

CONAMA 2024

CONGRESO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE

Regions4Climate: Innovación Sistémica para una Agricultura Resiliente y Adaptada al Cambio Climático

Castilla y León como Región
Demostradora



CONAMA 2024

REGIONS4CLIMATE: INNOVACIÓN SISTÉMICA PARA UNA AGRICULTURA RESILIENTE Y ADAPTADA AL CAMBIO CLIMÁTICO

Autor Principal: Esther San José (Fundación Cartif)

Otros autores: José Feroso (Fundación Cartif); Nuria Fernández (Fundación Cartif); Bárbara Díez (Fundación Cartif); Raúl Sánchez (Fundación Cartif); Jorge Calvo (Fundación Cartif); Raquel Marijuán (Fundación Cartif); Silvia Gómez (Fundación Cartif).

ÍNDICE

1. Título
2. Resumen
3. Antecedentes
4. Contexto
5. Acciones de innovación
6. Conclusiones
7. Financiación del proyecto
8. Bibliografía

1. TÍTULO

Regions4Climate: Innovación Sistémica para una Agricultura Resiliente y Adaptada al Cambio Climático. Castilla y León como región demostradora

Palabras clave: Regions4Climate; Castilla y León; Enfoque sistémico; Desarrollo sostenible; Economía circular; Innovación agrícola; Adaptación climática; despoblación; modelos de negocio sostenibles y respetuosos con el entorno

2. RESUMEN

Los desafíos del cambio climático y sus consecuencias son para el medio rural muy diferentes al urbano, haciendo necesarias políticas que sepan entender la realidad de este entorno. En Castilla y León, la despoblación, el abandono de tierras agrícolas y forestales, y la gran extensión de esta comunidad, hace que las estrategias de adaptación al cambio climático sean especialmente problemáticas.

El proyecto Regions4Climate aborda esta situación desde la perspectiva de la transición justa, identificando modelos de desarrollo viables ambiental, económica y socialmente. El Centro Tecnológico CARTIF y la Junta de Castilla y León trabajan junto con dos empresas de la región para poner en marcha y testear modelos de producción agrícola sostenible.

Ambas empresas son del sector agrícola, dedicadas a la producción de hortalizas y frutos rojos en invernadero, en la Comarca de Tierra de Pinares. En ellas, se están poniendo en marcha acciones de innovación que redundan en la adaptabilidad de los negocios al cambio climático y en su sostenibilidad a largo plazo.

Así, para optimizar recursos y reducir residuos, se propone una estrategia de economía circular valorizando residuos como biofertilizantes o en nutrición animal, así como la reutilización de equipos y servicios. Se instalará un biofiltro en los sistemas de calefacción de biomasa de los invernaderos, para emplear el humo resultante de la combustión una vez depurado para aumentar la concentración de CO₂ en su interior y mejorar la producción vegetal. La rotación de cultivos reemplazará el monocultivo, diversificando la producción y optimizando recursos. Además, se mejorará el uso energético y el riego en invernaderos utilizando termografía infrarroja.

Se promoverá también el intercambio de conocimientos y prácticas replicables entre agricultores, así como la colaboración entre empresas locales para adquisición de insumos, o el establecimiento de redes de distribución o préstamo de equipos.

Las experiencias y resultados obtenidos en los invernaderos, se plasmarán en contenidos educativos para los centros de formación profesional agraria, promoviendo así el emprendimiento agrícola en las futuras generaciones de agricultores. Esta experiencia se espera que también impacte en el desarrollo de políticas de adaptación al cambio climático y en las estrategias de desarrollo rural que desde el Gobierno regional se estén llevando a cabo.

En conclusión, el proyecto Regions4Climate plantea un enfoque sistémico para la transición justa en Castilla y León que permita a la región ser más resiliente frente al cambio climático, sin perder competitividad y generando un modelo de negocio atractivo y sostenible que ayude a frenar la despoblación.

3. ANTECEDENTES

La resiliencia climática y la transición justa son pilares fundamentales para afrontar los desafíos del cambio climático en Castilla y León. A nivel nacional, la Ley de Cambio Climático y Transición Energética (Ley 7/2021) es uno de los principales marcos que guían las políticas climáticas en España. En base a esta regulación marco, las comunidades autónomas deben elaborar sus propios planes y estrategias que alineen sus políticas con los objetivos nacionales de adaptación, garantizando la reducción de la vulnerabilidad de sus territorios frente a los impactos del cambio climático. Además, las comunidades autónomas deben contribuir al cumplimiento de los objetivos nacionales de reducción de gases de efecto invernadero, alineando sus políticas sectoriales, como energía, transporte, agricultura y ordenación del territorio, con las metas de descarbonización para 2050.

La región ha adoptado diversas leyes, políticas, instrumentos financieros e informativos para guiar la acción climática y fomentar una adaptación efectiva. Sin embargo, Castilla y León debe hacer frente a una coyuntura territorial marcada por la despoblación, el envejecimiento de la población rural o la falta de oportunidades económicas. Esto se une al hecho de que la agricultura es uno de los sectores clave en la economía de Castilla y León, y está altamente expuesto a los cambios climáticos. Las variaciones en la temperatura y las precipitaciones afectan los rendimientos de los cultivos y aumentan la vulnerabilidad a plagas y enfermedades.

Ante esta situación, se hace necesaria la incorporación e impulso, como parte del desarrollo de políticas de adaptación al cambio climático, de modelos de desarrollo económico que potencien la resiliencia del sector agrícola de forma sostenible y justa. Fomentar la adopción de prácticas agrícolas sostenibles y cultivos resilientes al cambio climático, así como fortalecer la innovación en técnicas agrícolas que mejoren la eficiencia del agua y reduzcan la dependencia de insumos climáticamente sensibles.

En el marco del proyecto Regions4Climate, que pretende desarrollar y demostrar de forma colaborativa una transición socialmente justa hacia la resiliencia climática, Castilla y León participa como Región Demostradora, desarrollando un modelo económico sostenible basado en agricultura productiva en invernaderos que pueda contribuir al desarrollo de comunidades rurales más resilientes.

4. CONTEXTO

El proyecto Regions4Climate

El proyecto Regions4Climate es un proyecto financiado por la Unión Europea en el marco del programa Horizonte Europa. En concreto, se encuadra dentro de la Misión de Adaptación al Cambio Climático, que persigue apoyar al menos a 150 regiones y comunidades europeas para que sean resilientes al clima de aquí a 2030.

Regions4Climate busca enfrentar los crecientes desafíos derivados del cambio climático, agravados por prácticas de gestión insostenibles y condiciones meteorológicas extremas, con el objetivo de construir comunidades europeas más resilientes. A través de la colaboración intersectorial y con un enfoque centrado en la Transición Justa, el proyecto pretende crear ecosistemas regionales más inteligentes, inclusivos y preparados para la resiliencia climática. Para ello, el proyecto desarrolla y testea estrategias innovadoras que combinen soluciones tecnológicas, sociales, ambientales y de gobernanza.

El proyecto Regions4Climate en Castilla y León se enmarca dentro del modelo de “Adaptación Sistémica”, donde ciudadanos y empresas son actores clave en la transición hacia la resiliencia climática. Este piloto, liderado por el Centro Tecnológico CARTIF, colaboran la Junta de Castilla y León y dos empresas agrícolas, busca implementar acciones en tres grandes áreas: social, medioambiental, económico, además de políticas y gobernanza, con acciones transversales.

Este artículo se enfoca en el despliegue del grupo ambiental más técnico, cuyo objetivo es aplicar conceptos de economía circular y soluciones basadas en la naturaleza (SbN) para mejorar la producción y la eficiencia del invernadero, en términos de sostenibilidad. Las acciones incluyen la instalación de un biofiltro en los invernaderos, la colaboración entre empresas para la gestión de residuos y el uso de pellets, la mejora de sistemas de cultivo, el análisis de residuos, y el uso de tecnología infrarroja para optimizar recursos. Aunque el proyecto está aún en fase de ejecución, se espera que finalice en diciembre de 2025, consolidando buenas prácticas sostenibles que impulsen la adaptación climática en la región.

Castilla y León como región demostradora

Si bien la experiencia demostradora del proyecto Regions4Climate se lleva a cabo en la región de Castilla y León en su conjunto, el testeo del nuevo modelo de producción agrícola se desarrollará en dos explotaciones agrícolas familiares ubicadas en la comarca de Tierra de Pinares, provincia de Segovia. Estas empresas, dedicadas a la producción hortícola en invernaderos calefactados, inicialmente producen puerros en una y plantones de fresa en la otra. En ambas explotaciones se están desarrollando acciones de innovación co-diseñadas por el Centro Tecnológico CARTIF y las empresas participantes. En este artículo se detallarán las siguientes:

- Instalación de biofiltros en los sistemas de calefacción de biomasa y reutilización del CO₂ en los invernaderos para mejorar la producción.
- Implementación de la rotación de cultivos para la intensificación y la diversificación de la producción. Para hacer un uso sostenible y eficaz de los invernaderos se ha diseñado una rotación de cultivos en base a la familia botánica, de modo que se aprovechen las instalaciones y, además, se beneficie al suelo con un correcto manejo de la producción.
- Reaprovechamiento y revalorización de residuos orgánicos del invernadero, aplicando principios de economía circular: Fibra de celulosa a partir de residuos de tomate y alimentación animal con hojas de brócoli.
- Uso de termografía infrarroja para optimizar energía y riego.

En las siguientes secciones se detalla el progreso de estas actividades.

5. ACCIONES DE INNOVACIÓN

Soluciones basadas en la naturaleza: biofiltro para el sistema de calefacción

Con esta acción se pretende implantar el concepto innovador de invernadero con calefacción por biomasa y biofiltro para aumentar la concentración de CO₂ en el interior y potenciar la producción vegetal.

El aumento de la concentración de CO₂ en cultivos bajo condiciones controladas, como invernaderos, ha demostrado ser una técnica efectiva para incrementar la productividad vegetal. Estudios previos han mostrado que la concentración de CO₂ en la atmósfera ha ido en aumento durante las últimas décadas, pasando de aproximadamente 270 ppm en tiempos preindustriales a más de 420 ppm en la actualidad (NASA, 2024), y se espera que alcance 800 ppm para 2050 (Calvin et al., 2023; Easterbrook, 2016). Aunque este incremento es una preocupación ambiental por sus implicaciones en el cambio climático, en el contexto agrícola puede tener un efecto positivo, especialmente en plantas C3, que utilizan el CO₂ de manera más eficiente durante la fotosíntesis (Körner, 2003; Long et al., 2004). La fertilización con CO₂ en invernaderos puede incrementar significativamente la fotosíntesis, mejorar la eficiencia en el

uso del agua y aumentar la producción de biomasa y frutos, lo que ha sido corroborado en cultivos de tomate, pepino y fresa en estudios previos y en este trabajo. Sin embargo, es importante considerar que, aunque el CO₂ aumenta el crecimiento y la producción de biomasa, también puede alterar la concentración de nutrientes en los tejidos de las plantas, lo que podría afectar a la calidad nutricional de los cultivos (AINSWORTH & ROGERS, 2007; Taub & Wang, 2008). Por lo tanto, aunque el CO₂ elevado puede ser una herramienta eficaz para aumentar la productividad agrícola, es crucial encontrar un equilibrio que maximice los beneficios sin comprometer la calidad del producto final.

Martinez-Alonso et al. (2024) encontraron que el uso de CO₂ (generado por ejemplo durante la combustión en una caldera de biomasa industrial) ha mostrado ser una estrategia eficaz para la bioestimulación de plantas de tomate, pepino y fresa cultivadas en un invernadero semi-cerrado. Los resultados indican que es posible filtrar los humos de salida de la caldera mediante un biofiltro diseñado para retener gases contaminantes tóxicos fue eficiente, evitando que las sustancias dañinas fueran absorbidas por las plantas o afectaran el ambiente del invernadero.



Figura 1. Ejemplo de biofiltro instalado en un invernadero prototipo (CARTIF, SingularGreen)

Un aumento en la concentración de CO₂ hasta los 1000 ppm, mejoró significativamente la fotosíntesis, el crecimiento de la biomasa y la producción de frutos en todas las especies estudiadas. Estas adaptaciones fisiológicas, que incluyen una reducción en la pérdida de agua y cambios en la dinámica metabólica, subrayan el potencial de optimizar las prácticas agrícolas utilizando gases contaminantes ricos en CO₂ como recurso. Se sugiere que este enfoque puede ser útil para mitigar las emisiones y mejorar la productividad agrícola de manera sostenible.

Por otro lado, además de la implementación de calefacción y la introducción del CO₂ en el invernadero, se trabajará para las condiciones que se generen también reduzcan el riesgo de proliferación de hongos en el interior.

Los estudios analizados sobre la proliferación de hongos en invernaderos de tomate indican que las condiciones microclimáticas, especialmente la alta humedad relativa y la presencia de condensación en las hojas, son factores determinantes que favorecen la proliferación de hongos como *Botrytis cinerea* y el desarrollo de enfermedades como el moho gris y manchas foliares. En particular, estos hongos tienden a prosperar en ambientes húmedos, donde la humedad relativa supera el 85% y se presenta agua libre en las superficies de las plantas, lo que genera condiciones óptimas para la germinación de esporas y el establecimiento de infecciones (Katsoulas et al., 2021; Zhang et al., 2022).

Modelos predictivos y sistemas de soporte de decisiones han demostrado ser herramientas útiles para anticipar el riesgo de proliferación de estos hongos en función de la humedad y la temperatura. Estos sistemas permiten a los productores ajustar prácticas de manejo de ventilación y control de temperatura en el invernadero para evitar condiciones que favorecen la esporulación y la dispersión de conidios, lo cual reduce la necesidad de aplicaciones de fungicidas y fomenta un manejo más sostenible y preventivo (Johansson et al., 2021; Katsoulas et al., 2021).

El invernadero se está monitorizando en términos de temperatura, humedad relativa, concentración de dióxido de carbono, concentración de material particulado (PM₁, PM_{2.5} y PM₁₀), concentración de formaldehído y de compuestos orgánicos volátiles totales. Para ello se emplean dispositivos de medida de calidad de aire interior MICA¹ de la empresa inBiot. Esta monitorización permitirá, además las necesidades de inyección de humo filtrado al invernadero para mantener la concentración óptima de CO₂ durante el periodo de fotosíntesis, valorar la calidad del aire en el interior de los invernaderos y los riesgos asociados a ella. En este sentido, se trabajará en la implementación de un índice de riesgo de proliferación de hongos en los invernaderos una vez que el biofiltro esté en funcionamiento. De esta forma, este parámetro será un factor más a considerar en la operación del mismo.

En primer lugar, se recopilaron los planos de situación y los diagramas P&I (por sus siglas en inglés: *Piping and Instrumentation*) de los invernaderos a intervenir. Concretamente, en el plano de situación se marcaron los puntos de ventilación existentes, la superficie ocupada por los cultivos, los puntos de suministro eléctrico y las posibles ubicaciones de los sensores de calidad del aire interior. Esta información es necesaria para encontrar la mejor ubicación de la caldera (exterior) y optimizar el sistema de calefacción (interior). Esta información también es necesaria para encontrar la mejor ubicación para el biofiltro.

El proceso ha comenzado con la búsqueda de proveedores de calefacción y los materiales necesarios para su aplicación. Además, se han detallado los indicadores que se utilizarán y ya se está trabajando en la definición de la base de referencia.

¹ <https://www.inbiot.es/productos/dispositivos-mica/mica>



Figura 2. Estado del invernadero previo a la instalación del biofiltro (Regions4Climate)

Por otra parte, se ha establecido un marco de evaluación para valorar el impacto de la calefacción y el biofiltro en la actividad de los invernaderos. Cabe mencionar en este punto que, en la actualidad, los invernaderos de esta zona casi no disponen de calefacción ni de iluminación de fotoperiodo, lo que significa que son prácticamente inútiles durante la temporada de invierno.

El marco de evaluación incluirá varios indicadores. I) Calidad del aire interior: utilizado para evaluar el impacto del biofiltro en la calidad del aire interior del invernadero y evaluar los riesgos para la salud de las personas que lo utilizan; II) Rendimiento de los cultivos debido al aumento de las concentraciones de CO₂ en el interior; III) Rendimiento de la captura de contaminantes por el biofiltro; IV) Consumo de agua; V) Número de cultivos; Indicadores económicos, Huella de carbono. No obstante, se encuentra en fase de desarrollo.

Rotación de cultivos

Los invernaderos actualmente se están utilizando en sistema de monocultivo. En el marco del proyecto se propone un sistema multiproductivo que aproveche el invernadero y optimice el uso de recursos durante el mayor tiempo posible, y que sea respetuoso con el uso del suelo. Por ello, se ha co-diseñado un sistema de rotación de cultivos que busca el mantenimiento y mejora de las propiedades del suelo, tanto a nivel físico como químico y la productividad sostenible de los cultivos.

La rotación de cultivos basada en familias tiene como objetivo alternar cultivos de baja exigencia con aquellos que demandan mayores nutrientes, con el fin de evitar el agotamiento de las reservas del suelo (Argento et al., 2024; Ryan et al., 2008). Además, la variación en la longitud de las raíces de los cultivos también desempeña un papel importante en este proceso. La rotación de cultivos con arquitecturas radiculares diferentes puede ayudar a mejorar la

porosidad del suelo, la estabilidad de los agregados y la retención de agua (Chen et al., 2021). En general, un adecuado manejo de la rotación de cultivos contribuye a mejorar las propiedades del suelo, manteniéndolo saludable y equilibrado (Guardia et al., 2016).

Se ha establecido una rotación de cultivos en base a las familias botánicas. Inicialmente, se han considerado las siguientes: Compuestas, Crucíferas, Cucurbitáceas, Leguminosas, Liliáceas, Quenopodiáceas, Solanáceas y Umbelíferas. Teniendo en cuenta estas familias, se está estudiando la mejor asociación entre ellas para una rotación de cuatro años. A modo de ejemplo, se está evaluando una rotación con cultivos adaptados al contexto climático y edáfico del entorno donde se encuentran los invernaderos y representativos de cada una de estas familias, aunque los cultivos específicos están aún en estudio.

El sistema de rotación se puede plantear de forma uniforme con un cultivo cada año, o bien se puede dividir el invernadero en 4 hojas e ir rotando los cultivos en cada una de ellas. Por facilidad de gestión, se ha optado por la primera opción. Para el estudio de la rotación, se han considerado diversos factores que afectan al desarrollo de cada planta, tales como exigencias nutricionales, tipo de raíz, y sensibilidad a plagas y enfermedades. A continuación, se muestra la rotación planteada para invernadero, aunque también se está estudiando el diseño de una rotación de cultivos en campo basándonos en el mismo sistema de familias botánicas.

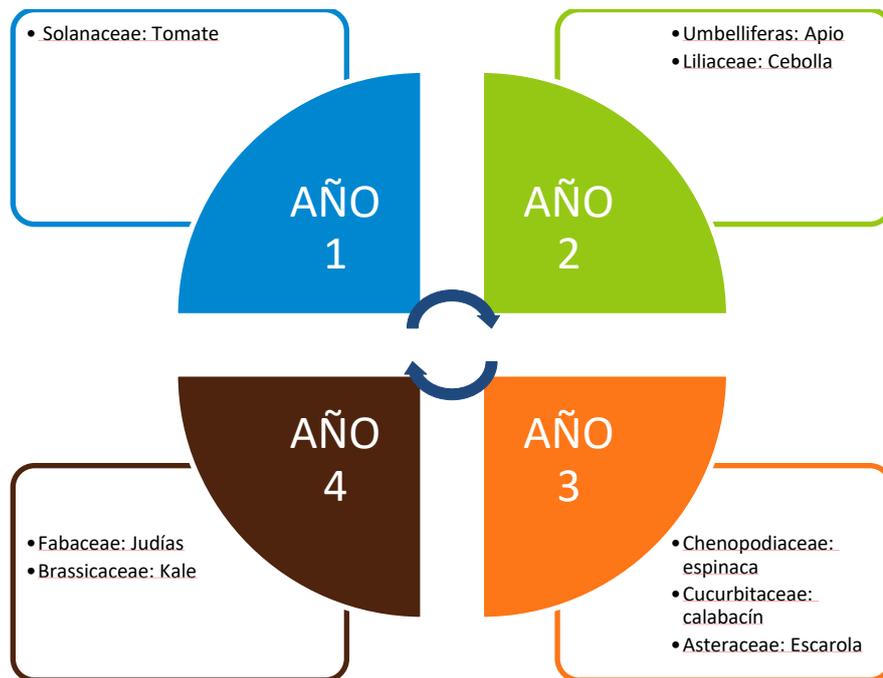


Figura 3. Sistema de rotación de cultivos en invernadero (Regions4Climate)

El primer año se plantea un monocultivo de tomate en invernadero. Se trata de un cultivo con el que la empresa ya había hecho algún ensayo previo a muy pequeña escala, por lo que su implementación sería más sencilla. Además, como el suelo del invernadero no ha sido utilizado hasta ahora, se comienza con un cultivo exigente en nutrientes ya que, las reservas del suelo son óptimas y a partir de este primer cultivo se continúa con el orden establecido de familias botánicas.

CONAMA 2024

REGIONS4CLIMATE: INNOVACIÓN SISTÉMICA PARA UNA AGRICULTURA RESILIENTE Y ADAPTADA AL CAMBIO CLIMÁTICO

Cuadro 1. Requerimientos y amenazas de los cultivos planteados en la rotación (Infoagro)

AÑO 1		 Tomate
Nutrientes	Planta exigente	
Tipo de Raíz	Profunda	
Fertilización (kg/ton)	N [2,5 a 3] – P [0,2 a 0,3] – K [3 a 3,5] – Ca [4,2] – Mg [0,8]	
Plagas	Pulgones, minadores de hojas (género <i>Liriomyza</i>), cochinillas, orugas, araña roja, trips, mosca blanca, chinches y otros ácaros.	
Enfermedades	Mildiu, podredumbre gris, antracnosis, oídio, alernaria. Cáncer bacteriano, marchitez bacteriana. También virus (amarillamiento y deformación de hojas y frutos).	
AÑO 2		 Apio
Nutrientes	Planta exigente	
Tipo de Raíz	Superficial	
Fertilización (kg/ton)	N [1,7 a 3,5] – P [0,6 a 0,9] – K [2,8 a 7,6] – Ca [0,8] – Mg [0,3]	
Plagas	Gusanos grises (<i>Agrotis spp</i>), rosquilla negra (<i>Spodoptera littoralis Boisduval</i> y <i>Psilla rosae Fab</i>), mosca del apio: <i>Phylophylloa heraciei L.</i> y <i>Liriomiza trifolii Burg</i> . Pulgones, caracoles y babosas.	
Enfermedades	Cercosporosis, Septoriosis, Sclerotinia y mildiu. Bacteriosis (<i>Pseudomonas apii</i>) y pata negra (<i>Erwinia carotovora</i>). Virus del mosaico.	
AÑO 2		 Cebolla
Nutrientes	Planta poco exigente	
Tipo de Raíz	Superficial	
Fertilización	N [2,5] – P [1,5] – K [3,5]	
Plagas	Escarabajo de la cebolla, mosca de la cebolla, trips, polilla de la cebolla y nemátodos	
Enfermedades	Mancha púrpura, moho negro, Podredumbre del cuello, botritis de la hoja, entre otras. Podredumbre blanda y podredumbre agria entre otras bacteriosis. Virus: enanismo amarillo y virus de la mancha amarilla.	
AÑO 3		 Escarola
Nutrientes	Planta poco exigente	
Tipo de Raíz	Superficial	
Fertilización (kg/ton)	N [2.3-2.9] – P [0,9-1.4] – K [4.6-6]	
Plagas	Pulgones, mosca blanca (<i>Bemisia tabaci</i>), trips, caracoles y babosas, nemátodos.	
Enfermedades	Antracnosis, botritis, mildiu veloso y esclerotinia. Tizón marginal, y virus del bronceado del tomate.	
AÑO 3		 Espinaca
Nutrientes	Planta de exigencia media	
Tipo de Raíz	Superficial	
Fertilización	N [4.5-5.2] – P [1,5-1.8] – K [7.2-8.8]	

CONAMA 2024

REGIONS4CLIMATE: INNOVACIÓN SISTÉMICA PARA UNA AGRICULTURA RESILIENTE Y ADAPTADA AL CAMBIO CLIMÁTICO

Plagas	Mosca de la remolacha, gusanos grises, pulgones, nemátodos, caracoles y babosas y trips.
Enfermedades	Mildiu veloso, cercosporiosis, <i>Botrytis</i> , <i>Pythium</i> , <i>Alternaria</i> , <i>Cladosporium</i> , <i>Colletotrichum</i> . Pudrición bacteriana blanca. Virus del mosaico.
AÑO 3  Calabacín	
Nutrientes	Planta poco exigente
Tipo de Raíz	Profunda
Fertilización	N [3-4] – P [1.3-1.6] – K [4.5-6.4]
Plagas	Mosca blanca, araña roja, pulgones y trips.
Enfermedades	Oídio, mildiu, <i>Botrytis</i> , antracnosis, podredumbre de la raíz y la corona y cladosporiosis. Pudrición blanda bacteriana. Virus del mosaico y otros virus.
AÑO 2  Judías verdes	
Nutrientes	Planta poco exigente
Tipo de Raíz	Intermedia
Fertilización (kg/ton)	N [8-12] – P [2.9-4.3] – K [12-16]
Plagas	Mosca de los sombreados, minador de hojas, rosquilla negra, pulgones, araña roja y mosca blanca.
Enfermedades	Antracnosis, roya, furariosis, podredumbre de la raíz y mildiu. Grasa de la judía, marchitez bacteriana y quema bacteriana. Virus del mosaico.
AÑO 2  Kale	
Nutrientes	Planta exigente
Tipo de Raíz	Intermedia
Fertilización	N [28] – P [4.5] – K [22]
Plagas	Pulgones, orugas de la col, caracoles y babosas, trips y mosca de la col.
Enfermedades	Mildiu polvoriento, moho blanco y roya. Mancha angular de la hoja y podredumbre negra. Virus del mosaico.

Durante este primer ciclo, ya se ha plantado tomate. Para el segundo ciclo, se plantea la siguiente rotación con Liliáceas (cebolla) y Umbelíferas (apio), esta combinación de familias tiene sinergias beneficiosas, además de pasar de una raíz profunda (tomate) a una raíz más superficial con estos cultivos y en cuanto a los requerimientos nutricionales, combinamos un cultivo poco exigente y un cultivo con mayor exigencia.

Soluciones de Economía Circular

Esta acción consiste en hacer un uso óptimo de los recursos y minimizar los residuos generados. Los residuos generados principalmente en los invernaderos, teniendo en cuenta la actividad actual y el programa de rotación de cultivos son: hojas de puerro, zanahorias, pieles de cebolla, tomate (poda, frutos, planta) y hojas de brócoli. Actualmente su aprovechamiento es

principalmente ganadero, en la misma explotación. Esta acción busca optimizar el aprovechamiento de los residuos buscando un mayor valor añadido.

Se han estudiado dos principales vías de aprovechamiento hasta el momento, que son alimentación animal optimizada con las hojas de brócoli, y extracción de celulosa a partir de las plantas de tomate en la última fase del ciclo.

Alimentación animal con hojas de brócoli.

La incorporación de residuos de brócoli en la alimentación animal ofrece múltiples ventajas tanto nutricionales como económicas y ambientales. Estos residuos son ricos en nutrientes, incluyendo un alto contenido proteico (alrededor del 24% del peso seco) y una buena fuente de fibra (aproximadamente 21% peso seco). Además, son ricos en vitaminas, minerales y antioxidantes, así como en carotenoides beneficiosos, lo que los convierte en un suplemento valioso para la dieta de los animales. La composición nutricional de las hojas de brócoli es la siguiente (USDA Agricultural Research Service, 2019).

Cuadro 2. Composición nutricional de las hojas de brócoli



Image: <https://dare2dreamfarms.com/>

Composición	Cantidades por 100 g
Agua	90,700 g
Carbohidratos	5,000 g
Proteínas	3,000 g
Potasio	0,325 g
Fósforo	0,066 g
Calcio	0,048 g
Sodio	0,027 g
Hierro	0,001 g
Grasas totales	0,000 g

En términos de producción, el uso de residuos de brócoli ha demostrado mejorar significativamente la calidad y/o cantidad de los productos animales. En gallinas ponedoras se ha reportado un aumento en el peso de los huevos y una mayor concentración de vitamina E en la yema e intensifica su color (Mustafa & Baurhoo, 2018). La suplementación de alimentación con hojas de brócoli aumentó la ganancia de peso y la tasa de conversión alimenticia en pollos de engorde (Mustafa & Baurhoo, 2016) y en ovejas (Mahmoud, 2016). Sin embargo, los estudios demostraron una pérdida de digestibilidad a niveles altos de suplementación. En cuanto a la leche, se ha constatado el aumento de la cantidad de proteínas en leche de vacas y disminución de materia grasa al suplementar la alimentación de alfalfa con residuos de brócoli en combinación con otras hortalizas (Losada et al., 2024).

En el marco del proyecto, se propone estudiar la mejora que supone el uso de suplementación animal con residuos de hojas de brócoli. El estudio se encuentra en fase de diseño. Para el testeo se contará con la colaboración de la JCyL y una de sus escuelas de formación profesional en ganadería para realizar las pruebas en ganado.



Figura 4. Ganadería en la Escuela Viñalta (Palencia). (Regions4Climate)

Extracción de celulosa de la planta de tomate.

La planta de tomate que queda como residuo a partir de la producción de tomate, tiene un elevado porcentaje de material celulósico, por lo que puede ser aprovechado como materia prima en la producción de material de base celulósica, como papel, cartón, etc. En concreto, el material aprovechable consiste en los residuos de la propia planta, hojas y tallos, así como las pieles del tomate durante su procesado. El contenido en celulosa en estos residuos puede ser significativamente alto, partiendo de un 20,9 % en la materia prima, elevándose hasta un 66,4% en material procesado como pulpa de celulosa (Bascón-Villegas et al., 2020).

En industria del envase y embalaje, se ha estudiado su uso como fuente de fibras lignocelulósicas (LCNF). En las inmediaciones de los invernaderos estudiados, existe una planta de producción de estas características. Además, una de sus líneas de producción se centra en la fabricación de embalajes a partir de residuos orgánicos de origen agrícola.



Figura 5. Envase biodegradable fabricado a partir de residuos agrícolas orgánicos. (Regions4Climate, PackBenefit)

Se necesita un pre-procesado previo de los residuos, de forma que la materia prima entra en la planta como fibras ya procesadas. Este tratamiento es específico de la materia prima a procesar.

Para que la producción sea económicamente viable, se requieren entre 1 500 - 3 000 Tn de materia prima ya procesada al año.

Teniendo en cuenta estos datos, se ha analizado la producción de tomate en la zona (Ministerio de Agricultura, 2024). La siguiente gráfica, muestra la producción del cultivo de tomate a nivel regional (Castilla y León) y a nivel provincial (Segovia, provincia donde se localizan las explotaciones del proyecto), considerando el periodo de producción que va del año 1999 al 2000.

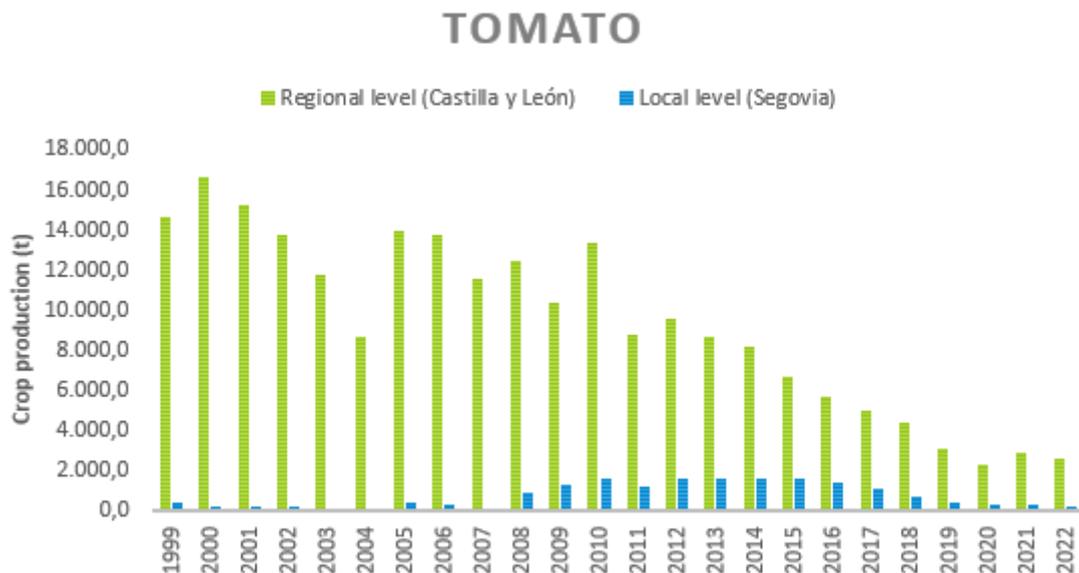


Figura 6. Producción de tomate (t) en Castilla y León y Segovia (Regions4Climate, basado en datos del Ministerio de Agricultura)

Como puede observarse, el cultivo de tomate ha ido decreciendo considerablemente a lo largo de los años. El pico máximo de producción para Castilla y León se produjo en el año 2000, con una producción de más de 16.000 toneladas. En la actualidad, la producción regional se ha reducido hasta producirse poco más de 2 600 Tn a nivel regional. La producción actual en Segovia es aún más residual, situándose en las 152 Tn.

Por cada Kg de tomate producido, se estima que se producen entre 0,09 y 0,72 kg (Hueso-Kortekaas et al., 2021; Llorach-Massana et al., 2017; Moreno et al., 2021) de residuos de planta, en función de si estos valores son medidos como peso seco o húmedo. Teniendo esto en cuenta, junto con la producción de tomate actual en Castilla y León, el recurso potencial de materia prima como residuo estaría en torno a las 234 – 1872 Tn, y en forma de celulosa (teniendo en cuenta la cifra anterior de rendimiento de la transformación) sería de entre 49 – 391 Tn, lo cual sería insuficiente para mantener un nivel adecuado de producción de bandejas.

Por tanto, si bien esta vía de aprovechamiento es prometedora, el nivel actual de producción de tomate es insuficiente para alimentar la industria con este residuo. Otra vía a explorar sería el diseño de biorrefinerías que sean capaces de procesar múltiples perfiles de residuos agrícolas.

Esto no sólo aumentaría la producción potencial, sino que además eliminaría la estacionalidad en la producción de los residuos.

Aplicación de termografía en invernaderos

La termografía infrarroja es una técnica no invasiva con múltiples aplicaciones en invernaderos. Algunas de estas aplicaciones incluyen la evaluación del estrés térmico en las plantas, ya que cuando una planta sufre estrés hídrico, los estomas tienden a cerrarse, lo que reduce la transpiración y aumenta la temperatura de las hojas (Khorsandi et al., 2018). También se utiliza para la optimización del riego, detectando patrones de temperatura asociados con el agua y evaluando la efectividad del riego por goteo, incluso en sustratos cubiertos. Además, permite estudiar la distribución del calor en el invernadero y su efecto en las necesidades de agua (Parihar et al., 2021). Otras aplicaciones incluyen la programación del riego, la estimación del rendimiento de los cultivos, la detección de enfermedades en las plantas, la evaluación de la madurez de los frutos y la detección de golpes, así como el monitoreo de viveros (Ljungberg & Joensson, 2002).

Hasta el momento se ha realizado un estudio preliminar en el vivero inicialmente en vacío, identificando los puntos de intercambio de calor. En la siguiente imagen se puede ver el efecto del apantallamiento interior invernadero, donde los puntos P4, P7, P2 y P1 marcan la temperatura del material sin apantallamiento interior, mientras que el resto de puntos están marcados sobre la pantalla interior. La diferencia de temperaturas está en torno a un 5% de disminución con la pantalla.

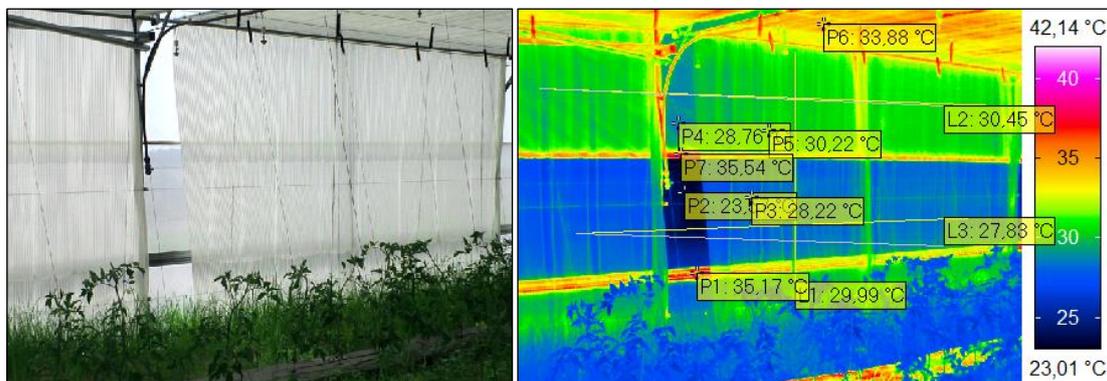


Figura 7. Diferencias termográficas del apantallamiento del invernadero (Regions4Climate)

Gráficamente, el apantallamiento supone una diferencia de unos 5 grados observados en la temperatura emitida por el material. La línea L2 está trazada sobre la parte exterior sin apantallamiento exterior, mientras que la línea L3 está trazada sobre la zona con apantallamiento exterior.

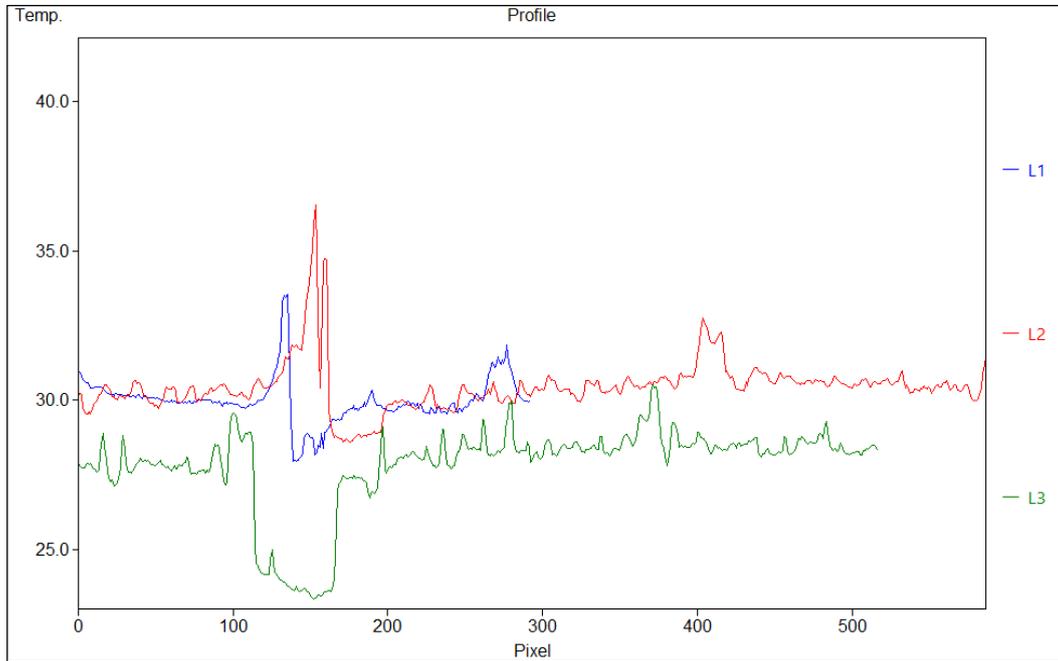


Figura 8. Temperatura por píxel de las líneas L1, L2 y L3 marcadas en la anterior imagen (Regions4Climate)

También se han tomado imágenes para la evaluación del riego por goteo. En la siguiente imagen, se puede observar la diferencia de temperatura que produce la presencia de la tubería de riego por goteo (puntos P2, P4 frente a P3 y P5), así como una potencial zona de difusión del agua de riego (P1).

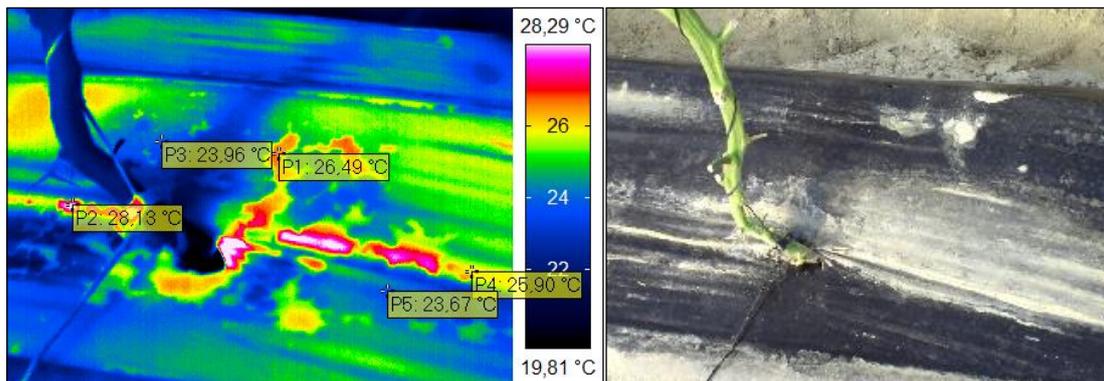


Figura 9. Diferencias termográficas del riego por goteo (Regions4Climate)

Por otro lado, también se observan diferencias de temperatura dentro de la propia planta. Estos cambios se deben al contenido de agua dentro de las distintas partes de la planta: vasos, superficie foliar, tallos, frutos... También se pueden observar diferencias en hojas parcialmente afectadas por hongos o insectos defoliadores, debido al cambio físico en la superficie que afecta a la absorción y emisión de calor.

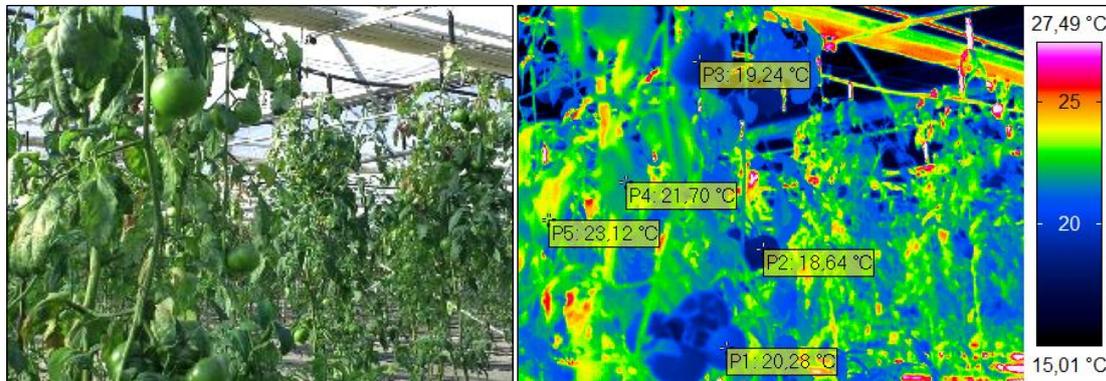


Figura 10. Diferencias termográficas morfológicas: fruto y hojas (Regions4Climate)

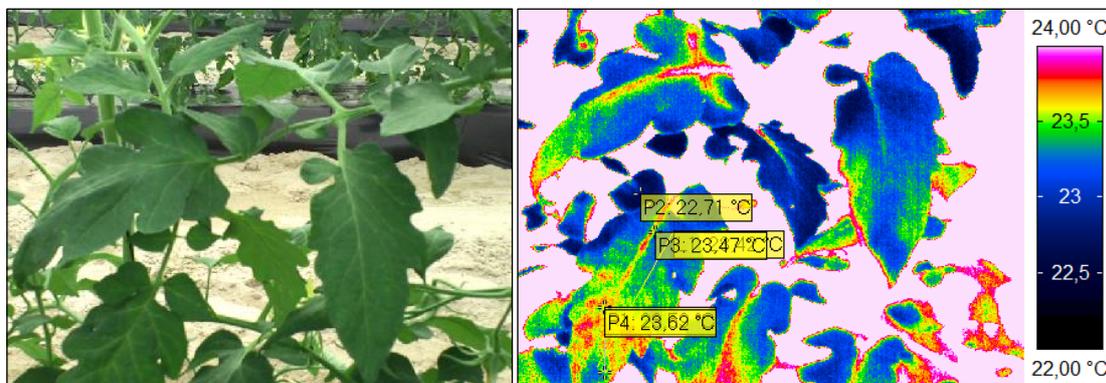


Figura 11. Diferencias termográficas morfológicas: variabilidad en hojas (Regions4Climate)

A lo largo del proyecto se trabajará sobre estas líneas, identificando puntos de fugas de riego, evaluando la distribución del calor dentro del invernadero, así como diferencias debidas a plagas y enfermedades.

6. CONCLUSIONES

En conclusión, el proyecto Regions4Climate en Castilla y León está demostrando ser un modelo innovador de resiliencia climática que integra soluciones tecnológicas, sociales y ambientales en el ámbito agrícola. Las iniciativas implementadas, ofrecen una visión de adaptación climática sostenible y aplicable a otras regiones.

Como parte del proyecto, se plantean soluciones innovadoras para aumentar de forma sostenible la productividad en invernaderos. La implementación de un sistema de calefacción por biomasa combinado con un biofiltro permite el aprovechamiento del CO₂ generado, aumentando la fotosíntesis y la productividad vegetal, y al mismo tiempo mitiga los riesgos de emisiones contaminantes. Por su parte la rotación de cultivos como acción innovadora, abarca la transición de un sistema de monocultivo hacia un sistema multiproductivo, con el objetivo principal de optimizar el uso de recursos, mejor la rentabilidad y garantizar la sostenibilidad productiva a largo plazo.

También se proponen soluciones que contribuyen a una gestión eficiente de insumos y residuos. La valorización de residuos agrícolas a través de prácticas de economía circular, como la suplementación animal y la extracción de celulosa, impulsa el aprovechamiento de los recursos locales, promoviendo la sostenibilidad económica y medioambiental. Finalmente, la aplicación de termografía infrarroja en invernaderos ofrece un recurso invaluable para la gestión agrícola, permitiendo evaluar tanto el estado hídrico de las plantas como la efectividad del riego y la distribución del calor en el ambiente controlado, optimizando así el uso de recursos.

Los resultados esperados a corto y largo plazo no solo contribuirán al desarrollo rural en Castilla y León, sino que también servirán como referencia para la creación de políticas de adaptación al cambio climático y fortalecimiento del sector agrícola, combinando innovación, sostenibilidad y compromiso social.

7. FINANCIACIÓN DEL PROYECTO

Regions4Climate es un proyecto financiado por la Unión Europea (GA nº 101093873). No obstante, las opiniones y puntos de vista expresados son exclusivamente los del autor o autores y no reflejan necesariamente los de la Unión Europea o CINEA. Ni la Unión Europea ni CINEA son responsables de las mismas. Coordinadora del Proyecto: Carmen Antuña Rozado (VTT)

8. BIBLIOGRAFÍA

AINSWORTH, E. A., & ROGERS, A. (2007). The response of photosynthesis and stomatal conductance to rising [CO₂]: mechanisms and environmental interactions. *Plant, Cell & Environment*, 30(3), 258–270. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2007.01641.x>

Argento, S., Garcia, G., & Treccarichi, S. (2024). Sustainable and Low-Input Techniques in Mediterranean Greenhouse Vegetable Production. *Horticulturae*, 10(9), 997. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10090997>

Bascón-Villegas, I., Espinosa, E., Sánchez, R., Tarrés, Q., Pérez-Rodríguez, F., & Rodríguez, A. (2020). Horticultural Plant Residues as New Source for Lignocellulose Nanofibers Isolation: Application on the Recycling Paperboard Process. *Molecules*, 25(14), 3275.

Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P. W., Trisos, C., Romero, J., Aldunce, P., Barrett, K., Blanco, G., Cheung, W. W. L., Connors, S., Denton, F., Diongue-Niang, A., Dodman, D., Garschagen, M., Geden, O., Hayward, B., Jones, C., ... Ha, M. (2023). *IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.* <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>

Chen, J., Wu, Z., Zhao, T., Yang, H., Long, Q., & He, Y. (2021). Rotation crop root performance and its effect on soil hydraulic properties in a clayey Ustisol. *Soil and Tillage Research*, 213, 105136. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105136>

- Easterbrook, D. J. (2016). Greenhouse Gases. In *Evidence-Based Climate Science* (pp. 163–173). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804588-6.00009-4>
- Guardia, G., Tellez-Rio, A., García-Marco, S., Martin-Lammerding, D., Tenorio, J. L., Ibáñez, M. Á., & Vallejo, A. (2016). Effect of tillage and crop (cereal versus legume) on greenhouse gas emissions and Global Warming Potential in a non-irrigated Mediterranean field. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *221*, 187–197. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.01.047>
- Hueso-Kortekaas, K., Romero, J. C., & González-Felipe, R. (2021). Energy-Environmental Impact Assessment of Greenhouse Grown Tomato: A Case Study in Almeria (Spain). *World*, *2*(3), 425–441. <https://doi.org/10.3390/world2030027>
- Johansson, P., Lång, L., & Capener, C. M. (2021). How well do mould models predict mould growth in buildings, considering the end-user perspective? *Journal of Building Engineering*, *40*. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102301>
- Katsoulas, N., Antoniadis, D., & Nikitas, A. (2021). A web-based system for fungus disease risk assessment in greenhouses: System development. *Computers and Electronics in Agriculture*, *188*. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106326>
- Khorsandi, A., Hemmat, A., Mireei, S. A., Amirfattahi, R., & Ehsanzadeh, P. (2018). Plant temperature-based indices using infrared thermography for detecting water status in sesame under greenhouse conditions. *Agricultural Water Management*, *204*, 222–233. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.04.012>
- Körner, C. (2003). Ecological impacts of atmospheric CO₂ enrichment on terrestrial ecosystems. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, *361*(1810), 2023–2041. <https://doi.org/10.1098/rsta.2003.1241>
- Ljungberg, S.-A., & Joensson, O. (2002). *Infrared thermography: a tool to map temperature anomalies of plants in a greenhouse heated by gas fired infrared heaters* (X. P. Maldague & A. E. Rozlosnik, Eds.; pp. 399–406). <https://doi.org/10.1117/12.459589>
- Llorach-Massana, P., Lopez-Capel, E., Peña, J., Rieradevall, J., Montero, J. I., & Puy, N. (2017). Technical feasibility and carbon footprint of biochar co-production with tomato plant residue. *Waste Management*, *67*, 121–130. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.05.021>
- Long, S. P., Ainsworth, E. A., Rogers, A., & Ort, D. R. (2004). RISING ATMOSPHERIC CARBON DIOXIDE: Plants FACE the Future. *Annual Review of Plant Biology*, *55*(1), 591–628. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.55.031903.141610>
- Losada, H., Cortés, J., & Grande, D. (2024). El uso de hortalizas en la producción de leche en sistemas sub-urbanos. *Livestock Research for Rural Development*, *4*(28).
- Mahmoud, Y. M. M. (2016). Using Broccoli plant wastes in sheep rations. *Egyptian J. Nutrition and Feeds*, *19*, 277–287.

- Martinez-Alonso, A., Feroso, J., Verdugo, F., & Carvajal, M. (2024). *Benefit from Biomass Boiler Emissions for Increase Greenhouse Co₂ Levels for Optimal Growth and Yield in Tomato, Cucumber and Strawberry*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4895020>
- Ministerio de Agricultura, P. y A. (2024). *Anuario de Estadística Agraria*.
- Moreno, A. D., Duque, A., González, A., Ballesteros, I., & Negro, M. J. (2021). Valorization of Greenhouse Horticulture Waste from a Biorefinery Perspective. *Foods*, 10(4), 814. <https://doi.org/10.3390/foods10040814>
- Mustafa, A. F., & Baurhoo, B. (2016). Effects of feeding dried broccoli floret residues on performance, ileal and total digestive tract nutrient digestibility, and selected microbial populations in broiler chickens. *Journal of Applied Poultry Research*, 25(4), 561–570. <https://doi.org/10.3382/japr/pfw038>
- Mustafa, A. F., & Baurhoo, B. (2018). Effect of feeding broccoli floret residues on leghorn layer performance and egg quality and nutrient digestibility. *British Poultry Science*, 59(4), 430–434. <https://doi.org/10.1080/00071668.2018.1460459>
- NASA. (2024). Dióxido de carbono. <https://Climate.Nasa.Gov/En-Espanol/Signos-Vitales/Dioxido-de-Carbono/?Intent=111>.
- Parihar, G., Saha, S., & Giri, L. I. (2021). Application of infrared thermography for irrigation scheduling of horticulture plants. *Smart Agricultural Technology*, 1, 100021. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2021.100021>
- Ryan, J., Pala, M., Masri, S., Singh, M., & Harris, H. (2008). Rainfed wheat-based rotations under Mediterranean conditions: Crop sequences, nitrogen fertilization, and stubble grazing in relation to grain and straw quality. *European Journal of Agronomy*, 28(2), 112–118. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2007.05.008>
- Taub, D. R., & Wang, X. (2008). Why are Nitrogen Concentrations in Plant Tissues Lower under Elevated CO₂? A Critical Examination of the Hypotheses. *Journal of Integrative Plant Biology*, 50(11), 1365–1374. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7909.2008.00754.x>
- USDA Agricultural Research Service. (2019, April 1). *Broccoli, leaves, raw*. <https://Fdc.Nal.USda.Gov/Fdc-App.Html#/Food-Details/169329/Nutrients>.
- Zhang, Q., Zhang, X., Yang, Z., Huang, Q., & Qiu, R. (2022). Characteristics of Plastic Greenhouse High-Temperature and High-Humidity Events and Their Impacts on Facility Tomatoes Growth. *Frontiers in Earth Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.848924>