system was proven useful to promote growth and development of two plant species (pea and melon) and *in vitro* plant material (black carrot hairy roots). This opens up the application of the growth chamber to other species and under varying environmental conditions, for which further research will be needed.

1. Capítulo I. Introducción

1.1. Naturaleza de la luz

Para definir el concepto de luz se utiliza la teoría “dualidad onda-partícula”, que se basa en la doble naturaleza de la luz. Dependiendo de cómo se observe se puede manifestar como partícula u onda, siendo dos estados que se complementan. A continuación, se detalla cada una de estas teorías (Del Río et al., 2017):

1.1.1. Teoría ondulatoria

Esta teoría explica cómo se propaga la luz mediante un comportamiento ondulatorio. Las ondas luminosas son radiaciones electromagnéticas capaces de excitar la retina del ojo humano.

Una onda electromagnética es el producto de un campo eléctrico y un campo magnético. Ambos son perpendiculares entre sí y además son perpendiculares a la dirección de propagación de la onda. Un campo magnético variable genera un campo eléctrico (Ley de Faraday) y un campo eléctrico variable genera un campo magnético (Ley de Ampère). Así es como se autopropaga la onda a través del espacio, generando campos magnéticos y eléctricos continuamente.

Los parámetros característicos de las ondas son los siguientes:

- Período (T): tiempo, medido en segundos (s) que tarda un punto cualquiera en realizar una oscilación.
- Amplitud (A): máxima distancia entre la posición de reposo y la onda.
- Frecuencia (f): inversa del período o cantidad de periodos por unidad de tiempo, medido en hertzios (Hz).
- Longitud de onda (λ): distancia lineal, medida en metros (m) entre dos valles consecutivos o dos picos.
- Velocidad de propagación (c): Se define como la distancia que recorre una onda en un tiempo determinado (m/s)

$$c = \lambda \cdot f = \lambda / T \quad (1)$$

λ : Longitud de onda

f: Frecuencia

T: Período

La cantidad de movimiento de una onda electromagnética y la energía están relacionadas por la expresión:

$$E = p \cdot c \quad (2)$$

p: impulso

c: velocidad de propagación

1.1.2. Teoría corpuscular

Esta teoría explica la interacción de la materia con la luz. La luz se define como un conjunto de partículas llamadas fotones, capaces de transportar todas las formas de radiación electromagnéticas.

Explica como la luz se propaga en todas direcciones en línea recta, y al chocar con los ojos produce una sensación luminosa debido a que los corpúsculos que la forman se mueven a gran velocidad.

También explica los fenómenos de la refracción y la reflexión. Los corpúsculos se reflejan ya que éstos chocan elásticamente contra la superficie de separación entre dos medios y se refractan, debido a que la luz cambia de velocidad en medios de distinta densidad.

La energía del fotón viene cuantificada por la siguiente fórmula:

$$E_{\text{fotón}} = h \cdot f = (h \cdot c) / \lambda \quad (3)$$

h = constante de Plank, $h=6.623 \cdot 10^{-34}$ J.s= $4.136 \cdot 10^{-15}$ eV.s

f= frecuencia en Hz

1.1.3. Dualidad onda-partícula:

Uniando las dos teorías anteriores se llega a la conclusión que la luz se comporta como una partícula y como onda. Cuando se comporta como una onda, la luz presenta difracción y interferencia, dispersando su energía continuamente en el espacio y en el tiempo. Cuando la luz se comporta como una partícula, le permite dispersarse, localizarse, intercambiar energía y obedece a las leyes del momento lineal en los choques y de conservación de la energía.

En resumen, la luz intercambia energía como una partícula y se propaga como una onda. Es por lo que se atribuye a toda partícula con impulso (p), una onda asociada y viceversa.

Igualando las ecuaciones anteriores y aislando λ se obtiene:

$$E = h \cdot f = (h \cdot c) / \lambda = p \cdot c \rightarrow \lambda = (h \cdot c) / (p \cdot c) = h / p \quad (4)$$

El hecho de que un fotón tenga longitud de onda (propiedad ondulatoria) pero también tenga masa y cantidad de movimiento (propiedades corpusculares), supone que en una colisión con otro fotón, predomine el comportamiento corpuscular, pero si un haz de fotones se difracta, predominará su comportamiento ondulatorio.

1.1.4. Espectro electromagnético:

Las radiaciones electromagnéticas se propagan en el vacío a la misma velocidad ($3 \cdot 10^8$ m/s) y son de la misma naturaleza. Las características que las diferencian son la longitud de onda y su frecuencia de emisión.

El espectro electromagnético (Figura 1.1) se clasifica en diferentes subgrupos según su frecuencia o longitud de onda, estos son los rayos cósmicos, rayos gamma, rayos X, radiación ultravioleta, luz visible, rayos infrarrojos, microondas, ondas de radio y otras radiaciones.

Figura 1.1 Espectro de radiación electromagnética (Moro, 2013)

En la investigación se ha trabajado en el espectro de luz comprendido entre el ultravioleta (UV-B) y el rojo lejano (RL) cercano al infrarrojo (Ir) (305 – 740 nm)

1.1.5. Espectro luminoso

El espectro luminoso puede ser discontinuo o continuo, según la variedad de longitudes de onda que emita una determinada fuente luminosa.

Un espectro continuo contiene una gama continua de longitudes de onda; esto se explica mediante el ejemplo del prisma que descompone la luz blanca en un abanico de colores, pasando de un color a otro sin interrupción.

Un espectro discontinuo es un tipo de radiación integrada por pequeños intervalos limitados de longitud de onda, llamados picos de emisión. Los colores y posiciones de las líneas en el espectro son característicos de los átomos del elemento químico del foco emisor.

1.1.6. El cuerpo negro:

El cuerpo negro es un sistema físico idealizado para el estudio de las radiaciones electromagnéticas.

El cuerpo negro absorbe toda la energía radiante incidente en él y tiene un rendimiento del 100% en absorción, nada se refleja. Además, éste emite radiación en función de la temperatura a la que está expuesto. Esta energía radiante o irradiancia se puede determinar mediante la fórmula de Stefan-Boltzmann:

$$E = \sigma \cdot T^4 = 5,6703 \cdot 10^{-8} (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}) \cdot T(\text{K})^4 \quad (5)$$

E: Potencia emisiva hemisférica total

σ : Constante de Stefan-Boltzmann

T: Temperatura efectiva

Otro de los parámetros del cuerpo negro es la longitud de onda en la cual se emite la mayor parte de la energía y viene determinada por la fórmula de Wien:

$$\lambda_{\text{max}} (\text{nm}) = (2.8978 \cdot 10^{-3}) / (T (\text{K})) \quad (6)$$

1.2. Propiedades de la luz

Cuando la luz incide sobre una superficie, dependiendo de las propiedades de la superficie del material, tiene lugar los fenómenos de refracción, reflexión y absorción.

1.2.1. Reflexión

La reflexión se produce cuando la luz incide sobre la superficie de manera que el rayo incidente se refleja parcial o totalmente, generando nuevas ondas que se alejan del cuerpo.

El índice de reflexión o reflectividad (R) da una idea del rendimiento reflectante de una superficie:

$$R = (\text{flujo reflejado}) / (\text{flujo incidente}) = \Phi_r / \Phi_i \quad (7)$$

Los tres tipos de reflexión son:

Especular, cuando el ángulo incidente de la luz y el de reflexión son iguales. Tiene lugar en superficies pulidas y brillantes

Difusa, cuando la luz se refleja en varias direcciones siendo el de mayor intensidad perpendicular a la superficie. Se da en superficies mate o con rugosidades.

Mixta, cuando la luz al incidir sobre la superficie se comporta como en los dos casos anteriores, presentando una componente direccional predominante y una pequeña difusión debido a algunas rugosidades de la superficie.

1.2.2. Refracción

Se denomina refracción al cambio de dirección del rayo incidente al pasar de un medio a otro, produciéndose una diferencia de velocidad del haz luminoso.

$$n = c/v \quad (8)$$

n = índice de refracción

c = velocidad de la luz en el vacío

v = velocidad en el medio

El ángulo de refracción y el incidente se relacionan mediante la siguiente fórmula:

$$n_1 \cdot \sin \theta_1 = n_2 \cdot \sin \theta_2 \quad (9)$$

1.2.3. Absorción

La absorción es la capacidad que tiene un material para absorber parcial o totalmente las radiaciones incidentes y convertirlas en otra forma de energía, normalmente en calor, lo que produce una disminución en el rendimiento de la luminaria.

$$A = (\text{flujo absorbido})/(\text{flujo incidente}) = \Phi_a/\Phi_i \quad (10)$$

A = índice de absorción

1.2.4. Transmisión

La transmisión se produce cuando la luz atraviesa una superficie. También se la conoce como doble refracción, debido a que al atravesar el material se modifica su trayectoria.

$$T = \frac{\text{flujo transmitido}}{\text{flujo incidente}} = \frac{\Phi_t}{\Phi_i} \quad (11)$$

T = índice de transmisión o transmisibilidad

Los tres tipos de transmisión son:

Regular, cuando el haz de luz no modifica su trayectoria al atravesar la superficie, manteniéndose constantes sus propiedades. Es típico en superficies transparentes.

Difusa, cuando el haz de luz se desvía al atravesar una superficie en direcciones diferentes. En este caso, la intensidad de salida de los haces o rayos es menor que la del haz o rayo incidente. Es típico en superficies transparentes con rugosidades o semitransparentes.

Mixta, cuando se produce una mezcla de la transmisión regular y la difusa, donde hay una componente direccional predominante y una pequeña difusión debido a algunas rugosidades de la superficie.

1.3. Iluminación

La luminotecnia es la ciencia que estudia los fenómenos luminosos artificiales, que incluyen la producción de la luz, su control y aplicaciones. La iluminación se clasifica desde el punto de vista arquitectónico e industrial en luz interior y exterior, enfocada a unos requerimientos según las exigencias de la zona a iluminar o del puesto de trabajo.

1.3.1. **Conceptos, magnitudes fotométricas y colorimétricas de las luminarias**

-Lámpara: dispositivo que transforma la energía química o eléctrica en energía lumínica.

- Luminaria: aparato de alumbrado que transforma las luces proporcionadas por una o varias lámparas, además comprende todas las piezas y dispositivos para la fijación, soporte y protección de las lámparas además de los medios de conexión a la red de alimentación.

- Lente: elemento óptico utilizado para controlar la geometría del flujo luminoso.

- Difusor: elemento óptico que se utiliza para esparcir o difuminar la luz que incide sobre él, siguiendo un patrón lambertiano.

-Reflector: elemento óptico que se utiliza para aprovechar al máximo la luz emitida por una fuente lumínica aprovechando las propiedades reflectivas de un material.

- Driver: dispositivo electrónico que adapta la tensión de alimentación proveniente de la red eléctrica a las necesidades de la fuente de luz LED.
- Vida útil: es el tiempo estimado de vida de la fuente de luz en condiciones óptimas.

1.3.2. Magnitudes fotométricas

Las magnitudes fotométricas se emplean para cuantificar la radiación que es sensible por el ojo humano.

Para medir estas magnitudes, así como la sensibilidad espectral relativa al sistema visual humano, se aplican normas de la Comisión Internacional de la Iluminación (CIE), en la que se adoptan dos curvas de sensibilidad espectral relativa $[V(\lambda)]$, una para niveles de iluminación bajos (condiciones escotópicas) y otra para niveles de iluminación altos (condiciones fotópicas). A continuación, se muestran estas dos curvas (Figura 1.2), que están relacionadas con el sistema fotoreceptor humano, el de los bastones y los conos que operan en condiciones escotópicas y fotópicas.

Figura 1.2 Curvas de sensibilidad $V'(\lambda)$ condiciones escotópicas y $V(\lambda)$ condiciones fotópicas

A continuación, se definen las magnitudes fotométricas esenciales.

Flujo luminoso (Φ): es la potencia luminosa emitida en todas direcciones por una fuente de luz durante una unidad de tiempo. La unidad de medida es el lumen (Lm).

El cálculo del flujo luminoso se determina a través de la suma ponderada de la potencia para cada longitud de onda del espectro visible emitida por la fuente de luz:

$$\Phi = K_m \cdot \int_{\lambda_{\text{visible}}} \Phi(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \quad (12)$$

$\Phi(\lambda)$ flujo radiante o cantidad de energía emitida por unidad de tiempo de un punto luminoso (W)

$V(\lambda)$ función de sensibilidad luminosa

K_m constante para condiciones fotópicas con valor 683 Lm.W^{-1}

K_m constante para condiciones escotópicas con valor 1699 Lm.W^{-1}

Intensidad luminosa (I): es el flujo luminoso que se emite en una dirección dada por unidad de tiempo. La unidad de medida son las candelas (cd). Esta dirección se mide mediante un ángulo sólido y la cantidad de luz contenida dentro de este ángulo es la intensidad luminosa

$$I = \frac{d\Phi}{dW} = K \cdot \int_{\lambda_{\text{visible}}} I(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \quad (13)$$

W ángulo sólido

Iluminancia (E): es el flujo luminoso que incide sobre una superficie. También se puede denominar como la iluminación que produce un lumen cuando incide sobre una superficie de 1 m^2 . Su unidad de medida es el Lux.

$$E = \frac{d\Phi}{dS} \quad (14)$$

La iluminancia de una fuente de luz que incide perpendicularmente sobre un plano es directamente proporcional a la intensidad luminosa e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre la fuente de luz y el plano (d), también conocida como la Ley de la inversa del cuadrado de la distancia.

$$E = \frac{I}{d^2} \quad (15)$$

Si la dirección de la luz forma un ángulo determinado con la superficie sobre la que incide, la iluminancia se calcula por medio de la ley del coseno multiplicando por el coseno del ángulo de incidencia. Además, se puede descomponer en iluminación vertical y horizontal:

$$E = I/d^2 \cdot \cos \alpha \quad (16)$$

$$E_h = \frac{I \cdot \cos^3 \alpha}{h^2} \quad (17)$$

$$E_v = \frac{I \cdot \cos^2 \alpha \cdot \sin \alpha}{h^2} \quad (18)$$

Eh: iluminación horizontal

Ev: iluminación vertical

H: distancia más corta del foco de luz al plano receptor

Luminancia (L) es la intensidad luminosa por unidad de superficie reflejada. En otras palabras, es la luz que se percibe indirectamente a través de la transmisión o reflexión de ésta en otros objetos u cuerpos en una dirección de observación determinada.

$$L_\beta = \frac{I_\beta}{S \cdot \cos \beta} \left[\frac{\text{cd}}{\text{m}^2} \right] \quad (19)$$

L_β : luminancia en una dirección dada

I_β : intensidad en una dirección dada

S: superficie

En superficies difusoras o emisoras no importa el ángulo desde el que se observa, ya que siempre se tiene la misma sensación de luminosidad, conocido como la ley de Lambert.

$$I_\beta = I_0 \cdot \cos \beta \quad (20)$$

Dónde I_0 es la intensidad en dirección normal al foco luminoso.

Índice de deslumbramiento unificado (UGR): es la disminución o pérdida de la capacidad visual debido al exceso de brillo o luminancia. El UGR es un parámetro para valorar el confort visual y controlarlo es importante ya que puede ocasionar daños en los ojos además de ser molesto. Es necesario mantenerlo entre niveles de 10 y el 30% como máximo.

Eficacia luminosa (Lm/W): es el rendimiento de la luminaria o lámpara. También se define como la relación entre el flujo luminoso y la potencia consumida. La eficacia luminosa de una luminaria LED depende de varios factores, como la temperatura de trabajo, la temperatura de color y la corriente aplicada.

$$\eta = \frac{\Phi(Lm)}{P(W)} \quad (21)$$

Eficiencia óptica (%): es la relación entre el flujo luminoso emitido por la luminaria y el flujo proporcionado por la fuente de luz.

$$\eta_{luminaria} = \frac{\Phi_{emitido\ luminaria}}{\Phi_{emitido\ lámpara}} \quad (22)$$

Se define la curva fotométrica como las representaciones gráficas en dos dimensiones de la distribución o forma de la luz emitida por la luminaria en el espacio. En estas curvas, lo que se representa es la distribución de la intensidad luminosa en función de las coordenadas polares, donde la intensidad es cero en el centro y máxima en el punto más alejado del centro. Los cálculos se realizan normalmente en laboratorios especializados y están referidos a un flujo de 1000 Lm, por lo que la intensidad real se calcula según la siguiente ecuación:

$$I_{real} = \Phi \cdot \frac{I_{gráfico}}{1000} \quad (23)$$

1.3.3. Magnitudes colorimétricas

Las magnitudes colorimétricas son las que tienen en cuenta la distribución espectral de la luz o el color. Si predominan longitudes de onda bajas del espectro visible se observará una luz azul. Si predominan longitudes de onda medias se observará una luz más amarillenta y, si predominan longitudes de onda largas se observará una luz más roja. Finalmente, una combinación de todas las longitudes de onda con una proporción similar forma una luz blanca.

A continuación, se describen algunas magnitudes colorimétricas:

Temperatura de color correlacionada (TTC): es el color de la luz que emite un cuerpo negro cuando se calienta a una determinada temperatura (°K). Sólo se aplica a la luz blanca y según su apariencia se clasifica en neutra, fría o cálida. Las lámparas con TTC por encima de los 4500 °K son fuentes de luz frías, si están por debajo de los 3200 °K son fuentes de luz cálidas y si se encuentran entre estos valores se considera fuente de luz neutra.

Índice de reproducción cromática (IRC): es la medida que indica si la fuente de luz reproduce fielmente los diferentes colores en comparación con la luz natural. En una escala del 1 al 100, cuanto mayor es el IRC mejor reproduce el color (Tabla 1.1).

Tabla 1.1 *Clasificación del IRC según su calidad*

IRC	Calidad
60	Pobre
60 – 80	Buena
80 – 90	Muy buena
90 – 100	Excelente

Diagrama de cromaticidad CIE: es un espacio de colores compuesto por los tres colores primarios (rojo, verde y azul), donde cada uno de ellos queda definido por una coordenada “x” e “y” (Figura 1.3) situados en los extremos y a partir de estos se crean todos

los demás y en el centro del diagrama se produce la unificación de colores hasta llegar al centro donde se encuentra la región del blanco.

Figura 1.3 Diagrama de cromaticidad (CIE, 1931)

1.4. Tecnología Solid State Lighting (SSL)

La tecnología Solid State Lighting (SSL) es un tipo de iluminación que emplea como fuente de iluminación diodos emisores de luz (LED), diodos emisores de luz orgánicos (OLED) y un nuevo tipo de diodo emisor de luz basado en polímeros (PLED), en oposición a otros sistemas que utilizan filamentos o gases.

El término sólido hace referencia a que la luz es emitida por un objeto sólido (un semiconductor). Hasta hace unos años, la luz era emitida tradicionalmente por un elemento en otro estado, como ocurría con las bombillas incandescentes, lámparas fluorescentes y lámparas de vapor de sodio.

La tecnología SSL que se utiliza en iluminación consigue reducir el calentamiento y aumenta la eficiencia energética.

1.4.1. LEDs empleados en el solid-state lighting

La tecnología SSL basada en LEDs es una tecnología emergente con potencial para superar con creces la eficiencia de la iluminación tradicional, basada en lámparas, donde la eficiencia energética es la principal motivación SSL. Los LEDs están previstos que brinden funcionalidades totalmente nuevas en los sistemas de iluminación, reemplazando a las lámparas tradicionales, como en luminarias, semáforos, señales, pantallas, etc.

Las prestaciones de los LED, en cuanto a la fiabilidad, el color, la visibilidad y la vida útil, están haciendo que se empleen de forma extensiva en la sociedad, como por ejemplo, en semáforos, automoción, señalización, monitores PC, teléfonos móviles, mantenimiento, en el hogar y en la agricultura.

La tecnología LED es conocida por una serie de ventajas en cuanto a su rendimiento, eficiencia energética, eficiencia óptica, menor peso y embalaje. La flexibilidad de los LED ha permitido que se empleen en aplicaciones donde las lámparas tradicionales no funcionarían (de Almeida et al., 2014).

El LED emite una luz de forma particular de color o longitud de onda dependiendo del material utilizado en la base del chip. En la Tabla 1.2 se muestran una serie de ventajas y desventajas de los LEDs.

Tabla 1.2 *Ventajas y desventajas de los LEDs.*

Ventajas	Desventajas
Alta eficiencia, bajo voltaje, bajo consumo de energía	Falta de estandarización
Robustez física	Dependencia de la temperatura (la temperatura ambiente influye en el rendimiento de los LED)
Pequeño peso y tamaño	Precio relativamente alto
Esperanza de vida útil prolongada de 25.000 hrs a 50.000 hrs	Contaminación azul (esto se aplica a los LED blancos fríos que pueden causar contaminación lumínica)

Ventajas	Desventajas
Encendido instantáneo	Necesidad de un tratamiento térmico para evitar la degradación durante su vida
Sin mercurio	
Alta eficacia luminosa	
Nuevas posibilidades de diseño de luminarias	
Sin radiación UV	
Tiempo de encendido / apagado rápido	
Control y rango de colores vivos	
Facilmente regulable	

1.4.2. Aplicaciones de la tecnología SSL

Inicialmente, el mercado estaba dominado por la señalización y la visualización de aplicaciones móviles, automotrices y de entretenimiento. En la última década se han abierto nuevas posibilidades en la iluminación decorativa, debido a la variedad de colores y capacidades de distribución especial, además del reducido coste en mantenimiento y posibilidades de diseño mejoradas. El uso de los LEDs se está volviendo más común en edificios para reemplazar tubos fluorescentes y lámparas de halogenuros, destacando el ahorro de energía con respecto a las lámparas mencionadas. Actualmente, los LEDs tienen una alta eficiencia, reduciendo el consumo de energía entorno a un 50% con respecto a las fuentes de luz convencionales.

Además de una alta eficiencia, los LEDs en un edificio pueden ofrecer lo siguiente:

- Menor calor irradiado.
- Reducción del calor residual, por lo que se consiguen ahorros energéticos en el aire acondicionado.

- Menores costes de mantenimiento.
- Posibilidades de diseño mejoradas.

El alumbrado público es uno de los sectores de aplicación de rápido crecimiento para la tecnología LED. Las ventajas que ofrece son las siguientes:

- Reducción de los costos de energía (aproximadamente un 50% en comparación con las lámparas VSAP (Lámparas de vapor de sodio a alta presión).
- Menor costo de mantenimiento, ya que pueden durar hasta 3 ó 6 veces más que las Lámparas VSAP.
- Tendencia de color mejorada, lo que lleva a una mayor visibilidad.
- Menor contaminación lumínica debido a la mayor dirección de salida de luz de los LED.

La estimación del ahorro en energía de la tecnología LED dependerá de la tecnología existente en la ciudad, comunidad, etc., y de si está equipada con Lámparas VSAP, vapor de mercurio o lámparas fluorescentes compactas.

1.5. Cámaras de experimentación vegetal: estado del arte, desarrollo y aplicaciones

En los últimos 40 años se ha realizado un esfuerzo constante de las Agencias Espaciales en desarrollar cámaras de crecimiento para el cultivo de plantas como parte del soporte vital para las misiones espaciales.

La primera cámara de crecimiento se realizó por la Unión Soviética para su estación *Salyut Space Stations*, una de las primeras estaciones espaciales tripuladas, que fue antecesora de la estación espacial Mir (Estación Espacial Soviética) y la EEI (Estación Espacial Internacional) es el laboratorio artificial más grande hasta ahora en la órbita de la Tierra. Se encuentra en funcionamiento desde el año 2000 y tiene un tiempo estimado de vida hasta el año 2024, sirviendo como banco de pruebas para futuras misiones de exploración espacial humana en el sistema solar.

La primera cámara, conocida como Oasis 1 (Harvey y Zakutnyaya, 2011), se instaló en la Salyut 1 en 1971 y el equipo de Soyuz 11 pasó 23 días a bordo de Salyut 1,

realizando varios experimentos en los que se cultivó puerro, cebolla y col china. Después de estos experimentos, se llevaron a cabo algunas mejoras para subsanar problemas técnicos y el programa Salyut continuó con Salyut 3, 5, 6 y 7 entre los años 1974-1987.

En la Oasis 1 se realizaron varios experimentos con puerro y cebolla mediante el empleo de lámparas fluorescentes que proporcionaban la iluminación necesaria. Posteriormente, se realizaron varias mejoras en la cámara para resolver problemas con el sistema de medición de agua y de suministro de nutrientes (Porterfield et al., 2003). En la Oasis 1M se cultivaron guisantes y cebollas. Los cosmonautas pudieron observar como las plantas de guisante murieron en tres semanas, pudiendo haber sido la causa la alta intensidad luminosa aplicada. Sin embargo, en las mismas condiciones, las cebollas crecieron hasta 20 cm de altura. En julio de 1975, las cebollas cultivadas se convirtieron en los primeros vegetales crecidos en el espacio consumidos por los humanos (Harvey y Zakutnyaya, 2011). Los elementos que se mejoraron en la Oasis 1A fueron el sistema de iluminación para realizar el mantenimiento, el sistema de riego para proporcionar una mayor aireación en la zona de la raíz, además de la ventilación e intercambio de gases (Halstead y Dutcher, 1984, Porterfield et al., 2003, Haeuplik-Meusburger et al., 2014).

Vazon fue otra cámara desarrollada por la Unión Soviética y enviada al espacio en 1973. A diferencia de la Oasis, no incorporaba iluminación propia, obteniendo la del sistema de iluminación de la nave espacial. Se diseñó para cultivar plantas bulbosas (Porterfield et al., 2003). Se empleó en la Salyut y en la estación espacial Mir para cultivar cebollas y plantas de tulipanes para aumentar el estado de ánimo de la tripulación. Los cosmonautas informaron que atender las plantas les ayudó a sobrellevar la depresión durante la misión. El primer florecimiento de plantas cultivadas en el espacio se produjo durante un experimento que duró 65 días en la cámara Svetoblok en la estación espacial Mir (Haeuplik-Meusburger et al., 2014, Musgrave y Kuang, 2003).

En 1980, se incorporó a las misiones Salyut 6 y 7 el sistema de crecimiento Phytón, compuesto por una lámpara muy potente, un filtro para extraer contaminantes del aire y un medio nutriente. Se realizaron diferentes experimentos con cebollas, pepinos, tomates, ajo,

zanahoria y plantas de Arabidopsis (Harland, 2004). Los cosmonautas observaron que las plantas cultivadas en el espacio florecieron cuatro días más tarde que las que se pusieron en el experimento control en la Tierra (Porterfield et al., 2003). Con el mismo sistema, en 1982, se realizó un experimento durante 69 días con plantas de Arabidopsis bajo iluminación continua (Tabla 1.3). Estas plantas desarrollaron flores y vainas que maduraron, dando lugar a semillas que después de recolectarlas en el espacio se enviaron, a la Tierra. Sólo el 42% de estas semillas germinaron y produjeron plantas normales (Harland, 2004, Salisbury, 1999).

La estación espacial Mir se diseñó en base a la experiencia adquirida con las estaciones Salyut, poniéndose en órbita el primer módulo en 1986. En ella se realizó una gran cantidad de experimentos científicos. El inicio del programa Shuttle-Mir sentó las bases para la construcción de la EEI entre Estados Unidos y Rusia en 1994.

Los rusos continuaron su esfuerzo de investigación de mejora del sistema de soporte vital bio-regenerativo en la estación espacial Mir con el invernadero espacial SVET. El 15 de junio 1990 se realizaron una serie de pruebas del sistema demostrando su funcionalidad (Ivanova et al., 1993, Ivanova et al., 1994).

La cámara SVET tenía un área de crecimiento de 0,1 m², iluminación, ventilación, sistema de suministro de aire, fuente de alimentación, suministro de agua y una unidad de control. El sistema de iluminación constaba de 12 pequeñas lámparas fluorescentes. Además, dentro de la cámara se utilizaron sensores para medir diferentes parámetros ambientales, incluyendo la temperatura del aire interior, del dosel de la planta, la duración de la iluminación y de la humedad. Fue el primer sistema automatizado que utilizó su propio microprocesador, capaz de recibir datos de sensores ambientales y controlar la ventilación. Disponía también de un compresor y un sistema de iluminación (Ivanova et al., 1993, Ivanova et al., 1994). En el verano de 1990 se llevó a cabo un experimento de 53 días con plantas de rábano y col china. En comparación con los experimentos en la Tierra, las plantas tenían una apariencia saludable pero las hojas tenían un color verde oscuro, una superficie rugosa y estaban atrofiadas (Ivanova et al., 1993).

En 1994 comenzó el programa Shuttle-Mir, entre Estados Unidos y Rusia, realizando varias misiones conjuntas con el transbordador espacial y la estación espacial Mir. La cámara SVET y sus sistemas se actualizaron. Uno de los nuevos equipos consistió en un sistema de monitorización de intercambio de gases (GEMS) y un sistema de medición ambiental (EMS) pasando la cámara a llamarse SVET-GEMS (Bingham et al., 1996). En el nuevo sistema EMS se sustituyeron los antiguos sensores, dotándolo de nuevos sensores para la medición de radiación, oxígeno y temperatura, y facilitando el envío de los datos recopilados diariamente a la Tierra. Este nuevo sistema mejoró la calidad y cantidad de los datos obtenidos. Debido a la complejidad del control y la cantidad de datos, otra de las mejoras consistió en la instalación de una computadora portátil IBM (Ward et al., 1970, Bingham et al., 1996, Ivanova et al., 1998, Monje et al., 2000). Entre 1995 y 1997, se realizaron varios experimentos con trigo (Ivanova, 2010). Durante el desarrollo de estos experimentos se produjeron varios fallos en el sistema, incluyendo los de las lámparas, los ventiladores y la unidad de control. Los experimentos se volvieron a realizar entre 1996 y 1997 una vez que todos los fallos fueron subsanados (Bingham et al., 2000, Salisbury et al., 2003). Los resultados fueron mejores de lo esperado, ya que el crecimiento y aspecto de las raíces fue mucho mejor, con las hojas con un color verde saludable.

En 1997 se mejoró el sistema de iluminación de la unidad de crecimiento de plantas (PGU) aumentando la intensidad luminosa de 50-75 a 220 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Porterfield et al., 2003, Kuang et al., 2000). Durante los experimentos se pudo conocer cómo afectaba una adecuada ventilación y enriquecimiento de CO_2 en condiciones de microgravedad sobre la producción normal de semillas (Musgrave et al., 1997b).

La cámara de crecimiento de plantas de la serie Astroculture (ASC) se diseñó para el programa Shuttle STS-89 entre los años 1992 y 1998 (Zhou et al., 2000). Se realizaron varias pruebas del sistema para probar el subsistema de suministro de nutrientes y agua (Morrow et al., 1993, Morrow et al., 1994). Se incorporó un subsistema de iluminación LED (Bula et al., 1994) y un subsistema de control de humedad y temperatura (Duffie et al., 1994, Duffie et al., 1995). Progresivamente, se incorporaron otros subsistemas para el

control del pH, los contaminantes atmosféricos, la composición de nutrientes y el CO₂ (Zabel et al.2016),

La primera cámara de crecimiento de plantas en la EEI fue la conocida como Astrocultura Avanzada (ADVASC). Esta cámara tenía el doble de tamaño que sus predecesoras y era capaz de proporcionar de forma autónoma las condiciones ambientales óptimas para el cultivo de plantas en microgravedad (Porterfield et al., 2003). La ADVASC constaba de 2 módulos, uno de ellos destinado al crecimiento de la planta y el otro destinado al control de parámetros como la temperatura, la humedad, la iluminación, el control atmosférico y el suministro de nutrientes fluidos (Zhou et al., 2002). Se realizaron varios experimentos con semillas de soja durante el año 2001 y 2002 para conocer si eran capaces de completar un ciclo de vida completo bajo condiciones de microgravedad y ver cómo afectaba a su genoma (Link et al., 2003). Después de 95 días, se completó un ciclo de vida. Se pudo verificar que las semillas resultantes eran saludables y presentaban una tasa de germinación comparable a las obtenidas en la agricultura terrestre (Zhou, 2005).

La cámara de crecimiento SVET-GEMS se reconvirtió en la denominada Lada en el año 2002 (Ivanova, 2002), estando compuesta por 4 módulos: un módulo empleado como tanque de agua, dos módulos de crecimiento y otro módulo utilizado para el control y visualización. El módulo de crecimiento se equipó con lámparas fluorescentes (Bingham et al., 2003) o LED (Bingham et al., 2002).

A partir de esta cámara Lada, se llevó a cabo la primera investigación de los efectos psicológicos de la interacción entre la tripulación y las plantas (Bingham et al., 2002). También se realizaron algunos estudios relativos al consumo de plantas cultivadas en el espacio (Bingham et al., 2003). De 2003 a 2005 se cultivaron plantas de guisante para investigar los parámetros morfológicos y genéticos en varias generaciones de plantas cultivadas en el espacio (Sychev et al., 2007). La Lada se utilizó para el análisis de peligros y plan de puntos críticos para las unidades de producción vegetal (HACCP) (Hummerick et al., 2011, Hummerick et al., 2010).

El Sistema Europeo de Cultivo Modular (EMCS) se instaló en la EEI en 2006 (Solheim, 2009). En 2008 el experimento se trasladó al módulo de Columna Europeo CE (Centro ERASMUS2016) el cuál simula la gravedad mediante dos rotores que aplican diferentes niveles de gravedad (0,001-2,0 g). El sistema proporcionaba un soporte vital simple, lámparas, sistema de cámara de vídeo y un depósito. (Brinckmann, 2005). El EMCS se utilizó para realizar diferentes experimentos europeos sobre crecimiento y de fisiología vegetal (Brinckmann, 2005). También fue utilizado por la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA) (Kamada et al., 2007)

La unidad de experimentos de plantas japonesas (PEU), instalada dentro del laboratorio Kibo de la EEI, constaba de un sistema de iluminación LED (rojo y azul), un sistema de riego automatizado, una cámara CCD (*Charge-Coupled Device*) y una cámara de crecimiento. El experimento que se realizó con esta cámara fue cultivar plantas de *Arabidopsis* en diferentes condiciones durante 62 días (Yano et al., 2013).

En el año 2009 se lanzó el Sistema de Investigación Biológica Avanzada (ABRS) (Levine et al., 2009) para su colocación en un casillero de la plataforma intermedia de la EEI. Esta cámara permitía realizar experimentos con plantas y microorganismos. La cámara estaba equipada con un módulo de luz LED que constaba de 303 LEDs, mayoritariamente de los espectros del rojo y el azul, pero también del blanco y del verde, cubriendo el rango de 470 a 660 nm del espectro visible. Además, contenía un panel de control ambiental para controlar la temperatura, la humedad y el nivel de CO₂. Además, disponía de módulos para filtrar compuestos orgánicos volátiles y para limpiar el aire entrante. Uno de los equipos estaba equipado con un sistema de detección de imágenes de la proteína verde fluorescente (GFP) (Levine et al., 2009). Uno de los experimentos realizados fue la investigación del sistema de expresión génica de plantas transgénicas de *Arabidopsis* (Paul et al., 2012, Paul et al., 2013b).

VEGGIE, el primer sistema diseñado para la producción de alimentos vegetales desarrollado por la NASA y ORBITEC (*Orbital Technologies Corporation*, Wisconsin, EE.UU.), se puso en marcha en el año 2014. Estaba compuesto por tres subsistemas

principales, el subsistema de iluminación, el tapete raíz y el recinto del fuelle (Morrow et al., 2005). El subsistema iluminación estaba compuesto por luces LED rojo, azul y verde, proporcionando una intensidad luminosa de más de $300 \mu\text{mol de m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Los cultivos producidos por el sistema VEGGIE se emplearon como alimento suplementario para la tripulación de la EEI. Una producción de lechuga completó su ciclo de crecimiento en 28 días y se comprobó que la carga microbiana del producto estaba dentro de los estándares establecidos por la NASA (Stutte et al., 2011). En agosto de 2015, se permitió que los astronautas de la NASA comieran sus vegetales cultivados en el espacio (Centro Espacial Kennedy de la NASA, 2015).

El sistema de iluminación para las cámaras de crecimiento de plantas se puede dividir en dos épocas, la previa a la tecnología LED y la era de la tecnología LED. Gracias a la aparición de nuevos materiales en la década de 1990, se avanzó en el desarrollo de la tecnología LED, y a principios del año 2000 había numerosos tipos de LED disponibles, que presentaban grandes ventajas con respecto a las lámparas fluorescentes y de sodio a alta presión, como mayor eficiencia, menor tamaño y un espectro de iluminación variable. En la Tabla 1.3 se resume las características principales de las cámaras de crecimiento usadas en misiones espaciales en las últimas décadas.

Tabla 1.3 Información detallada sobre las diferentes cámaras de crecimiento vegetal.

Modelos de Cámaras	Año	Ubicación	Tipo Lámpara	de	Condiciones de Luz ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Nº días Experi	Area de Crecimiento (m^2)	de	Observaciones	Referencia
Oasis 1	1971	Salyut 1	F		50 - 68	23	0,001		Puerro, cebolla, col china. Mejoras en la medición de agua y suministro de nutrientes	Harvey y Zakutnyaya, 2011 Porterfield et al., 2003
Oasis 1M	1974	Salyut 4	F		50 - 68	21	0,010		Guisantes y cebollas. Las cebollas fueron los primeros vegetales crecidos en el espacio y comidos por los humanos	Harvey y Zakutnyaya, 2011
Oasis 1A	1982	Salyut 7	F		170 - 350	----	0,010		Mejoras en el sistema de iluminación, sistema de riego, ventilación e intercambio de gases	Halstead y Dutcher, 1984, Porterfield et al., 2003, Haeuplik-Meusburger et al., 2014
Vazon	1973	Salyut 6, 7 / Mir	L.A.		----	----	----		Plantas bulbosas (cebollas, tulipanes). Mejora estado de ánimo de la tripulación	Porterfield et al., 2003
Svetoblok	1973	Salyut 7 / Mir	F		----	65	----		Primer florecimiento de plantas en el espacio	Haeuplik-Meusburger et al., 2014 Musgrave y Kuang, 2003

Modelos de Cámaras	Año	Ubicación	Tipo Lámpara	de	Condiciones de Luz ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Nº días Experim	Area de Crecimiento (m^2)	Observaciones	Referencia
Python	1982	Salyut 7	-		----	69	----	Arabidopsis, estas plantas desarrollaron flores y vainas que maduraron dando lugar a semillas	Harland, 2004 Salisbury, 1999
SVET	1990	Mir	F		216	53	0,100	Plantas de rábano y col china. Fue el primer sistema automatizado con microprocesador y sensores	Ivanova et al., 1993 Ivanova et al., 1994
SVET-GEMS	1995	Mir	F		500	-----	0,100	Incorporación de un sistema de monitorización de intercambio de gases (radiación, oxígeno y temperatura) Incorporación computadora portátil IBM Experimentos con trigo	Bingham et al., 1996 Ivanova et al., 1998 Monje et al., 2000 Ivanova, 2010
PGU	1982	STS	F		30 - 75	-----	0,050	Efectos de la ventilación y enriquecimiento de CO_2 en condiciones de microgravedad sobre la producción normal de semillas	Musgrave et al., 1997b
PGF	1997	STS	F		>220	-----	0,055	Aumento de la intensidad luminosa	Porterfield et al., 2003 Kuang et al., 2000

Modelos de Cámaras	Año	Ubicación	Tipo de Lámpara	de	Condiciones de Luz ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Nº días Experim	Area de Crecimiento (m^2)	Observaciones	Referencia
ASC	1992	STS	LED (R+A)		R: 0 – 450 A: 0 - 50	-----	0,021	Subsistemas suministro de nutrientes, control de humedad, temperatura, pH, CO ₂ , iluminación LED	Morrow et al., 1993 Morrow et al., 1994 Bula et al., 1994 Duffie et al., 1994 Duffie et al., 1995
ADVASC	2001	EEI	LED (R+A)		R: 0 -550 A: 0 - 70	95	0,052	Se completó un ciclo de vida de las semillas de soja. Tamaño 2 módulos uno para el crecimiento de la planta y otro para el control	Zhou, 2005 Zhou et al. 2002
Lada	2002	EEI	F		250	-----	0,050	Primer plan de análisis de peligros y puntos críticos de control, para las unidades de producción de hortalizas en el espacio. Compuesta por 4 módulos uno para el agua, 2 para crecimiento y otro para el control.	Ivanova, 2002 Bingham et al., 2002 Bingham et al., 2003
EMCS	2006	EEI	LED(IR+B)		-----	-----	0,077	Se realizaron diferentes experimentos europeos sobre crecimiento y fisiología vegetal	Brinckmann, 2005

Modelos de Cámaras	Año	Ubicación	Tipo de Lámpara	Condiciones de Luz ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Nº días Experim	Area de Crecimiento (m^2)	Observaciones	Referencia
PEU	2009	EEI	LED (R+A)	110	62	0,027	Plantas de Arabidopsis	Yano et al., 2013
ABRS	2009	EEI	LED (R+V+A+B)	300	-----	0,053	Investigación del sistema de expresión génica de plantas transgénicas de Arabidopsis. Sistema de imágenes de proteína fluorescente verde.	Levine et al., 2009 Paul et al., 2012 Paul et al., 2013b
VEGGIE	2014	EEI	LED (R+V+A)	>300	28	0,170	Primer sistema de crecimiento de plantas destinado a investigar la producción de alimentos en el espacio. Producción de lechuga como alimento suplementario para la tripulación	Stutte et al., 2011

F= Lámpara Fluorescente, L.A.= Luz Ambiental, LED= Light Emiting Diode, R= Rojo; V= Verde, A= Azul, B= Blanco, IR= Infrarojo

En 2019, el grupo de investigación de sistemas dinámicos y de control automático de la Universidad Técnica de Chemnitz en Alemania (Padmanabha et al., 2019) realizó una cámara de crecimiento de bajo coste para la producción combinada de plantas y larvas. Los autores determinaron que la combinación de ambas podría ser rentable para la construcción de granjas verticales por su comportamiento simbiótico entre ellos (por ejemplo, entre plantas y peces). Tales investigaciones suponen un avance en la exploración espacial y el diseño bioregenerativo de sistemas de soporte vital. Por su parte, el Centro Aeroespacial Alemán (DLR) ha demostrado que al combinar la producción de diferentes organismos se reduce el costo total de las granjas verticales (Padmanabha et al., 2019).

En la actualidad las políticas medioambientales, promovidas por la Unión Europea y la ONU contra el cambio climático, apoyan cambios en la agricultura que mitiguen el impacto mediante el empleo de las nuevas tecnologías que lleven a cabo una transición hacia modelos de agricultura más sostenibles. En el plan estratégico regional de Murcia RISMUR (Figura 1.4) se puede observar el peso que la industria agrícola tiene en nuestra región y la importancia de invertir en tecnologías que hagan a nuestra región más competitiva.

Figura 1.4 Impacto del sector agroalimentario en la Región de Murcia

En el plano internacional, empresas especializadas en el sector de la iluminación como Osram están invirtiendo en *Spin-Off* creadas por personal investigador que durante años han estado trabajando en programas espaciales de la NASA para el desarrollo de sistemas de iluminación empleados en diferentes cámaras de ensayos a bordo de las diferentes estaciones espaciales. Es el caso del sistema Phytofy desarrollado por la Universidad de Michigan en colaboración con el nuevo departamento *Urban & Digital Farming* de Osram en EE.UU. Al igual que las grandes empresas, investigadores de diferentes partes del mundo están viendo un amplio horizonte de investigación. En la revista *Life Sciences in Space Research* se publicó un artículo sobre la evolución tecnológica de los últimos 50 años de los sistemas de crecimiento vegetal en el espacio (Zabel et al., 2016) (Figura 1.5).

Figura 1.5 Evolución tecnológica de los últimos 50 años de los sistemas de crecimiento vegetal en el espacio (Zabel et al., 2016).

En la actualidad, el Centro de Astrobiología CAB-CSIC, asociado a la NASA, ha llevado a cabo diferentes ensayos con semillas de *Arabidopsis*, que han sido llevadas a la EEI e incubadas en la VEGGIE en unas condiciones de luz y atmosfera controlada, para estudiar diferentes comportamientos fisiológicos bajo la influencia de la gravedad. Dados los buenos resultados obtenidos en este tipo de cámaras de crecimiento, con los últimos avances en iluminación, la tecnología LED se ha incorporado rápidamente en la última década en este tipo de proyectos. Como el precio de los LED ha disminuido, ha habido un renovado interés en el uso de LEDs como herramientas para fotobiología (Folta y Childers, 2008). Con el aumento de la disponibilidad de fuentes de luz LED a precios asequibles, la gama de aplicaciones comerciales también se ha expandido. En este sentido, se han realizado instalaciones comerciales de producción de lechuga utilizando fuentes de luz LED en Japón (Wheeler, 2008), desarrollando luminarias para iluminación entre planta y planta (Massa et al., 2008), así como accesorios de iluminación adicionales (Bourget, 2008). Hay

una serie de cuestiones importantes asociadas con la fotobiología que necesitan ser consideradas con el uso del espectro estrecho LEDs en la producción de cultivos. A medida que el precio de las LEDs disminuye, y las longitudes de onda disponibles aumentan, hay una oportunidad creciente de incorporar LEDs en la práctica comercial hortícola. Para implementar eficientemente LEDs comerciales en las prácticas de producción hortícola, es necesario hacer coincidir las características espectrales particulares de la fuente de luz con la fotosíntesis y requisitos fotomorfogénicos de cada cosecha en cuestión, han destacado los logros en el empleo de LEDs en el campo de la horticultura (Bantis et al, 2018). Actualmente, se está extendiendo el uso de iluminación LED en el cultivo de plantas de interior en zonas urbanas, también conocido como “vertical farming” en sistemas automatizados capaces de controlar el crecimiento y las condiciones ambientales, haciendo un uso más eficiente en el consumo de agua, electricidad y eliminando el uso de plaguicidas y fitosanitarios, encaminado hacia una agricultura sostenible que mira al futuro y a los nuevos retos de abastecimiento de vegetales a nivel mundial que reduzca su huella de carbono y el impacto climático con respecto a los tradicionales sistemas de cultivo (Kozai, T., 2013).

Con el desarrollo de la cámara propuesta en esta Memoria Doctoral, se trató de acercar los sistemas que actualmente están empleando las Agencias Espaciales y grandes empresas del sector tecnológico a los Centros de Investigación, Universidades, PYMES tecnológicas y del sector agrícola (semilleros, cooperativas e industria) para que puedan llevar a cabo sus investigaciones y poder competir en otros mercados europeos e internacionales. Los sistemas que integran la cámara son escalables, por lo que es posible llevar a cabo desarrollos de mayores dimensiones para el cultivo de vegetales a gran escala en el centro de las ciudades, en el interior de almacenes, en contenedores marítimos, etc.

1.6. La luz LED y su influencia sobre la fisiología de las plantas

En los últimos años se están realizando investigaciones sobre la influencia de la luz LED sobre la fisiología de las plantas, en cámaras de crecimiento, invernadero, en sistemas

agrícolas verticales, en semilleros, además se están empleando en aplicaciones para mantener la calidad pos-cosecha de frutas y verduras.

1.6.1. Impacto de la iluminación LED en el desarrollo y la fisiología de plantas de interés agronómico

La luz natural impulsa la fotosíntesis y también controla muchas respuestas de desarrollo y fisiológicas a lo largo del ciclo de vida de una planta. Dichas respuestas incluyen la germinación de semillas, la apertura de gancho apical, el alargamiento de brotes, la arquitectura de las raíces, la expansión foliar, la síntesis de pigmentos fotosintéticos y fotoprotectores (clorofilas, carotenoides y antocianinas), la floración o la dirección del crecimiento (fototropismo) (citadas). La capacidad de la planta de responder a luz de intensidad y color determinados se debe a la activación de sus fotorreceptores por longitudes de onda específicas (Liu, 2012; Zhang y Folta, 2012), lo que permite responder fisiológicamente a las distintas condiciones ambientales (Chen et al., 2004). Las respuestas antes mencionadas se atribuyen principalmente a los efectos de la luz azules (A), roja (R) y roja lejana (RL), y a sus proporciones. En este sentido, cada especie vegetal puede reaccionar de manera distinta a una determinada composición espectral de la luz (Avercheva et al., 2009). En los últimos años se han revelado respuestas distintas a la luz verde (V) y / o a las proporciones azul / verde y rojo / verde. La luz verde puede estimular la fotosíntesis proporcionando ganancia de carbono, especialmente dentro de las cubiertas sombreadas (Bantis et al., 2018).

Debido a la importancia de la luz en el desarrollo de la planta, en los últimos años se ha desarrollado considerablemente la tecnología para el control de la iluminación en la producción de cultivos (Bourget, 2008). Concretamente, las importantes ventajas que presenta el uso de la iluminación LED (reducido tamaño, alta radiación con escasa emisión de calor, larga vida útil y control del rango de longitudes de onda) ha supuesto la implantación progresiva de dicha tecnología para el cultivo de plantas (Bourget, 2008; Massa et al., 2008; Dutta-Gupta, 2013)

1.6.2. Aplicación de iluminación LED en cámaras de crecimiento

La combinación de lámparas fluorescentes de luz blanca fría (LBF) con luz LED roja lejana (RL), causó una reducción en el contenido de antocianinas, carotenoides y clorofila en plantas de lechuga, al tiempo que mejoró el peso fresco y seco, la longitud del tallo y la longitud y el ancho de la hoja (Li y Kubota, 2009). Los autores también observaron que la luz R suplementada con LBF aumentó la concentración de clorofila, mientras que la combinación de CFB con LED azul(A) o ultravioleta (UV) aumentó la concentración de antocianinas, pero redujo la longitud del tallo. La lechuga de hoja roja cultivada bajo luz R suplementada con luz RL también resultó en una concentración de antocianina y potencial antioxidante más bajos, mientras que la luz R suplementada con luz A provocaba el resultado contrario (Stutte et al., 2009). Chen y sus colaboradores describieron que la luz B suplementada con LED monocromáticos con varios picos de emisión afectaba de manera diferente a la lechuga de hoja de roble verde (Chen et al., 2016). Específicamente, la luz RL suplementaria afectó negativamente el peso fresco de los brotes, la biomasa y el contenido de pigmentos, pero el aumento de la relación brote a raíz (S / R) y ácido ascórbico. La combinación con luces R y A condujo a un mayor peso fresco de los brotes, y a un mayor contenido en clorofila y carotenoides. La combinación con luces A y UV disminuyó el contenido de nitrato. Sin embargo, la combinación con luz amarilla (Y) aumentó esto último. Finalmente, los autores observaron que la combinación con luz verde (V) favoreció la acumulación de azúcares solubles, mientras que la combinación con luz Y la suprimió (Chen et al., 2016).

Diferentes trabajos han demostrado cómo la combinación de iluminación LED de diferentes colores pueden favorecer la calidad de los frutos, mediante una mayor acumulación de azúcares, tal y como se ha descrito en tomate (Li et al., 2017). En este sentido, la luz R aumentaba los contenidos de glucosa y fructosa, mientras que la combinación R + A favorecía la acumulación de almidón y de sacarosa (Li et al., 2017). Por otro lado, la combinación de diferentes LEDs también favoreció la acumulación de compuestos antioxidantes en microbrotes de mostaza, perejil o remolacha. Así, la

combinación de luz RL + R y diferentes intensidades de luz A aumentó la concentración de carotenoides, clorofila a y b y de α -tocoferol (Samuoliene et al., 2017).

1.6.3. Aplicación de la iluminación LED en invernaderos

La iluminación suplementaria en invernaderos se ha usado normalmente en viveros para aumentar la luz diaria integral percibida por las plantas, con el fin de mejorar la producción de plántulas y el crecimiento de las plantas. Para este propósito, ya se han utilizado varios tipos de fuentes de iluminación artificial, como bombillas de sodio (HPS), tubos fluorescentes (FL) y, más recientemente iluminación LED (Tinus, 1995; Bourget, 2008). El uso de LED durante el cultivo en invernadero tiene un gran potencial tanto desde el punto de vista comercial como de investigación. Se ha postulado el uso general de los LED como iluminación fotoperiódica, suplementaria o fotomorfogénica para numerosas especies de plantas (Morrow, 2008; Mitchell et al., 2012; Kozai et al., 2016). El parámetro más estudiado ha sido la intensidad de la luz, pero la composición espectral de la misma puede, del mismo modo, afectar sensiblemente al crecimiento y desarrollo de la planta. No se han publicado muchos estudios sobre la implementación de iluminación LED en invernaderos donde las plantas también están influenciadas por la luz natural. La combinación de luz natural con iluminación LED B o R aumentó el peso fresco de plantas de tomate (Lu et al., 2012). En otro estudio, se demostró que el uso de luz R+A (95%/5%) como luz intracanal, favorecía el crecimiento y el rendimiento de cosecha en tomate en comparación con el uso de solo luz natural (Gómez et al., 2013). Por otro lado, (Ouzounis et al., 2015a) describieron un efecto positivo de la luz natural suplementada con LED de luz A en los contenidos de clorofilas, carotenoides y compuestos fenólicos en lechuga de hoja verde y roja, en comparación con la luz natural con HPS.

1.6.4. Aplicación de la iluminación LED en sistemas agrícolas verticales

La agricultura vertical es un sistema CEA (agricultura de ambiente controlado) donde las lámparas eléctricas se usan únicamente para proporcionar luz a las plantas. La agricultura vertical se practica en interiores bajo condiciones controladas (luz, calefacción,

ventilación, aire acondicionado y aporte de CO₂) (Kozai et al., 2015; Gupta, 2017). Estos sistemas tienen varios beneficios en la producción de hortalizas frescas, como: (1) mayor productividad anual en comparación con la agricultura en campo, siendo independientemente de la temporada y las condiciones ambientales al aire libre; (2) una distancia reducida entre las áreas de producción y los sitios de consumo, lo que favorece un menor consumo de combustible, menos pérdidas y tiempo de transporte y, por lo tanto, potencialmente precios más bajos para los consumidores; y (3) el establecimiento cerca (e incluso dentro) de las ciudades en casi cualquier espacio vacío que pueda ofrecer oportunidades de trabajo a una amplia gama de personas, facilitando el procesamiento de los desechos (agua, productos, calor, CO₂) producidos, con la posibilidad de poder reutilizarlos (Kozai et al., 2015). En este sistema, la lechuga ha sido la especie vegetal más estudiada, y en la que se ha podido comprobar cómo el tratamiento con luz UV-A aumenta la producción de antocianos, y compuestos fenólicos totales, así como su capacidad antioxidante (Lee et al., 2014). Del mismo modo, se ha descrito que aumentando la proporción de luz R aumentaba el crecimiento y la tasa fotosintética, pero disminuyó el contenido de clorofila y de compuestos fenólicos en lechuga de hoja roja (Son et al., 2017).

1.6.5. Aplicación de la iluminación LED para mantener la calidad pos-cosecha de frutas y verduras

El potencial de almacenamiento para la mayoría de los productos hortícolas comprende desde días hasta algunas semanas. Las principales causas de la pérdida en pos-cosecha incluyen la pérdida de peso, la senescencia, la pérdida de firmeza, la maduración excesiva, el ablandamiento, la descomposición y los trastornos fisiológicos específicos (Bantis et al., 2018). El uso de iluminación LED durante el almacenamiento de productos vegetales podría ser una solución alternativa para reducir las pérdidas pos-cosecha y mantener la calidad del producto debido a sus ventajas de larga vida, pequeño tamaño y su baja emisión de calor que permite su uso en cámaras de refrigeración y

camiones frigoríficos con bajos requerimientos de carga de refrigeración. Además, los LED utilizados en el almacenamiento en frío son eficaces como bactericidas (Hasan et al., 2017).

El tomate es un vegetal que generalmente se cosecha antes de madurar y el proceso de maduración se lleva a cabo durante su almacenamiento y distribución. En este sentido, los tratamientos con iluminación LED se han aplicado tanto para adelantar la maduración como para retrasarla. Así, tomates expuestos a luz LED R o una combinación R+UV requirieron cinco días menos que las frutas no tratadas para alcanzar el mismo nivel de madurez. Además, la combinación R+UV también aumentó las concentraciones de licopeno, β -caroteno, flavonoides totales y compuestos fenólicos (Panjai et al., 2017). En contraste, la aplicación de luz A durante 7 días retrasó la acumulación de licopeno, la aparición del color rojo del fruto y la maduración (Panjai et al., 2017). Estos resultados indicaban que el tratamiento con luz A inhibía el proceso de maduración, siendo una forma potencial de extender el almacenamiento a largo plazo de los tomates después de la cosecha (Dhakal y Baek, 2014). Igualmente, el tratamiento con iluminación LED, de diferentes colores, también tenía un efecto en los contenidos de vitamina C en tomate y en lechuga fresca cortada (Ntagkas et al., 2016; Witkowska 2013).

1.6.6. La importancia de la luz durante la germinación y el uso de LEDs

La germinación es un proceso fisiológico complejo, fundamental en la vida de la planta y determinado por factores genéticos, endógenos y ambientales como la humedad, la temperatura y la luz (Jooseny et al., 2013; Rosental et al., 2014). La mayoría de los estudios se han centrado en las combinaciones de luz R y A debido a los picos de absorción de clorofila y la teoría generalizada de que la energía fuera de esas bandas no se utiliza por las plantas. Sin embargo, cada vez se está realizando más experimentos con luz A, V, R y UV ya que también se ha demostrado que afectan los procesos fisiológicos y metabólicos de las plantas (Bantis et al., 2018).

La inducción de la germinación mediante la luz está mediada exclusivamente por el fitocromo B y otros fitocromos que perciben la relación R/RL (Stutte, 2009), produciéndose

una estimulación máxima de la misma mediante un pulso monocromático de luz R (Bae y Choi, 2008). La naturaleza fotorreversible de la molécula de fitocromo le confiere una función de 'interruptor', en la que a forma inactiva que absorbe luz R se convierte en su forma activa, que a su vez puede pasar a su forma inactiva mediante luz RL (Devlin, 2016). Este fenómeno se ha demostrado en diversas especies como *Arabidopsis*, *Paulownia* y lechuga (Mancinelli y Borthwick, 1964; Grubišić y Konjević, 1990; Lymperopoulos et al., 2008).

Por otra parte, está descrito el efecto de la luz R en la germinación de semillas que exhiben fotodormancia, tales como las de ciertas variedades de lechuga, *Lepidium sativum* y *Arabidopsis* (Ibarra et al., 2013; Neff et al., 2009). La cantidad de clorofila que cubre el embrión en la semilla se relaciona con la presencia de fotodormancia; en general, altos niveles de clorofila acumulados en los tejidos maternos durante la maduración de la semilla conllevan la necesidad de luz para llevar a cabo la germinación, mientras que las semillas con bajos niveles de clorofila no precisarán de dicha luz (Cresswell y Grime, 1983). Sin embargo, hay excepciones como el guisante o la judía, que son capaces de germinar en oscuridad (Salisbury y Ross, 1992).

La investigación del efecto que la iluminación LED tiene sobre la germinación es, hasta la fecha, escasa. En un estudio con nueve especies aromáticas de los géneros *Artemisia*, *Atriplex*, *Chenopodium*, *Salicornia*, *Sanguisorba*, *Portulaca* y *Rosmarinus*, la iluminación LED proporcionó superiores de germinación y crecimiento temprano de las plántulas que la iluminación con luz fluorescente (Sanouba et al., 2018). En ornamentales (petunia, zinia, verbena y balsamina), la luz LED de combinación 75% R: 25%A proporcionó una mayor calidad de las plántulas, mientras que la luz R monocromática resultó en una mayor tasa de germinación (Behnaz et al., 2016). En este sentido, y puesto que cada especie vegetal puede reaccionar de manera distinta a una determinada composición espectral de la luz (Avercheva et al., 2009), parte de los esfuerzos deben centrarse en encontrar la mejor combinación de espectro/intensidad/fotoperiodo para cada especie de importancia agronómica.

Por lo tanto, la tecnología LED puede favorecer muy positivamente la producción de plántulas a gran escala, así como en cámaras de crecimiento, invernaderos y en sistemas de agricultura vertical, ya que reduce significativamente el consumo de electricidad al tiempo que producen material vegetal de alta calidad. Esta situación es aún más importante en un contexto de cambio climático en el que la creciente escasez de recursos hídricos y de terreno cultivable requiere de alternativas y mejoras en la producción.

1.6.7. Raíces pilosas: una herramienta biotecnológica para la producción de metabolitos secundarios

La gran diversidad de compuestos bioactivos producidos por las plantas incluye terpenos, flavonoides, antocianinas, alcaloides, saponinas, entre otros, siendo componentes cotizados de medicamentos, cosméticos, tintes y de la industria alimentaria. La mayoría de estos compuestos se producen a partir del metabolismo secundario, siendo no esenciales para la función celular y, por tanto, acumulados en bajas concentraciones (Tiwari et al., 2015). La obtención de los mismos de plantas cultivadas puede requerir de meses a años, en función de la especie. Además, los niveles en la planta pueden fluctuar con el estado fisiológico, patógenos o factores ambientales, lo que sumado a los costes de extracción pueden hacer el proceso inviable económicamente. En este contexto, el cultivo *in vitro* se presenta como una alternativa en auge para la producción de metabolitos secundarios (Smetanska 2008).

Una de las estrategias de producción *in vitro* más importantes es el cultivo de raíces pilosas (RP), provenientes de la transformación de una planta mediante *Rhizobacterium rhizogenes* (antes *Agrobacterium rhizogenes*) (Giri y Narasu, 2000; Bourgaud et al., 2001). La transformación lleva a la emergencia de dichas raíces pilosas en el sitio de infección, que pueden ser aisladas para su cultivo axénico. Las características más relevantes de las RP son: (1) un crecimiento ilimitado en medio de cultivo libre de reguladores del crecimiento; (2) estabilidad genotípica; (3) crecimiento profuso sin gravitropismo; y (4) composición de metabolitos secundarios similar al de la planta original. Además, el uso de cepas silvestres

de *R. rhizogenes* no modificadas genéticamente suponen que el material vegetal resultante de la transformación no sea considerado modificado genéticamente de acuerdo a la legislación vigente (Unión Europea, 2001). Hasta la fecha, se ha obtenido cultivos *in vitro* de raíces pilosas de más de 150 especies pertenecientes a 41 familias (Li et al., 2015; Tian, 2015). Entre ellos, existen numerosos ejemplos de alta producción de metabolitos secundarios en comparación con la planta original. Por ejemplo, la producción de resveratrol aumentó 100 veces en RP de *Vitis amurens* (Kiselev et al., 2007), la de jaceosidina 37 veces en RP de *Saussurea medusa* (Li et al., 2015) y los isoflavonoides se incrementaron 4,5 veces en RP de *Psoralea corylifolia* (Shinde et al., 2009).

Recientemente, se obtuvo por primera vez RP de zanahoria morada, con capacidad de acumular antocianinas a elevada concentración (Barba-Espín et al., 2020) (Figura 1.6)

Figura 1.6 Raíces de zanahoria morada (i) y cultivo de raíces pilosas de la misma (d) crecido en medio sólido (Barba-Espín et al. 2020).

El interés comercial de las antocianinas radica en su uso como colorante natural (etiquetado como E163 en la UE), con potencial para el reemplazo progresivo de determinados colorantes sintéticos (Carocho et al., 2014; Khoo et al. 2017). Además, su gran capacidad antioxidante se ha asociado con prevención de enfermedades cardiovasculares, diabetes, cáncer y enfermedades neuronales, entre otras (Andersen et al., 2005; Khoo et al., 2017). Hasta la fecha, la producción de colorantes basados en

antocianinas proviene de en su mayoría de cultivos de uva, col roja y zanahoria morada (Khoo et al., 2017). Sin embargo, sistemas de producción alternativos que proporcionen elevado rendimiento independientemente de variaciones estacionales o climáticas son deseables para la industria. En este contexto, el uso de RP de zanahoria morada se plantea como una alternativa potencial.

Las antocianinas son pigmentos hidrosolubles de la familia de los flavonoides responsables de los colores azules, rojos y morados de las flores, frutos y hojas de plantas superiores (Timberlake & Bridle, 1975; Winefield et al., 2009). Se forman mediante la glicosilación de una antocianidina (Figura 1.7), lo que constituye la estructura básica y aporta el color en función del número y orientación de los grupos hidroxilo y metoxilo presentes. Se ha descrito 27 antocianidinas distintas (Wallace & Giusti, 2015), que por conjugación y acilación dan lugar a las más de 700 antocianinas conocidas (Zhang et al., 2019) (Seitz & Hinderer, 1988, Khoo et al., 2017). Además, el tipo de sustitución glicosídica y de acilación modifican el tono de las antocianinas (Stintzing et al., 2002). En la zanahoria morada, las cinco antocianinas más abundantes se basan en la cianidina (Algarra et al., 2014) (Figura 1.5), y más de la mitad se encuentran aciladas, lo que aumenta su estabilidad físico-química (Barba-Espín et al., 2017).

Figura 1.7 Estructura básica de las antocianidinas (i) y la cianidina (d) (Adaptada de Khoo et al., 2017).

Las antocianinas actúan como compuestos antioxidantes, eliminando especies reactivas del oxígeno (ERO) y participando en la respuesta a estrés (Huda-Faujan et al.,

2009). En este sentido, la biosíntesis de antocianinas, y de compuestos fenólicos en general, se incrementa en condiciones de estrés como daño físico, infección por patógenos y radiación ultravioleta-B (UV-B), entre otros (Horvath et al., 1994; Reyes et al., 2003). La función fotoprotectora de los compuestos fenólicos la llevan a cabo mediante su acumulación en las células epidérmicas de hojas y tallos, absorbiendo de esta forma la luz UV-B incidente. De entre los compuestos fenólicos, son las antocianinas los que más contribuyen al efecto pantalla contra la radiación UV-B (Jenkins et al., 2014).

Además de su papel como agente estresante, la radiación UV-B tiene importantes funciones reguladoras en plantas, asociadas a dosis moderadas de la misma (Jansen, 2002; Jenkins, 2009; Jordan, 1996). En RP de *Cataranthus roseus*, dosis de 5 kJ de radiación UV-B, incrementaron los alcaloides indol-terpenoides (Binder et al., 2009). El contenido en rutina aumentó 5 veces en RP de *Fagopyrum tataricum* expuestas a 25 kJ de radiación UV-B (Huan et al., 2016). Así mismo, en plantas de zanahoria morada, la exposición a dosis moderadas de UV-B (21,6 kJ/día) incremento un 10% la concentración de antocianinas y compuestos fenólicos totales de la raíz (Barba-Espin et al., 2019). Sin embargo, hasta la fecha, no se ha investigado el efecto de la radiación UV-B en la biosíntesis de antocianinas en cultivos de RP.

1.7. Internet de las cosas (IoT)

Internet de las cosas, también conocido por su nombre original en inglés (Internet of Things, IoT), es un término que fue propuesto por primera vez en 1999 por Kevin Ashton del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), inicialmente empleado en investigaciones de identificación por radiofrecuencia (RFID) y tecnologías de sensores inteligentes.

La European Research Cluster for the Internet of Things (IERC) junto con el ITU Telecommunication Standardization Sector (UIT-T) definen el IoT como una infraestructura mundial para la sociedad de la información que propicia la prestación de servicios avanzados mediante la interconexión de objetos (físicos y virtuales) gracias a la interoperabilidad de tecnologías de la información y la comunicación presentes y futuras.

Actualmente, el IoT está compuesto por una colección dispersa de redes diferentes y con distintos fines. Se considera la tercera revolución en internet después de la WWW (años 1990) e internet móvil (años 2000).

La IoT se refiere a la interconexión en red de todos los objetos cotidianos, que a menudo están equipados con algún tipo de inteligencia, para su monitoreo o control desde cualquier lugar, de esta manera las cosas o dispositivos estarán conectadas e intercambiando datos sin intervención humana.

Estos sensores y dispositivos electrónicos se agregan a cualquier otro objeto sobre el que se quiere obtener información, control o monitoreo, convirtiéndolo en parte del ecosistema de internet de las cosas.

El verdadero valor de IoT y sus beneficios para las personas, empresas y sociedad es poder reunir un volumen de datos provenientes de los sensores de los objetos conectados y analizarlos (Nguyen et al. 2016).

En 2010, el número de objetos físicos cotidianos y dispositivos conectados a internet fue de alrededor de 12,5 mil millones. En la actualidad hay cerca de 25 mil millones de dispositivos conectados a la IoT. Se espera que el número de dispositivos inteligentes conectados a la IoT será más de 50 mil millones en 2020.

El IoT puede ser visto como una combinación de sensores y actuadores que son capaces de proporcionar y recibir información digitalizada y colocarla en redes bidireccionales capaces de transmitir todos los datos para ser utilizados por una gran cantidad de diferentes usuarios y servicios finales (Charith Perera et. al. 2014).

Múltiples sensores se pueden unir a un objeto o dispositivo para medir una amplia gama de variables físicas o fenómenos y luego transmitir todos los datos a la nube.

La arquitectura de sistemas de IoT se puede dividir en cuatro capas: capa de detección de objetos (sensores, obtención de datos), la capa de intercambio de datos (para la transmisión de datos a través de redes de comunicación), capa de integración de la información (para procesamiento de la información), y la capa de servicios de aplicaciones (para dar servicios de contenido a los usuarios) (Ma HD. 2011)

Los sensores son uno de los pilares constructivos del IoT. Como sistemas ubicuos pueden implementarse en todas partes y tomar medidas sin la intervención humana.

Los chips de silicio miniaturizados son diseñados con nuevas capacidades en factores de forma cada vez más pequeños y con mejor rendimiento en procesado y eficiencia.

La comunicación entre máquinas es considerada de alta prioridad para la IoT. Prioridades adicionales son la potencia de procesado, la integración de memoria, y la capacidad de resistir a entornos severos. Un factor clave para el desarrollo de la IoT será el desarrollo de núcleos de microcontroladores y procesadores de ultra bajo consumo de energía diseñados para dispositivos móviles de la IoT. Estos dispositivos deberán tener alguna forma de almacenamiento no volátil EEPROM regrabable eléctricamente. Esta memoria es la preferida para lograr un alto rendimiento durante la fase de producción y al mismo tiempo servir como memoria de usuario, pudiendo almacenar datos del sensor y ser programada.

La computación en la nube es un modelo para el acceso bajo demanda a un conjunto compartido de recursos configurables (unidades de almacenamiento, aplicaciones, servicios, software, redes, servidores y ordenadores). Uno de los resultados más importantes del IoT es la enorme cantidad de datos generados a partir de dispositivos conectados a internet (Gubbi, J. et al., 2013).

Muchas aplicaciones IoT requieren de almacenamiento masivo de datos y de una gran velocidad de procesamiento que permita tomar decisiones en tiempo real. La computación en la nube es la solución ideal cuando se manejan grandes cantidades de flujos de datos para su procesado y que provienen de un número elevado de dispositivos conectados al IoT.

Los protocolos de comunicación estarán diseñados para arquitecturas orientadas a plataformas web de la IoT.

Los dispositivos IoT son muy diversos y miden diferentes parámetros y con diferentes convenciones y unidades de medida. Por lo que es probable que los estándares

de código abierto sean una de las formas de obtener estos datos para interoperar. Los estándares abiertos son la herramienta clave para el éxito de las tecnologías de comunicación y para cualquier tipo de comunicación de máquina a máquina.

1.7.1. Modelos de Arduino y Raspberry Pi y similares

Se pueden encontrar en el mercado una gran variedad de placas Arduino y de Raspberry Pi. La gran mayoría están basadas en los microcontroladores ATmega328P o ATmega2560. En la Tabla 1.4 se han recopilado las características de ciertos modelos significativos de Arduino y en la Tabla 1.5 se muestran las especificaciones de los últimos modelos de Raspberry Pi.

Tabla 1.4 Modelos de Arduino y similares

Características	ARDUINO UNO	ARDUINO NANO	ARDUINO MEGA	NODEMCU
Microcontrolador	ATmega328P	ATmega328P	ATmega328P	Chip SoC ESP8266
Wifi integrado	No	No	No	Si
Velocidad de reloj	16 MHz	16 MHz	16 MHz	80 – 160 MHz
Servidor web	No	No	No	Si
Pines de E/S digital	14	14	54	16
Salidas PWM	6	6	15	16
Entradas analógicas	6	6	16	1
Memoria flash	32 kB	32 kB	256 kB	128 kB
Memoria SRAM	2 kB	2 kB	8 kB	
Memoria EEPROM	1 kB	1 kB	4 kB	4 MB
Conexión	USB	Mini USB	USB	USB
Conector				
Alimentación extra	7 – 12 V	No dispone	7 – 12 V	3,3 – 3,6 V
Precio Unidad	4 €	2 €	8 €	3 €

Tabla 1.5 Características de los últimos modelos de Raspberry Pi

Características	Raspberry Pi Zero W	Raspberry Pi 3 B+	Raspberry Pi 4 B
CPU	ARM1176JZF-S	ARM CORTEX-A53	ARM CORTEX-A72
Instrucciones	ARMv6 32bits	ARMv8 64bits	ARMv8 64bits

Características	Raspberry Zero W	Pi	Raspberry Pi 3 B+	Raspberry Pi 4 B
Cores	Single-core		Quad-core	Quad-core
Velocidad	1000 MHz		1400 MHz	1500 MHz
RAM	512 MB		1 GB (1024 MB)	1 GB, 2 GB, 4 GB
Almacenamiento	MicroSD slot		MicroSD slot	MicroSD slot
GPU	250 MHz Broadcom VideoCore IV		400 MHz Broadcom VideoCore IV	500 MHz Broadcom VideoCore VI
Conexiones	MiniHDMI 1 x micro USB2.0 40 pines E/S GPIO Conector camera Wi-Fi Bluetooth	MIPI	1 x HDMI 4 x USB 2.0 40 pines E/S GPIO Conector cámara MIPI display DSI MIPI Video compuesto (PAL y NTSC) vía 3.5 mm TRRS jack compartido con audio estéreo	2 x micro HDMI 2 x USB 3.0 2 x USB 2.0 40 pines E/S GPIO Conector MIPI camera MIPI display DSI Video compuesto (PAL y NTSC) vía 3.5 mm TRRS jack compartido con audio estéreo
Wi-Fi	Sí		Si (2.4GHz / 5GHz)	Si (2.4GHz / 5GHz)
Bluetooth	Sí		Si (4.2)	Si (5.0)
Ethernet	No		10/100/300 MBps	10/100/1000 Gigabit
Tamaño	6,5 x 3 cm (9 grs)		8,6 x 5,7 cm (45 g)	8,6 x 5,7 cm (45 g)
Alimentación	5V a 2A microUSB		5V a 3A microUSB	5V a 3ª USB-C

2. Capítulo II. Objetivos

Objetivos

Los objetivos de la presente Tesis Doctoral se centraron inicialmente en seleccionar el tipo de LED y espectros para la realización de ensayos y de ahorro energético. Para ello se empleó un software técnico profesional para la realización de cálculos luminotécnicos. Después se fabricó el prototipo de cámara experimental de espectro modulable (CEEM) y posteriormente se llevó a cabo la evaluación técnica y validación práctica mediante el desarrollo de varios ensayos a nivel fisiológico con semillas de melón y de guisante y con raíces pilosas de zanahoria morada en condiciones *in vitro*.

Para desarrollar la cámara se realizaron inicialmente unos diseños y modelos a escala mediante Relux, un software técnico de cálculo y simulación electrónica (Relux Informatik AG, Münchenstein, Switzerland). A partir de unas dimensiones físicas y de unas fotometrías de LEDs se pudo obtener valores fotométricos sobre su superficie. Seguidamente se fabricó un modelo a escala de la cámara y se fabricaron varios prototipos de luminarias. Se instalaron varios sensores en su interior para la adquisición de las variables de temperatura, humedad e iluminación del interior para su procesamiento y almacenamiento en la nube en tiempo real y se desarrolló un sistema de control mediante interfaz hombre-máquina. Además, se conectó la CEEM al Internet de las cosas (IoT) mediante un sistema de control basado en una arquitectura de computación conocido como *Fog Computing*. Y finalmente se estudió la validación del efecto de la calidad espectral sobre la germinación de semillas, en el desarrollo vegetal, en el crecimiento *in vitro* de raíces pilosas y en el metabolismo antioxidante de las plantas.

3. Capítulo III. Materiales y Métodos

3.1. Componentes hardware

3.1.1. Iluminación LED

Para el desarrollo de los diferentes prototipos de luminarias se emplearon LEDs, que son dispositivos semiconductores de estado sólido (SSL), duraderos y de larga vida que proporcionan emisiones espectrales de banda estrecha. La luz de un LED se genera dentro de la unión p-n de un diodo simple, que está hecho de dos aleaciones distintas con diferentes energías potenciales. A medida que la corriente eléctrica pasa de una aleación a otra de menor energía potencial, se liberan fotones. Esta diferencia de potencial, conocida como la brecha de energía, determina la longitud de onda de los fotones producidos. La composición de los diferentes materiales cambia la brecha de energía y, por lo tanto, cambia el color de la luz que se genera.

Para el desarrollo de los diferentes prototipos de luminaria se emplearon los LEDs de la familia OSOLON SSL (OSRAM, Munich, Alemania), considerados LEDs de alta potencia y para el espectro UV-B se emplearon los chips HP310SMD del fabricante UVphotonics (UVphotonics, Berlin, Alemania).

3.1.1.1. LED rojo con espectro comprendido entre 646-666 nm

El LED rojo (R) está montado sobre una superficie cerámica con unas dimensiones de 3 mm x 3 mm y una óptica de 120° con un diámetro de 2,15 mm (Figura 3.1). Los parámetros eléctricos de alimentación óptima para una temperatura de 25°C se encuentran comprendidos entre 1,80 – 2,60 Voltios y una intensidad de 350 mA (Tabla 3.1).

Figura 3.1 A) Apariencia física del chip LED rojo y B) Dimensiones del chip montado sobre una superficie cerámica. (OSRAM, Munich, Alemania).

Tabla 3.1 Parámetros luminotécnicos y eléctricos del LED rojo

Parámetros	Unidad SI	LED ROJO (OSLON SSL HYPER RED)		
		Mín.	Typ.	Máx.
λ	nm	646	657	666
λ_{pico}	nm		660	
Voltaje	V	1,80	2,15	2,60
Intensidad	mA		350	
Temperatura	°C		25	
Óptica	°		120	

El LED R seleccionado emite un haz de luz en el espectro comprendido entre los 646 y los 666nm, con un pico máximo de intensidad en los 660 nm como se puede ver en la Figura 3.2, obtenida de la hoja de características del fabricante del chip en la que se muestra la curva fotométrica (Nozue et al., 2011).

Figura 3.2 Curva espectral del LED rojo, (OSRAM, Munich, Alemania)

3.1.1.2. LED Rojo lejano con espectro comprendido entre 710-740 nm

El LED rojo lejano (RL) está montado sobre una superficie cerámica con unas dimensiones de 3 mm x 3 mm y una óptica de 120° con un diámetro de 2,15 mm (Figura 3.3). Los parámetros eléctricos de alimentación óptima para una temperatura de 25 °C se encuentran comprendidos entre 1,60 – 2,30 Voltios y una intensidad de 350 mA (Tabla 3.2).

Figura 3.3 A) Apariencia física del chip LED rojo lejano y B) Dimensiones del chip montado sobre una superficie cerámica, (OSRAM, Munich, Alemania)

Tabla 3.2 Parámetros luminotécnicos y eléctricos del LED rojo lejano

Parámetros	Unidad SI	LED ROJO LEJANO (OSLON SSL FAR RED)		
		Mín.	Typ.	Máx.
λ	nm	710	727	740
λ_{pico}	nm		730	
Voltaje	V	1,60	1,95	2,30
Intensidad	mA		350	
Temperatura	°C		25	
Óptica	°		120	

El LED RL seleccionado emite un haz de luz en el espectro comprendido entre los 710 nm y los 740 nm con un pico máximo de intensidad en los 730 nm como se puede ver en la Figura 3.4, obtenida de la hoja de características del fabricante del chip en la que se muestra la curva fotométrica.

Figura 3.4 Curva espectral del LED rojo lejano, (OSRAM, Munich, Alemania)

3.1.1.3. LED azul con espectro comprendido entre 439-461 nm

El LED azul (A) está montado sobre una superficie cerámica con unas dimensiones de 3 mm x 3 mm y una óptica de 120° con un diámetro de 2,15 mm (Figura 3.5). Los parámetros eléctricos de alimentación óptima para una temperatura de 25°C se encuentran comprendidos entre 2,75 – 3,25 Voltios y una intensidad de 350 mA (Tabla 3.3).

Figura 3.5 A) Apariencia física del chip LED azul y B) Dimensiones del chip montado sobre una superficie cerámica,. (OSRAM, Munich, Alemania)

Tabla 3.3 *Parámetros luminotécnicos y eléctricos del LED azul*

Parámetros	Unidad SI	LED AZUL (OSLON SSL DEEP BLUE)		
		Mín.	Typ.	Máx.
λ	nm	439	455	461
λ_{pico}	nm		451	
Voltaje	V	2,75	2,85	3,25
Intensidad	mA		350	
Temperatura	°C		25	
Óptica	°		120	

El LED A seleccionado emite un haz de luz en el espectro comprendido entre los 439nm y los 461nm con un pico máximo de intensidad en los 451nm como se puede ver en la Figura 3.6 obtenida de la hoja de características del fabricante del chip en la que se muestra la curva fotométrica

Figura 3.6 *Curva espectral del LED azul, (OSRAM, Munich, Alemania)*

3.1.1.4. LED verde con espectro comprendido entre 513 – 543 nm

El LED verde (V) está montado sobre una superficie cerámica con unas dimensiones de 3 mm x 3 mm y una óptica de 80° con un diámetro de 2,15 mm (Figura 3.7). Los parámetros eléctricos de alimentación óptima para una temperatura de 25°C se encuentran comprendidos entre 2,75 – 3,50 Voltios y una intensidad de 350 mA (Tabla 3.4).

Figura 3.7 A) Apariencia física del chip LED verde y B) Dimensiones del chip montado sobre una superficie cerámica, (OSRAM, Munich, Alemania)

Tabla 3.4 Parámetros luminotécnicos y eléctricos del LED verde

Parámetros	Unidad SI	LED VERDE (OSLON SSL GREEN)		
		Mín.	Typ.	Máx.
λ	nm	513	528	543
λ_{pico}	nm		521	
Voltaje	V	2,75	3,20	3,50
Intensidad	mA		350	
Temperatura	°C		25	
Óptica	°		80	

El LED V seleccionado emite un haz de luz en el espectro comprendido entre los 513nm y 543nm con un pico máximo de intensidad en los 521nm como se puede ver en la Figura 3.8, obtenida de la hoja de características del fabricante del chip en la que se muestra la curva fotométrica

Figura 3.8 Curva espectral del LED verde, (OSRAM, Munich, Alemania)

3.1.1.5. LED blanco con espectro comprendido entre 439-700

El LED blanco (B) está montado sobre una superficie cerámica con unas dimensiones de 3 mm x 3 mm y una óptica de 80° con un diámetro de 2,15 mm (Figura 3.9). Los parámetros eléctricos de alimentación óptima para una temperatura de 25°C se encuentran comprendidos entre 2,70 – 3,20 Voltios y una intensidad de 700 mA (Tabla 3.5).

Figura 3.9 A) Apariencia física del chip LED blanco y B) Dimensiones del chip montado sobre una superficie cerámica, (OSRAM, Munich, Alemania).

Tabla 3.5 Parámetros luminotécnicos y eléctricos del LED blanco.

Parámetros	Unidad SI	LED BLANCO (OSLON SSL WHITE)		
		Mín.	Typ.	Máy.
λ	nm	439		700
λ_{pico}	nm			
Voltaje	V	2,70	2,80	3,20
Intensidad	mA		700	
Temperatura	°C		25	
Óptica	°		120	

El LED B seleccionado emite un haz de luz en el espectro comprendido entre los 439 nm y 700nm como se puede ver en la Figura 3.10, obtenida de la hoja de características del fabricante del chip en la que se muestra la curva fotométrica

Figura 3.10 Curva espectral del LED blanco, (OSRAM, Munich, Alemania).

3.1.1.6. LED UV-B con espectro comprendido entre 305-315 nm

El LED UV-B está montado sobre una superficie cerámica con unas dimensiones de 3 mm x 3 mm y una óptica de 120° (Figura 3.11). Los parámetros eléctricos de alimentación óptima para una temperatura de 20°C se encuentran comprendidos entre 7 – 10 Voltios y una intensidad de 350 mA (Tabla 3.6).

Figura 3.11 A) Apariencia física del chip LED UV-B y B) Dimensiones del chip montado sobre una superficie cerámica (UVphotonic NT GmbH, Berlin, Alemania).

Tabla 3.6 *Parámetros luminotécnicos y eléctricos del LED UV-B.*

Parámetros	Unidad SI	LED UV-B (HP310SMD)		
		Mín.	Typ.	Máx.
λ	nm	305	310	315
λ_{pico}	nm		310	
Voltaje	V	7	8,5	10
Intensidad	mA		350	
Temperatura	°C		20	
Óptica	°		120	

El LED UV-B seleccionado emite un haz de luz en el espectro comprendido entre los 305nm y los 315nm con un pico máximo de intensidad en los 310nm como se puede ver en la Figura 3.12, obtenida de la hoja de características del fabricante del chip en la que se muestra la curva fotométrica

Figura 3.12 *Curva espectral del LED UV-B (UVphonic NT GmbH, Berlin, Alemania).*

3.1.1.7. Luminaria experimental con LEDs rojos

La luminaria experimental con LEDs R está compuesta por 10 LEDs ubicados en 2 filas de 5 LEDs cada una (Figura 3.13A). Esta luminaria se desarrolló para la caracterización de los niveles de luxy $\mu\text{moles de fotones m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ en la superficie interior de la cámara experimental para diferentes intensidades, en función del número de LEDs y de su óptica

(Tabla 3.7). Para el conexionado de los LEDs se realizó un diseño del circuito electrónico mediante el empleo del software Tina-TI (Texas Instrument, Texas, EE.UU.) (Figura 3.13B)

Figura 3.13 A) Diseño PCB de la luminaria experimental de LEDs rojos B) Diseño del circuito electrónico en Tina-TI.

Tabla 3.7 Consumo de energía (W), máximo valor de luminancia (lux) y radiación fotosintéticamente activa (PAR, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) en función del número de LEDs rojos y de su óptica.

nº LED	Óptica	PAR ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Luminancia (lux)	Energía eléctrica (W)
1	120°	10,1	118	0,71
2	120°	22.4	256	1.42
5	120°	55	624	3.58
10	120°	110	1283	7.17
1	16°	102	1208	0,71
2	16°	220	2590	1.42
5	16°	319	3000	3.58
10	16°	603	6203	7.17

3.1.1.8. Luminaria experimental con LEDs azules

La luminaria experimental con LEDs A está compuesta por 10 LEDs ubicados en 2 filas de 5 LEDs cada una (Figura 3.14A). Esta luminaria fue desarrollada para la caracterización de los niveles de lux y $\mu\text{moles de fotones m}^{-2} \text{s}^{-1}$ en la superficie interior de la cámara experimental para diferentes intensidades en función del número de LEDs y de su

óptica (Tabla 3.8). Para el conexionado de los LEDs se realizó un diseño del circuito electrónico mediante el empleo del software Tina-TI (Figura 3.14B).

Figura 3.14 A) Diseño PCB de la luminaria experimental de LEDs azules B) diseño del circuito electrónico en Tina-TI.

Tabla 3.8 Consumo de energía (W), máximo valor de luminancia (lux) y radiación fotosintéticamente activa (PAR, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) en función del número de LEDs azules y de su óptica.

nº LED	Óptica	PAR ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Luminancia (lux)	Energía eléctrica (W)
1	120°	9,5	144	1
5	120°	50,4	620	5
10	120°	108	1438	10
1	16°	86,5	966	1
5	16°	286	3651	5
10	16°	498	6457	10

3.1.1.9. Luminaria experimental con LEDs verdes

La luminaria experimental con LEDs V está compuesta por 10 LEDs ubicados en 2 filas de 5 LEDs (Figura 3.15A). Esta luminaria fue desarrollada para la caracterización de los niveles de lux y μmoles de fotones $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ en la superficie interior de la cámara experimental para diferentes intensidades en función del número de LEDs y de su óptica como se muestra en la Tabla 3.9. Para el conexionado de los LEDs se realizó un diseño del circuito electrónico mediante el empleo del software Tina-TI (Figura 3.15B)

Figura 3.15 A) Diseño PCB de la luminaria experimental de LEDs verdes B) Diseño del circuito electrónico en Tina-TI.

Tabla 3.9 Consumo de energía (W), máximo valor de luminancia (lux) y radiación fotosintéticamente activa (PAR, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) en función del número de LEDs verdes y de su óptica.

nº LED	Óptica	PAR ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Luminancia (lux)	Energía eléctrica (W)
1	80°	24,3	2564	1,1
5	80°	85,6	9536	5,5
10	80°	203,2	22451	11
1	16°	154	15994	1,1
5	16°	262,8	28385	5,5
10	16°	503,8	56202	11

3.1.1.10. Luminaria experimental con LEDs blancos

La luminaria experimental con LEDs B está compuesta por 10 LEDs ubicados en 2 filas de 5 LEDs cada una (Figura 3.16A). Esta luminaria fue desarrollada para la caracterización de los niveles de lux y μmoles de fotones $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ en la superficie interior de la

cámara experimental para diferentes intensidades en función del número de LEDs y de su óptica (Tabla 3.10). Para el conexionado de los LEDs se realizó un diseño del circuito electrónico mediante el empleo del software Tina-TI (Figura 3.16B).

Figura 3.16 A) Diseño PCB de la luminaria experimental de LEDs blancos B) Diseño del circuito electrónico en Tina-TI.

Tabla 3.10 Consumo de energía (W), máximo valor de luminancia (lux) y radiación fotosintéticamente activa (PAR, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) en función del número de LEDs blancos y de su óptica.

nº LED	Óptica	PAR ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Luminancia (lux)	Energía eléctrica (W)
1	120°	21,3	1381	2
5	120°	69,8	4394	10
10	120°	213	11464	20
1	16°	65,3	4110	2
5	16°	353	22000	10
10	16°	693	47392	20

3.1.1.11. Luminaria experimental con LEDs rojo lejano

La luminaria experimental con LEDs RL está compuesta por 10 LEDs ubicados en 2 filas de 5 LEDs cada una (Figura 3.17A). Esta luminaria fue desarrollada para la caracterización de los niveles de lux y μmoles de fotones $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ en la superficie interior de

la cámara experimental para diferentes intensidades en función del número de LEDs y de su óptica (Tabla 3.11). Para el conexionado de los LEDs se realizó un diseño del circuito electrónico mediante el empleo del software Tina-TI (Figura 3.17B).

Figura 3.17 A) Diseño PCB de la luminaria experimental de LEDs rojo lejano B) Diseño del circuito electrónico en Tina-TI.

Tabla 3.11 Consumo de energía (W), máximo valor de luminancia (lux) y radiación fotosintéticamente activa (PAR, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) en función del número de LEDs rojo lejano y de su óptica.

nº LED	Óptica	PAR ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Luminancia (lux)	Energía eléctrica (W)
1	120°	0,1	14,11	0,68
5	120°	0,3	69,1	3,4
10	120°	0,4	130	6,8
1	16°	0,6	144,1	0,68
5	16°	1,8	388,6	3,4
10	16°	3,8	868	6,8

3.1.1.12. Luminaria experimental con LEDs UV-B

La luminaria experimental con LEDs UV-B está compuesta por 4 LEDs ubicados en 2 filas de 2 LEDs cada una (Figura 3.18A). Esta luminaria fue desarrollada para la caracterización de los niveles de Julios por segundo en la superficie interior de la cámara experimental para diferentes intensidades en función del número de LEDs (Tabla 3.12). Para el conexionado de los LEDs se realizó un diseño del circuito electrónico mediante el empleo del software Tina-TI (Figura 3.18B).

Figura 3.18 A) Diseño PCB de la luminaria experimental de LEDs UV-B B) Diseño del circuito electrónico en Tina-TI.

Tabla 3.12 Consumo de energía (W), máximo valor de energía en Julios por segundo en función del número de LEDs UV-B.

nº LED	Óptica	Julios por segundo ($\text{W m}^{-2} \text{s}$)	Energía eléctrica (W)
1	120°	2	3,5
2	120°	4	7
3	120°	6	10,5
4	120°	8	14

3.1.1.13. Luminaria experimental de espectro modulable

La luminaria experimental de espectro modulable está compuesta por 5 LEDs de diferentes espectros que comprenden el azul, verde, rojo, rojo lejano y el blanco con una óptica de 16° para cada uno, distribuidos como se muestra en la Figura 3.19A. Esta luminaria fue desarrollada para la caracterización de los niveles de lux y μmoles de fotones

$\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ en la superficie interior de la cámara experimental para cada LED y de su óptica (Tabla 3.13). Para el conexionado y control de los LEDs se realizó un diseño del circuito electrónico para cada uno de ellos mediante el empleo del Mosfet de Canal N modelo IRF530N a partir del software Tina-TI (Figura 3.19B). La señal de control del encendido y apagado de cada LED se realiza desde la Unidad de Control de la cual se hablará más adelante.

Figura 3.19 A) Diseño PCB de la luminaria experimental de LEDs B) Diseño del circuito electrónico en Tina-TI.

Tabla 3.13 Consumo de energía (W), máximo valor de luminancia (lux) y radiación fotosintéticamente activa (PAR, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) en función del color del LEDs.

Color LED	Óptica	PAR ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Luminancia (lux)	Energía eléctrica (W)
Rojo	16°	102	1208	0,71
Verde	16°	154	15994	1,1
Azul	16°	86,5	966	1
Blanco	16°	65,3	4110	2
Rojo Lejano	16°	0,6	144	0,68

3.1.2. Arduino

Arduino es una compañía de hardware libre y una comunidad tecnológica que diseña y manufactura placas de desarrollo de hardware y software (Arduino, Ivrea, Italia), compuestas respectivamente por circuitos impresos que integran un microcontrolador y por un entorno de desarrollo (IDE) donde se programa cada placa.

Toda la plataforma, tanto hardware como software, se libera con licencia de código abierto que permite libertad de acceso a los mismos.

Una placa Arduino (Figura 3.20) está formada generalmente por un microcontrolador que es un sistema microprogramable completo, que integra en un solo chip todos los componentes (microprocesador, memoria, puertos de E/S, periféricos, etc.) y una serie de dispositivos adicionales (controlador USB, cristal de cuarzo, regulador de tensión, etc.), así como una serie de pines de conexión (Figura 3.21).

Figura 3.20 Modelo de placa Arduino UNO (Arduino, Torino, Italia).

Figura 3.22 Sensor DHT discreto e integrado en placa (Adafruit Industries, Nueva York, EE.UU).

Los sensores DHT11 y DHT22 llevan integrados un medidor capacitivo de humedad, un termistor y un circuito digital de acondicionamiento y transmisión, de tal forma que pueden enviar digitalmente el valor de la temperatura y de la humedad al sistema de control. El manejo, el conexionado, la alimentación, etcétera, son exactamente iguales en ambos sensores, así como el encapsulado (azul claro en DHT11, blanco en DHT22). La única diferencia entre ellos son las prestaciones, siendo el DHT22 más preciso. En la Tabla 3.14 se pueden apreciar las características de los dos sensores.

Tabla 3.14 Características de los sensores DHT11 y DHT22

Característica	DHT11	DHT22
Intervalo humedad	20 % – 80 %	0 % – 100 %
Precisión humedad	5 %	2 % – 5 %
Intervalo temperatura	0 °C – 50 °C	-40 °C – 125 °C
Precisión temperatura	±2 °C	±0,5 °C
Frecuencia máxima	1 Hz	0,5 Hz
Alimentación	3 V – 5 V	3 V – 5 V
Consumo	2,5 mA	2,5 mA
Dimensiones	15,5 x 12 x 5,5 mm	15,1 x 25 x 7,7 mm

El DHT11 tiene unas especificaciones bastante pobres, quedando virtualmente descartado para cualquier aplicación real práctica. Es más un elemento de bajo coste destinado a la investigación y el aprendizaje, y para quien da sus primeros pasos con Arduino. El tiempo de respuesta de los dos sensores es bastante lento (uno o dos segundos entre mediciones), pero suficiente para la mayoría de las aplicaciones (por ejemplo, la

temperatura ambiente no presenta grandes variaciones en un segundo). El conexionado es idéntico en los dos sensores (Figura 3.23). Ambos constan de cuatro pines: uno no conectado, dos para alimentación y uno para la E/S digital. Es necesario conectar una resistencia de “pull-up” de 10 k en la patilla de E/S digital, de la misma forma que se realizaría para un pulsador. Se pueden encontrar sensores ya montados en placa con la resistencia integrada.

Figura 3.23 *Conexionado del sensor DHT11/22 a una placa Arduino, el cable rojo se conecta a Vcc (3,3 – 5 V), el cable verde es la salida de datos que se conecta a una entrada digital de Arduino y el cable negro conecta a GND, (Adafruit Industries, Nueva York, EE.UU).*

Los sensores DHT utilizan un protocolo de comunicación bidireccional propio. Se puede obtener información sobre este protocolo en las hojas de características del fabricante para programar la comunicación desde Arduino, pero si no se quieren complicaciones, se puede utilizar una biblioteca de terceros ya desarrollada. Existen multitud de ellas, siendo la más conocida la biblioteca “Adafruit”.

3.1.3.2. Sensor de iluminación TSL2591

El sensor de luminosidad TSL2591 (Adafruit Industries, Nueva York, EE.UU.) es un sensor de luz digital avanzado (Figura 3.24). En comparación con las células CdS de bajo coste, este sensor es más preciso, permite cálculos de lux exactos y se puede configurar para diferentes rangos de ganancia / sincronización para detectar rangos de luz desde 188 μ lux hasta 88.000 lux sobre la marcha.

Este sensor contiene diodos infrarrojos y de espectro completo. Puede medir por separado la luz infrarroja, de espectro completo. La mayoría de los sensores solo pueden detectar uno u otro, lo que no representa con precisión lo que ven los ojos humanos. Este sensor es muy parecido al TSL2561, pero con un rango más amplio. Este sensor tiene un rango dinámico masivo de 600.000.000: 1, y a diferencia del TSL2561, no puede cambiar la dirección I2C (Tabla 3.15).

El ADC incorporado se puede usar con cualquier microcontrolador, incluso si no tiene entradas analógicas. El consumo es muy bajo, por lo que es ideal para sistemas de registro de datos de baja potencia de aproximadamente 0,4 mA, cuando detecta activamente, y menos de 5 μ A cuando está en modo de apagado. En la Figura 3.25 se muestra el conexionado físico y en la Tabla 3.16 el conexionado del sensor TSL2561 a la placa Arduino UNO.

Figura 3.24 Sensor TSL2591 (Adafruit Industries, Nueva York, EE.UU.).

Tabla 3.15 Especificaciones del sensor TSL2591

Características	Parámetros
Rango dinámico	1 a 600.000.000 cuentas
Rango de lux	188 μ lux hasta 88.000 lux

Características	Parámetros
Rango de temperatura	-30 a 80 °C
Rango de voltaje	3,3 – 5V
Interfaz	I2C
Direcciones I2C de 7 bits	0x29 y 0x28
Dimensiones	19 x 16 x 1 mm
Peso	1,1 grs

Tabla 3.16 Conexión del sensor TSL2561 a la placa Arduino UNO

Sensor TSL2591	Arduino UNO
Vin	5V
GND	GND
SCL (señal de reloj I2C)	A5
SDA (señal de datos I2C)	A4
INT	No se conecta
Dirección I2C	0x29 y 0x28

Figura 3.25 Conexión del sensor TSL2591 a la placa Arduino UNO (Adafruit Industries, Nueva York, EE.UU).

3.1.3.3. Sensor de radiación fotosintéticamente activa (PAR)

La radiación que impulsa la fotosíntesis se denomina radiación fotosintéticamente activa (PAR) y se define típicamente como la radiación total entre 400 y 700 nm. PAR se expresa a menudo como densidad de flujo de fotones fotosintéticos (PPFD): flujo de fotones

en unidades de micromoles por metro cuadrado por segundo ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, igual a microEinsteins por metro cuadrado por segundo) sumado de 400 a 700 nm (total número de fotones de 400 a 700 nm). Si bien las unidades Einstein y micromoles son iguales (un Einstein = un mol de fotones), Einstein no es una unidad SI, por lo que se prefiere el PPFD como $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Los sensores que miden PPFD a menudo se denominan sensores cuánticos. Un cuanto es la cantidad mínima de radiación (un fotón), necesaria para provocar una reacción física, eléctrica o química (por ejemplo, la absorción por pigmentos fotosintéticos). Entonces, un fotón es un solo cuanto de radiación.

El sensor Quantum (Apogee Instruments, Utah, EE.UU.) consta de un difusor acrílico fundido (filtro), un fotodiodo, un circuito de procesamiento de señales montado en una carcasa de aluminio anodizado, y un cable para conectar el sensor a un dispositivo de medición. Está diseñado para la medición continua de PPFD en ambientes interiores, exteriores y submarinos. La señal del sensor es directamente proporcional a la radiación incidente en una superficie plana donde la radiación proviene de todos los ángulos de un hemisferio.

El sensor empleado en el interior de la CEEM para medir el PAR es el modelo SQ-420 del fabricante Apogee (Apogee Instruments) (Figura 3.26).

Figura 3.26 Sensor PAR y sus dimensiones (Apogee Instruments, UT, EEUU).

3.1.3.4. Sensor UV

La radiación ultravioleta (UV) constituye una parte del espectro electromagnético de 100 a 400 nm, y se subdivide en tres rangos de longitud de onda: UV-A (315 a 400 nm), UV-B (280 a 315 nm) y UV-C (100 a 280 nm). La atmósfera de la Tierra absorbe gran parte de los rayos UV-B y todas las longitudes de onda de los rayos UV-C del sol. Hay muchas fuentes de luz UV artificial disponibles que emiten un rango de longitud de onda seleccionado u ofrecen una fuente de radiación UV de banda ancha.

La mayoría de los sensores UV diseñados para mediciones de luz solar son sensibles a la radiación UV en los rangos UV-A y UV-B. Los sensores UV de “Apogee Instruments SU-420” detectan la radiación UV de 250 a 400 nm y están calibrados en unidades de flujo de fotones de micromoles por metro cuadrado por segundo ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). La salida también se puede expresar en unidades de flujo de energía de vatios por metro cuadrado (W m^{-2} , igual a julios por segundo por metro cuadrado).

Los sensores UV de la serie SU de “Apogee Instruments” consisten en un fotodiodo y un circuito de procesamiento de señales montado en una carcasa de aluminio anodizado, y un cable para conectar el sensor a un dispositivo de medición.

El sensor empleado en el interior de la CEEM para medir la Radiación UV-B fue el modelo SU-420 (Apogee Instruments) (Figura 3.27).

Figura 3.27 Sensor UV y sus dimensiones (Apogee Instruments, UT, EEUU).

3.1.3.5. Raspberry Pi

La Raspberry Pi (Fundación Raspberry Pi, South Cambridgeshire, Reino Unido) se desarrolló con el objetivo de potenciar la enseñanza de las ciencias en las escuelas. Con el tiempo la Raspberry Pi, junto con la placa microcontroladora Arduino, se han convertido en un referente en el mundo “maker” y en el desarrollo de dispositivos para el denominado Internet de las cosas (IoT).

La Raspberry Pi es un ordenador de placa única (es decir, que tiene todos los componentes integrados en una sola placa) y de bajo coste destaca por su gran flexibilidad y su reducido precio (unos 35 €).

En el mercado existen diferentes versiones de Raspberry Pi según las necesidades de los diferentes usuarios, aunque los principales modelos actualmente son la “Raspberry Pi Zero W”, la “Raspberry Pi 3 B+” y la “Raspberry Pi 4 B” (Figura 3.28). Cada modelo cubre una serie de necesidades específicas, pero actualmente la Raspberry Pi 4B está sustituyendo al modelo Raspberry Pi 3 B+. En la web oficial de la Fundación Raspberry Pi se pueden descargar diversas distribuciones (sistemas operativos) adaptadas a la Raspberry Pi, dependiendo siempre de los usos que se quiera dar.

Una vez vistas las diferentes versiones de la Raspberry Pi, se debe elegir qué sistema se desea instalar al modelo seleccionado. El sistema más extendido y más flexible es Raspbian, una versión adaptada de la distribución de Linux Debian.

Más allá de las distribuciones oficiales, que se pueden encontrar en la web de la Fundación Raspberry Pi, existen multitud de desarrollos de terceros que permiten gran variedad de usos alternativos. Además, cuenta con una serie de GPIO programables Figura 3.29.

Figura 3.28 A) Raspberry Pi Zero W. B) Raspberry Pi 4 B. (Raspberry Pi Foundation, Cambridge, Inglaterra).

Figura 3.29 GPIO Raspberry Pi (Raspberry Pi Foundation, Cambridge, Inglaterra).

3.1.4. Cuadro eléctrico de mando y control

El cuadro de mando y control está compuesto por un carril DIN en el que se ha montado un interruptor diferencial (DIF1) y tres magneto-térmicos (PROT1, PROT2, PROT3) que son los que alimentan las fuentes de alimentación de cada uno de los circuitos

de alimentación como son el circuito alimentación de la CEEM (VC1) del cual depende la iluminación LED, sensores, climatización, ventilación. El segundo circuito de alimentación (VC2) alimenta la Raspberry Pi, que a su vez alimenta, a través del puerto USB, a la placa Arduino. Finalmente, el tercer circuito alimenta (VC3) al monitor táctil de 10". En la Figura 3.30 se muestra el esquema unifilar del cuadro de mando y control de la CEEM realizado con el software de diseño técnico CADE SIMU.

Figura 3.30 Esquema unifilar del cuadro de mando y control de la CEEM realizado con el software de diseño técnico CADE-SIMU

Además de estos elementos de protección eléctrica, en el cuadro también se encuentra un miniordenador "Raspberry Pi", la unidad microcontroladora Arduino, un módulo relé de 8 canales de 5V, un driver de alimentación de 12V 300W 30A para alimentación de los LEDs, sensores, ventiladores, bombas de aire y celdas Peltier.

En el panel frontal del cuadro se ha instalado un monitor táctil de 10" conectado a la "Raspberry Pi" para la monitorización y control de la CEEM.

3.1.5. Chasis

El chasis de la cámara está formado por una estructura de chapa galvanizada que forma un cubo de 500 x 350 x 400 mm y sus 6 caras están cerradas con cartón pluma y recubiertas por un vinilo lavable.

3.1.6. Sistema de climatización

El sistema de climatización para la CEEM es un prototipo desarrollado a partir de celdas de Peltier (Figura 3.31), cuyo funcionamiento consiste en recircular el aire del interior de la cámara a través de un sistema de conductos fríos o calientes, en función de si se desea subir o bajar la temperatura en la CEEM.

Figura 3.31 Sistema de climatización de la CEEM.

El efecto Peltier se caracteriza por la aparición de una diferencia de temperaturas entre las dos caras de un semiconductor cuando por él circula una corriente. Una celda Peltier está conformada por dos materiales semiconductores, uno tipo P y otro tipo N en un arreglo como el mostrado en la Figura 3.32, produciéndose internamente el denominado efecto termoeléctrico de Peltier.

Figura 3.32 Diagrama que muestra la estructura interna de una celda Peltier, donde se observan los elementos semiconductores dispuestos eléctricamente en serie y térmicamente en paralelo (Patterson et al. 2007).

3.1.7. Esfera de Ulbricht

La esfera de Ulbricht o esfera de integración (Figura 3.33) que se ha empleado en la investigación es el modelo Hopoo HP8000S del fabricante Hopoo Optoelectronics Technology Co., Ltd. Con nº de serie 201401527 y con un rango de medida desde los 380 nm – 780 nm como se muestra en la Tabla 3.17 cedida por el fabricante Cifra Import, Cartagena, España.

Se trata de una esfera hueca de 2 metros de diámetro, cubierta en su interior con una pintura especial, de color blanco, para que la reflexividad en su interior sea lo más uniforme posible a las diferentes longitudes de onda percibidas por el ojo humano. Sobre la superficie de la esfera se monta un luxímetro como elemento de medición, que mide la iluminancia ajustada a la curva de sensibilidad fotópica del ojo humano a las radiaciones monocromáticas, y en su centro geométrico se sitúa la luminaria cuyo flujo se quiere determinar.

Para que la esfera se comporte como esfera integradora se coloca una placa (cubierta con la misma pintura de la esfera), cuyo cometido es evitar que la luz incida directamente sobre el elemento de medición. De esta manera y en forma ideal, se asume que la esfera integradora es una superficie lambertiana, con reflectancia no selectiva. Es

decir, que para cualquier longitud de onda del espectro visible se tiene el mismo índice de reflectancia en todos los puntos de la esfera, favorecido, además, por la geometría de la esfera y por el hecho de que la luz no incide directamente sobre el punto de medición. No existen puntos privilegiados en su superficie interior. En estas condiciones, y asumiendo la fuente luminosa como puntual frente a la esfera, se puede probar que el flujo luminoso es proporcional a la intensidad luminosa (medida en candelas (cd)). Luego, aplicando la ley del cuadrado inverso, se llega a que el flujo es proporcional a la iluminancia según la ecuación:

$$\Phi = kE$$

Donde k es la llamada constante de la esfera que, entre otros factores, depende de las dimensiones de la esfera, la composición de la pintura con la cual está pintada, el envejecimiento de la misma y la temperatura. Así pues, determinando de manera adecuada (en función de los requerimientos del laboratorio) la constante k de la esfera, se puede obtener el valor de flujo luminoso que emite una determinada lámpara bajo ensayo, midiendo la iluminancia.

No es difícil aceptar el hecho de que la constante de la esfera, en condiciones adecuadas de laboratorio, sigue un patrón claro de variación, debido principalmente a la degradación de la pintura y a la contaminación del ambiente (polvo). De hecho, la constante aumenta su valor conforme transcurre el tiempo desde la última pintura (Rivero Nicolas et al., 2010).

Figura 3.33 Esfera de Ulbricht empleada para la realización de los ensayos (Laboratorio del fabricante Cifra import, Murcia, España).

Tabla 3.17 Características técnicas de la esfera de Ulbricht.

Características técnicas	Parámetros
Rango longitud de onda	380 – 780 nm
Precisión de las coordenadas cromáticas	+/- 0,0015 (x,y)
Rango longitud de onda dominante (λ_D)	380 – 780 nm
Precisión	+/- 0,3 nm
Rango de correlación color de temperatura (CCT)	1000 – 100000 K
Precisión	+/- 3%
Rango de flujo luminoso (Φ_V)	10 mlm – 20000 lm
Rango de intensidad luminosa	10 mcd – 3000 cd
Precisión	Clase 1
Corriente directa (I_F)	0,01 mA – 5000 mA

Características técnicas	Parámetros
Precisión	+/- 5%
Voltaje directo (V_F)	0,01 – 40 V
Precisión	+/- 5%
Corriente inversa (I_R)	0,01 μ A – 200 μ A
Precisión	+/- 5%
Voltaje inverso (V_R)	0,01 – 30 V
Precisión	+/- 5%

3.1.8. Cámara termográfica

La cámara termográfica es un dispositivo que, a partir de las emisiones de infrarrojos de los cuerpos detectados forma imágenes luminosas visibles para el ojo humano. Permite ver la irradiación de un objeto, persona u animal que de otra forma no se podría observar.

Todos los cuerpos emiten una cierta radiación infrarroja en función de su temperatura. Generalmente los objetos con mayor temperatura emiten más radiación infrarroja que los que poseen menor temperatura.

La cámara termográfica empleada en la investigación (Figura 3.34) es el modelo Ti-Series del fabricante Fluke con n° de serie Ti10-09020027 con las características que se muestran en la Tabla 3.18.

Tabla 3.18 Características técnicas de la cámara termográfica.

Características técnicas	Parámetros
Mediciones de temperatura	-20 °C a +100 °C
Precisión	+/- 5 °C o el 5% (el que sea mayor)
Campo de visión	23° x 17°
Resolución espacial (IFOV)	2,5 mRad
Distancia mínima del enfoque lente térmica	15 cm (aprox. 6 pulg.)

Características técnicas	Parámetros
Distancia mínima del enfoque lente de luz visible	46 cm (aprox. 18 pulg.)
Enfoque	Manual
Frecuencia de la imagen	9 Hz de velocidad de actualización
Tipo de detector	Arreglo de plano focal de 160 x 120 microbolómetro sin enfriamiento
Tipo de lente infrarrojo	20 mm EFL, lente F/0,8
Sensibilidad térmica (DTER)	<0,2 °C a 30 °C (200 mK)
Banda espectral infrarroja	7,5 µm a 14 µm
Cámara visual	640 x 480 de resolución

Figura 3.34 Cámara termográfica empleada durante los ensayos, cedida por el Colegio de Ingenieros Técnicos Industriales de la Región de Murcia.

3.2. Componentes software

3.2.1. Instalación y configuración del sistema operativo Raspbian en la Raspberry Pi

El sistema operativo *Raspbian* es gratuito, está basado en *Debian* y ha sido optimizado para el hardware de la *Raspberry Pi*. El sistema operativo *Raspbian* viene con más de 35.000 paquetes, y software precompilado. Sin embargo, *Raspbian* todavía se encuentra en desarrollo activo con énfasis en mejorar la estabilidad y el rendimiento.

Para llevar a cabo la instalación del sistema operativo *Raspbian* en la *Raspberry Pi*. Hay que seguir los siguientes pasos.

1. Instalar sistema operativo *Raspbian* en una micro-SD desde Windows:

Se realiza el formateo de la tarjeta micro-SD con el programa *EaseUspartition Master Free Edition* de Windows.

2. Desde este mismo programa se cambia el formato de la tarjeta micro-SD a FAT32

Se descarga el sistema operativo Raspbian desde el siguiente enlace:

<https://www.raspberrypi.org/downloads/raspbian/>.

3. Aparecerán varios sistemas operativos. Se elige *Raspbian Buster with desktop and recommended software*.
4. A continuación, se descarga el archivo Zip, dentro del cual se encuentra una imagen (.img). Esta imagen hay que copiarla en la micro-SD, para ello previamente hay que descargarse el programa balena Etcher del siguiente enlace:

<https://www.balena.io/etcher/>.

5. Una vez descargado el programa balena Etcher, se abre el programa y seleccionamos unidad donde se va a Flashear la imagen y finalmente le damos a Flash. Una vez finalizado el proceso anterior, se introduce la tarjeta micro-SD en la Raspberry Pi, se enciende y comienza a configurarse. Este proceso suele durar unos 5 minutos. Finalmente aparecerá en el escritorio donde pedirá que se realicen unos ajustes como país, lenguaje, zona horaria. Después de todo esto pedirá que se cambie la contraseña. Por defecto el usuario es “pi” y la contraseña “raspberry”:

Para finalizar el proceso de configuración se abre la terminal y se ejecutan los siguientes comandos:

```
sudo apt-get update
```

```
sudo apt-get upgrade
```

Para la automatización del proceso de subir y bajar datos de la nube, se ha de habilitar el acceso remoto de la *Raspberry Pi* desde el exterior mediante la activación del SSH desde la terminal se ejecuta el siguiente comando:

```
Sudo raspi-config
```

```
Interfacing Options ---> SSH is enabled
```

3.2.2. Instalación y configuración de rclone en la Raspberry Pi

“Rclone” es una aplicación libre para sistemas de tipo Unix, Microsoft Windows, para sincronizar archivos y directorios desde la computadora con los proveedores más

importantes de alojamiento de contenidos en la nube. También permite efectuar copias dentro de nuestro propio sistema de archivos. Está escrito en lenguaje de programación Go, que se trata de un lenguaje de programación concurrente y compilado inspirado en la sintaxis de C que intenta ser dinámico como “Python” con el rendimiento de C o C++ y ha sido desarrollado por Google.

Desde la terminal de la “Raspberry” se puede realizar la instalación de “rclone”, siguiendo los siguientes pasos:

- 1- Se instala “rclone” en la *Raspberry* con el siguiente comando:

```
curl https://rclone.org/install.sh|sudo bash
```

- 2- Se configura el proveedor de servicios “cloud” para la *Raspberry Pi*. Para este desarrollo, se seleccionó Google Drive (15 GB de almacenamiento gratuito), previo a la creación de una nueva cuenta con el siguiente comando:

```
rcloneconfig
```

- 3- Se instala Fuse con el siguiente comando:

```
sudo apt-get install fuse
```

- 4- Se crea una carpeta en nuestra *RaspberryPi* que se sincronizara con “minube” con el siguiente comando:

```
mkdir /home/pi/minube
```

- 5- Con el siguiente comando se permitirá que usuarios no “root”, tengan permisos para acceder a la carpeta montada, para ello será necesario “descomentar” la línea **user-allow-others**. En algunos casos si no nos funciona se tendrá que volver y probar con **user--allow-other** :

```
sudo nano /etc/fuse.conf
```

- 6- Se monta la carpeta virtual en la *Raspberry Pi* con el siguiente comando:

```
rclone mount minube: /home/pi/minube
```

6.1) `rclone mount minube: /home/pi/minube --allow-other`

7- Se crea una carpeta dentro de “minube” con el siguiente comando donde se va a dirigir el archivo.CSV con los datos de fecha, hora, temperatura, humedad, iluminación y demás información:

```
rclone mkdir /home/pi/minube/datalogger
```

7- Para sincronizar el contenido de la cuenta de Google Drive con la carpeta en la *Raspberry Pi* se escribe el siguiente comando:

```
rclone sync minube: /home/pi/minube
```

8- Para copiar el contenido de una carpeta en la carpeta virtual de Google Drive se escribe el siguiente comando:

```
rclone copy /home/pi/nombre_carpeta minube: rclone_test_folder
```

9- Para conocer el número de nubes montadas en la *Raspberry Pi* se escribe el siguiente comando:

```
rclone listremotes
```

10- Para crear una carpeta dentro de “minube” en Google Drive llamada “datalogger” se realiza con el siguiente comando:

```
rclone mkdir minube: datalogger
```

3.2.3. Instalación y configuración de Node-RED en la Raspberry Pi

“Node-RED” es una aplicación de visualización “open source” desarrollada por el equipo de tecnologías emergentes de IBM y permite interconectar elementos del Internet de las Cosas (IoT). Está basada en “node.js”, una plataforma “JavaScript” del lado del servidor para crear aplicaciones en tiempo real y tiene licencia “Apache 2.0”. La interfaz está basada en un navegador web que permite crear flujos de eventos e interconectarlos como se puede apreciar en la Figura 3.35.

Figura 3.35 Interfaz de programación basada en un navegador web.

3.2.3.1. Proceso de instalación de Node-RED desde la terminal de la Raspberry

Pi.

- 1- Para la instalación de “Node-RED”, se teclea la siguiente línea de comando en la terminal:

```
sudo apt-get install nodered
```

- 2- Para la instalación del gestor de paquetes de “node-red” (npm) se teclea la siguiente línea de comando en la terminal:

```
sudo apt-get install npm
```

```
Sudo npm install -g npm
```

- 3- Para la instalación del “dashboard node-red” desde el gestor de paquetes, se teclea la siguiente línea de comando en la terminal:

```
npm install node-red-dashboard
```

- 4- Una vez instalada la aplicación, se ejecuta tecleando la siguiente línea de comando en la terminal:

```
sudo node-red
```

- 5- Se identifica la dirección IP del bróker (IPlocalhost). Para ello se ha de teclear el siguiente comando en la terminal:

ifconfig

- 6- Una vez identificada la dirección del bróker (IPlocalhost), se abre cualquier navegador y se teclea la siguiente dirección para acceder al entorno de programación de Node-RED, a través del puerto 1880.

https://IPlocalhost:1880

- 7- Una vez dentro del entorno de programación de "Node-RED" tenemos varias opciones, como importar, exportar un código de programa desde cualquier editor de texto o desarrollar un programa desde cero. Desde la siguiente ruta se puede exportar copiando el código que aparece en el "clipboard" y se guarda en cualquier editor de texto plano igualmente para importar se copia el texto plano y se pega en el "clipboard de Node-RED":

menu--->import --->clipboard

- 8- Para visualizar el "dashboard", se teclea la siguiente dirección en el navegador:

https://IPlocalhost:1880/ui

- 9- Otros comandos empleados para iniciar, parar, ejecutar en segundo plano "Node-RED":

node-red-start

node-red-stop

node-red-start&

- 10- Línea de comando para iniciar "Node-RED" en el arranque de la *Raspberry Pi* de forma automática:

Sudo systemctl enable nodered.service

3.2.4. Configuración del archivo crontab del usuario de la Raspberry Pi.

El archivo "crontab" es un simple archivo de texto que guarda una lista de comandos a ejecutar en un tiempo especificado por el usuario. "Crontab" verificará la fecha y hora en

que se ejecutará el script o el comando, los permisos de ejecución y lo realizará el “background”.

La unidad de control de la CEEM ha sido automatizada para que ejecute una serie de programas de forma autónoma, mediante la configuración del archivo “crontab” del usuario, donde cada línea será una nueva tarea de “crontab” (“crontab –e”).

Lo primero que hace el sistema cuando se enciende la “Raspberry Pi” es ejecutar la configuración de “crontab-e”.

3.2.5. IDE Arduino

El entorno de desarrollo integrado (IDE) de Arduino es una aplicación multiplataforma (para Window, macOS, Linux) está desarrollada en lenguaje de programación Java. Se utiliza para escribir y cargar programas en placas compatibles con Arduino.

El código fuente para el IDE se ha publicado bajo la Licencia Pública General GNU, versión 2. El IDE de Arduino admite los lenguajes C y C++ utilizando reglas especiales de estructuración de códigos. El IDE de Arduino suministra una biblioteca de software del proyecto “Wiring”, que proporciona muchos procedimientos comunes de E/S. El código escrito por el usuario solo requiere dos funciones básicas, para iniciar el boceto y el ciclo principal del programa, que se compilan y vinculan con un apéndice de programa principal en un ciclo con el GNU “toolchain”, que también se incluye. El IDE de Arduino emplea el programa “avrdude” para convertir el código ejecutable en un archivo de texto en codificación hexadecimal que se carga en la placa Arduino mediante un programa de carga en el firmware de la placa.

3.2.6. Instalación de la biblioteca del sensor DHT22

- 1- El proceso de carga de la librería del sensor DHT22 se realiza a través de Arduino Library Manager:

Sketch → include Library → Manage Libraries...

- 2- Se escribe DHT en el campo de búsqueda y aparecerá una lista. Dentro de esa lista se busca “DHT sensor “librarybyAdafruit”, se selecciona y se hace clic en el botón de Instalación.
- 3- A partir de la versión 1.3.0 de la biblioteca DHT, también será necesario instalar “Adafruit_Sensorlibrary” que también está disponible e Arduino Library Manager.
- 4- A continuación, se realizará una prueba del sensor DHT para ello se cargará el siguiente programa desde:

Examples → DHT → DHTTester sketch

- 5- Si está utilizando un sensor **DHT22**, se descomenta la línea que establece el tipo:

```
#define DHTTYPE DHT22 // DHT 22
```

- 6- Y se comenta la línea del sensor DHT11

```
//#define DHTTYPE DHT11 // DHT 11
```

3.2.7. Instalación de la biblioteca del sensor TSL2591

- 1- El proceso de carga de la librería del sensor TSL2591 se realiza desde el menú de IDE de Arduino siguiendo la siguiente ruta:

Sketch → Include Library → Manage Libraries...

- 2- Se escribe “**adafruit tsl2591**” en el campo de búsqueda y aparecerá una lista. Dentro de esa lista se busca “AdafruitTSL2591”, se selecciona y se hace clic en el botón de Instalación.
- 3- También será necesario instalar “AdafruitUnified” Sensor, que también está disponible en Arduino Library Manager.
- 4- A continuación, se realizará una prueba del sensor TSL para ello se cargará el siguiente programa desde:

File → Examples → Adafruit_TSL2591 → tsl2591

- 5- Leerá y calculará las lecturas de lux. Se abre el monitor serie a 9600 baudios para ver las medidas.

3.2.7.1. Código TSL2591

En caso de que se tengan varios “TSL2591” y se desee rastrearlos por separado se escribe la siguiente línea tantas veces como sensores “TSL2591” se instalen se cambiará el valor entre paréntesis (2591) por un valor de 32 bits:

```
Adafruit_TSL2591 tsl = Adafruit_TSL2591 (2591);
```

Ganancia y sincronización

Se puede ajustar la configuración de ganancia y el tiempo de integración del sensor para que sea más o menos sensible a la luz, dependiendo del entorno donde se esté utilizando el sensor.

La ganancia se puede leer o configurar a través de las siguientes funciones:

```
voidsetGain (tsl259Gain_t gain);
```

```
tsl259Gain_t getGain ();
```

El tiempo de integración se puede establecer entre 100 y 600 ms, y cuanto más largo sea el tiempo de integración, más luz podrá integrar el sensor, haciéndolo más sensible con poca luz, mayor será el tiempo de integración. Se pueden usar los siguientes valores:

```
TSL2591_INTEGRATIONTIME_100MS
```

```
SL2591_INTEGRATIONTIME_500MS
```

```
TSL2591_INTEGRATIONTIME_600MS
```

El tiempo de integración se puede leer o configurar a través de las siguientes funciones:

```
voidsetTiming (tsl259IntegrationTime_t integration);
```

```
tsl259IntegrationTime_t getTiming();
```

El sensor “TSL2591” permite discriminar el valor de lux que son visibles al ojo de los no visibles (infrarrojos, IR) mediante el empleo de unas funciones y líneas de código.

3.2.8. Fog Computing

El *fog Computing* o computación en la niebla es un término creado por Cisco Systems (Cisco System, San Jose, CA, USA). Es una forma de procesamiento de datos que hace disminuir el tiempo de respuesta de los dispositivos conectados a internet. Debido al creciente número de dispositivos y aplicaciones conectados al IoT, este tipo de estructura hace más eficiente el procesamiento de datos sin necesidad de subir los datos para su procesamiento.

Se establecen 3 niveles de computación: edge layer, fog layer, cloud layer (Figura 3.36).

En este tipo de estructura el usuario sigue disponiendo de la información sin necesidad de acceder a la nube, aún cuando se produzca un fallo de conexión o del sistema. El usuario podrá acceder al nivel fog layer (Raspberry Pi), donde se encontrarán almacenados los datos e interactuar con los diferentes dispositivos conectados en el nivel edge layer y cuando el sistema disponga de conexión a internet los datos serán subidos al nivel cloud layer.

Figura 3.36 Niveles de computación (Cisco Systems, Inc. CA. EEUU)

3.3. Ensayo fisiológico I: tratamiento de semillas

3.3.1. Material vegetal y tratamiento de luz roja (LR)

Se ha empleado semillas de la variedad de melón híbrida Edecos, proporcionada por Seminis (Murcia, España) y semillas de guisante (*Pisum sativum* L) de las variedades Alaska (Ed Hume Seeds Store, Puyallup, WA, USA) y Lincoln (Ramiro Arnedo, Murcia).

Las semillas de melón se incubaron directamente en placas Petri (15 cm de diámetro, 15 semillas por placa) con tres capas de papel de filtro humedecido con 6 ml de agua destilada (dH₂O). Las semillas se trataron con LR a baja, moderada y alta intensidad (13, 50 o 100 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, respectivamente), durante periodos de tiempo crecientes (0, 5, 10, 15, 30 y 60 minutos) en el interior de la Cámara Experimental de Espectro Modulable (CEEM). Las placas Petri con semillas control (es decir, en ausencia de tratamiento) se envolvieron con papel de aluminio para evitar la exposición a la LR. Después de cada tratamiento con LR, las correspondientes placas Petri fueron también envueltas en papel de aluminio para prevenir tratamientos de LR adicionales. Tras ello, las semillas se incubaron a

25°C durante 4 días en un incubador (MIR-153 Sanyo, Osaka, Japón). En un segundo experimento, las semillas de melón se sometieron a los mismos tratamientos durante 0, 30 y 60 min, y después de los tratamientos, las semillas se incubaron en las mismas condiciones durante 5 días.

Para los experimentos con guisante, las semillas se sometieron a un periodo de imbibición con dH₂O durante 12 h previo al tratamiento con LR. En los experimentos iniciales, las semillas se colocaron en placas Petri de 9 cm de diámetro con tres capas de papel de filtro humedecido con 4 ml de dH₂O (10 semillas por placa). Las semillas se trataron con LR a una intensidad de 10 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ durante diferentes periodos de tiempo (0, 15, 30 y 60 minutos) en el interior de la CEEM. En un segundo experimento, las semillas de guisante se sometieron a LR con una intensidad de 13 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, durante diferentes periodos de tiempo (0, 45 y 90 min) en el interior de la CEEM. Las placas Petri con semillas control (es decir, ausencia de tratamiento con LR) se envolvieron con papel de aluminio para prevenir la exposición a la LR. Después de cada tratamiento con LR, las correspondientes placas Petri fueron también envueltas en papel de aluminio para prevenir tratamientos de LR adicionales. Después de los tratamientos, las semillas se incubaron en las mismas condiciones durante 48 horas.

Finalmente, se realizaron otros experimentos con semillas de melón y de guisante empleando únicamente 50 and 100 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de LR. Después de cada tratamiento con LR, las semillas se incubaron en las mismas condiciones que en los experimentos anteriores durante 72 horas.

Después de los diferentes periodos de incubación con LR, se determinó el peso fresco y la longitud de las plántulas de melón y de guisante eliminando los cotiledones.

3.3.2. Preparación de muestras y determinación de actividades enzimáticas

En los últimos ensayos llevados a cabo con semillas de guisante y de melón se analizó si los tratamientos con LR tenían algún efecto, no solo sobre parámetros de crecimiento, sino también sobre algunos parámetros bioquímicos de las plántulas.

En este sentido, se determinó la actividad de algunas enzimas antioxidantes en las muestras vegetales. En concreto se determinó las enzimas del denominado ciclo Ascorbato-Glutatión [ascorbato peroxidasa (APX, EC1.11.1.11), monodeshidroascorbato reductasa (MDHAR, EC1.6.5.4), glutatión reductasa (GR, EC1.6.4.2)], superóxido dismutasa (SOD, EC1.15.1.1), catalasa (CAT, EC1.11.1.6) y peroxidasa (POX, EC.1.11.1.7).

Las muestras vegetales, aproximadamente 1 g por muestra, se homogenizaron, en un mortero a 4°C, en presencia de un tampón de extracción que contenía Tris-Acetato 50 mM pH 6,0, ascorbato sódico 20 mM, EDTA 0,1 mM, cisteína 2 mM y 0,2% de Tritón X-100 (Barba-Espín et al., 2012, Acosta-Motos et al., 2017). Se empleó una relación peso/volumen de 1/2, es decir, 1 g de muestra se extrajo en 2 ml del mencionado tampón. Los extractos vegetales se traspasaron a tubos eppendorf y se centrifugaron a 10000 g durante 15 minutos y a 4°C. Los sobrenadantes obtenidos se filtraron por columnas de Sephadex NAP-5 (GE Healthcare, Chicago, IL, USA) equilibradas con tampón Tris-acetato 50 mM pH 6,0, siguiendo las instrucciones del fabricante.

Las actividades enzimáticas se determinaron siguiendo protocolos normalmente empleados en el laboratorio de los Drs. José A. Hernández y Gregorio Barba (Hernández et al., 2000; Barba-Espín et al., 2010; Faize et al., 2011).

3.3.3. Análisis estadísticos

Los análisis estadísticos para los parámetros de crecimiento se realizaron con 45 semillas diferentes. Los análisis estadísticos para las enzimas antioxidantes se llevaron a cabo con 3 muestras biológicas diferentes, cada una de ellas obtenidas de placas Petri diferentes, es decir, cada repetición procedía de las 15 plántulas de cada placa. Cada experimento se repitió al menos 2 veces. Los datos se sometieron a un análisis estadístico empleando el software SPSS 20.0 (SPSS Inc., 2002, Chicago, IL, USA). Los tratamientos se sometieron a un análisis de la Varianza (ANOVA) de una vía, seguido del test de Tukey ($p \leq 0,05$).

3.4. Ensayo fisiológico II: tratamiento de raíces pilosas (RP)

3.4.1. Material vegetal y preparación de cultivos

Se usó la línea de RP denominada H43-5, proveniente de la transformación *in vitro* de segmentos de raíz de zanahoria morada (Barba-Espín et al., 2020). Previo a la realización de los experimentos, se preparó un pre-cultivo como fuente de inóculo, resultado del crecimiento de dicha línea durante 10 días en medio Murashige & Skoog ½ (2,2 g/L sales MS, 30 g/L sacarosa, 0,5 g/L MES monohidrato, pH 6,3) en condiciones de oscuridad, a 25 °C y en agitación orbital a 85 rpm (Heidolph™, Fisher Scientific, MA, EE.UU.).

Para la realización de los experimentos se utilizaron placas Petri de vidrio Pyrex® de 9 cm de diámetro (Merck & Co., Kenilworth, NJ, EE.UU.), que permite >90% de la transmisión de la luz a su través en el rango del UV-B (290-320 nm). Las placas contenían el mismo medio MS ½ utilizado anteriormente, solidificado por la adición de 7,5 g de agar/L durante su preparación. Por cada placa, se dispuso 0.4 g de RP procedente del pre-cultivo, y se incubó en una cámara de crecimiento con un fotoperiodo de 16 h ($140 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de luz blanca proporcionada por tubos fluorescentes), a 25 °C y durante 10 días para asegurar un crecimiento adecuado previo al tratamiento experimental.

3.4.2. Tratamiento de luz ultravioleta-B (UV-B)

Las placas Petri crecidas durante 10 días se sometieron a $8\text{W m}^{-2} \text{s}^{-1}$ proporcionados por un LED que emite con un pico máximo de intensidad a 310 nm. Las placas se introdujeron en la CEEM en grupos de 4, y se trataron durante 1, 10 y 45 min, resultando en dosis recibidas de 0,48, 4,8 y 21,6 kJ, respectivamente. Tras el tratamiento, las placas Petri se incubaron en las mismas condiciones de inicio (fotoperiodo de 16 h y 25 °C). Al cabo de 7 días, parte de las placas se sometieron a una segunda dosis de radiación idéntica al primer tratamiento, durante 1, 10 y 45 min, respectivamente. Todas las placas se incubaron entonces en las mismas condiciones durante 4 días más.

3.4.3. Toma de muestras, procesado y medida de pesos

Al final de este periodo (placas crecidas durante 21 días en total), las RP se extrajeron cuidadosamente del medio sólido, se lavaron con abundante agua corriente seguido de varios lavados con agua destilada y se secaron con papel de filtro. Tras la toma de fotografías y el registro del PF, las RP se trituraron en presencia de nitrógeno líquido y se recogió el material resultante en tubos Falcon de 50 mL. De cada tubo se pesó alrededor de 1,5 gramos para el cálculo de la materia seca (MS) (%), tras 48 h en una estufa a 65°C. Los tubos Falcon con el resto del material procesado se almacenaron entonces a -80 °C para posteriores análisis.

3.4.4. Extracción ácida y medida de antocianinas monoméricas totales (AMT)

La extracción de antocianinas se llevó a cabo en ácido sulfúrico al 3% en una relación 1:1 (p:p), de acuerdo a (Barba-Espin et al., 2017). El homogenado resultante se centrifugó a 4.500 rpm durante 25 min a 4 °C (Beckman Allegra 22R, CA, EEUU).

Se determinó espectrofotométricamente el contenido en AMT, basado en el método diferencial de pH con modificaciones (Barba-Espin et al., 2017). El sobrenadante resultante de la centrifugación anterior se mezcló en proporción 1:20 con cloruro potásico (KCl) 0,2 M a pH 1, se filtró mediante un filtro de celulosa 0,45 µm (Sartorius™, Fisher Scientific) para eliminar impurezas, y se midió la absorbancia a 525 y 700 nm. La medida a 700 nm nos permite discriminar la absorbancia correspondiente a otros fenoles que no sean antocianinas. La concentración de antocianinas se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Concentración de antocianinas} \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) = \frac{\Delta Abs \cdot PM \cdot FD \cdot 10^3}{\varepsilon \cdot 1} \quad (24)$$

Donde:

Abs: es la diferencia de absorbancia a 700 y 525 nm

PM: corresponde al peso molecular de la antocianina mayoritaria (cianidina-3-glucósido, 449,2 g/mol)

FD: es el factor de dilución

10^3 : es el factor de conversión de gramos a miligramos

ϵ es el coeficiente extinción molar de la cianidina-3-glucósido (26.900 L/mol cm).

Finalmente, a partir de la concentración de antocianinas por unidad de volumen del extracto (mg/L), se calculó la concentración de las mismas en función del peso, expresando los resultados como $\mu\text{g/g}$ PF, mg/g peso seco (PS) y como cantidad total por muestra ($\mu\text{g/placa}$ Petri).

3.4.5. Análisis estadístico

Se utilizaron 4 raíces pilosas (réplicas biológicas) por tratamiento, proveniente cada una de ellas de una placa Petri independiente. Cada experimento se repitió 2 veces. Los datos se sometieron a un análisis estadístico empleando el software SPSS 20.0 (SPSS Inc., 2002, Chicago, IL, USA). Los tratamientos se sometieron a un análisis de la Varianza (ANOVA) de una vía, seguido del test de Tukey ($p \leq 0,05$).

La Figura 3.37 muestra esquemáticamente los ensayos fisiológicos realizados en la presente Tesis Doctoral haciendo uso de la CEEM.

Figura 3.37 Esquema del tratamiento en la cámara experimental de espectro modulable (CEEM) de las raíces pilosas y las semillas de guisante y melón, la posterior toma de muestras y análisis bioquímicos realizados.

4. Capítulo IV. Resultados

4.1. Integración de la cámara experimental

La integración de todas las partes hardware y software (Figura 4.1) se realizó siguiendo la estructura Fog Computing (Lai et al., 2019) que actualmente está siendo empleada para reducir la dependencia de acceso a internet de forma continua disponiendo de la información offline en un menor tiempo de conexión de los dispositivos conectados en el IoT. En primer lugar, se montó el chasis y se ubicaron en su interior los diferentes sensores que se conectaron a la ACU, también se montó en su interior la luminaria con LEDs R que se conectó directamente a la Raspberry Pi (Figura 4.1).

Figura 4.1 Flujograma de operación de la cámara experimental para el desarrollo de los experimentos en el espectro rojo basado en una estructura Fog Computing.

Por otro lado, la ACU se conectó a la Raspberry Pi, a través de un cable de comunicación serie USB. El monitor táctil se conectó a la Raspberry, a través de un cable

HDMI. Además, en la Raspberry Pi se instalaron, configuraron y programaron una serie de elementos necesarios para llevar a cabo la automatización del proceso (Figura 4.2A). Finalmente, todo quedó conectado a una red local y pública desde la que el usuario puede acceder a los datos en tiempo real (Grindstaff et al., 2019). Con este desarrollo se pudieron realizar radiaciones de luz simultáneamente sobre 6 placas de Petri (Solano et.al, 2020). Se puede observar en la Figura 4.2B el aspecto real de la integración de la ACU con la Raspberry Pi formando la Unidad de Control (UC) del sistema y el conjunto de la CEEM y la UC se instaló y se puso en funcionamiento en el laboratorio del CEBAS-CSIC para la realización de los ensayos (Figura 4.3).

A)

B)

Figura 4.2 A) Arquitectura interna de la integración de la unidad de control en el sistema B)
Integración de la Unidad de Control.

Figura 4.3 *La CEEM y la UC instalada en el laboratorio del CEBAS-CSIC durante la realización de los ensayos.*

Finalmente, como resultado de la investigación se realizaron unos ajustes que llevaron a la siguiente configuración de la CEEM (Figura 4.4) manteniendo la estructura anterior, salvo la luminaria que fue reemplazada por una con múltiples LEDs que iban desde el espectro UV-B hasta el RL.

Figura 4.4 Flujograma de operación de la cámara experimental de espectro modulable basado en una estructura Fog Computing.

La interfaz hombre-máquina o *dashboard* táctil quedó como se muestra en la Figura 4.5A, donde se puede observar la lectura gráfica de los niveles de temperatura, humedad, iluminación y PAR con 10 LEDs R encendidos. En la Figura 4.5B se muestra la interfaz gráfica cuando el sistema está apagado, y en la Figura 4.5.C se muestra la lectura gráfica de los niveles de temperatura, humedad, iluminación, PAR y UV cuando los LEDs R y UV están encendidos simultáneamente. Se puede observar cómo desde este panel de control se puede realizar un control del encendido y apagado manual de los diferentes espectros lumínicos. En la Tabla 4.1 se puede observar la relación de entradas / salidas empleadas entre la Raspberry Pi y Arduino, y en la Figura 4.6 se puede ver el esquema de conexionado de las salidas de Arduino con los dispositivos electrónicos que se encuentran en la CEEM. El consumo total por dispositivos electrónicos se puede ver en la Tabla 4.2.

A)

B)

C)

Figura 4.5 Interfaz gráfica hombre-máquina mostrada en la pantalla táctil de la Unidad de Control del Sistema A) Versión inicial para la realización del experimento de melón y guisante B) Versión mejorada C) Versión mejorada mostrando valores y estado de sensores e interruptores.

Tabla 4.1 Relación de entradas / salidas virtuales y físicas empleadas entre la Raspberry Pi y Arduino.

RASPBERRY PI			ARDUINO		
Node-RED Dirección física Virtual de la Entrada	Salidas Digitales	Entradas Digitales	Salidas Digitales a Relé	Entradas Analógicas	Dispositivo
7	04	08	2		Luz roja
11	17	09	3		Luz verde
12	18	10	4		Luz azul
13	27	11	5		Luz blanca
15	22	12	6		Luz roja lejana
16	23	13	7		Luz UV-B
-				A0	Sensor DHT22 (T ^a y Hr%)
-				A4	(SDA) Sensor TSL2591 (lux)
				A5	(SCL) Sensor TSL2591 (lux)

Figura 4.6 Esquema de conexionado de las salidas de Arduino con los dispositivos electrónicos que se encuentran en la CEEM.

Tabla 4.2 Distribución de Potencias de cada dispositivo electrónico del sistema.

Dispositivo electrónico	Potencia (w)
Raspberry Pi 4	15
Arduino Uno	9,6
LED rojo	0,75
LED azul	0,99
LED verde	1,12
LED rojo lejano	0,68
LED blanco	1,96
LED UV-B	2,97
Celda Peltier	60

Dispositivo electrónico	Potencia (W)
Celda Peltier	60
Celda Peltier	60
Celda Peltier	60
Ventilador	2,2
Ventilador	2,2
Monitor táctil	12
Sensor PAR	0,30
Sensor UV	0,30
Sensor TSL2591	0,5
Sensor DHT22	0,013

Consumo total del sistema sin climatizador = 51 Watios; consumo total del sistema con climatizador= 300 Watios.

4.2. Evaluación de la Cámara experimental: toma de medidas y determinaciones teóricas

4.2.1. MATLAB

El Matlab es un sistema de cómputo numérico que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M), empleado actualmente para el diseño de modelos de inteligencia artificial y sistemas dirigidos por inteligencia artificial (<https://es.mathworks.com/>). En la presente Tesis Doctoral se ha empleado Matlab para obtener una serie de representaciones gráficas de los datos en 2D y 3D.

El procedimiento utilizado consistió en realizar una serie de tablas con mediciones en diferentes puntos de la superficie de la cámara con el sensor PAR para cada una de las luminarias LED, para posteriormente representar gráficamente su distribución sobre la superficie para cada uno de los espectros lumínicos rojo, verde, azul, blanco en función de su número de LEDs.

Para poder obtener una representación gráfica de estos datos en 2D y 3D en Matlab es necesario convertir estos valores numéricos en vectores, como se verá más adelante en la parte de código de programación en lenguaje M.

4.2.1.1. Distribución espacial de la radiación fotosintéticamente activa (PAR)

A continuación, se representó el nivel de radiación fotosintéticamente activa (PAR) en la superficie interior de la cámara experimental de espectro modulable para cada uno de los espectros de iluminación.

4.2.1.1.1. Distribución espacial del nivel PAR para el espectro de luz roja

A continuación, se detalla cómo se obtuvo el nivel de PAR en la superficie para el espectro de luz roja, para lo que se siguió el siguiente procedimiento:

En primer lugar se marcaron una serie de puntos con coordenadas (x,y) en la superficie interior de la cámara (Solano et.al, 2020). A continuación, se realizó un montaje de una luminaria compuesta por 10 LEDs R con una óptica de 120° por LED. Finalmente, se registró en cada una de las coordenadas (x,y) el nivel de PAR (Tabla 4.3).

Una vez registrado el nivel de PAR en cada uno de los puntos para dicha luminaria anterior, se continuó con el mismo proceso para una luminaria compuesta por 5 LEDs R con una óptica de 120° por LED y finalmente se realizó el mismo proceso para una luminaria compuesta por 1 LED R con una óptica de 16°. Los valores registrados para ambas luminarias se pueden consultar en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3 Nivel PAR del espectro de luz roja sobre la superficie de la CEEM en función del número de LEDs.

Coordenadas X (mm)	Coordenadas Y (mm)	1 LED	5 LEDs	10 LEDs
		($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
65	285	2,8	40,7	79,7
138	285	3,4	49,5	97,5
244	285	4,3	54,2	104
350	285	2,8	46,4	86
423	285	2,4	39,7	75,6
112	226	3,6	46,2	91,9

Coordenadas X (mm)	Coordenadas Y (mm)	1 LED ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	5 LEDs ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	10 LEDs ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
192	226	11,6	52,5	104,6
296	226	8,5	52,9	104,1
376	226	2,7	44,5	84,3
65	168	3,2	45,4	89,4
138	168	9,3	51,1	100,9
244	168	101,6	55	110
350	168	5,3	46,7	97,1
423	168	2,6	42,3	79,6
112	109	4	45,4	94,2
192	109	21,4	54	110,6
296	109	10,8	51,9	107,6
376	109	3,1	43,6	90,1
65	48	3,1	40,1	83,4
138	48	3,9	46,6	95,8
244	48	6	51,3	108,4
350	48	3,5	44,1	93,1
423	48	2,8	36,8	77

4.2.1.1.1.1 Código M para la representación gráfica en 2D y 3D del nivel PAR de luz roja.

A continuación, se muestra una serie de líneas de programación encargadas de importar los valores numéricos de la Tabla 4.3 para transformarlos en vectores a partir del lenguaje de programación M de Matlab, para finalmente obtener una representación en 2D y 3D de los valores numéricos (Figura 4.7).

Se crea el vector de coordenadas de posición X

```
x=TablaRed(:,1);
```

```
x1 = table2array(x);
```

```
x=x1;
```

Se crea el vector de coordenadas de posición Y

```
y=TablaRed(:,2);
```

```
y1 = table2array(y);
```

```
y=y1;
```

Se crea el vector de $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ para 1 LED 16°

```
z1LED=TablaRed(:,3);
```

```
z1 = table2array(z1LED);
```

```
z1LED=z1;
```

Se crea el vector de $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ para 5 LEDs 120°

```
z5LEDs=TablaRed(:,4);
```

```
z1 = table2array(z5LEDs);
```

```
z5LEDs=z1;
```

Se Crea el vector de $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ para 10 LEDs 120°

```
z10LEDs=TablaRed(:,5);
```

```
z1 = table2array(z10LEDs);
```

```
z10LEDs=z1;
```

Se crea Figura para 1 LED 16°

```
figure(1);
```

```
[xq,yq]=meshgrid(0:1:500,0:1:300);
```

```
vq=griddata(x,y,z1LED,xq,yq);
```

```
mesh(xq,yq,vq);
```

```
holdon;
```

```
plot3(x,y,z1LED,'o');
```

```
xlim([0 500]);
```

```
ylim([0 300]);
```

```
view(2);
```

```
holdon
```

Se crea Figura para 5 LEDs 120°

```
figure(2);
[xq,yq]=meshgrid(0:1:500,0:1:300);
vq=griddata(x,y,z5LEDs,xq,yq);
mesh(xq,yq,vq);
holdon;
plot3(x,y,z5LEDs,'o');
xlim([0 500]);
ylim([0 300]);
view(2);
holdon
```

Se crea Figura para 10 LEDs 120°

```
figure(3);
[xq,yq]=meshgrid(0:1:500,0:1:300);
vq=griddata(x,y,z10LEDs,xq,yq);
mesh(xq,yq,vq);
holdon;
plot3(x,y,z10LEDs,'o');
xlim([0 500]);
ylim([0 300]);
view(2);
```

Se crea Figura 3D

```
figure(1);
[xq,yq]=meshgrid(0:1:500,0:1:300);
vq=griddata(x,y,z1LED,xq,yq);
mesh(xq,yq,vq);
holdon;
[xq,yq]=meshgrid(0:1:500,0:1:300);
```

```
vq=griddata(x,y,z5LEDs,xq,yq);
mesh(xq,yq,vq);
holdon;
[xq,yq]=meshgrid(0:1:500,0:1:300);
vq=griddata(x,y,z10LEDs,xq,yq);
mesh(xq,yq,vq);
holdon;
```

Figura 4.7 Distribución espacial de la radiación fotosintéticamente activa (PAR, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) en la superficie interior de la CEEM para las luminarias con 1 (A), 5 (B) y 10 (C) LED R. La imagen (D) representa el montaje en 3D de las 3 luminarias.

4.2.1.1.1.2 Distribución espacial del nivel PAR para el espectro de luz azul

Para obtener el nivel de PAR en la superficie para el espectro de luz azul, se siguió el siguiente procedimiento:

Primero se marcaron una serie de puntos con coordenadas (x,y) en la superficie interior de la cámara. En segundo lugar, se realizó un montaje de una luminaria compuesta por 10 LEDs A con una óptica de 120° por LED. Finalmente, se registró en cada una de las coordenadas (x,y) el nivel de PAR como se puede ver en la Tabla 4.4.

Una vez registrado el nivel de PAR en cada uno de los puntos para dicha luminaria anterior, se continuó con el mismo proceso para una luminaria compuesta por 5 LEDs A con una óptica de 120° por LED. Finalmente, se realizó el mismo proceso para una luminaria compuesta por 1 LED A con una óptica de 16°. Los valores registrados para ambas luminarias se pueden ver en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4 Nivel PAR del espectro de luz azul sobre la superficie de la CEEM en función del número de LEDs.

Coordenadas X (mm)	Coordenadas Y (mm)	1 LED	5 LEDs	10 LEDs
		($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
65	285	1,1	26,4	62,9
138	285	1,6	37,9	81,9
244	285	2	45,1	74,2
350	285	1,2	41,5	86
423	285	1	34,2	70,3
112	226	1,4	34,7	79,4
192	226	7,5	46,5	98,3
296	226	6,2	49,9	103,8
376	226	1,2	40	86,3
65	168	1,3	33,2	76
138	168	4,8	39,5	88,9
244	168	86,5	50,4	108,1
350	168	3,2	45,1	97,8
423	168	1,2	34,6	83,2

Coordenadas X (mm)	Coordenadas Y (mm)	1 LED ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	5 LEDs ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	10 LEDs ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
112	109	1,8	32,1	76,1
192	109	17,9	43	96,9
296	109	11,6	46,3	105
376	109	1,6	34,8	89,5
65	48	1,1	28,6	67,5
138	48	2	33,7	78,6
244	48	5,2	43,5	97,4
350	48	1,8	38	86,8
423	48	1,1	27,6	74,8

4.2.1.1.1.3 Código M para la representación gráfica en 2D y 3D del nivel PAR de Luz

Azul.

Las líneas de programación encargadas de importar los valores numéricos de la Tabla 4.4 y transformarlos en vectores a partir del lenguaje de programación M de Matlab, para finalmente obtener una representación en 2D y 3D de los valores numéricos (Figura 4.8) son las mismas líneas de código empleadas para luz R. Únicamente se ha de cambiar el parámetro de la Tabla 4.3 por los de la Tabla 4.4.

Figura 4.8 Distribución espacial de la radiación fotosintéticamente activa (PAR, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) en la superficie interior de la CEEM para las luminarias con 1 (A), 5 (B) y 10 (C) LED A. La imagen (D) representa el montaje en 3D de las 3 luminarias.

4.2.1.1.1.4 Distribución espacial del nivel PAR para el espectro de luz verde

A continuación, se detalla cómo se obtuvo el nivel de PAR en la superficie para el espectro de luz verde, para lo que se siguió el siguiente procedimiento:

Primero se marcaron una serie de puntos con coordenadas (x,y) en la superficie interior de la cámara. A continuación, se realizó un montaje de una luminaria compuesta por 10 LEDs V con una óptica de 80° por LED. Finalmente, se registró en cada una de las coordenadas (x,y) el nivel de PAR como se puede ver en la Tabla 4.5.

Una vez registrado el nivel de PAR en cada uno de los puntos para dicha luminaria anterior, se continuó con el mismo proceso para una luminaria compuesta por 5 LEDs V con una óptica de 80° por LED y finalmente se realizó el mismo proceso para una luminaria

compuesta por 1 LED V con una óptica de 16° con los valores registrados para ambas luminarias (Tabla 4.5).

Tabla 4.5 Nivel PAR del espectro de luz verde sobre la superficie de la CEEM en función del número de LEDs

Coordenadas X (mm)	Coordenadas Y (mm)	1 LED	5 LEDs	10 LEDs
		($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
65	285	2,8	37,9	80
138	285	5,7	55,3	116,5
244	285	10,8	59,8	142,7
350	285	4,4	43	115,6
423	285	2,2	28,4	88,4
112	226	5,1	59,4	118,9
192	226	23,2	79	173,1
296	226	28,4	70,2	183
376	226	3,8	42,6	124,7
65	168	3,4	51,6	102,3
138	168	12,7	76,1	155,2
244	168	153,7	85,6	203,2
350	168	15,8	58	163
423	168	2,7	34,3	112,8
112	109	4,8	57,7	113,8
192	109	20,9	76,4	162,4
296	109	24,4	65,3	176,1
376	109	3,1	36,3	116,3
65	48	2,3	40,7	82,8
138	48	4	53,3	110,7
244	48	9,1	52	134,3

Coordenadas X (mm)	Coordenadas Y (mm)	1 LED ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	5 LEDs ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	10 LEDs ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)
350	48	3	40	107,7
423	48	1,8	26,2	80

4.2.1.1.1.5 Código M para la representación gráfica en 2D y 3D del nivel PAR de Luz Verde.

Las líneas de programación encargadas de importar los valores numéricos de la Tabla 4.5 y transformarlos en vectores a partir del lenguaje de programación M de Matlab, para finalmente obtener una representación en 2D y 3D de los valores numéricos (Figura 4.9). Son las mismas líneas de código empleadas para luz R. Únicamente se ha de cambiar el parámetro de la Tabla 4.3 por los de la Tabla 4.5.

Figura 4.9 Distribución espacial de la radiación fotosintéticamente activa (PAR, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) en la superficie interior de la CEEM para las luminarias 1 (A), 5 (B) y 10 (C) LED V. La imagen (D) representa el montaje en 3D de las 3 luminarias.

4.2.1.1.1.6 Distribución espacial del nivel PAR para el espectro de luz blanca

A continuación, se detalla cómo se obtuvo el nivel de PAR en la superficie para el espectro de luz blanca, para lo que se siguió el siguiente procedimiento:

Primero se marcaron una serie de puntos con coordenadas (x,y) en la superficie interior de la cámara. A continuación, se realizó un montaje de una luminaria compuesta por 10 LEDs B con una óptica de 120° por LED. Por último, se registró en cada una de las coordenadas (x,y) el nivel de PAR como se puede ver en la Tabla 4.6

Una vez registrado el nivel de PAR en cada uno de los puntos para dicha luminaria anterior, se continuó con el mismo proceso para una luminaria compuesta por 5 LEDs B con una óptica de 120° por LED y finalmente se realizó el mismo proceso para una luminaria

compuesta por 1 LED B con una óptica de 16° con los valores registrados para ambas luminarias se pueden ver en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6 Nivel PAR del espectro de luz blanca sobre la superficie de la CEEM en función del número de LEDs.

Coordenadas X (mm)	Coordenadas Y (mm)	1 LED	5 LEDs	10 LEDs
		($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
65	285	1,8	39,6	94,5
138	285	3,2	50,6	120,2
244	285	4,7	50,4	134,4
350	285	2,9	43,7	114,8
423	285	1,8	35,9	94,4
112	226	3,3	51,8	117,9
192	226	12,2	61,3	149,3
296	226	12,3	60,1	153,4
376	226	3,2	44,9	114,4
65	168	2,6	51,8	116,7
138	168	8,9	61,4	141,1
244	168	65,3	69,8	213
350	168	8,5	51,2	153,4
423	168	2,6	44,2	114,5
112	109	3,5	51,4	121,4
192	109	15,3	65,5	188,4
296	109	10,9	59,2	183,6
376	109	3,1	47,8	151,2
65	48	2	44,6	128,7
138	48	3,6	51,8	146,3
244	48	5,6	57,7	171,8

Coordenadas X (mm)	Coordenadas Y (mm)	1 LED	5 LEDs	10 LEDs
		($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
350	48	2,7	48,2	142
423	48	1,7	37	109,9

4.2.1.1.1.7 Código M para la representación gráfica en 2D y 3D del nivel PAR de luz blanca.

Las líneas de programación encargadas de importar los valores numéricos de la Tabla 4.6 y transformarlos en vectores a partir del lenguaje de programación M de Matlab, para finalmente obtener una representación en 2D y 3D de los valores numéricos (Figura 4.10). Son las mismas líneas de código empleadas para luz roja. Únicamente se ha de cambiar el parámetro de la Tabla 4.3 por los de la Tabla 4.6.

Figura 4.10 Distribución espacial de la radiación fotosintéticamente activa (PAR, $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) en la superficie interior de la CEEM para las luminarias 1 (A), 5 (B) y 10 (C) LED B. La imagen (D) representa el montaje en 3D de las 3 luminarias.

4.2.2. Estimación matemática del factor de interconversión de lux a $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de la luminaria experimental

Otro avance dentro de esta investigación ha sido obtener el factor de interconversión de Unidades fotónicas a unidades fotométricas de la luminaria experimental aplicando el procedimiento de interconversión (Thimijan et al., 1983) y el modelo matemático que se describe abajo, se obtuvo el factor específico para cada una de las luminarias experimentales LED (Biggs, 1986). Gracias a este factor solamente se necesita emplear un sensor de iluminancia (lux) en el interior de la CEEM, la información transmitida por el sensor TSL2561 a la unidad Arduino, la cuál será la encargada de aplicar el factor de conversión de lux a $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ como más adelante se detalla.

Para la obtención del factor de conversión de lux a $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ será necesario conocer la fotometría de la luminaria LED empleada. Para ello se hará uso de las fotometrías obtenidas en la esfera de integración de Ulbricht.

Para convertir las unidades de fotones ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 400-700 nm) en unidades fotométricas (lux, 400-700 nm), se utilizó el procedimiento descrito por Biggs (1986). Según este autor:

El rango de 400-700 nm se divide en intervalos 'i' de igual espaciado de longitud de onda $\Delta\lambda$. Se determinó la longitud de onda central (λ_i) de cada intervalo.

Luego, la relación entre la unidad fotométrica (lux) y las unidades de fotones ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) se estimó mediante la siguiente ecuación:

$$\text{lux} = 8.17 \times 10^4 (R) \frac{\sum_i y_{\lambda_i} N_{\lambda_i}}{\sum_i \lambda_i N_{\lambda_i}} \quad (25)$$

Donde y_{λ_i} es el coeficiente de luminosidad de la fuente de luz específica, medido en un intervalo de longitud de onda definido por λ_i y $\Delta\lambda$.

En su artículo, Biggs utilizó los siguientes parámetros:

$i=1 \text{ to } 31$

$\Delta\lambda = 10 \text{ nm}$

$\lambda_1 = 400, \lambda_2 = 410, \lambda_3 = 420 \dots \lambda_{31} = 700$

$N_{\lambda} = 1 \text{ for all wavelengths}$

$y_{\lambda_1} = 0.0004, y_{\lambda_2} = 0.0012, y_{\lambda_3} = 0.004 \dots y_{\lambda_{31}} = 0.0041$

Según esta estimación, por ejemplo, una medida obtenida por un sensor de iluminancia (TSL2561) de 1000 lux (1 klux) puede estimarse automáticamente a un valor de 96,71 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, lo que significa que el uso del sensor PAR podría eliminarse para reducir los costos de monitoreo de sensores.

4.2.2.1. Factor de interconversión de lux a $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ para LEDs rojos

En la investigación desarrollada, se mejoró la estimación de Biggs porque se utilizó una esfera de Ulbrich capaz de dar mediciones de luminosidad con un $\Delta\lambda$ de 2 nm en lugar de 10 nm. Luego, suponiendo una curva de distribución espectral plana de la luminaria

experimental de LEDs R en el rango de 400 – 700 nm (irradiancia espectral igual en el rango de 400 – 700 nm) se aplicaron los siguientes parámetros:

$$i = 1 \text{ to } 151$$

$$\Delta\lambda = 2 \text{ nm}$$

$$\lambda_1 = 400, \lambda_2 = 402, \lambda_3 = 404 \dots \lambda_{151} = 700$$

$$N_{\lambda} = 1 \text{ for all wavelengths}$$

$$y_{\lambda 1} = 0, \dots y_{\lambda 120} = 0.1182, \dots, y_{\lambda 128} = 0.5611, \dots, y_{\lambda 131} = 1, y_{\lambda 132} = 0.8747, y_{\lambda 134} = 0.4669, \dots, y_{\lambda 151} = 0$$

$$\text{lux} = 8.17 \times 10^4 (R) \frac{\sum_i y_{\lambda_i}}{\sum_i \lambda_i} \quad (26)$$

$$\text{lux} = 10,34 \times R \quad (27)$$

$$R = \frac{\text{lux}}{10,34} \quad (28)$$

Donde R son $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$

Por ejemplo, para 1000 lux = 1 klux = 96,71 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$

4.2.2.2. Factor de interconversión de lux a $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ para LEDs azules

Se realizó el mismo proceso empleado para la obtención del factor de interconversión de lux a $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ descrito anteriormente:

$$i = 1 \text{ to } 151$$

$$\Delta\lambda = 2 \text{ nm}$$

$$\lambda_1 = 400, \lambda_2 = 402, \lambda_3 = 404 \dots \lambda_{151} = 700$$

$$N_{\lambda} = 1 \text{ for all wavelengths}$$

$$y_{\lambda 1} = 0.005, \dots y_{\lambda 21} = 0.4496, \dots, y_{\lambda 26} = 1, \dots, y_{\lambda 29} = 0.9244, y_{\lambda 34} = 0.2863, y_{\lambda 38} = 0.125, \dots, y_{\lambda 151} = 0$$

$$\text{lux} = 8.17 \times 10^4 (R) \frac{\sum_i y_{\lambda_i}}{\sum_i \lambda_i} \quad (29)$$

$$\text{lux} = 11,85 \times R \quad (30)$$

$$R = \frac{\text{lux}}{11,85} \quad (31)$$

Donde R son $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

Por ejemplo, para 1000 lux = 1 klux = 84,39 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

4.2.2.3. Factor de interconversión de lux a $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ para LEDs verdes

Se realizó el mismo proceso empleado para la obtención del factor de interconversión de lux a $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ descrito anteriormente:

$i = 1 \text{ to } 151$

$\Delta\lambda = 2 \text{ nm}$

$\lambda_1 = 400, \lambda_2 = 402, \lambda_3 = 404 \dots \lambda_{151} = 700$

$N_\lambda = 1 \text{ for all wavelengths}$

$y_{\lambda 1} = 0, \dots y_{\lambda 120} = 0.1182, \dots, y_{\lambda 128} = 0.5611, \dots, y_{\lambda 131} = 1, y_{\lambda 132} = 0.8747, y_{\lambda 134} = 0.4669, \dots, y_{\lambda 151} = 0$

$$\text{lux} = 8.17 \times 10^4 (R) \frac{\sum_i y_{\lambda_i}}{\sum_i \lambda_i} \quad (32)$$

$$\text{lux} = 10,34 \times R \quad (33)$$

$$R = \frac{\text{lux}}{10,34} \quad (34)$$

Donde R son $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

Por ejemplo, para 1000 lux = 1 klux = 96,71 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

4.2.2.4. Factor de interconversión de lux a $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ para LEDs blancos

Se realizó el mismo proceso empleado para la obtención del factor de interconversión de lux a $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ descrito anteriormente:

$i = 1 \text{ to } 151$

$\Delta\lambda = 2 \text{ nm}$

$\lambda_1 = 400, \lambda_2 = 402, \lambda_3 = 404 \dots \lambda_{151} = 700$

$N_{\lambda} = 1$ for all wavelengths

$y_{\lambda 1} = 0,0079, \dots y_{\lambda 12} = 0.1095, \dots, y_{\lambda 19} = 0.5776, \dots, y_{\lambda 23} = 1, y_{\lambda 60} = 0.5901, y_{\lambda 110} = 1, \dots, y_{\lambda 151} = 0.3117$

$$\text{lux} = 8.17 \times 10^4 (R) \frac{\sum_i y_{\lambda_i}}{\sum_i \lambda_i} \quad (35)$$

$$\text{lux} = 94,58 \times R \quad (36)$$

$$R = \frac{\text{lux}}{94,58} \quad (37)$$

Donde R son $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

Por ejemplo, para 1000 lux = 1 klux = $10,57 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

4.2.2.5. Factor de interconversión de lux a $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ para LEDs rojo lejano

Se realizó el mismo proceso empleado para la obtención del factor de interconversión de lux a $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ descrito anteriormente:

$i = 1 \text{ to } 151$

$\Delta\lambda = 2 \text{ nm}$

$\lambda_1 = 400, \lambda_2 = 402, \lambda_3 = 404 \dots \lambda_{151} = 700$

$N_{\lambda} = 1$ for all wavelengths

$y_{\lambda 1} = 0, \dots y_{\lambda 110} = 0.5719, \dots, y_{\lambda 114} = 1, \dots, y_{\lambda 118} = 0.4489, y_{\lambda 132} = 0.0093, y_{\lambda 134} = 0.0058, \dots, y_{\lambda 151} = 0.001$

$$\text{lux} = 8.17 \times 10^4 (R) \frac{\sum_i y_{\lambda_i}}{\sum_i \lambda_i} \quad (38)$$

$$\text{lux} = 10,19 \times R \quad (39)$$

$$R = \frac{\text{lux}}{10,19} \quad (40)$$

Donde R son $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

Por ejemplo, para 1000 lux = 1 klux = $98,07 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

4.2.3. Relux

Relux es un software de cálculo profesional luminotécnico (Relux Informatik AG, Switzerland) que permite realizar cálculos y simulaciones de luminarias comerciales y prototipos tanto en instalaciones de interior como de exterior. A partir de este software se realizaron varios cálculos y simulaciones de la distribución e intensidad de la luz en la superficie de la CEEM previos a la fabricación de la cámara para cada uno de los espectros, a partir de las fotometrías electrónicas disponibles en la página del fabricante de los LEDs se muestran los resultados obtenidos para diferentes configuraciones según el nº de LEDs para cada uno de los espectros (Figura 4.11).

E)

F)

G)

H)

I)

J)

K)

L)

M)

N)

Ñ)

O)

P)

Q)

R)

S)

T)

U)

Figura 4.11 Distribución 3D de la luz en el interior de la CEEM y valores de iluminancia (lux)máximo, mínimo, medio e índices de uniformidad en la superficie de la CEEM en función del número y tipo de LEDs para (A)1 LED rojo (B) valores de iluminancia para (A), (C) 5 LEDs rojos (D) Valores de iluminancia para (C), (E) 10 LEDs rojos (F) Valores de iluminancia para (E), (G) 1 LED azul (H) Valores de iluminancia para (G), (I) 5 LEDs azules(J) Valores de iluminancia para (I), (K) 10 LEDs azules (L) Valores de iluminancia para (K), (M) 1 LED verde (N) Valores de iluminancia para (M), (Ñ) 5 LEDs verdes (O) Valores de iluminancia para (Ñ), (P) 10 LEDs verdes (Q) Valores de iluminancia para (P), (R) 1 LED blanco (S) Valores de iluminancia para (R), (T) 5 LEDs blancos (U) Valores de iluminancia para (T), (V) 10 LEDs blancos (W) Valores de iluminancia para (V)

4.3. Ensayos luminarias experimentales LEDs en la esfera de Ulbricht

La esfera de Ulbricht va equipada con un software técnico HPLED propio del fabricante para el procesamiento y registro de la información proveniente de la fuente de luz. Para cada una de las luminarias experimentales LED se ha obtenido un informe (Anexo)

4.3.1. Ensayo luminaria experimental con 10 LEDs rojos con óptica de 120° en la esfera de Ulbricht

En la Figura 4.12 se muestra la información procesada y registrada por el software de cálculo HPLED proveniente de la esfera, durante el ensayo de la luminaria experimental con 10 LEDs R con óptica de 120°. En la Figura 4.13A se muestra la instalación, calibración (Figura 4.13B) y toma de datos (Figura 4.13C) de la luminaria en la esfera de Ulbricht.

Figura 4.12 Captura de pantalla del programa de cálculo luminotécnico HPLED durante el ensayo de la luminaria experimental de 10 LEDs rojos con óptica de 120° en la esfera de Ulbricht.

Figura 4.13 A) Instalación de la luminaria experimental con 10 LEDs rojos con óptica de 120° en el interior de la esfera de Ulbricht B) Encendido y calibración de la luminaria en el interior de la esfera de Ulbricht C) Esfera de Ulbricht cerrada para la toma de datos con el programa de cálculo HPLED. (Cifra import, Murcia, España).

4.3.2. Ensayo con una luminaria experimental compuesta por 10 LEDs rojos y una óptica de 16° en la esfera de Ulbricht

En la Figura 4.14 se muestra la información procesada y registrada por el software de cálculo HPLED proveniente de la esfera, durante el ensayo de la luminaria experimental con 10 LEDs R con óptica de 16° . En la Figura 4.15A se muestra la instalación, calibración (Figura 4.15B) y toma de datos (Figura 4.15C) de la luminaria en la esfera de Ulbricht.

Figura 4.14 Captura de pantalla del programa de cálculo luminotécnico HPLED durante el ensayo de la luminaria experimental de 10 LEDs rojos con óptica de 16° en la esfera de Ulbricht.

Figura 4.15 A) Instalación de la luminaria experimental con 10 LEDs rojos con óptica de 16° en el interior de la esfera de Ulbricht B) Encendido y calibración de la luminaria en el interior de la esfera de Ulbricht C) Esfera de Ulbricht cerrada para la toma de datos con el programa de cálculo HPLED. (Cifra import, Murcia, España).

4.3.3. Ensayo con una luminaria experimental compuesta por 10 LEDs azules y una óptica de 16° en la esfera de Ulbricht

En la Figura 4.16 se muestra la información procesada y registrada por el software de cálculo HPLED proveniente de la esfera, durante el ensayo de la luminaria experimental con 10 LEDs A con óptica de 16° . En la Figura 4.17A se muestra la instalación, calibración (Figura 4.17B) y toma de datos (Figura 4.17C) de la luminaria en la esfera de Ulbricht.

Figura 4.16 Captura de pantalla del programa de cálculo luminotécnico HPLED durante el ensayo de la luminaria experimental de 10 LEDs azules con óptica de 16° en la esfera de Ulbricht.

Figura 4.17 A) Instalación de la luminaria experimental con 10 LEDs azules con óptica de 16° en el interior de la esfera de Ulbricht B) Encendido y calibración de la luminaria en el interior de la esfera de Ulbricht C) Esfera de Ulbricht cerrada para la toma de datos con el programa de cálculo HPLED. (Cifra import, Murcia, España).

4.3.4. Ensayo con una luminaria experimental compuesta por 10 LEDs verdes y una óptica de 16° en la esfera de Ulbricht

En la Figura 4.18 se muestra la información procesada y registrada por el software de cálculo HPLED proveniente de la esfera, durante el ensayo de la luminaria experimental con 10 LEDs V con óptica de 16° . En la Figura 4.19A se muestra la instalación, calibración (Figura 4.19B) y toma de datos (Figura 4.19C) de la luminaria en la esfera de Ulbricht.

Figura 4.18 Captura de pantalla del programa de cálculo luminotécnico HPLED durante el ensayo de la luminaria experimental de 10 LEDs verdes con óptica de 16° en la esfera de Ulbricht.

Figura 4.19 A) Instalación de la luminaria experimental con 10 LEDs verdes con óptica de 16° en el interior de la esfera de Ulbricht B) Encendido y calibración de la luminaria en el interior de la esfera de Ulbricht C) Esfera de Ulbricht cerrada para la toma de datos con el programa de cálculo HPLED. (Cifra import, Murcia, España).

4.3.5. Ensayo con una luminaria experimental compuesta por 10 LEDs blancos y una óptica de 16° en la esfera de Ulbricht

En la Figura 4.20 se muestra la información procesada y registrada por el software de cálculo HPLED proveniente de la esfera, durante el ensayo de la luminaria experimental con 10 LEDs B con óptica de 16° . En la Figura 4.21A se muestra la instalación, calibración (Figura 4.21B) y toma de datos (Figura 4.21C) de la luminaria en la esfera de Ulbricht.

Figura 4.20 Captura de pantalla del programa de cálculo luminotécnico HPLED durante el ensayo de la luminaria experimental de 10 LEDs blancos con óptica de 16° en la esfera de Ulbricht.

Figura 4.21 A) Instalación de la luminaria experimental con 10 LEDs blancos con óptica de 16° en el interior de la esfera de Ulbricht B) Encendido y calibración de la luminaria en el interior de la esfera de Ulbricht C) Esfera de Ulbricht cerrada para la toma de datos con el programa de cálculo HPLED. (Cifra import, Murcia, España).

4.3.6. Ensayo con una luminaria experimental compuesta por 10 LEDs rojo lejano y una óptica de 16° en la esfera de Ulbricht

En la Figura 4.22 se muestra la información procesada y registrada por el software de cálculo HPLED proveniente de la esfera, durante el ensayo de la luminaria experimental con 10 LEDs RL con óptica de 16° . En la Figura 4.23A se muestra la instalación, calibración (Figura 4.23B) y toma de datos (Figura 4.23C) de la luminaria en la esfera de Ulbricht.

Figura 4.22 Captura de pantalla del programa de cálculo luminotécnico HPLED durante el ensayo de la luminaria experimental de 10 LEDs rojo lejano con óptica de 16° en la esfera de Ulbricht.

Figura 4.23 A) *Instalación de la luminaria experimental con 10 LEDs rojo lejano con óptica de 16° en el interior de la esfera de Ulbricht* B) *Encendido y calibración de la luminaria en el interior de la esfera de Ulbricht* C) *Esfera de Ulbricht cerrada para la toma de datos con el programa de cálculo HPLED. (Cifra import, Murcia, España).*

4.3.7. Ensayo luminaria experimental con 4 LEDs UV-B con óptica de 120° en la esfera de Ulbricht

No se han obtenido los parámetros fotométricos de la luminaria debido a que la esfera de Ulbricht empleada mide en el rango de los 380 – 780 nm y la radiación UV-B se encuentra entorno a los 280 – 320 nm quedándose fuera del rango de medida del equipo.

4.3.8. Ensayo luminaria experimental de espectro modulable con óptica de 16° en la esfera de Ulbricht

En la Figura 4.24 se muestra la información procesada y registrada por el software de cálculo HPLED proveniente de la esfera, durante el ensayo de la luminaria experimental de espectro modulable con óptica de 16°. En la Figura 4.25A se muestra la instalación, calibración (Figura 4.25B) y toma de datos (Figura 4.25C) de la luminaria en la esfera de Ulbricht.

Figura 4.24 Captura de pantalla del programa de cálculo luminotécnico HPLED durante el ensayo de la luminaria experimental de espectro modulable con óptica de 16° en la esfera de Ulbricht.

Figura 4.25 A) Instalación de la luminaria experimental de espectro modulable con óptica de 16° en el interior de la esfera de Ulbricht B) Encendido y calibración de la luminaria en el interior de la esfera de Ulbricht C) Esfera de Ulbricht cerrada para la toma de datos con el programa de cálculo HPLED. (Cifra import, Murcia, España).

4.3.9. Ensayo de 1 LED rojo con óptica de 16° en la esfera de Ulbricht

En la Figura 4.26 se muestra la información procesada y registrada por el software de cálculo HPLED proveniente de la esfera, durante el ensayo de la luminaria experimental con 1 LED R con óptica de 16° . En la Figura 4.27A se muestra la instalación, calibración y toma de datos (Figura 4.27B) de la luminaria en la esfera de Ulbricht.

Figura 4.26 Captura de pantalla del programa de cálculo luminotécnico HPLED durante el ensayo de 1 LED rojo con óptica de 16° en la esfera de Ulbricht

Figura 4.27 A) Instalación, encendido y calibración de la luminaria experimental con 1 LED rojo con óptica de 16° en el interior de la esfera de Ulbricht B) Esfera de Ulbricht cerrada para la toma de datos con el programa de cálculo HPLED (Cifra import, Murcia, España).

4.3.10. Ensayo de 1 LED verde con óptica de 16° en la esfera de Ulbricht

En la Figura 4.28 se muestra la información procesada y registrada por el software HPLED proveniente de la esfera, durante el ensayo de 1 LED V con óptica de 16° . En la Figura 4.29A se muestra la instalación, calibración (Figura 4.29B) y toma de datos (Figura 4.29C) de la luminaria en la esfera de Ulbricht.

Figura 4.28 Captura de pantalla del programa de cálculo luminotécnico HPLED durante el ensayo de 1 LED verde con óptica de 16° en la esfera de Ulbricht.

Figura 4.29 A) Instalación de la luminaria en el interior de la esfera de Ulbricht B) Encendido y calibración de la luminaria experimental con 1 LED verde con óptica de 16° en el interior de la esfera de Ulbricht C) Esfera de Ulbricht cerrada para la toma de datos con el programa de cálculo HPLED. (Cifra import, Murcia, España).

4.3.11. Ensayo de 1 LED azul con óptica de 16° en la esfera de Ulbricht

En la Figura 4.30 se muestra la información procesada y registrada por el software HPLED proveniente de la esfera, durante el ensayo de 1 LED A con óptica de 16° . En la Figura 4.31A se muestra la instalación, calibración (Figura 4.31B) y toma de datos (Figura 4.31C) de la luminaria en la esfera de Ulbricht.

Figura 4.30 Captura de pantalla del programa de cálculo luminotécnico HPLED durante el ensayo de 1 LED azul con óptica de 16° en la esfera de Ulbricht.

Figura 4.31 A) Instalación de la luminaria en el interior de la esfera de Ulbricht B) Encendido y calibración de la luminaria experimental con 1 LED azul con óptica de 16° en el interior de la esfera de Ulbricht C) Esfera de Ulbricht cerrada para la toma de datos con el programa de cálculo HPLED. (Cifra import, Murcia, España).

4.3.12. Ensayo de 1 LED blanco con óptica de 16° en la esfera de Ulbricht

En la Figura 4.32 se muestra la información procesada y registrada por el software HPLED proveniente de la esfera, durante el ensayo de 1 LED B con óptica de 16° . En la Figura 4.33A se muestra la instalación, calibración (Figura 4.33B) y toma de datos (Figura 4.33C) de la luminaria en la esfera de Ulbricht.

Figura 4.32 Captura de pantalla del programa de cálculo luminotécnico HPLED durante el ensayo de 1 LED blanco con óptica de 16° en la esfera de Ulbricht.

Figura 4.33 A) Instalación de la luminaria en el interior de la esfera de Ulbricht B) Encendido y calibración de la luminaria experimental con 1 LED blanco con óptica de 16° en el interior de la esfera de Ulbricht C) Esfera de Ulbricht cerrada para la toma de datos con el programa de cálculo HPLED. (Cifra import, Murcia, España).

4.3.13. Ensayo de 1 LED rojo lejano con óptica de 16° en la esfera de Ulbricht

En la Figura 4.34 se muestra la información procesada y registrada por el software HPLED proveniente de la esfera, durante el ensayo de 1 LED RL con óptica de 16° . En la Figura 4.35A se muestra la instalación, calibración y toma de datos (Figura 4.35B) de la luminaria en la esfera de Ulbricht.

Figura 4.34 Captura de pantalla del programa de cálculo luminotécnico HPLED durante el ensayo de 1 LED rojo lejano con óptica de 16° en la esfera de Ulbricht.

Figura 4.35 A) Instalación, encendido y calibración de la luminaria experimental con 1 LED rojo lejano con óptica de 16° en el interior de la esfera de Ulbricht B) Esfera de Ulbricht cerrada para la toma de datos con el programa de cálculo HPLED (Cifra import, Murcia, España).

4.4. Ensayos de las luminarias experimentales LEDs en la cámara termográfica

Las mediciones termográficas que se han tomado con la cámara termográfica durante los ensayos se han registrado en una tarjeta de memoria. Para cada una de las luminarias experimentales LED se han realizado mediciones termográficas tanto en el lado de emisión de los LEDs como en la parte del disipador.

4.4.1. Ensayo de la luminaria experimental compuesta por 10 LEDs rojos con la cámara termográfica

Para la realización del ensayo de la luminaria experimental compuesta por 10 LEDs R con la cámara termográfica inicialmente se pone en funcionamiento y pasados unos minutos se realizan varias mediciones por ambos lados de la luminaria. En la Figura 4.36A se muestra la imagen termográfica del lado de emisión de luz de los LED y en la Figura 4.36B se muestra la imagen termográfica del lado del disipador de aluminio. En ambas

imágenes se puede apreciar que en ningún momento se supera la temperatura máxima indicada por el fabricante de 125 °C.

Figura 4.36 A) Imagen termográfica de la parte frontal de la luminaria con LEDs rojos B) Imagen termográfica de la parte trasera de la luminaria con disipador de aluminio.

4.4.2. Ensayo de la luminaria experimental compuesta por 10 LEDs azules con la cámara termográfica

Para la realización del ensayo de la luminaria experimental compuesta por 10 LEDs A con la cámara termográfica, inicialmente se pone en funcionamiento y pasados unos minutos se realizan varias mediciones por ambos lados de la luminaria. En la Figura 4.37A se muestra la imagen termográfica del lado de emisión de luz de los LED y en la Figura 4.37B se muestra la imagen termográfica del lado del disipador de aluminio, en ambas imágenes se puede apreciar que en ningún momento se supera la temperatura máxima indicada por el fabricante de 125 °C.

Figura 4.37 A) Imagen termográfica de la parte frontal de la luminaria con LEDs azules B) Imagen termográfica de la parte trasera de la luminaria con disipador de aluminio.

4.4.3. Ensayo de la luminaria experimental compuesta por 10 LEDs verdes con la cámara termográfica

Para la realización del ensayo de la luminaria experimental compuesta por 10 LEDs V con la cámara termográfica, inicialmente se pone ésta en funcionamiento y pasados unos minutos se realizan varias mediciones por ambos lados de la luminaria. En la Figura 4.38A se muestra la imagen termográfica del lado de emisión de luz de los LED y en la Figura 4.38B se muestra la imagen termográfica del lado del disipador de aluminio. En ambas imágenes se puede apreciar que en ningún momento se supera la temperatura máxima indicada por el fabricante de 125 °C.

Figura 4.38 A) Imagen termográfica de la parte frontal de la luminaria con LEDs verdes. B) Imagen termográfica de la parte trasera de la luminaria con disipador de aluminio.

4.4.4. Ensayo de la luminaria experimental compuesta por 10 LEDs blancos con la cámara termográfica

Para la realización del ensayo de la luminaria experimental con 10 LEDs B con la cámara termográfica, inicialmente se pone en funcionamiento y pasados unos minutos se realizan varias mediciones por ambos lados de la luminaria. En la Figura 4.39A se muestra la imagen termográfica del lado de emisión de luz de los LED y en la Figura 4.39B se muestra la imagen termográfica del lado del disipador de aluminio. En ambas imágenes se puede apreciar que en ningún momento se supera la temperatura máxima indicada por el fabricante de 125 °C.

Figura 4.39 A) Imagen termográfica de la parte frontal de la luminaria con LEDs blancos B) Imagen termográfica de la parte trasera de la luminaria con disipador de aluminio

4.4.5. Ensayo de la luminaria experimental compuesta por 10 LEDs rojo lejano con la cámara termográfica

Para la realización del ensayo de la luminaria experimental con 10 LEDs RL con la cámara termográfica, inicialmente se pone en funcionamiento y pasados unos minutos se realizan varias mediciones por ambos lados de la luminaria. En la Figura 4.40A se muestra la imagen termográfica del lado de emisión de luz de los LED y en la Figura 4.40B se muestra la imagen termográfica del lado del disipador de aluminio, en ambas imágenes se puede apreciar que en ningún momento se supera la temperatura máxima indicada por el fabricante de 125 °C.

Figura 4.40 A) Imagen termográfica de la parte frontal de la luminaria con LEDs rojo lejano
B) Imagen termográfica de la parte trasera de la luminaria con disipador de aluminio

4.4.6. Ensayo de la luminaria experimental de espectro modulable con la cámara termográfica

Para la realización del ensayo de la luminaria experimental de espectro modulable con la cámara termográfica, inicialmente se pone en funcionamiento y pasados unos minutos se realizan varias mediciones por ambos lados de la luminaria. En la Figura 4.41A se muestra la imagen termográfica del lado de emisión de luz de los LED y en la Figura 4.41B se muestra la imagen termográfica del lado del disipador de aluminio, en ambas imágenes se puede apreciar que en ningún momento se supera la temperatura máxima indicada por el fabricante de 125 °C.

Figura 4.41 A) Imagen termográfica de la parte frontal de la luminaria con LEDs rojo, azul, verde, blanco, rojo lejano, B) Imagen termográfica de la parte trasera de la luminaria con disipador de aluminio.

4.4.7. Ensayo de la luminaria experimental compuesta por LEDs UV-B con la cámara termográfica

Para la realización del ensayo de la luminaria experimental compuesta por LEDs UV-B con la cámara termográfica, inicialmente se pone en funcionamiento y pasados unos minutos se realizan varias mediciones de la luminaria. En la Figura 4.42A se muestra la imagen termográfica del lado de emisión de luz de los LED sobre chapa de aluminio y en la Figura 4.42B se muestra la imagen termográfica del lado de emisión de luz de los LED sobre chapa de aluminio más disipador y en la Figura 4.42C se muestra la imagen termográfica del lado de emisión de luz de los LED sobre chapa de aluminio más disipador y ventilador, en las imágenes se puede apreciar que en ningún momento se supera la temperatura máxima indicada por el fabricante de 125 °C.

Figura 4.42 A) Imagen termográfica de los LEDs sobre chapa de aluminio de 3mm de espesor B) Imagen termográfica de los LEDs sobre chapa de aluminio de 3mm de espesor más disipador C) Imagen termográfica de los LEDs sobre chapa de aluminio de 3mm de espesor más disipador y ventilador.

4.4.8. Ensayo de un LED rojo con la cámara termográfica

Para la realización del ensayo de un LED R con la cámara termográfica, inicialmente se pone en funcionamiento y pasados unos minutos se realizan varias mediciones por ambos lados de la luminaria. En la Figura 4.43A se muestra la imagen termográfica del lado de emisión de luz de los LED y en la Figura 4.43B se muestra la imagen termográfica del lado del disipador de aluminio, en ambas imágenes se puede apreciar que en ningún momento se supera la temperatura máxima indicada por el fabricante de 125 °C.

Figura 4.43 A) *Imagen termográfica de la parte frontal de la luminaria con un LED rojo.* B) *Imagen termográfica de la parte trasera de la luminaria con disipador de aluminio.*

4.4.9. Ensayo de un LED verde con la cámara termográfica

Para la realización del ensayo de un LED V con la cámara termográfica, inicialmente se pone en funcionamiento y pasados unos minutos se realizan varias mediciones por ambos lados de la luminaria. En la Figura 4.44A se muestra la imagen termográfica del lado de emisión de luz de los LED y en la Figura 4.44B se muestra la imagen termográfica del lado del disipador de aluminio, en ambas imágenes se puede apreciar que en ningún momento se supera la temperatura máxima indicada por el fabricante de 125 °C.

Figura 4.44 A) Imagen termográfica de la parte frontal de la luminaria con un lado LED verde. B) Imagen termográfica de la parte trasera de la luminaria con disipador de aluminio.

4.4.10. Ensayo de un LED azul con la cámara termográfica

Para la realización del ensayo de un LED A con la cámara termográfica, inicialmente se pone en funcionamiento y pasados unos minutos se realizan varias mediciones por ambos lados de la luminaria. En la Figura 4.45A se muestra la imagen termográfica del lado de emisión de luz de los LED y en la Figura 4.45B se muestra la imagen termográfica del lado del disipador de aluminio, en ambas imágenes se puede apreciar que en ningún momento se supera la temperatura máxima indicada por el fabricante de 125 °C.

Figura 4.45 A) Imagen termográfica de la parte frontal de la luminaria con un LED azul B) Imagen termográfica de la parte trasera de la luminaria con disipador de aluminio.

4.4.11. Ensayo de un LED rojo lejano con la cámara termográfica

Para la realización del ensayo de un LED RL con la cámara termográfica, inicialmente se pone en funcionamiento y pasados unos minutos se realizan varias mediciones por ambos lados de la luminaria. En la Figura 4.46A se muestra la imagen termográfica del lado de emisión de luz de los LED y en la Figura 4.46B se muestra la imagen termográfica del lado del disipador de aluminio, en ambas imágenes se puede apreciar que en ningún momento se supera la temperatura máxima indicada por el fabricante de 125 °C.

Figura 4.46 A) Imagen termográfica de la parte frontal de la luminaria con un LED rojo lejano. B) Imagen termográfica de la parte trasera de la luminaria con disipador de aluminio.

4.4.12. Ensayo de un LED blanco con la cámara termográfica

Para la realización del ensayo de un LED B con la cámara termográfica, inicialmente se pone en funcionamiento y pasados unos minutos se realizan varias mediciones por ambos lados de la luminaria. En la Figura 4.47A se muestra la imagen termográfica del lado de emisión de luz de los LED y en la Figura 4.47B se muestra la imagen termográfica del lado del disipador de aluminio, en ambas imágenes se puede apreciar que en ningún momento se supera la temperatura máxima indicada por el fabricante de 125 °C.

Figura 4.47 A) Imagen termográfica de la parte frontal de la luminaria con un LED blanco B) Imagen termográfica de la parte trasera de la luminaria con disipador de aluminio.

4.5. Implementación práctica (I): efecto de la iluminación LED en la franja del rojo en la germinación de semillas de guisante y melón

4.5.1. Resultados

En un primer experimento, se analizó el efecto de la LR de baja intensidad ($13 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) en la germinación de melón. Como resultado, se incrementó el crecimiento temprano de las plántulas tras 4 días del tratamiento, medido como peso fresco (PF) o longitud de las mismas. En estos experimentos iniciales, observamos un progresivo efecto del tiempo de exposición a la LR en el PF de las plántulas de melón (Figura 4.48)

Figura 4.48 (A) Efecto de la exposición a la luz roja de baja intensidad ($13 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) sobre el peso fresco de las plántulas de melón a los cuatro días del tratamiento. B) Imagen que muestra las diferencias en la longitud de las plántulas y en las raíces secundarias. Los datos representan la media $\pm$ SE de al menos diez mediciones. Letras diferentes indican diferencias significativas según el Test estadístico de Tukey ($p \leq 0.05$).

De acuerdo con el análisis ANOVA, se observaba un efecto significativo de la LR en el PF de las plántulas ($F = 4.231$, $p < 0.002$). En este sentido, después de 5 minutos de exposición a LR, se observó un aumento de casi 2 veces en el PF, mientras que 15, 30 y 60 minutos producían un aumento en el PF de las plántulas de más de 2 veces (Figura 4.48A). En este experimento, aunque no se midió la longitud de las plántulas de melón, se pudo

observar un aumento progresivo de la misma, paralelo al tiempo de exposición a LR (Figura 4.48B). De forma interesante, los tratamientos con LR también estimulaban el crecimiento de raíces secundarias, e incrementaba el crecimiento de tanto los epicotilos (parte de la plántula por encima de los cotiledones) como los de los hipocotilos (parte de la plántula por debajo de los cotiledones) y la radícula (Figura 4.48B).

En un segundo experimento con semillas de melón, se repitieron los tratamientos con LR más largos (30 y 60 minutos). Después del tratamiento, las semillas se incubaron durante 5 días, en lugar de 4, en oscuridad, y se analizó tanto el PF como la longitud de las plántulas completas. De nuevo, se pudo comprobar el efecto positivo de los tratamientos de 30 y 60 min con LR sobre la longitud y el PF de las plántulas (valores de F de 13,704 y 9,946, respectivamente). El efecto del tratamiento de LR sobre la biomasa de las plántulas fue evidente, aumentando alrededor de un 50% con respecto a las plántulas control (Figuras 4.49A y 4.49B). Sin embargo, este efecto positivo resultó atenuado si se compara con las semillas incubadas 4 días en el primer experimento. Igualmente, el efecto estimulante de la LR sobre el crecimiento de raíces secundarias fue también patente, sobre todo con el tratamiento de 30 min de LR (Figura 4.49C).

Figura 4.49 Efecto de la exposición a la luz roja de baja intensidad ($13 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) en la longitud (A) y en el peso fresco (B) de las plántulas de melón a los 5 días del tratamiento. C)

Imagen que muestra las diferencias en la longitud de las plántulas y en las raíces secundarias. Los datos representan la media $\pm$ SE de al menos diez mediciones. Letras diferentes indican diferencias significativas según el test de Tukey ($p \leq 0.05$).

Seguidamente, en los primeros experimentos llevados a cabo con semillas de guisante (cv. Alaska), se ensayó también el efecto de bajas intensidades de LR ($13 \mu\text{moles m}^{-2} \text{s}^{-1}$) hasta 90 minutos sobre el crecimiento de las plántulas de forma visual a las 24 y 48 h del tratamiento (Figura 4.50). A las 24 h se podía observar un efecto positivo en la germinación y el crecimiento de las radículas de forma paralela al tiempo de exposición a la LR (Figura 4.50A). El efecto progresivo del tratamiento con LR era menos evidente a las 48 h de imbibición de las semillas, pero en todos los casos, las semillas tratadas con LR crecían visiblemente más que las semillas control, si bien se observó que el tratamiento de 30 min de LR producía el mejor efecto, ya que el efecto a los 60 minutos no parecía mejorar

lo observado a los 30 minutos (Figura 4.50A). Posteriormente, empleamos un tiempo mayor de tratamiento con LR (90 minutos) y un tiempo en un punto intermedio (45 minutos) (Figura 4.50B). En este segundo ensayo, observamos que tiempos mayores de 45 minutos no mejoraban el efecto positivo conseguido en ese tiempo de tratamiento, pero ambos tratamientos daban lugar a un mayor crecimiento de las plántulas de guisante, con respecto al tratamiento control (Figura 4.50B).

Figura 4.50 Efecto del tratamiento con luz roja de baja intensidad ($13 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) sobre la germinación de semillas de guisante (cv. Alaska).

En los experimentos sucesivos, tanto las semillas de melón como las de guisante se sometieron a tratamientos con LR de mayor intensidad (50 y $100 \mu\text{moles m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Respecto a melón, el efecto de $50 \mu\text{moles m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de LR fue más significativo sobre la longitud ($F = 5,202$; $p < 0,001$) que sobre el PF de las plántulas ($F = 2,334$; $p < 0,057$). Respecto al PF, los tratamientos de 10 y 30 minutos mostraron un aumento estadísticamente significativo (25 y 20% de aumento, respectivamente) (Figura 4.51A), mientras que los tratamientos de 5 a 30 minutos con LR produjeron una estimulación significativa en la longitud de las plántulas, siendo de nuevo, los tiempos 10 y 30 minutos los más efectivos, donde

observamos aproximadamente un 40% de aumento en la longitud de las plántulas (Figura 4.51B).

Figura 4.51 Efecto de la exposición a la luz roja de intensidad moderada ($50 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) sobre el peso fresco (A) y la longitud (B) de las plántulas de melón a los 4 días del tratamiento. Los datos representan la media $\pm$ SE de al menos diez mediciones. Letras diferentes indican diferencias significativas según el test de Tukey ($p \leq 0.05$).

A diferencia de lo que ocurría con el tratamiento con una intensidad moderadas de LR, el tratamiento de las semillas de melón con una intensidad mayor ($100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) tuvo un mayor efecto sobre el PF ($F = 5,186$, $p < 0,001$) que sobre la longitud ($F = 2,39$, $p < 0,053$) de las plántulas. En este sentido, los tratamientos de 5, 10 y 15 minutos, aumentaron la biomasa de las plántulas de una forma significativa, siendo el tratamiento de 15 minutos el que tuvo un mejor efecto, con un aumento de un 44% en el PF (Figura 4.52A). En

relación a la longitud, sólo el tratamiento de 15 minutos mejoró de forma significativa este parámetro, con un aumento de un 34% (Figura 4.52B). Sin embargo, tiempos mayores de exposición no produjeron ningún efecto beneficioso en los parámetros de crecimiento analizados.

Figura 4.52 Efecto de la exposición a la luz roja de alta intensidad ($100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) sobre el peso fresco (A) y la longitud (B) de las plántulas de melón a los 3 días del tratamiento.

Los datos representan la media $\pm$ SE de al menos diez mediciones. Letras diferentes indican diferencias significativas según el test de Tukey ($p \leq 0.05$).

De forma interesante, los tratamientos moderado y elevado también estimularon el crecimiento de raíces secundarias (ver como ejemplo Figura 4.53 que corresponde a semillas tratadas con $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

Figura 4.53 Imagen que muestra el efecto de la exposición a LR de intensidad elevada ($100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) en la longitud y en las raíces secundarias de las plántulas de melón

El tratamiento de semillas de guisante con una intensidad moderada de LR ($50 \mu\text{moles m}^{-2} \text{s}^{-1}$) afectó de forma muy significativa tanto al PF ($F = 7,451$; $p < 0,001$) como la longitud ($F = 12,750$; $p < 0,001$) de las plántulas. Este efecto era más evidente en los tratamientos largos (15, 30, 60 minutos) que en tratamientos más cortos (5, 10 minutos), Observándose aumentos por encima del 60% en el PF y del 50% para la longitud, respectivamente, en los tiempos largos (Figura 4.54A-B).

Figura 4.54 Efecto de la exposición a la luz roja de intensidad moderada ($50 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) sobre el peso fresco (A) y la longitud (B) de las plántulas de guisante a los 4 días del tratamiento. Los datos representan la media $\pm$ SE de al menos diez mediciones. Letras diferentes indican diferencias significativas según el test de Tukey ($p \leq 0.05$).

El efecto de la LR de intensidad moderada sobre la germinación ya era visible a las 24 h de dicho proceso (Figura 4.55A), pero sobre todo a las 72 h del proceso de germinación (Figura 4.55B), tal y como lo evidenciaban los datos de PF y longitud.

Figura 4.55 Imagen que muestra el efecto de la luz roja de intensidad moderada ($50 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) sobre la germinación de semillas de guisante a 24 (A) y a 72 h (B) después del tratamiento.

El tratamiento de semillas de guisante con una intensidad mayor de LR ($100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) sólo tuvo efectos significativos en el PF ($F = 4,733$; $p < 0,01$) pero no en la longitud de las plántulas ($F = 1,845$) (Figura 4.56). Respecto al PF, solamente el tratamiento de 15 minutos con LR fue significativamente mayor que los controles, con un aumento de un 54%. Sin embargo, los tratamientos de 5 y 30 minutos con LR, si bien también aumentaron el PF de las plántulas, no proporcionaron diferencias estadísticamente significativas (Figura 4.56A). Este efecto puede observarse en la Figura 4.57.

Figura 4.56 Efecto de la exposición a la luz roja de intensidad elevada ($100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) sobre el peso fresco (A) y la longitud (B) de las plántulas de guisante a los 3 días del tratamiento. Los datos representan la media $\pm$ SE de al menos diez mediciones. Letras diferentes indican diferencias significativas según el test de Tukey ($p \leq 0,05$).

Figura 4.57 Imagen que muestra el efecto de la luz roja de intensidad elevada ($100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) sobre el crecimiento de plántulas de guisantea los 3 días del tratamiento.

Figura 4.58 Efecto de la luz roja de intensidad elevada ($100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) sobre el desarrollo de pelos radiculares en guisante a los 3 días del tratamiento.

Igualmente, el tratamiento con LR de elevada intensidad también favoreció el desarrollo de pelos radiculares, siendo el efecto más patente a los 15 y 30 minutos de tratamiento (Figura 4.58). El crecimiento de las plantas, procedentes de semillas tratadas durante 15 minutos con LR de elevada intensidad ($100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), se siguió hasta planta adulta en cultivos hidropónicos para comprobar si el efecto estimulante de la LR sobre el crecimiento también se hacía patente con el tiempo. En este sentido pudimos comprobar

que la biomasa de la parte aérea durante las semanas 3 a la 6 era bastante mayor en las plantas pre-tratadas con LR, que era visualmente patente en la Figura 4.59, que corresponde a plantas de 3 semanas crecidas en solución hidropónica Hoagland $\frac{1}{2}$ (Hoaglant et al., 1933).

Figura 4.59 Efecto del tratamiento con luz roja de elevada intensidad ($100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) sobre el crecimiento de plantas de guisante en cultivos hidropónicos a las tres semanas del tratamiento. A: Plantas control. B: Plantas procedentes de semillas tratadas con luz roja durante 15 minutos.

Con el fin de comprobar si el tratamiento con LR tenía algún efecto sobre la respuesta de estrés en las plantas de melón y de guisante, analizamos la actividad de algunas enzimas antioxidantes. Es sabido que la actividad de estas enzimas, en general, se ve afectada por el efecto de los estreses ambientales, incluyendo estreses abióticos (salinidad, sequía, frío etc...) y estreses bióticos (infecciones por virus, bacterias y hongos,

etc...). En este sentido, se procedió a determinar los valores de las actividades peroxidasa (POX), superóxido dismutasa (SOD) y las enzimas del denominado ciclo Ascorbato-Glutatión (ASC-GSH): ascorbato peroxidasa (APX), monodeshidroascorbato reductasa (MDHAR), dehidroascorbato reductasa (DHAR) y glutatión reductasa (GR). Con el fin de establecer una comparación en la respuesta de ambas especies, los análisis se realizaron en plántulas de melón y de guisante de tres días sometidas al mismo tratamiento, siendo éste 0, 15 y 60 minutos de LR de $100 \mu\text{moles m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Así, se comparó también el efecto de un tiempo intermedio (15 minutos) con el de una exposición más prolongada.

Respecto a los resultados obtenidos, pudimos observar que en guisante el tratamiento de LR aplicado no tenía ningún efecto significativo en la actividad de las enzimas antioxidantes. Sin embargo, en melón pudimos observar más cambios inducidos por los tratamientos con LR. En este sentido, tanto el tratamiento más corto como el más largo disminuyeron las actividades POX y GR (Figura 4.60). El descenso era más evidente en la actividad POX, llegando a un 70% de descenso (Figura 4.60A). El descenso registrado en la actividad GR parecía ser dependiente del tiempo de tratamiento. Así, tras 15 min de LR la actividad GR presentó un descenso de un 29%, mientras que, tras 60 min de LR, el descenso era de un 47% (Figura 4.60D). Respecto a las otras actividades medidas, el tratamiento más breve aumentó la actividad SOD un 23% (Figura 4.60B), pero disminuyó la actividad APX en un 34% (Figura 4.60C). El tratamiento de 60 minutos producía un descenso significativo, cercano al 20%, de la actividad SOD (Figura 4.60B), así como de la actividad APX, pero en este caso los cambios no eran significativos (Figura 4.60C).

4.6. Implementación práctica (II): efecto de la iluminación LED en la franja del ultravioleta-B en el crecimiento y acumulación de pigmentos de raíces pilosas de zanahoria morada

4.6.1. Resultados

La segunda implementación práctica de la presente Tesis Doctoral consistió en analizar el efecto de la luz UV-B en el crecimiento y acumulación de antocianinas de raíces

pilosas de zanahoria morada. Para ello, se utilizó la línea denominada H43-5, proveniente de la transformación de segmentos de raíz de zanahoria morada en un estudio anterior (Barba-Espín et al., 2020).

Las placas Petri crecidas durante 10 días se sometieron a luz UV-B de intensidad $8 \text{ W m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ proporcionados por un LED que emite con un pico máximo de intensidad a 310nm. Visualmente, no se apreciaron diferencias notables entre los diferentes tratamientos (Figura 4.60); sin embargo, las medidas de peso y de concentración de antocianinas proporcionaron diferencias notables entre tratamientos (Figura 4.61). Referente al PF, la media de los distintos tratamientos varió desde 2,71 (tratamiento de 1 min) a 4,44 g (10 minx2) (Figura 4.61A). Sin embargo, no existieron incrementos significativos con respecto al control (3,97 g), y por el contrario las muestras tratadas 1 min disminuyeron su peso significativamente respecto al mismo. Respecto a la MS, el tratamiento “10 minx2” varió significativamente los valores medios en comparación con el control, aumentando del 8,41% a 9,23% (Figura 4.61B). Concerniente a la concentración de antocianinas por g de PF (Figura 4.61C), a pesar de que todos los tratamientos proporcionaron valores medios por encima de los del control (549 $\mu\text{g/g}$ PF), únicamente 45 minx2 resultó en un incremento significativo, siendo del 46%. De manera similar, la concentración de antocianinas por unidad de PS (Figura 4.61D) fue significativamente superior en 45 minx2 con respecto al control, con un 49% de aumento. Finalmente, se determinó el rendimiento de antocianinas por placa para cada una de las concentraciones, resultado de la multiplicación de la concentración de antocianinas por el peso de la RP (Figura 4.61E). En este sentido, tanto “10 minx2” como “45 minx2” proporcionaron incrementos significativos, del 58 y 50% con respecto al control, con valores de 3,43 y 3,25 mg/placa, respectivamente.

Figura 4.60 Efecto del tratamiento con luz ultravioleta-B de baja intensidad ($8W m^{-2} s^{-1}$) sobre el crecimiento de raíces pilosas de zanahoria morada a las tres semanas del tratamiento. Las placas Petri conteniendo las raíces pilosas se trataron en el día 10 de cultivo durante 0 (A), 1(B), 10 (C) ó 45 min (D). En el día 17, parte de las placas tratadas se sometieron al mismo tratamiento de 1 (E), 10 (F) ó 45 min (G).

Figura 4.61 Efecto de la radiación ultravioleta-B (UV-B, $8W\ m^{-2}\ s^{-1}$) en el crecimiento y acumulación de antocianinas de raíces pilosas de zanahoria morada. Las placas Petri conteniendo las raíces pilosas se trataron en el día 10 de cultivo durante 0, 1, 10 ó 45 min. En el día 17, parte de las placas tratadas se sometieron al mismo tratamiento. El día 21, las raíces pilosas se muestrearon. (A): Peso fresco. (B): Materia seca. (C): Antocianinas por unidad de peso fresco. (D): Antocianinas por unidad de peso seco. (E) Rendimiento de antocianinas por muestra. Se presentan los valores medios de las réplicas biológicas $\pm$ el error estándar, $n = 4$. Las letras indican los subconjuntos generados a partir de las diferencias significativas entre los datos según el test de Duncan ($p \leq 0,05$).

5. Capítulo V. Discusión

5.1. Tecnología SSL

La iluminación de estado sólido es una tecnología de alta eficiencia energética en una rápida fase de mejora tecnológica, con múltiples avances, potencialmente más eficientes energéticamente frente a otras fuentes de luz, vida útil más larga lo que conlleva menores costos de mantenimiento y buena robustez física. Además, permite reducir el impacto medioambiental durante el ciclo de vida del producto y un menor costo del ciclo de vida (De Almeida et al., 2014).

La tecnología SSL ofrece una mayor variedad de opciones en términos de características de luz, diversidad de lámparas, accesorios y aplicaciones lo que hacen que esta tecnología se este posicionando en el mercado para convertirse en dominante, reemplazando al resto de tecnologías tradicionales. El ahorro de energía se puede incrementar aún más con control de iluminación inteligente, llegando a optimizar su empleo, aumento de la comodidad y seguridad.

Las principales barreras técnicas, económicas y de mercado que se encuentra la tecnología SSL-LED a gran escala son las siguientes:

- El costo de las fuentes de iluminación general basadas en SSL-LED en comparación con las tecnologías de iluminación convencionales.
- La eficacia luminosa (Lm/W) de los LEDs se encuentra por encima de los 100 Lm/W, pero aún puede mejorar para competir con otras soluciones de iluminación como las lámparas de VSAP.
- Uniformidad del proceso de fabricación.
- Los estándares LED disponibles tienen una cobertura limitada.
- Productos de mala calidad en el mercado europeo invadido por una calidad deficiente de costo relativamente bajo (baja eficacia, etiquetado defectuoso, corta duración) procedentes de Asia.

- Incertidumbre del rendimiento del producto en particular, se requiere una vida útil para justificar la inversión, lo que puede influir negativamente en los inversores.
- Falta de información la tecnología LED sigue siendo una nueva tecnología y no se conoce bien en el mercado.

Un número de estados miembros de la UE han tomado medidas, especialmente en el campo de la investigación científica, relacionados con la penetración de mercado. Las políticas europeas para superar las barreras existentes deben promover una penetración más rápida de los productos SSL. Las acciones deben estar dirigidas al suministro, rendimiento, calidad y mejora del precio.

Se necesita promover el esfuerzo colaborativo para aumentar el rendimiento en las soluciones SSL de iluminación, el costo, la calidad está en el foco de la industria de luminarias pequeñas y medianas empresas.

El camino europeo, para superar la fragmentación y recuperar la masa crítica y despliegue de la tecnología SSL, debe apoyar la investigación y desarrollo lo que mejorará la eficacia y reducirá costes. Apoyando el desarrollo de la fabricación a bajo coste, procesos de ensamblaje y diseño de procesos con mucho más alto grado de automatización será clave para reducir el costo desde el nivel actual y apoyar la investigación sobre iluminación biológicamente eficiente.

Para asegurar una amplia aceptación y credibilidad de los productos SSL, es necesario establecer normas, etiquetas y esquemas de calidad junto con la industria, incluidos los siguientes:

- Estándares de prueba armonizados internacionales mejorados todos los aspectos clave del rendimiento, es decir, lúmenes, vatios, CCT, color, índice de reproducción cromática (IRC) y vida útil, que son necesarios para garantizar una nivelación en un mercado competitivo.
- Marcar unos estándares mínimos de rendimiento de eficiencia para retirar los productos del mercado que no cumplan las normas de iluminación existentes a nivel de la UE, estándares que deben de expandirse a nivel global.

- Creación de etiquetas energéticas como las de la Unión Europea LED Quality Charter o ENERGY STAR, son muy importantes para establecer niveles mínimos que aseguren la credibilidad de los productos SSL, para ello se debe realizar una vigilancia de los mercados para que se cumplan los requisitos europeos evitando la competencia desleal y el cliente insatisfecho.
- Promover el uso de controles de iluminación inteligentes apropiados, por ejemplo, detector de presencia y atenuación de la luz del día para iluminación interior y presencia con atenuación de la circulación fuera del pico y la iluminación de puertas. La tecnología SSL-LED no solo tiene que usarse para readaptar la iluminación existente, también ofrece oportunidades de diseño y aplicación en variedad de áreas donde la iluminación convencional está dominada, para ello es necesario se desarrollen programas de incentivos y otros negocios orientados hacia la eficiencia energética en sectores públicos y privados con tecnología SSL.

5.2. Cámara de crecimiento (software y hardware)

La cámara de experimentación desarrollada de espectro modulable se mejoró a través de la realización de diferentes ensayos, consiguiendo que los ajustes realizados en cada una de las unidades permitieran aumentar la fiabilidad de la misma. El empleo de sistemas programables permitió automatizar los procesos de recogida de datos y de control de las unidades. Posteriormente, la validación mediante la realización de diferentes ensayos biológicos permitió realizar actuaciones de mejora en la cámara y abrió un abanico amplio de futuras intervenciones de mejora sobre todo en el chasis y las paredes mediante el empleo de materiales poliméricos que permitieron un mayor control de la temperatura, humedad, iluminación, reducción de peso, reducción del coste energético, eliminación del uso de plaguicidas y fungicidas.

Las primeras cámaras de crecimiento de plantas usadas en el espacio se centraron únicamente en el cultivo, la floración y fructificación de las plantas (Zabel et al., 2016). Una

vez que se logró, las cámaras se diseñaron para realizar experimentos de ciencia básica en plantas, incluyendo el estudio de la formación de raíces, la orientación, la producción de semillas en diferentes condiciones y la germinación de semillas para diferentes especies vegetales, si bien todavía están bajo investigación. No obstante, se requiere de futuras investigaciones para comprender mejor el comportamiento de las plantas y cultivos en el espacio. No solamente los experimentos que continúan están centrados en la planta modelo *Arabidopsis*, sino también en plantas hortícolas destinadas a la alimentación.

Para las futuras misiones de exploración espacial, se requiere de sistemas de soporte vital basados en sistemas bio-regenerativos sostenibles, especialmente en la producción de alimentos. La diferencia entre los sistemas dedicados a la ciencia básica requiere de un menor tamaño con respecto a los sistemas dedicados a la producción de alimentos que tienen un mayor tamaño ya que deben contribuir a la dieta de la tripulación (Zabel et al., 2016). Otra diferencia significativa es que las cámaras científicas requieren de una mayor cantidad de sensores para la adquisición de datos y sistemas de imágenes para una mayor precisión, mientras que las cámaras de producción solo requieren de un control básico de los subsistemas de la cámara para la producción de alimentos. El objetivo general es la producción sostenible de alimentos en el espacio.

Con respecto a los avances recientes en la tecnología LED, se deben estudiar los efectos que las longitudes de onda menos estudiadas, como por ejemplo rojo lejano y la combinación de diferentes combinaciones de longitudes de onda, así como la dependencia del tiempo sobre estas longitudes de onda. De hecho, es bien conocido el efecto acumulativo sobre la fotosíntesis cuando las plantas se irradian al mismo tiempo con luz roja y luz del rojo lejano (Taiz y Zeiger 2006).

Es también importante el estudio del efecto del espectro de la luz en la producción de vitaminas y de antioxidantes, así como de metabolitos secundarios (Zabel et al., 2016).

La eficiencia de la iluminación LED va a permitir reducir considerablemente las altas demandas de energía que las cámaras de crecimiento requerían en el pasado, posibilitando el desarrollo futuro del empleo de esta tecnología de cultivo de plantas en el espacio.

La automatización juega un papel fundamental en el desarrollo de estos sistemas de cultivo de plantas a medida que se hacen más grandes, lo que facilita reducir el tiempo de dedicación de la tripulación para mantener el sistema. En la actualidad, los sistemas de iluminación, atmosféricos y de riego y los ajustes de la disolución nutritiva todavía no están automatizados. La monitorización del estado de las plantas es otro punto importante que se debe mejorar con la automatización. Hasta hoy, la mayoría de las tareas son realizadas manualmente, pero en un futuro se debe trabajar en la mejora de la cámara para detectar automáticamente el estado de estrés de la planta, mediante el empleo de imágenes térmicas y de fluorescencia de clorofila o la medida de diferentes parámetros de estrés mediante la fabricación de sensores específicos. En la actualidad, la empresa alemana LemnaTeck ofrece estos servicios de detección automática del estrés de la planta, mediante el empleo de imágenes térmicas y de fluorescencia de clorofila.

5.3. Efecto de la iluminación LED en la franja del rojo en la germinación de semillas de guisante y melón

La mayor parte de la información acerca del efecto de la tecnología LED en el crecimiento y la morfología vegetal se ha llevado a cabo mayoritariamente en condiciones *in vitro* (Dutta Gupta et al 2017). Sin embargo, el efecto de la iluminación LED sobre la germinación y el crecimiento temprano de plántulas en condiciones *ex vitro* ha recibido menos atención.

El crecimiento y la morfología vegetal están afectados por la calidad de la luz (Kim et al., 2004 a, b; Gupta and Jotothu 2013). Debido a que los fotorreceptores se estimulan fundamentalmente por la luz del espectro del rojo y del azul, la mayoría de los estudios con LEDs se han centrado en dichos espectros. En este sentido, la combinación de luces rojas y azules provocó aumentos en la tasa de fotosíntesis, así como del crecimiento vegetal (Kim et al., 2004a). Se ha descrito efectos positivos de la aplicación de luz LED roja en la elongación de tallos y en la longitud de los internudos en plantas de *Chrysanthemum* (Kim et al., 2004b). Además, se ha descrito que la luz LED roja también favorece la formación de

raíces de plántulas de *Anthurium* en condiciones *in vitro* (Budiarto 2010), situación que puede favorecer los procesos de aclimatación de las plantas *in vitro* a condiciones *ex vitro*.

En este trabajo, se observó que la exposición de semillas de melón y de guisante a LR no tuvo un efecto significativo en la tasa de germinación de semillas, pero sí se observó un efecto muy positivo en el proceso de crecimiento temprano de las plántulas, actuando como un tratamiento de vigorización de las plantas. Igualmente, las diferentes partes de las plántulas de melón y de guisante (epicotilo, hipocotilo y radícula) se desarrollaron antes por efecto del pre-tratamiento con LR, en relación a las plántulas controles. Este efecto se mostró dependiente del tiempo de exposición a la misma y, en menor medida, de la intensidad de la LR.

Además, la exposición de LR mejoraba la arquitectura de las raíces, especialmente en plántulas de melón. De ese modo, las plántulas de melón, procedentes de semillas tratadas con LR, mostraron la presencia de una mayor cantidad de raíces secundarias que las plántulas control. Del mismo modo, las radículas de las plántulas de guisante desarrollaron pelos radiculares como consecuencia del tratamiento con LR. La presencia de un mayor número de raíces secundarias, así como de pelos radiculares puede ser un aspecto clave para facilitar el crecimiento temprano de las plántulas, ya que este mayor desarrollo facilitaría una mayor absorción de agua en nuestras condiciones experimentales. Del mismo modo, en condiciones de cultivo, tanto las raíces secundarias como los pelos radiculares cumplen una función importante tanto en la absorción de agua como de nutrientes (Choi et al., 2019).

Se ha descrito que los fitocromos regulan la elongación de las raíces primarias mediado por LR (Correll and Kiss, 2005). Además, se ha descrito la función de los fitocromos en la regulación del crecimiento de raíces secundarias (Salisbury et al., 2007). Los resultados de este trabajo sugieren que la LR podría actuar en la activación de fitocromo que actuaría tanto en el desarrollo de las raíces secundarias y pelos radiculares y por tanto influenciar el crecimiento de las plántulas.

El tratamiento con LR no tuvo un efecto aparente en la actividad de las enzimas antioxidantes en plántulas de guisante. Sin embargo, en plántulas de melón sí se detectó un efecto de la irradiación con LR en la actividad de estas enzimas, que parecía ser dependiente de la duración del tratamiento, como ocurría con las actividades POX y GR. Además, el tratamiento de menor duración también reducía la actividad APX, pero aumentaba la actividad SOD. Por lo tanto, en melón, el tratamiento con LR puede modificar el balance redox de las células vegetales. Este efecto de la iluminación LED en el metabolismo redox y en las enzimas antioxidantes también ha sido descrito por otros autores (Benson 2000; Batkova et al., 2008; Dutta Gupta and Sahoo 2017).

Durante la última década, se ha logrado importantes progresos en el uso de la tecnología LED para su aplicación en agricultura. Sin embargo, no existe mucha información del efecto de la iluminación con diferentes tipos de colores (rangos de longitud de onda). En este trabajo, se ha descrito cómo una cámara de experimentación de bajo consumo se puede usar para mejorar el crecimiento de plántulas de melón y de guisante. Estas respuestas ayudan a mejorar el vigor de las plántulas de melón y de guisante y podría ser usado por los agricultores y/o los viveristas como un tratamiento de “priming” para mejorar el establecimiento y el crecimiento temprano de las plántulas, así como, probablemente, mejorar la germinación de especies agronómicas recalcitrantes (semillas que no resisten la sequedad y bajas temperaturas). Sin embargo, queda mucho por investigar con otras especies de interés agronómico, así como con el efecto de distintas combinaciones de luz usando la CEEM.

5.4. Efecto de la iluminación LED en la franja del ultravioleta-B en el crecimiento y acumulación de pigmentos de raíces pilosas de zanahoria morada

En el presente trabajo, la luz UV-B se ha utilizado como elicitador de la concentración de antocianinas. La elicitación consiste en un aumento en la producción de metabolitos secundarios como respuesta a un agente estresante (elicitador) de origen endógeno o exógeno. Los elicitores se clasifican en bióticos, como extractos de levaduras o

polisacáridos, o abióticos, como el estrés osmótico o la luz ultravioleta (Halder et al., 2019). En sistemas *in vitro* como el cultivo celular o el de RP, la elicitación se ha aplicado satisfactoriamente para la producción de compuestos de interés industrial (Buitelaar et al., 1992; Satdive et al., 2007; Shinde et al., 2009; Zhang et al., 2009; Udomsuk et al., 2011). Concerniente a la luz ultravioleta, intensidades de 3 W m^{-2} de UV-B provocaron un aumento del 89% del contenido en flavonoides de cultivos de RP de *Kalanchoe pinnata* (Fkiara et al., 2020). En un estudio anterior, en la línea de RP de zanahoria morada utilizada en el presente estudio, la aplicación foliar de etefón, compuesto que en el interior de la planta se hidroliza para liberar etileno, aumentó la producción de antocianinas un 45% (Barba-Espín et al., 2020). Por otra parte, en plantas de zanahoria morada, la aplicación foliar de dosis diarias de 21,6 kJ – equivalente a los proporcionados por el tratamiento de 45 min del presente estudio – resultaron en un aumento del 10% de la concentración de antocianinas de la raíz (Barba-Espín et al. 2019). Con estos precedentes, en este estudio se comprobó el papel de la luz UV-B como regulador de la síntesis de antocianinas, y su aplicabilidad en cultivos de RP.

Ninguno de los tratamientos aumentó la biomasa o la materia seca (Figura 14A-B). Esto concuerda con estudios anteriores en los que la aplicación de luz UV como elicitor de compuestos bioactivos no afectó al peso, como en cultivos de callos de *Eurycoma longifolia* (Parikrama et al., 2014), o disminuyó el mismo significativamente, como en plantas de guisante (Alexieva et al., 2001) y trigo (Alexieva et al., 2001; Tian et al., 2007). A su vez, este comportamiento puede relacionarse con el uso de azúcares para la glicosilación de antocianinas (Winefield et al., 2009), de manera que un aumento en la producción de antocianinas pueda disminuir la formación de biomasa. Una consecuencia común a la exposición a la luz UV es la acumulación de compuestos fenólicos, que actúan como fotoprotectores o compuestos pantalla (Frohnmeier & Staiger, 2003). Los mecanismos de percepción y transducción de la señal en respuesta a la luz UV-B se ha descrito con precisión en hojas, tallos y frutos de plantas superiores (Cisnero-Zevallos, 2003; Solovchenko & Merzlyak, 2008; Agati & Tattini, 2010; Jenkins, 2014). Sin embargo, en raíces

pilosas no se ha estudiado en detalle. A nivel celular, la radiación UV-B promueve inicialmente la acumulación de ERO que, entre otros efectos, culmina con la acumulación de compuestos fenólicos – y antocianinas en particular – como parte de las defensas antioxidantes no enzimáticas, que actúan como eliminadores de ERO (Solovchenko & Merzlyak, 2008; Fini et al., 2011). En este sentido, tanto 10 minx2 como 45 minx2 proporcionaron incrementos significativos, del 58 y 50% con respecto al control, con valores de 3,43 y 3,25 mg/placa, respectivamente (Figura 4.61E). Se observó de este modo que el aumento de 10 a 45 min de tratamiento no supuso un incremento adicional en la concentración de antocianinas. Esto sugiere que el número de pulsos resultó más influyente en el efecto elicitor que la duración del mismo, y apoya la tesis de que las antocianinas funcionarían como compuestos pantalla y/o eliminadores de ERO en respuesta a la radiación UV-B.

En resumen, en este trabajo se confirma el papel de la luz UV-B como regulador de la síntesis de antocianinas, se demuestra su aplicabilidad en cultivos de RP y la utilidad de la iluminación LED para tal propósito. Posteriores estudios a mayor escala determinarán si la producción de antocianinas a partir de dicho sistema es una alternativa biotecnológica factible a nivel industrial y comercial.

6. Capítulo VI. Conclusión

6.1. Conclusión general

La cámara de experimentación de espectro modulable que se desarrollo fue mejorada a través de la realización de diferentes ensayos, consiguiendo que los ajustes realizados en cada una de las unidades permitieran aumentar su fiabilidad durante la realización de los ensayos programados. El empleo de sistemas programables permitió automatizar los procesos de recogida de datos y de control de las unidades. La validación, mediante la realización de diferentes ensayos biológicos, permitió realizar actuaciones de mejora en la cámara y abrió un abanico amplio de futuras intervenciones de mejora sobre todo en el chasis y paredes mediante el empleo de materiales poliméricos que permitan un mayor control de la temperatura, humedad, iluminación, reducción de peso, reducción del coste energético, eliminación del uso de plaguicidas y fungicidas que permitan llevar estas mejoras a una escala dimensiones mayores centrado en la producción vegetal y protección del medioambiente. El futuro de la agricultura pasa por una mayor investigación y conocimiento del comportamiento de las plantas en ambientes controlados y artificiales que permitan simular las condiciones del medio natural sin que ello suponga un cambio fisiológico importante en las mismas.

6.2 Conclusiones parciales

El sistema de control de la cámara de experimentación se ha automatizado para que el usuario de la cámara monitorice las condiciones ambientales de la cámara sin necesidad de tener conocimientos informáticos.

Los datos de los diferentes sensores son leídos por el sistema de control y automáticamente el propio sistema los almacena en la unidad local y si se dispone de conexión a internet el propio sistema se conecta y sincroniza con el servicio en la nube que se disponga.

El uso de luz LED roja estimula el proceso de germinación y el crecimiento temprano de plántulas de guisante y melón.

El uso de luz LED roja estimula el crecimiento de raíces secundarias en melón y de pelos radiculares en guisante.

El uso de luz LED UV-B estimula la acumulación de antocianinas en cultivos *in vitro* de raíces pilosas de zanahoria morada.

7. REFERENCIAS

- Acosta-Motos JR, Hernández JA, Álvarez S, Barba-Espín G, Sánchez-Blanco MJ (2017). *The long-term resistance mechanisms, critical irrigation threshold and relief capacity shown by Eugenia myrtifolia plants in response to saline reclaimed water*. Plant Physiol Biochem. 111: 244-256.
- Acosta-Motos JR, Noguera-Vera L, Barba-Espín G, Piqueras A, Hernández José A (2019). *Antioxidant metabolism and chlorophyll fluorescence during the acclimatisation to ex vitro conditions of micropropagated Stevia rebaudiana Bertoni plants*. Antioxidants, Special Issue "Antioxidants and Foods", 8, 615.
- Agati, G.; Tattini, M. (2010). *Multiple functional roles of flavonoids in photoprotection*. New Phytol., 186, 786–793.
- Akbarian Behnaz, Matloobi Mansour, Mahna Nasser. (2016). Effets of LED light on seed emergence and seedling quality of four bedding flowers. Journal of Ornamental Plants (Journal Of Ornamental and Horticultural Plants), Volume 6, Number 2; Page(s) 115-123.
- Alexieva, V, Sergiev, I, Mapelli, S., Karanov, E. (2001). *The effect of drought and ultraviolet radiation on growth and stress markers in pea and wheat*. Plant, Cell & Environment, vol 24 (12), pp 1337–1344.
- Apogee Instruments (<https://www.apogeeinstruments.com/>)
- Andersen OM, Jordheim M. (2005). *The anthocyanins*. In: Andersen OM, Markham KR, editors. Flavonoids: Chemistry, Biochemistry and Applications. Boca Raton, FL: CRC Press; 2005. p. 471–552.
- Arduino (<https://www.arduino.cc/>)
- Avercheva, O.V. ; Yu.A. Berkovich, A.N. Erokhin, T.V. Zhigalova, S.I. Pogosyan, y S.O. Smolyanina, (2009). *Growth and photosynthesis of Chinese cabbage plants grown under Light-Emitting Diode-based light source*. Russian Journal of Plant Physiology, 56(1): 14-21.

- Bae, G.; Choi, G. (2008). *Decoding of light signals by plant phytochromes and their interacting proteins*. Annu. Rev. Plant Biol., 59, 281–311.
- Bantis F, Smirnakou S, Ouzounis T, Koukounaras A, Ntagkas N, Radoglou K (2018) *Current status and recent achievements in the field of horticulture with the use of light-emitting diodes (LEDs)*. Scientia Horticulturae 235, 437–451.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.02.058>
- Barba-Espin, G.; Díaz-Vivancos, P.; Clemente-Moreno, M. J.; Albacete, A.; Faize, L.; Faize, M.; Pérez-Alfocea, F.; Hernández, J. A. (2010). *Interaction between hydrogen peroxide and plant hormones during germination and the early growth of pea seedlings*. Plant, Cell & Environment 33, 981-994.
- Barba-Espin G, Nicolas E, Almansa MS, Cantero-Navarro E, Albacete A, Hernández JA, Díaz-Vivancos P (2012). *Role of thioproline on seed germination: interaction ROS-ABA and effects on antioxidative metabolism*. Plant Physiol Biochem. 59: 30-6.
- Barba-Espín G, Chen ST, Agnolet S, Hegelund JN, Stanstrup J, Christensen JH, Müller R, Lütken HV. (2020). *Establishment of anthocyanin-producing black carrot hairy roots: polyphenols and antioxidant system respond to ethephon*. Journal of Experimental Botany. En revision.
- Barba-Espín G, Glied S, Crocoll C (2017). *Foliar-applied ethephon enhances the content of anthocyanin of black carrot roots (Daucus carota ssp. sativus var. atrorubens Alef.)*. BMC Plant Biol.;17(1):70. doi:10.1186/s12870-017-1021-7.
- Baťková, P., Pospíšilová, J. & Synková, H. (2008). *Production of reactive oxygen species and development of antioxidative systems during in vitro growth and ex vitro transfer*. Biol Plant 52, 413 <https://doi.org/10.1007/s10535-008-0085-5>
- Benson EE (2000). *Do free radicals have a role in plant tissue culture recalcitrance In Vitro* Cell Dev Biol—Plant 36:163–170.
- Budiarto, Kurniawan. (2010). *Spectral Quality Affects Morphogenesis on Anthurium Plantlet during In Vitro Culture*. doi:10.17503/agrivita.v32i3.20
- Biggs William W. (1986). Principles of radiation measurement LI-COR.

- Binder BY, Peebles CA, Shanks JV, San KY. (2009). *The effects of UV-B stress on the production of terpenoid indole alkaloids in Catharanthus roseus hairy roots*. Biotechnol Prog. 25(3):861-5.
- Bingham, G.E., Salisbury, F.B., Campbell, W.F., Carman, J.G., Bubenheim, D.L., Yendler, B., Sytchev, V.N., Berkovitch, Y., Levinskikh, M.A., Podolsky, I.G. (1996). *The Spacelab-Mir-1 "Greenhouse – 2" experiment*. Adv. SpaceRes. 18, 225 – 232.
- Bingham, G., Jones, S., Or, D., Podolski, I., Levinskikh, M., Sytchov, V., Ivanova, T., Kostov, P., Sapunova, S., Dandolov, I., Bubenheim, D., Jahns, G., (2000). *Microgravity effects on water supply and substrate properties in porous matrix root support system*. Acta Astronaut. 47, 839-848.
- Bingham, G.E., Topham, T.S., Mulholland, J.M., Podolsky, I.G., (2002). *Lada: the ISS plant substrate microgravity test bed*. In: Proceedings of the 32nd International Conference on Environmental Systems. San Antonio, Texas
- Bingham, G.E., Topham, T.S., Taylor, A., Podolsky, I.G., Levinskikh, M.A., Sychev, V.N., (2003). *Lada: ISS plant growth technology checkout*. In: Proceedings of the 33rd International Conference on Environmental Systems. Vancouver, Canada.
- Bourgaud, F., Gravot, A., Milesi, S., and Gontier, E. (2001). *Production of plant secondary metabolites: a historical perspective*. Plant Sci. 161: 839–851.
- Bourget C. Michael, (2008). *An Introduction to Light-emitting Diodes*. HortScience 43. 1944-1946 <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.43.7.1944>
- Bula, R.J., Tennessen, D.J., Morrow, R.C., Tibbitts, T.W., (1994). *Light emitting diodes as a plant lighting source*. In: International Lighting in Controlled Environments Workshop. University of Wisconsin, NASA.
- Brinckmann, E., (2005). *ESA hardware for plant research on the International Space Station*. Adv. Space Res. 36, 1162 – 1166.
- CADE SIMU ([https:// cadesimu.net](https://cadesimu.net))

- Carocho M, Barreiro MF, Morales P, Ferreira I.(2014). *Adding Molecules to Food, Pros and Cons: A Review on Synthetic and Natural Food Additives*. Compr Rev Food Sci Food Saf.;13:377–399. doi: 10.1111/1541-4337.12065.
- Cisco System (<https://www.cisco.com/>)
- Cisneros-Zevallos, L. (2003) *The Use of Controlled Postharvest Abiotic Stresses as a Tool for Enhancing the Nutraceutical Content and Adding-Value of Fresh Fruits and Vegetables*. Food Sci., 68, 1560–1565.
- Correll, M.J. and Kiss, J.Z. (2005) *The roles of phytochromes in elongation and gravitropism of roots*. Plant Cell Physiol. 46, 317–323.
- Chen M.; J. Chory, y C. Fankhauser, (2004). *"Light signal transduction in higher plants"*. Annual Review of Genetics, 38: 87-117.
- Chen X, Xue X, Guo W, Wang L, Qiao X (2016) *Growth and nutritional properties of lettuce affected by mixed irradiation of white and supplemental light provided by light-emitting diode*. Sci. Hortic. 200, 111–118.
- Choi, H., Cho, H. (2019) *Root hairs enhance Arabidopsis seedling survival upon soil disruption*. Sci Rep 9, 11181.
- Cresswell, E.G.; Grime, J.P. (1981). *Induction of a light during seed development and its ecological consequences*. Nature., 291, 583–585.
- Salisbury, F.B.; Ross, C.W. (1992) Plant Physiology, 4th ed.; Wadsworth: OH, USA.
- Despommier, D., (2011). *The vertical farm : feeding the world in the 21st century*, St. Martins Press, New York,. doi: B-978-0-312-61139-2
- Davis, P.A., Burns, C., (2016). *Photobiology in protected horticulture*. Food Energy Secur.5, 223–238.
- De Almeida, Aníbal ; Santos, Bruno ; Bertoldi, Paolo ; Quicheron, Michel. (2014). *Solid state lighting review – Potential and challenges in Europe*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 34. 30–48. 10.1016/j.rser.2014.02.029.
- Del Río, Iciar; Calduch, Eduard; Saurina, Daniel (2017) *Diseño de una luminaria LED*. TFG, Universitat Politècnica de Catalunya.

- Devlin, P. (2016). Plants wait for the lights to change to red. PNAS., 113, 7301–7303.
- Dhakal, R., Baek, K.H (2014) *Short period irradiation of single blue wavelength light extends the storage period of mature green tomatoes*. Postharvest Biol. Technol. 90,73–77.
- Duffie, N.A., Bula, R.J., Morrow, R.C., Quirin, P.E., Macaulay, P.D., Wranovsky, S.R., Vignali, J.C., Tibbits, T.W., (1994). *Humidity and temperature control in the ASTROCULTURE™ flight experiment*. In: Proceedings of the 24th International Conference on Environmental Systems. Friedrichshafen, Germany.
- Duffie, N.A., Zhou, W., Morrow, R.C., Bula, R.J., Tibbits, T.W., Wranovsky, S.R., Macaulay, P.D., (1995). *Control and monitoring of environmental parameters in the ASTROCULTURE™ flight experiment*. In: Proceedings of the 25th International Conference on Environmental Systems. San Diego, California.
- Dutta Gupta, S.; Jatothu, B. (2013) *Fundamentals and applications of light-emitting diodes (LEDs) in in vitro plant growth and morphogenesis*. Plant Biotechnol. Rep, 7, 211–220.
- Dutta Gupta S, Sahoo TK (2015) *Light emitting diode (LED)-induced alteration of oxidative events during in vitro shoot organogenesis of Curculigo orchoides Gaertn*. Acta Physiol Plant 37:233
- Dutta Gupta, S.; Agarwal, A. (2017). *Influence of LED Lighting on In Vitro Plant Regeneration and Associated Cellular Redox Balance*. In *Light Emitting Diodes for Agriculture*; , Ed.; Springer Nature: Singapore, Malaysia,; pp. 273–303.
- ERASMUS Centre – Directorate of Human Space flight and Operations, European Modular Cultivation System (EMCS) (20016).
- Faize M, Burgos L, Faize L, et al. (2011) *Involvement of cytosolic ascorbate peroxidase and Cu/Zn-superoxide dismutase for improved tolerance against drought*. Journal of Experimental Botany 62: 2599–2613.
- Fini, A.; Brunetti, C.; Di Ferdinando, M.; Ferrini, F.; Tattini, M. (. 2011) *Stress-induced flavonoid biosynthesis and the antioxidant machinery of plants*. Plant Signal Behav, 6, 709–711.

- Fkiara A., Barba-Espín G., El-Houri R., Müller R., Christensen L.P., Lütken H. (2020) *Elicitation of Flavonoids in Kalanchoe pinnata by Agrobacterium rhizogenes-Mediated Transformation and UV-B Radiation*. Medicinal Plants: Biodiversity, Sustainable Utilization and Conservation. Springer, Singapore
- Folta KM, Childers KS (2008) *Light as a growth regulator: controlling plant biology with narrow-bandwidth solid-state lighting systems*. HortScience 43, 1957-1964.
- Frantz, J.M., Joly, R.J., Mitchell, C.A., (2000). *Intracanopy lighting influences radiationcapture, productivity, and leaf senescence in cowpea canopies*. J. Am. Soc. Hortic.Sci. 125, 694–701.
- Frohnmeier, H.; Staiger, D. (2003) *Ultraviolet-B radiation-mediated responses in plants. Balancing damage and protection*. Plant Physiol., 133, 1420–1428.
- Giri, A., and Narasu, M. L. (2000). *Transgenic hairy roots: recent trends and applications*. Biotechnol. Adv. 18: 1–22.
- Gómez, C., Morrow, R.C., Bourget, C.M., Massa, G.D., Mitchell, C.A (2013) *Comparison of intracanopy light-emitting diode towers and overhead high-pressure sodium lamps for supplemental lighting of greenhouse-grown tomatoes*. Horttechnology 23, 93–98.
- Grindstaff, B., M. E. Mabry, P. D. Blischak, M. Quinn, and J. C. Pires. (2019). *Affordable remote monitoring of plant growth in facilities using Raspberry Pi computers*. Applications in Plant Sciences 7(8): e11280 10.1002/aps3.11280
- Grubišić, D.; Konjević, R. (1990). *Light and nitrate interaction in phytochrome-controlled germination of Paulownia tomentosa seeds*. Planta., 181, 239–243.
- Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2013). *Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions*. Future Generation Computer Systems, 29(7), 1645-1660.
- Gupta SD, Jatothu B (2013) *Fundamentals and applications of light-emitting diodes (LEDs) in in vitro plant growth and morphogenesis*. Plant Biotechnol Rep 7:211–220.
- Gupta, D (2017) *Light Emitting Diodes for Health*. <http://dx.doi.org/10.1007/978-981-10-5807-3>.

- Haeuplik-Meusburger, S., Paterson, C., Schubert, D., Zabel, P., (2014). *Greenhouses and their humanizing synergies*. Acta Astronaut. 96, 138-150.
- Halder, M., Sarkar, S., & Jha, S. (2019). *Elicitation: A biotechnological tool for enhanced production of secondary metabolites in hairy root cultures*. Eng. Life Sci., 19(12), 880–895.
- Halstead, T.W., Dutcher, F.R., (1984). *Experiments on plants grown in space Status and prospects*. Ann. Botany 54, 3-18.
- Harland, D., (2004). *The Story of the MIR Space Station*. Springer, Dordrecht.
- Harvey, B., Zakutnyaya, O., (2011). *Russian Space Probes: Scientific Discoveries and Future Missions*. Springer, New York.
- Hasan, M.M., Bashir, T., Ghosh, R., Lee, S.K., Bae, H (2017) *An overview of LEDs' effectson the production of bioactive compounds and crop quality*. Molecules 22, 1–12.
- Hernández JA; Jiménez A; Mullineaux PM; Sevilla F (2000) *Tolerance of pea (Pisum sativum L.) to long-term saltstress is associated with induction of antioxidant defenses*. Plant Cell Environ., 23, 853–862.
- Horvath, D.M.; Chua, N.H. (1994). *The role of salicylic acid in systemic acquired resistance*. Curr. Opin. Biotechnol. , 5, 131–136.
- Huang X, Yao J, Zhao Y, Xie D, Jiang X, Xu Z. (2016). *Efficient Rutin and Quercetin Biosynthesis through Flavonoids-Related Gene Expression in Fagopyrum tataricum Gaertn. Hairy Root Cultures with UV-B Irradiation*. Front Plant Sci. 7:63. doi:10.3389/fpls.2016.00063
- Huda-Faujan, N.; Noriham, A.; Abdullah Sani, N.; Babji, A.S. (2009). *Antioxidant activity of plants methanolic extracts containing phenolic compounds*. Afr. J. Biotechnol. 8, 484–489
- Hummerick, M., Garland, J., Bingham, G., Sychev, V., Podolsky, I., (2010). *Microbiological analysis of Lada Vegetable Production Units (VPU) to define critical control points*

- and procedures to ensure the safety of space grown vegetables.* In: Proceedings of the 40th International Conference on Environmental Systems. Barcelona, Spain.
- Hummerick, M., Garland, J., Bingham, G., Wheeler, R., Topham, S., Sychev, V., Podolsky, I., (2011). *A hazard analysis critical control point plan applied to the Lada vegetable production units (VPU) to ensure the safety of space grown vegetables.* In: Proceedings of the 41st International Conference on Environmental Systems. Portland, Oregon.
- Ibarra, S.E.; Auge, G.; Sánchez, R.A.; Botto, J.F. (2013) *Transcriptional Programs Related to PhytochromeA Function in Arabidopsis Seed Germination.* Mol. Plant., 6, 1261–1273.
- Ivanova, T.N., Bercovich, Y., Mashinskiy, A.L., Meleshko, G.I., (1993). *The first “space” vegetables have been grown in the “SVET” greenhouse using controlled environmental conditions.* Acta Astronaut. 29, 639 – 644.
- Ivanova, T., Sapunova, S., Dandolov, I., Ivanov, Y., Meleshko, G., Mashinsky, A., Berkovich, Y., (1994). *‘SVET’ space greenhouse on board experiment data received from ‘MIR’ station and future prospects.* Adv. SpaceRes. 14, 343-346.
- Ivanova, T.N., Kostov, P.T., Sapunova, S.M., Dandolov, I.W., Salisbury, F.B., Bingham, G.E., Sytchov, V.N., Levinskikh, M.A., Podolski, I.G., Bubenheim, D.B., Jahns, G., (1998). *Six-month space greenhouse experiments – A step to creation of future biological life support systems.* Acta Astronaut. 42, 11-23.
- Ivanova, T., (2002). *Greenhouse aboard Mir shows plants can survive in space, 21st Century* 41-49.
- Ivanova, T., (2010). *Plant biology under space factors: microgravity.* In: Proceedings of the 4th International AgroSpace Workshop. Sperlonga, Italy.
- Jansen, M.A.K. (2002). *Ultraviolet-B radiation effects on plants: Induction of morphogenic responses.* Physiol. Plant. 116, 423–429.
- Jenkins, G.I. (2009). *Signal transduction in responses to UV-B radiation.* Annu. Rev. Plant Biol. 2009, 60, 407–431.

- Jenkins, G.I. (2014). *The UV-B Photoreceptor UVR8: From Structure to Physiology*. Plant Cell, 26, 21–37
- Joosen, R.V.L.; Arends, D.; Li, Y.; Willems, L.A.J.; Keurentjes, J.J.B.; Ligterink, W.; Jansen, R.C.; Hilhorst, H.W.M. (2013). *Identifying Genotype-by-Environment Interactions in the Metabolism of Germinating Arabidopsis Seeds Using Generalized Genetical Genomics*. Plant Phys., 162, 553–566.
- Jordan, B.R. (1996). *The effects of ultraviolet-B radiation on plants: A molecular perspective*. Adv. Bot. Res. 22, 97–162.
- Kamada, M., Omori, K., Nishitani, K., Hoson, T., Shimazu, T., Ishioka, N., (2007) *JAXA space plant research on the ISS with European modular cultivation system*. Biol. Sci. Space 21, 62-66.
- Kazunari Nozue, Stacey L. Harmer, and Julin N. Maloof (2011). *Genomic Analysis of Circadian Clock-, Light-, and Growth-Correlated Genes Reveals PHYTOCHROME-INTERACTING FACTOR5 as a Modulator of Auxin Signaling in Arabidopsis*. Plant Physiology, <https://doi.org/10.1104/pp.111.172684>
- Khoo HE, Azlan A, Tang ST, Lim SM. (2017). *Anthocyanidins and anthocyanins: colored pigments as food, pharmaceutical ingredients, and the potential health benefits* Food Nutr. Res. ;61(1):1361779. doi:10.1080/16546628.2017.1361779
- Kim HH, Goins GD, Wheeler RM, Sager JC (2004) *Green-light supplementation for enhanced lettuce growth under red- and blue-light-emitting diodes*. HortSci 39, 1617–1622.
- Kim SJ, Hahn EJ, Heo JW, Paek KY (2004) *Effects of LEDs on net photosynthetic rate, growth and leaf stomata of chrysanthemum plantlets in vitro*. Sci Hort 101, 143-151.
- Kiselev KV, Dubrovina AS, et al. (2007) *The rolB gene-induced overproduction of resveratrol in Vitis amurensis transformed cells*. Journal of biotechnology, 128(3):681-692.
- Kozai, T. (2013). *Sustainable plant factory closed plant production systems with artificial light for high resource use efficiencies and quality produce*. Acta Hort. 1004, 27-40. doi:10.17660/ActaHortic.2013.1004.2

- Kozai, T., Genhua, N., Takagaki, M (2015) *Plant Factory An Indoor Vertical Farming Food Production*.
- Kozai, T., Kazuhiro, F., Runkle, E.S., (2016). *LED Lighting for Urban Agriculture*.
<http://dx.doi.org/10.1007/978-981-10-1848-0>.
- Kuang, A., Popova, A., Xiao, Y., Musgrave, M.E., (2000). *Pollination and embryo development in Brassica rapa L. In microgravity*. Int. J Plant Sci. 161, 203-211.
- Lai, X.; Yang, T.; Wang, Z.; Chen, P. (2019). *IoT Implementation of Kalman Filter to Improve Accuracy of Air Quality Monitoring and Prediction*. Appl. Sci., 9, 1831.
<https://doi.org/10.3390/app9091831>
- Lee, M.J., Son, J.E., Oh, M.M (2014) *Growth and phenolic compounds of Lactuca sativa L. grown in a closed-type plant production system with UV-A, -B, or -C lamp*. J. Sci. Food Agric. 94, 197–204.
- Levine, H., Cox, D., Reed, D., Mortenson, T., Shellack, J., Wells, H., Murdoch, T., Regan, M., Albino, S., Cohen, J., (2009). *The advanced biological research system (ABRS): a single middeck payload for conducting biological experimentation on the international space station*. In: Proceedings of the 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Orlando, Florida.
- Li, Kubota C (2009) *Effects of supplemental light quality on growth and phytochemical of baby leaf lettuce*. Environ. Exp. Bot. 67, 59–64.
- Li T (2015) *Using Hairy Roots for Production of Valuable Plant Secondary Metabolites* Adv Biochem Eng Biotechnol 149:275-324.
- Li, Y., Xin, G., Wei, M., Shi, Q., Yang, F., Wang, X (2017) *Carbohydrate accumulation and sucrose metabolism responses in tomato seedling leaves when subjected to different light qualities*. Sci. Hortic. 225, 490–497.
- Link, B.M., Durst, S.J., Zhou, W., Stankovic, B., (2003). *Seed-to-seed growth of Arabidopsis Thaliana on the international space station*. Adv. Space Res. 31, 2237-2243.

- Liu, W., (2012). *Light Environmental Management for Artificial Protected Horticulture*. Agrotechnology, 1: 1-4.
- Lu, N., Maruo, T., Johkan, M., Hohjo, M., Tsukagoshi, S., Ito, Y., Ichimura, T., Shinohara, Y. (2012) *Effects of supplemental lighting with light-emitting diodes (LEDs) on tomato yield and quality of single-truss tomato plants grown at high planting density*. Environ. Control Biol. 50, 63–74.
- Lymperopoulos, P.; Msanne, J.; Rabara, R. (2018). *Phytochrome and Phytohormones: Working in Tandem for Plant Growth and Development*. Front Plant Sci., 9, 1037.
- Ma HD. 2011. *Internet of things: Objectives and scientific challenges*. Journal of computer science and technology 26 (6): 919-924.
- Mancinelli, A.L.; Borthwick, H.A. (1964). *Photocontrol of germination and phytochrome reaction in dark-germinating seeds of Lactucasativa L*. Ann. Bot., 28, 9–24.
- Massa G.D., Kim H-H, Wheeler R.M., Mitchell C.A. (2008). *Plant productivity in response to LED lighting*. Hortscience. 43: 1951-1956
<https://doi.org/10.21273/HORTSCI.43.7.1951>
- Massa, G.D., Newsham, G., Hummerick, M.E., Caro, J.L., Stutte, G.W., Morrow, R.C., Wheeler, R.M., (2013). *Preliminary species and media selection for the VEGGIE space hardware*. Gravit. SpaceRes. 1, 95-106.
- Matlab (<https://es.mathworks.com>)
- Mitchell, C., Both, A.-J., Bourget, M., Burr, J., Kubota, C., Lopez, R., Morrow, R., Runkle, E (2012) *LEDs: the future of greenhouse lighting Chron. Hortic*. 52, 1–9.
- Monje, O., Bingham, G.E., Carman, J.G., Campbell, W.F., Salisbury, F.B., Eames, B.K., Sytchev, V., Levinskikh, M.A., Podolsky, I., (2000). *Canopy photosynthesis and transpiration in microgravity: gas exchange measurements aboard Mir*. Adv. Space Res. 26, 303-306.
- Morrow, R.C., Dinauer, W.R., Bula, R.J., Tibbitts, T.W., (1993). *The ASTROCULTURE™ – 1 flight experiment: pressure control of the WCSAR porous tube nutrient delivery*

- system. In: Proceedings of the 23rd International Conference on Environmental Systems. Colorado Springs, Colorado.
- Morrow, R.C., Bula, R.J., Tibbitts, T.W., Dinauer, W.R., (1994). *The ASTROCULTURE™ flight experiment series, validating technologies for growing plants in space*. Adv. Space Res. 14, 29-37.
- Morrow, R.C., Remiker, R.W., Mischnick, M.J., Tuominen, L.K., Lee, M.C., Crabb, T.M., (2005). *A low equivalent system mass plant growth unit for space exploration*. In: Proceedings of the 35th International Conference on Environmental Systems. Rome, Italy.
- Morrow, R.C (2008) *LED lighting in horticulture*. HortScience 43, 1947–1950.
- Musgrave, M.E., Kuang, A., Porterfield, D.M., (1997b). *Plant reproduction in space flight environments*. Gravit. Space Biol. Bull 10, 83-90.
- Musgrave, M.E., Kuang, A., (2003). *Plant reproductive development during spaceflight*. Developmental Biology Research in Space. Elsevier, pp. 1-23.
- Neff, M.M.; Sanderson, L.; Tedor, D. (2009). *Light-Mediated Germination in Lettuce Seeds: Resurrection of a Classic Plant Physiology Lab Exercise*. Am Biol Teach., 71, 367–370.
- Nguyen & De Cremer, 2016. *The fairness challenge of the internet of things*. European Business Review. Enero 2016. Accedido 9/8/2020. 2020.
- Ntagkas, N., Min, Q., Woltering, E.J., Labrie, C., Nicole, C.C.S., Marcelis, L.F.M (2016) *Illuminating tomato fruit enhances fruit vitamin C content*. ActaHortic. 1134,351–356.
- Ouzounis, T., RaziParjikolaei, B., Fretté, X., Rosenqvist, E., Ottosen, C.-O (2015a) *Predawn and high intensity application of supplemental blue light decreases the quantum yield of PSII and enhances the amount of phenolic acids, flavonoids, and pigments in Lactuca sativa*. Front. Plant Sci. 6, 1–14.
- Ouzounis T, Rosenqvist E, Ottosen CO (2015b) *Spectral Effects of Artificial Light on Plant Physiology and Secondary Metabolism: A Review*. Hortscience 50, 1128-1135.

- Padmanabha, M., Streif, S. (2019). *Design and Validation of a Low Cost Programmable Controlled Environment for Study and Production of Plants, Mushroom, and Insect Larvae*. Appl. Sci., 9, 5166. <https://doi.org/10.3390/app9235166>
- Panjai, L., Noga, G., Fiebig, A., Hunsche, M (2017) *Effects of continuous red light and short daily UV exposure during postharvest on carotenoid concentration and antioxidant capacity in stored tomatoes*. Sci. Hortic. 226, 97–103.
- Patterson, G. ; Sobral, M. (2007). Efecto Peltier, Departamento de Física, Universidad de Buenos Aires.
- Paul, A.-L., Amalfitano, C.E., Ferl, R.J., (2012). *Plant growth strategies are remodelled by spaceflight*. BMC Plant Biol. 12, 232.
- Paul, A.-L, Zupanska, A.K., Schultz, E.R., Ferl, R.J., (2013b). *Organ specific remodelling of the Arabidopsis transcriptome in response to spaceflight*. BMC Plant Biol. 13, 112.
- Perera et. al. 2014. *Sensing as a Service Model for Smart Cities Supported by Internet of Things*. Transactions on Emerging Telecommunications Technology 25 (1): 81-93.
- Pistelli L, Giovannini A, et al. (2010) *Hairy Root Cultures for Secondary Metabolites Production. In BioFarms for Nutraceuticals Functional Food and Safety Control by Biosensors*. Editors: Giardi, Maria Teresa, Rea, Giuseppina, Berra, Bruno.
- Porterfield, D.M., Neichitailo, G.S., Mashinski, A.L., Musgrave, M.E., (2003). *Spaceflight hardware for conducting plant growth experiments in space: the early years 1960 – 2000*. Adv. Space Res. 31, 183-193.
- Rabab Sanouba, Roberta Calone, Enrico Noli, Lorenzo Barbanti. (2018). *Data on seed germination using LED versus fluorescent light under growth chamber conditions*. Data in Brief, 19, 594-600.
- Raspberry Pi (<https://www.raspberrypi.org/>)
- Relux informatik AG, Switzerland (Relux Informatik AG, Münchenstein, Switzerland).,
- Reyes, L.F.; Cisneros-Zevallos, L. (2003). *Wounding stress increases the phenolic content and antioxidant capacity of purple-flesh potatoes (Solanum tuberosum L.)*. J. Agric. Food Chem., 51, 5296–5300.

- Riksa Parikrama, and Rizkita Rachmi Esyanti. (2014). *Effect of UV Elicitation on Callus Growth, Alkaloid and Terpenoid Contents in Eurycoma longifolia Jack*. Int. Journal of Advances in Chemical Eng., & Biological Sciences (IJACEBS) Vol. 1, Issue 1 ISSN 2349-1507 EISSN 2349-1515
- Nicolás Rivero, Nicolás, Andrés Cardozo, Guzmán Pérez y Matías Sellanes (2010). *Medida de flujo luminoso en esfera de Ulbricht. Estudio de Incertidumbres. Intercomparación con cálculo por integración*. Encuentro de potencia, Instrumentación y Medidas, EPIM 10. Montevideo, Uruguay. <https://iie.fing.edu.uy/publicaciones/2010/RCPS10>
- Rosental, L.; Nonogaki, H.; Fait, A. (2014) *Activation and regulation of primary metabolism during seed germination*. Seed Sci. Res., 24, 1–15.
- Ruby Tiwari, C.S. Rana. (2015) *Plant secondary metabolites: a review*. International Journal of Engineering Research and General Science Volume 3, Issue 5, 661-670, 2015
- Salisbury, F.B., (1999). *Chapter 5 growing crops for space explorers on the Moon, Mars, or in Space*. In: Bontinc, S.L. (Ed.), *Advances in Space Biology and Medicine*. Elsevier, pp. 131-162.
- Salisbury, F.B., Campbell, W.F., Carman, J.G., Bingham, G.E., Bubenheim, D.L., Yendler, B., Sytchev, V., Levinskikh, M.A., Ivanova, I., Chernova, L., Podolsky, I., (2003). *Plant growth during the greenhouse II experiment on the Mir orbital station*. Adv. Space Res. 31, 221-227.
- Salisbury FJ, Hall A, Grierson CS, Halliday KJ (2007) *Phytochrome coordinates Arabidopsis shoot and root development*. Plant J. 50:429-38.
- Samuolienė, G., Viršilė, A., Brazaitytė, A., Jankauskienė, J., Sakalauskienė, S., Vaštakaitė, V., Novičkovas, A., Viškelienė, A., Sasnauskas, A., Duchovskis, P (2017) *Blue light dosage affects carotenoids and tocopherols in microgreens*. Food Chem. 228, 50–56.
- Shinde AN, Malpathak N, et al. (2009) *Enhanced production of phytoestrogenic isoflavones from hairy root cultures of Psoralea corylifolia L. Using elicitation and precursor feeding*. Biotechnology and Bioprocess Engineering 14(3):288-294.

- Smetanska I. (2008). *Production of secondary metabolites using plant cell cultures*. Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology, 111(July), 187–228. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-70536-9>
- Solano, C.J.; Hernández, J.A.; Suardíaz, J.; Barba-Espín, G. (2020). *Impacts of LEDs in the Red Spectrum on the Germination, Early Seedling Growth and Antioxidant Metabolism of Pea (Pisum sativum L.) and Melon (Cucumis melo L.)*. Agriculture , 10, 204. <https://doi.org/10.3390/agriculture10060204>
- Solheim, B., (2009). *3D information from 2D images recorded in the European modular cultivation system on the ISS*. Adv. SpaceRes. 44, 1382-1391.
- Solovchenko, A.; Merzlyak, M.N. (2008). *Screening of Visible and UV Radiation as a Photoprotective Mechanism in Plants*. Russ. J. Plant Physiol, 55, 719–737.
- Son, K.-H., Lee, J.-H., Oh, Y., Kim, D., Oh, M.-M., In, B.-C (2017) *Growth and bioactive compound synthesis in cultivated lettuce subject to light-quality changes*. HortScience 52, 584–591.
- Stutte, G.W. (2009). *Light-emitting Diodes for Manipulating the Phytochrome Apparatus*. HortScience., 44, 231–234.
- Stutte GW, Edney S, Skerrett T (2009) *Photoregulation of bioprotectant content of redleaf lettuce with light-emitting diodes*. HortScience 44, 79–82.
- Stutte, G., Wheeler, R., Morrow, R., Newsham, G., (2011a). *Operational evaluation of VEGGIE food production system in the habitat demonstration unit*. In: Proceedings of the 41st International Conference on Environmental Systems. Portland, Oregon.
- Stutte, G., Wheeler, R., Morrow, R., Newsham, G., (2011b). *Concept for sustained plant production on ISS using VEGGIE capillary mat rooting system*. In: Proceedings of the 41st International Conference on Environmental Systems. Portland, Oregon.
- Sychev, V.N., Levinskikh, M.A., Gostimsky, S.A., Bingham, G.E., Podolsky, I.G., (2007). *Space flight effects on consecutive generations of peas grown onboard the Russian segment of the international space station*. ActaAstronaut. 60, 426-432

- Taiz, L., Zeiger, E. (2006). *Fisiología Vegetal*. vol.1 Col.lecció "Ciencias Experimentals". Universitat Jaume I.
- Texas Instruments (<https://www.ti.com/tool/TINA-TI>)
- Thimijan, R. W. and R.D. Heins. (1983). *Photometric, radiometric and quantum light units of measure: A review of procedures for interconversion*. HortScience, 18:818-822.
- Tian, X. R., Lei, Y. B. (2007) "*Physiological responses of wheat seedlings to drought and UV-B radiation*". Russian Journal of Plant Physiology, vol 54 (5), pp 676-682.
- Tinus, R.W. (1995) *A new greenhouse photoperiod lighting system for prevention of seedling dormancy*. Tree Plant Notes 46, 11–14.
- Vermesan, O., Friess, P. *Internet of Things – From Research and Innovation to Market Deployment*. Disponible en: <http://www.internet-of-things-research.eu/>
- Ward, C.H., Wilkes, S.S., Craft, H.L., (1970). Effect of prolonged near weight less condition on growth and gas Exchange of photosynthetic plants. Dev. Ind. Microbiol 276-295.
- Winefield, C., Davies, K., & Gould, K. (2009). *Anthocyanins: Biosynthesis, Functions, and Applications*.
- Witkowska, I.M., (2013). *Factors Affecting the Postharvest Performance of Fresh-Cut Lettuce*. PhD thesis, Wageningen University, Wageningen, NL. ISBN 978-94-6173-574-4.
- Yano, S., Kasahara, H., Masuda, D., Tanigaki, F., Shimazu, T., Suzuki, H., Karahara, I., Soga, K., Hoson, T., Tayama, I., Tsuchiya, Y., Kamisaka, S., (2013). *Improvements in and actual performance of the plant experiment unit onboard Kibo, the Japanese experiment module on the international space station*. Adv. Space Res. 51, 780-788
- Zabel, P.; Bamsey, M.; Schubert, D.; Tajmar, M., (2016) *Review and analysis of over 40 years of space plant growth systems*. Life Sciences in Space Research 10, 1-16.
- Zhang T., K.M. Folta, (2012). *Green light signaling and adaptive response*". Plant Signaling & Behavior, 7(1): 1-4.

- Zhou, W., Duffie, N.A., Mookherjee, B., (2000). *Performance of the ASTROCULTURE™ plant growth unit (ASC-8) during the STS-95 mission*. In: Proceedings of the 30th International Conference on Environmental Systems. Toulouse, France.
- Zhou, W., Durst, S.J., Demars, M., Stankovic, B., Link, B.M., Tellez, G., Meyers, R.A., Sandstrom, P.W., Abba, J.R., (2002). *Performance of the advanced ASTROCULTURE™ plant growth unit during ISS-6A/7A mission*. In: Proceedings of the 32nd International Conference on Environmental Systems. San Antonio, Texas
- Zhou, W., (2005). *Advanced ASTROCULTURE™ Plant growth unit: capabilities and performances*. In: Proceedings of the 35th International Conference on Environmental Systems. Rome, Italy

8. ANEXO

LED Test Report

Product Mark

Product Type : LM. EXP. ROJO 16°-10

Manufacturer : CEBAS-CSIC & UPCT

Temperature : 21'C

Humidity : 65%

Operator : CJ SOLANO

Test Date : 2020-08-05 18:17:14

Remark: IGLUX

Chroma Parameters

Chro.Coord.: x=0.7236 y=0.2764 u=0.5943 v=0.3406 duv=-0.0016

CCT: 1644K Dominant Wave.: 645.8nm Purity: 100.0%

Flux RGB Ratio: R=100.0%, G=0.0%, B=0.0% Peak Wave: 660.7nm Half Width: 18.6nm

Rendering Index: Ra=-45.6

R1 = -88 R2 = 25 R3 = 11 R4 = -92 R5 = -57 R6 = 21 R7 = -25 R8 = -160

R9 = -469 R10 = 3 R11 = -125 R12 = -33 R13 = -62 R14 = 36 R15 = -117

Fidelity Index (Rf) = 0.0

Gamut Index (Rg) = 0.0

Photo Parameters

Flux: 79.14lm

Effi.: 9.8lm/W

Radiant: 1718.8mW

Ri: 0.0mW/sr

Efficiency: 0.692

Effi Level: C (EU 874-2012)

Ele. Parameters

Voltage: U=220.00V

Current: I=0.0810A

Power: P=8.100W

Power Factor: PF=0.460

Instrument state

Instrument: Hopoo HP8000S

Integral Time: 19.773ms

VPeak: 15204

VDark: 1267

Scan Range: 380-780nm

Product ID: 201401527

Hopoo Optoelectronics Technology CO.,LTD www.hopoo.net

LED Test Report

Product Mark

Product Type : LM. EXP. VERDE 16°-10

Manufacturer : CEBAS-CSIC & UPCT

Temperature : 21°C

Humidity : 65%

Operator : CJ SOLANO

Test Date : 2020-08-05 17:33:25

Remark: IGLUX

Chroma Parameters

Chro.Coord.: $x=0.1533$ $y=0.7019$ $u=0.0552$ $v=0.3788$ $duv=0.1595$

CCT: 8233K Dominant Wave.: 521.9nm Purity: 73.7%

Flux RGB Ratio: R=0.0%, G=98.7%, B=1.2% Peak Wave: 518.7nm Half Width: 37.6nm

Rendering Index: Ra=-19.4

R1 = -37 R2 = -5 R3 = -11 R4 = -63 R5 = -10 R6 = -7 R7 = 5 R8 = -27

R9 = -364 R10 = -94 R11 = -89 R12 = -21 R13 = -43 R14 = 44 R15 = -34

Fidelity Index (Rf) = 0.9

Gamut Index (Rg) = 8.5

Photo Parameters

Flux: 1212.66lm

Effi.: 27.1lm/W

Radiant: 3181.2mW

Ri: 0.0mW/sr

Efficiency: 0.497

Effi Level: B (EU 874-2012)

Ele. Parameters

Voltage: U=220.00V

Current: I=0.3650A

Power: P=44.800W

Power Factor: PF=0.557

Instrument state

Instrument: Hopoo HP8000S

Integral Time: 8.102ms

VPeak: 13828

VDark: 1182

Scan Range: 380-780nm

Product ID: 201401527

Hopoo Optoelectronics Technology CO.,LTD www.hopoo.net

LED Test Report

Product Mark

Product Type : LM. EXP. AZUL 16°-10
 Temperature : 21°C
 Operator : CJ SOLANO
 Remark: IGLUX

Manufacturer : CEBAS-CSIC & UPCT
 Humidity : 65%
 Test Date : 2020-08-05 17:19:00

Chroma Parameters

Chro.Coar.: $x=0.1548$ $y=0.0223$ $u=0.2093$ $v=0.0452$ $duv=-0.0825$
 CCT:100000K Dominant Wave.:452.8nm Purity:99.4%
 Flux RGB Ratio: $R=0.2\%$, $G=6.6\%$, $B=93.2\%$ Peak Wave:449.6nm Half Width:20.9nm

Rendering Index:Ra=-68.7

R1 =-16 R2 =-67 R3 =-173 R4 =-100 R5 =-4 R6 =-77 R7 =-68 R8 =-44
 R9 =-282 R10=-286 R11=-125 R12=-152 R13=-43 R14=-44 R15=-1
 Fidelity Index(Rf)=-214748000.0 Gamut Index(Rg)=-214748000.0

Photo Parameters

Flux:68.30lm Effi.:5.9lm/W Radiant:2379.1mW Ri:0.0mW/sr
 Efficiency:1.092 Effi Level:E (EU 874-2012)

Ele. Parameters

Voltage:U=220.00V Current:I=0.1080A
 Power:P=11.600W Power Factor:PF=0.487

Instrument state

Instrument:Hopoo HP8000S
 VDark: 1264

Integral Time: 6.505ms
 Scan Range: 380-780nm

VPeak: 15828
 Product ID: 201401527

LED Test Report

Product Mark

Product Type : LM. EXP. ROJO LEJ 16°-10

Manufacturer : CEBAS-CSIC & UPCT

Temperature : 21'C

Humidity : 65%

Operator : CJ SOLANO

Test Date : 2020-08-05 17:57:58

Remark: IGLUX

Chroma Parameters

Chro.Coord.: $x=0.7274$ $y=0.2679$ $u=0.6113$ $v=0.3377$ $duv=-0.0031$

CCT: 1719K Dominant Wave.: 677.4nm Purity: 98.6%

Flux RGB Ratio: $R=98.4\%$, $G=1.5\%$, $B=0.1\%$ Peak Wave: 728.8nm Half Width: 34.0nm

Rendering Index: $R_a = 6.5$

$R_1 = 61$	$R_2 = 86$	$R_3 = -88$	$R_4 = -16$	$R_5 = -1$	$R_6 = -31$	$R_7 = 36$	$R_8 = 6$
$R_9 = -193$	$R_{10} = 55$	$R_{11} = -169$	$R_{12} = -188$	$R_{13} = 79$	$R_{14} = -68$	$R_{15} = 38$	

Fidelity Index (R_f) = -214748000.0 Gamut Index (R_g) = -214748000.0

Photo Parameters

Flux: 6.100lm

Effi.: 0.6lm/W

Radiant: 1963.1mW

 $R_i = 0.0\text{mW/sr}$

Efficiency: 4.368

Effi Level: E (EU 874-2012)

Ele. Parameters

Voltage: $U = 220.00\text{V}$ Current: $I = 0.1010\text{A}$ Power: $P = 10.800\text{W}$ Power Factor: $PF = 0.482$

Instrument state

Instrument: Hopoo HP8000S

Integral Time: 66.102ms

VPeak: 15860

VDark: 1275

Scan Range: 380-780nm

Product ID: 201401527

Hopoo Optoelectronics Technology CO.,LTD www.hopoo.net

LED Test Report

Product Mark

Product Type : LM. EXP. BLANCO 16°-10

Manufacturer : CEBAS-CSIC & UPCT

Temperature : 21'C

Humidity : 65%

Operator : CJ SOLANO

Test Date : 2020-08-05 17:47:31

Remark: IGLUX

Chroma Parameters

Chro.Coar.:x=0.3502 y=0.3633 u=0.2104 v=0.3273 duv=0.0038

CCT: 4857K Dominant Wave.:571.3nm Purity:14.1%

Flux RGB Ratio:R=16.8%,G=79.9%,B=3.3% Peak Wave:448.2nm Half Width:27.9nm

Rendering Index:Ra= 93.0

R1 =93 R2 =94 R3 =93 R4 =94 R5 =92 R6 =90 R7 =97 R8 =91

R9 =73 R10=84 R11=93 R12=71 R13=93 R14=96 R15=92

Fidelity Index(Rf)=91.2

Gamut Index(Rg)=100.3

Photo Parameters

Flux:1059.74lm

Effi.:41.9lm/W

Radiant:5563.4mW

Ri:0.0mW/sr

Efficiency:0.314

Effi Level:B (EU 874-2012)

Ele. Parameters

Voltage:U=220.00V

Current:I=0.2180A

Power:P=25.300W

Power Factor:PF=0.525

Instrument state

Instrument:Hopoo HP8000S

Integral Time: 18.099ms

VPeak: 15444

VDark: 1176

Scan Range: 380-780nm

Product ID: 201401527

Hopoo Optoelectronics Technology CO.,LTD www.hopoo.net

LED Test Report

Product Mark

Product Type : LM. EXP. ROJO 120°-10

Manufacturer : CEBAS-CSIC & UPCT

Temperature : 21'C

Humidity : 65%

Operator : CJ SOLANO

Test Date : 2020-08-05 16:56:56

Remark: IGLUX

Chroma Parameters

Chro.Coor.: $x=0.7184$ $y=0.2791$ $u=0.5849$ $v=0.3409$ $duv=-0.0021$

CCT: 1603K Dominant Wave.: 642.7nm Purity: 99.2%

Flux RGB Ratio: R=99.6%, G=0.4%, B=0.0% Peak Wave: 660.7nm Half Width: 18.7nm

Rendering Index: Ra=-26.7

R1 =-19 R2 =82 R3 =-25 R4 =-118 R5 =-87 R6 =-29 R7 =42 R8 =-58

R9 =-331 R10=83 R11=-141 R12=-32 R13=20 R14=11 R15=-36

Fidelity Index (Rf)=-214748000.0 Gamut Index (Rg)=-214748000.0

Photo Parameters

Flux: 101.92lm

Effi.: 12.6lm/W

Radiant: 2083.6mW

Ri: 0.0mW/sr

Efficiency: 0.584

Effi Level: B (EU 874-2012)

Ele. Parameters

Voltage: U=220.00V

Current: I=0.0780A

Power: P=8.100W

Power Factor: PF=0.462

Instrument state

Instrument: Hopoo HP8000S

Integral Time: 16.710ms

VPeak: 14724

VDark: 1314

Scan Range: 380-780nm

Product ID: 201401527

Hopoo Optoelectronics Technology CO.,LTD www.hopoo.net

LED Test Report

Product Mark

Product Type : LM. EXP. x1 ROJO 16°
 Temperature : 21'C
 Operator : CJ SOLANO
 Remark: IGLUX

Manufacturer : CEBAS-CSIC & UPCT
 Humidity : 65%
 Test Date : 2020-08-06 10:48:30

Chroma Parameters

Chro.Coord.: $x=0.7214$ $y=0.2782$ $u=0.5894$ $v=0.3410$ $duv=-0.0016$
 CCT: 1622K Dominant Wave.: 643.4nm Purity: 99.9%
 Flux RGB Ratio: R=99.9%, G=0.1%, B=0.0% Peak Wave: 662.7nm Half Width: 19.6nm

Rendering Index: Ra=-32.7

R1 = -36 R2 = 69 R3 = -18 R4 = -114 R5 = -83 R6 = -17 R7 = 26 R8 = -88
 R9 = -377 R10 = 64 R11 = -139 R12 = -32 R13 = -0 R14 = 16 R15 = -59
 Fidelity Index (Rf) = -214748000.0 Gamut Index (Rg) = -214748000.0

Photo Parameters

Flux: 10.34lm Effi.: 1.9lm/W Radiant: 238.0mW Ri: 0.0mW/sr
 Efficiency: 1.619 Effi Level: E (EU 874-2012)

Ele. Parameters

Voltage: U=220.00V Current: I=0.0560A
 Power: P=5.400W Power Factor: PF=0.435

Instrument state

Instrument: Hopoo HP8000S
 VDark: 1283

Integral Time: 153.509ms VPeak: 14740
 Scan Range: 380-780nm Product ID: 201401527

Hopoo Optoelectronics Technology CO.,LTD www.hopoo.net

LED Test Report

Product Mark

Product Type : LM. EXP. x1 VERDE 16°

Manufacturer : CEBAS-CSIC & UPCT

Temperature : 21°C

Humidity : 65%

Operator : CJ SOLANO

Test Date : 2020-08-06 10:40:47

Remark: IGLUX

Chroma Parameters

Chro.Coord.: x=0.1303 y=0.7335 u=0.0452 v=0.3813 duv=0.1694

CCT: 8421K Dominant Wave.: 520.7nm Purity: 80.0%

Flux RGB Ratio: R=0.0%, G=99.3%, B=0.6% Peak Wave: 515.9nm Half Width: 29.4nm

Rendering Index: Ra=-31.0

R1 =-39 R2 =-16 R3 =-37 R4 =-74 R5 =-13 R6 =-22 R7 =-12 R8 =-33

R9 =-364 R10=-122 R11=-104 R12=-40 R13=-47 R14=31 R15=-34

Fidelity Index (Rf)=0.2

Gamut Index (Rg)=4.3

Photo Parameters

Flux: 61.93lm

Effi.: 11.3lm/W

Radiant: 157.1mW

Ri: 0.0mW/sr

Efficiency: 0.552

Effi Level: B (EU 874-2012)

Ele. Parameters

Voltage: U=220.00V

Current: I=0.0560A

Power: P=5.500W

Power Factor: PF=0.449

Instrument state

Instrument: Hopoo HP8000S

Integral Time: 141.927ms

VPeak: 15012

VDark: 1297

Scan Range: 380-780nm

Product ID: 201401527

Hopoo Optoelectronics Technology CO.,LTD www.hopoo.net

LED Test Report

Product Mark

Product Type : LM. EXP. x1 AZUL 16°
Temperature : 21'C
Operator : CJ SOLANO
Remark: IGLUX

Manufacturer : CEBAS-CSIC & UPCT
Humidity : 65%
Test Date : 2020-08-06 10:33:23

Chroma Parameters

Chro.Coar.: $x=0.1590$ $y=0.0167$ $u=0.2207$ $v=0.0347$ $duv=-0.0961$
CCT:100000K Dominant Wave.:447.9nm Purity:99.8%
Flux RGB Ratio: $R=0.2\%$, $G=0.9\%$, $B=98.9\%$ Peak Wave:444.1nm Half Width:19.5nm

Rendering Index:Ra=-75.0

R1 =-29 R2 =-86 R3 =-191 R4 =-99 R5 =7 R6 =-79 R7 =-74 R8 =-48
R9 =-286 R10=-333 R11=-120 R12=-159 R13=-64 R14=-51 R15=-17
Fidelity Index(Rf)=0.0 Gamut Index(Rg)=4.1

Photo Parameters

Flux:7.440lm Effi.:1.4lm/W Radiant:298.0mW Ri:0.0mW/sr
Efficiency:1.881 Effi Level:E (EU 874-2012)

Ele. Parameters

Voltage:U=220.00V Current:I=0.0530A
Power:P=5.200W Power Factor:PF=0.449

Instrument state

Instrument:Hopoo HP8000S
VDark: 1113

Integral Time: 40.255ms
Scan Range: 380-780nm

VPeak: 13460
Product ID: 201401527

Hopoo Optoelectronics Technology CO.,LTD www.hopoo.net

LED Test Report

Product Mark

Product Type : LM. EXP. x1 ROJO LEJ. 16° Manufacturer : CEBAS-CSIC & UPCT
 Temperature : 21'C Humidity : 65%
 Operator : CJ SOLANO Test Date : 2020-08-06 10:37:13
 Remark: IGLUX

Chroma Parameters

Chro.Coord.: x=0.7277 y=0.2686 u=0.6104 v=0.3380 duv=-0.0028
 CCT: 1715K Dominant Wave.: 670.8nm Purity: 98.9%
 Flux RGB Ratio: R=98.0%, G=2.0%, B=0.1% Peak Wave: 729.7nm Half Width: 34.0nm

Rendering Index: Ra=-25.5

R1 =57 R2 =47 R3 =-132 R4 =-43 R5 =-34 R6 =-86 R7 =-12 R8 =0
 R9 =-123 R10=-4 R11=-207 R12=-232 R13=42 R14=-102 R15=22
 Fidelity Index (Rf)=-214748000.0 Gamut Index (Rg)=-214748000.0

Photo Parameters

Flux: 0.690lm Effi.: 0.1lm/W Radiant: 210.4mW Ri: 0.0mW/sr
 Efficiency: 7.715 Effi Level: E (EU 874-2012)

Ele. Parameters

Voltage: U=220.00V Current: I=0.0590A
 Power: P=5.900W Power Factor: PF=0.449

Instrument state

Instrument: Hopoo HP8000S Integral Time: 494.884ms VPeak: 13108
 VDark: 1315 Scan Range: 380-780nm Product ID: 201401527

Hopoo Optoelectronics Technology CO.,LTD www.hopoo.net

LED Test Report

Product Mark

Product Type : LM. EXP. BLANCO 16°-10

Manufacturer : CEBAS-CSIC & UPCT

Temperature : 21'C

Humidity : 65%

Operator : CJ SOLANO

Test Date : 2020-08-05 17:47:31

Remark: IGLUX

Chroma Parameters

Chro.Coord.: $x=0.3502$ $y=0.3633$ $u=0.2104$ $v=0.3273$ $duv=0.0038$

CCT: 4857K Dominant Wave.: 571.3nm Purity: 14.1%

Flux RGB Ratio: $R=16.8\%$, $G=79.9\%$, $B=3.3\%$ Peak Wave: 448.2nm Half Width: 27.9nm

Rendering Index: $R_a=93.0$

$R_1=93$	$R_2=94$	$R_3=93$	$R_4=94$	$R_5=92$	$R_6=90$	$R_7=97$	$R_8=91$
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

$R_9=73$	$R_{10}=84$	$R_{11}=93$	$R_{12}=71$	$R_{13}=93$	$R_{14}=96$	$R_{15}=92$
----------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------

Fidelity Index (R_f) = 91.2Gamut Index (R_g) = 100.3

Photo Parameters

Flux: 1059.74lm

Effi.: 41.9lm/W

Radiant: 5563.4mW

 $R_i=0.0mW/sr$

Efficiency: 0.314

Effi Level: B (EU 874-2012)

Ele. Parameters

Voltage: $U=220.00V$ Current: $I=0.2180A$ Power: $P=25.300W$ Power Factor: $PF=0.525$

Instrument state

Instrument: Hopoo HP8000S

Integral Time: 18.099ms

VPeak: 15444

VDark: 1176

Scan Range: 380-780nm

Product ID: 201401527

Hopoo Optoelectronics Technology CO.,LTD www.hopoo.net

LED Test Report

Product Mark

Product Type : LM. EXP. FULL LEDs 16°

Manufacturer : CEBAS-CSIC & UPCT

Temperature : 21'C

Humidity : 65%

Operator : CJ SOLANO

Test Date : 2020-08-06 11:08:30

Remark: IGLUX

Chroma Parameters

Chro.Coar.:x=0.2673 y=0.2548 u=0.1936 v=0.2768 duv=-0.0093

CCT:16981K Dominant Wave.:473.1nm Purity:30.3%

Flux RGB Ratio:R=15.5%,G=79.6%,B=4.9% Peak Wave:444.5nm Half Width:20.4nm

Rendering Index:Ra= 69.5

R1 =75 R2 =94 R3 =61 R4 =49 R5 =75 R6 =93 R7 =70 R8 =39

R9 =-79 R10=89 R11=39 R12=82 R13=84 R14=78 R15=59

Fidelity Index(Rf)=70.6

Gamut Index(Rg)=118.1

Photo Parameters

Flux:200.64lm

Effi.:6.6lm/W

Radiant:1306.9mW

Ri:0.0mW/sr

Efficiency:1.372

Effi Level:E (EU 874-2012)

Ele. Parameters

Voltage:U=220.00V

Current:I=0.2590A

Power:P=30.600W

Power Factor:PF=0.536

Instrument state

Instrument:Hopoo HP8000S

Integral Time: 35.124ms

VPeak: 13604

VDark: 1231

Scan Range: 380-780nm

Product ID: 201401527

Hopoo Optoelectronics Technology CO.,LTD www.hopoo.net