



"Este proyecto ha sido financiado por el programa de investigación e innovación Horizonte 2020 de la Unión Europea en virtud del acuerdo de subvención N° 101000801"



Fluidos termoquímicos para cultivos en invernaderos

MANUAL DE FORMACIÓN

COORDINADOR



Zurich University
of Applied Sciences



School of
Engineering

IEFE Institute of Energy Systems
and Fluid Engineering



MEYER
ORCHIDEEN



UNIVERSIDAD
DE ALMERÍA



AVISO LEGAL

Toda difusión de los resultados debe indicar que refleja únicamente la opinión del autor. La Agencia y la Comisión Europea no son responsables del uso que pueda hacerse de la información que contienen.

Índice

1. Introducción.....	4
1.1. Consorcio.....	4
1.2. Objetivos del proyecto	4
1.3. Concepto	5
1.4. Aplicación para invernaderos.....	6
1.5. Aplicación del proceso de secado para la preparación de alimentos.....	7
1.6. Regeneración del TCF.....	7
1.7. Fluidos utilizados en TheGreefa	8
2. Demostración de las tecnologías de TheGreefa	9
2.1. Demostración en Suiza	13
2.2. Demostración en Túnez.....	21
3. Simulaciones y optimización – Casos de estudio.....	30
3.1. Casos de estudio.....	30
3.2. Caso de estudio 1 – Invernadero tipo Almería sin calefacción	35
3.3. Caso de estudio 2 – Invernaderos multitúnel sin calefacción en España	37
3.4. Caso de estudio 3 – Invernaderos multitúnel con calefacción en España.....	38
3.5. Caso de estudio 4 – Invernadero multitúnel sin calefacción en Italia	40
3.6. Caso de estudio 5 – Invernaderos multitúnel de alta tecnología con calefacción en Italia.....	41
3.7. Conclusiones.....	43
4. Impactos de TheGreefa.....	44
4.1. Impacto ambiental	44
4.2. Impacto económico.....	53
4.3. Conclusiones.....	57
5. Aspectos y políticas sociales	59
5.1. Marco estratégico europeo en agricultura	59
5.2. Marco regulatorio europeo en materia de energía	60
5.3. Marco regulatorio europeo en materia de agua	60
5.4. Marco regulatorio europeo en materia de productos químicos	61
5.5. Conclusiones.....	61
Referencias	63
Socios y personas involucradas en TheGreefa	64

1. Introducción

Este documento presenta la estructura y los resultados del proyecto TheGreefa (Programa de Investigación e Innovación Horizonte 2020, Convocatoria LC-FNR-06-2020, Acuerdo de Subvención N° 101000801), y proporciona una visión general de sus principales fases y logros.

1.1. Consorcio

TheGreefa es un proyecto de investigación e innovación financiado por la Comisión Europea y realizado por 12 socios de 7 países (Fig.1). El consorcio está compuesto por instituciones de investigación, pymes, operadores agrícolas y expertos legales. Se ha formado con el fin de garantizar un equilibrio de habilidades y experiencias para el desarrollo de una tecnología rentable e innovadora que reducirá significativamente el uso de energía fósil en la agricultura.

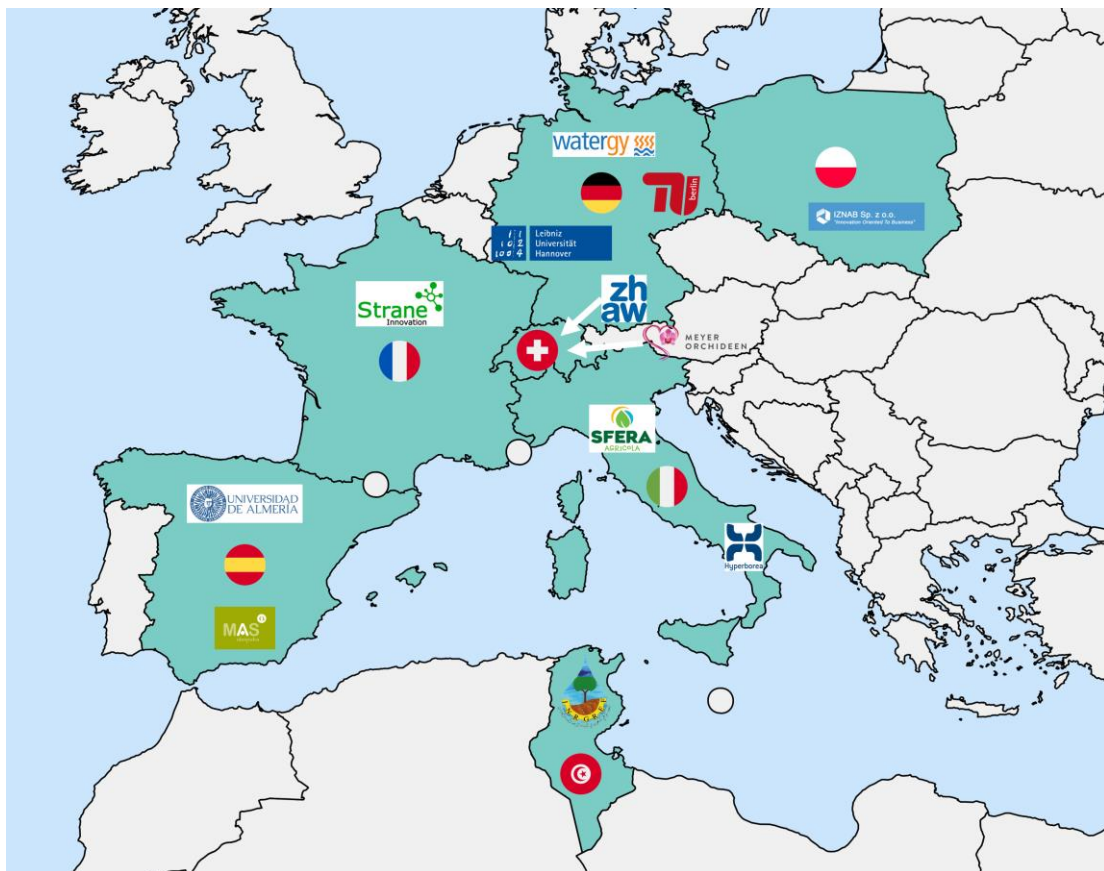


Figura 1. Socios del consorcio TheGreefa

1.2. Objetivos del proyecto

El objetivo del proyecto es el desarrollo y prueba de una tecnología rentable e innovadora que reducirá significativamente el uso de energía fósil en la agricultura.

Las soluciones propuestas por TheGreefa se alinean directamente con los objetivos clave de la UE de aumentar el uso de energías renovables en la agricultura, donde los invernaderos están adquiriendo cada vez más importancia. En los países desarrollados, una alta calidad de vida relacionada con la alimentación debe estar vinculada a productos frescos, saludables y variados. Para ello, a menudo son necesarias largas rutas de transporte.

El transporte de frutas y verduras frescas provoca altas emisiones de CO₂ y una proporción significativa de la huella ambiental de los alimentos. Las regiones pobres con condiciones adversas para el cultivo no pueden permitirse la importación de alimentos. Para ambos casos, los invernaderos con secadero y recuperación de agua representarán la solución adecuada, siempre que se cumplan con los requisitos establecidos por TheGreefa.

1.3. Concepto

TheGreefa se centra en las aplicaciones para invernaderos y para procesos de secado. La tecnología de invernaderos incluye aplicaciones para el control del clima, incluyendo calefacción, refrigeración y control de la humedad del aire. La tecnología propuesta utiliza desecantes líquidos, denominados fluidos termoquímicos (TCF). Los TCF típicos son soluciones salinas a base de hidróxido de sodio o cloruro de magnesio. El efecto común en todas las aplicaciones son las propiedades higroscópicas del TCF, que permiten la absorción de vapor de agua del aire, liberando calor sensible transformado a partir de calor latente almacenado en el vapor. Para dar una aproximación del proceso:

- 1 tonelada de humedad del aire absorbida en el TCF, de acuerdo con el cambio de fase involucrado en la energía, libera 680 kWh de calor (parte derecha de Figura 2). A continuación, la humedad se condensa en forma de agua líquida.
- La absorción de agua diluye parte del TCF, cuando el proceso no puede continuar el TCF debe regenerarse y el agua absorbida debe ser expulsada de nuevo.
- Para la reconcentración (regeneración), la misma cantidad de energía liberada por el proceso de absorción se reintroducirá en el sistema de nuevo, aproximadamente 680 kWh/tonelada de agua evaporada. Las temperaturas inferiores a 60 °C de la fuente de calor son suficientes para el proceso de regeneración, la temperatura exacta dependerá de la fase de equilibrio entre la presión de vapor del TCF y del aire ambiente.

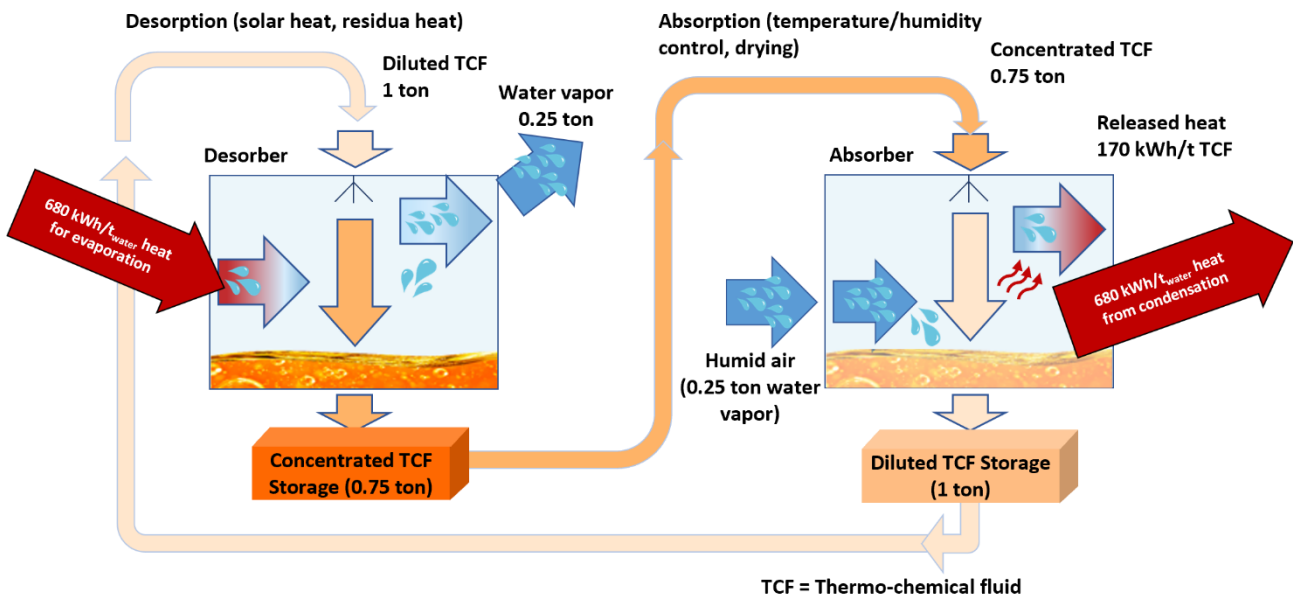


Figura 2. Concepto TheGreefa.

El agua puede ser liberada en forma de vapor de agua absorbido por el aire seco (parte izquierda de la Figura 2) o puede condensarse y recuperarse como agua pura.

El TCF diluido puede almacenarse y regenerarse cuando haya calor disponible, por ejemplo, durante los días soleados con energía solar o por calor residual. El TCF concentrado puede almacenarse en contenedores de plástico simples (por ejemplo, un tanque IBC “*Intermediate Bulk Container*” ó contenedor intermedio a granel, para aplicaciones pequeñas) durante el tiempo que sea necesario, por ejemplo, como almacenamiento estacional. El desplazamiento en el tiempo y el espacio entre el proceso de regeneración y el uso efectivo del TCF es la gran ventaja que presenta la solución propuesta en comparación con los procesos de sorción existentes, por ejemplo, las ruedas giratorias desecantes.

En el modo de regeneración, el proceso puede funcionar con efecto de humidificación y enfriamiento (evaporativo) como servicio adicional.

1.4. Aplicación para invernaderos

La calefacción es el factor de coste más relevante para la producción en los invernaderos de Europa Central. TheGreefa se puede aplicar con éxito en esas regiones reduciendo la cantidad de energía necesaria para la calefacción.

Esta aplicación se explica en la Figura 3, que compara los flujos de energía y agua de un invernadero estándar (izquierda) con un invernadero donde está instalada la tecnología propuesta (derecha).

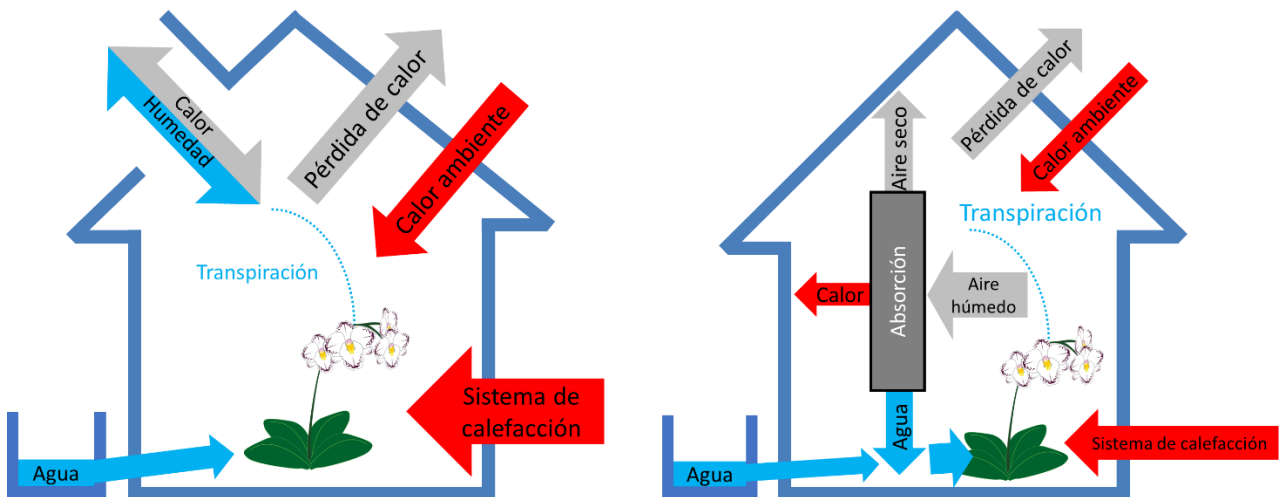


Figura 3. Aplicación de las tecnologías en invernaderos: invernadero estándar (izquierda) y la tecnología propuesta (derecha).

El consumo total de energía (flechas rojas) se reducirá considerablemente: por un lado, habrá una reducción a cero de la pérdida de calor debido a la ventilación porque el aire se recircula y la humedad será eliminada por el TCF. Por otro lado, el calor se libera a través del proceso de absorción.

La tecnología consiste en un intercambiador abierto de calor y masa a contracorriente (absorbedor), que deshumidifica y calienta/enfría el aire a través del TCF por absorción. El agua absorbida se puede recuperar como agua pura y el calor puede almacenarse en forma de TCF concentrado. Hay una recuperación del calor en el tiempo y en el espacio.

1.5. Aplicación del proceso de secado para la preparación de alimentos

El proceso también es muy adecuado para el secado de productos agrícolas como hierbas y frutas, que deben secarse inmediatamente después de la cosecha, independientemente de las condiciones climáticas.

El aire se seca en un absorbedor a contracorriente con un TCF concentrado, pero no necesariamente se calienta, ya que el calor podría dañar las hojas/verduras y afectar su calidad. En un ciclo cerrado, el aire seco liberado se inyecta en la cámara de secado donde se puede extraer la humedad de las verduras. A continuación, el TCF diluido puede almacenarse sin pérdidas térmicas y regenerarse cuando vuelva a disponerse de calor renovable (por ejemplo, calor solar). En comparación con las plantas de última generación que utilizan deshumidificadores de compresión, en un secador de absorción, el consumo de energía eléctrica se limita al funcionamiento de ventiladores y bombas de líquido, mientras que la energía térmica requerida puede ser proporcionada en su totalidad por una fuente de calor de baja temperatura, por ejemplo, puede ser renovable (calor solar, calor residual). Después del proceso de regeneración, la energía suministrada también puede almacenarse sin pérdidas en forma de TCF concentrado (Figura 4).

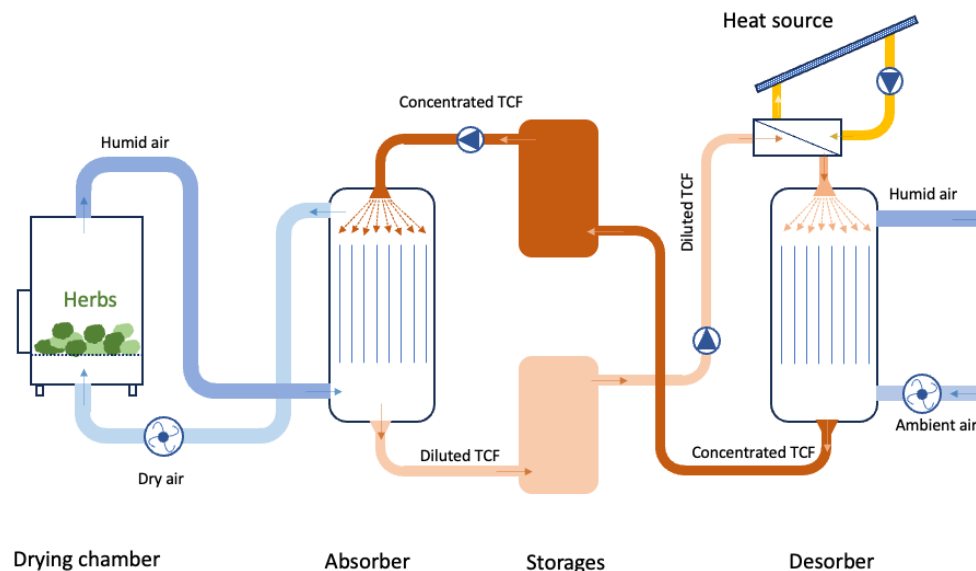


Figura 4. Proceso de secado con el uso del absorbedor y desorbedor.

1.6. Regeneración del TCF

Después de la absorción, el fluido termoquímico ha alcanzado el punto de saturación y entonces es insuficiente para fines de secado/deshumidificación. El TCF necesita ser regenerado para liberar el agua absorbida. La regeneración es el proceso opuesto a la absorción. El TCF se pone en contacto con aire seco y parte del agua de la solución del TCF se evapora al aire que pasa a través del dispositivo. Para forzar el proceso, generalmente es necesaria una pequeña cantidad de calor a baja temperatura para aumentar la temperatura del aire, disminuyendo así su humedad relativa. El nivel de temperatura depende del equilibrio de presión de vapor entre el aire y el TCF, en cualquier caso, estará por debajo de 60°C. El calor se almacena durante este proceso dentro del TCF en forma de potencial termoquímico (TCF concentrado).

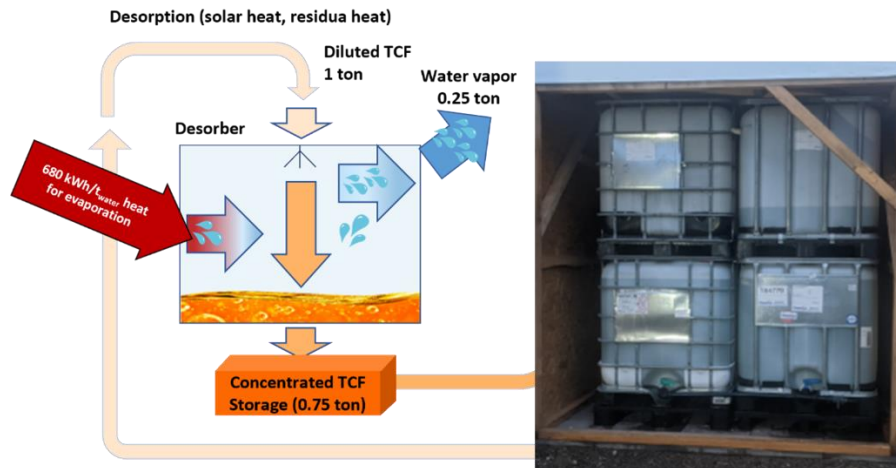


Figura 5. Regeneración del TCF.

La absorción y la desorción pueden tener lugar en la misma columna (absorbedor) en diferentes períodos. El equilibrio de la presión de vapor entre el aire y el TCF determinará en qué dirección fluirá el agua/humedad.

1.7. Fluidos utilizados en TheGreefa

Los fluidos termoquímicos utilizados en este proyecto son $MgCl_2$ y $NaOH$.

El $MgCl_2$ no es muy utilizado en los procesos de secado porque su higroscopicidad es mucho menor que la higroscopicidad del $LiBr$ o el $LiCl$. Las soluciones de $MgCl_2$ pueden reducir la humedad relativa del aire al 30% a temperatura ambiente (20 °C), pero no por debajo. Sin embargo, la humedad requerida para la aplicación en invernadero está en el rango del 40-70%, lo que significa que la higroscopicidad del $MgCl_2$ es suficiente.

La ventaja del $MgCl_2$ es su alta disponibilidad, ya que forma parte del agua de mar con una concentración de 1 kg/m^3 , y el coste es muy bajo, aproximadamente 100 €/m^3 .

El $NaOH$ se utiliza para aplicaciones de secado. El $MgCl_2$ no es adecuado debido a su baja higroscopicidad. Para el secado de cultivos, la humedad del aire se reducirá a aproximadamente el 10% en la salida del absorbedor. Esto es posible utilizando $NaOH$, cuya disponibilidad también es alta y el costo es bajo. Una limitación para el uso de $NaOH$ es su reacción con el CO_2 contenido en el aire. Esta reacción no afecta de manera significativa al proceso de secado porque el aire recircula en una cámara de secado con absorbedor en circuito cerrado.

Estos dos fluidos termoquímicos son inocuos: el $MgCl_2$ es un producto de la preparación de sal para cocinar, mientras que el $NaOH$ se utiliza como ingrediente para preparaciones especiales de panes.

2. Demostración de las tecnologías de TheGreefa

Como ya se ha introducido en sección 1.3, TheGreefa utiliza desecantes líquidos, los llamados fluidos termoquímicos (TCF). Los TCF típicos son soluciones salinas a base de hidróxido de sodio o cloruro de magnesio. El efecto común en todas las aplicaciones son las propiedades higroscópicas del TCF, que permiten la absorción de vapor de agua del aire, liberando así también calor sensible a partir de calor latente almacenado en el vapor. Para dar una aproximación del proceso:

- 1 tonelada de humedad del aire absorbida en el invernadero, de acuerdo con el cambio de fase involucrado en la energía, libera 680 kWh de calor. La humedad (vapor) se convierte en agua líquida. El efecto es que el invernadero se calienta y se deshumidifica al mismo tiempo.
- La absorción de agua diluye parte del TCF. Cuando el proceso no puede continuar el TCF debe regenerarse y el agua absorbida debe ser expulsada de nuevo.
- El TCF diluido se puede almacenar durante mucho tiempo sin pérdidas y se regenerará cuando haya calor disponible.
- Cuando el calor está disponible, por ejemplo, durante los días soleados o cuando el calor residual está disponible, el TCF diluido se transporta a la regeneración, que puede ser en el mismo invernadero o también en otro lugar (Figura 6 izquierda) porque no hay pérdidas durante el transporte. No se almacena energía térmica, pero sí el potencial de liberar la energía.
- Para la reconcentración (regeneración), se reintroducirá en el sistema la misma cantidad de energía liberada por el proceso de absorción, de nuevo aprox. 680 kWh/tonelada de agua evaporada. Las temperaturas inferiores a 60 °C de la fuente de calor son suficientes para el proceso de regeneración, la temperatura exacta depende del equilibrio de fase del vapor de presión entre el TCF y el aire ambiente.
- El agua puede ser liberada en forma de vapor de agua absorbido por el aire seco o puede ser condensada y recuperada como agua pura (parte central de la Figura 6).
- El TCF concentrado puede almacenarse todo el tiempo que sea necesario, y también durante un largo período.

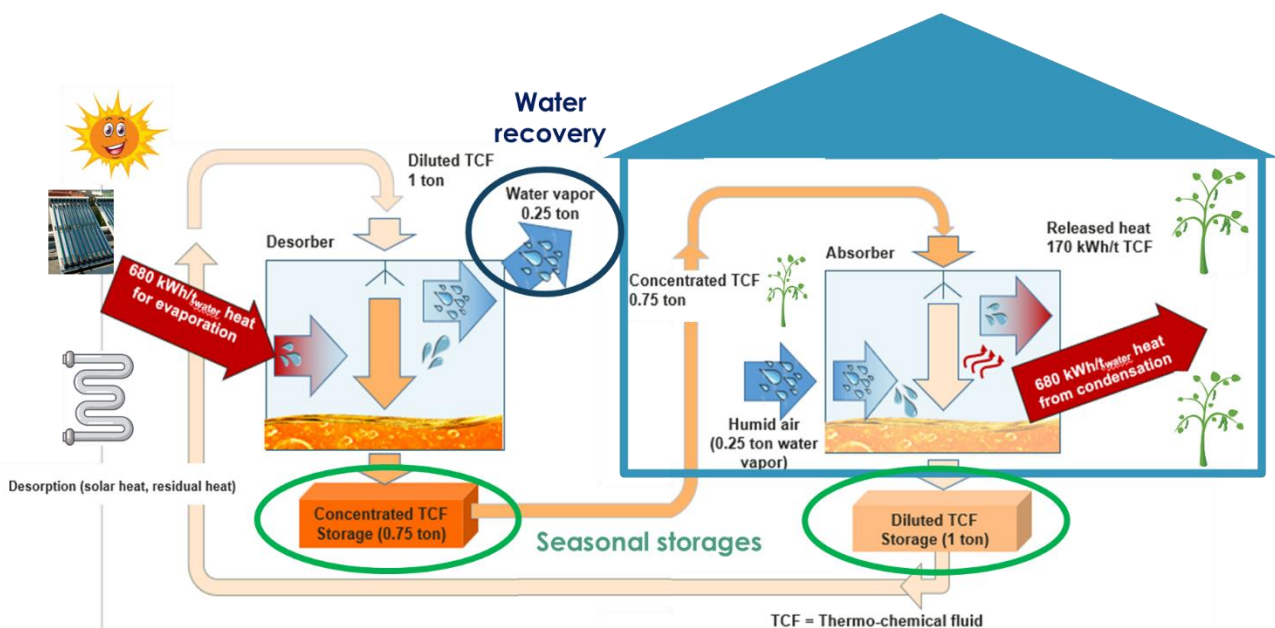


Figura 6. Esquema de circulación de fluido para invernaderos.

TheGreefa se utiliza en regiones de clima continental para regular la temperatura y la humedad dentro de los invernaderos. El uso de TheGreefa puede reducir la energía necesaria para la calefacción, lo que en estas regiones tiene un impacto significativo en el equilibrio general. Al controlar la humedad sin abrir las ventanas y, por lo tanto, sin liberar calor al exterior, se reducen las pérdidas de calor. Además, el proceso de absorción libera más calor, disminuyendo aún más la energía necesaria para el calentamiento. En la Figura 7, en el lado izquierdo, se representa un invernadero tradicional, y a la derecha el invernadero TheGreefa. El proceso de regeneración tiene lugar fuera del invernadero y el aire húmedo se libera a la atmósfera. En la región continental no hay necesidad de recuperar agua.

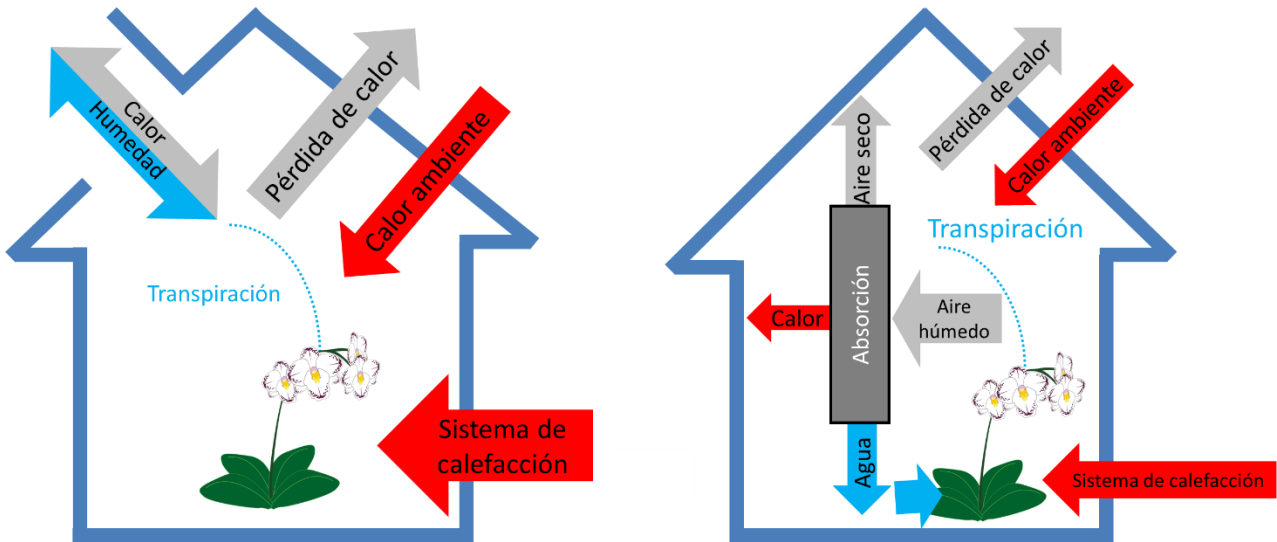


Figura 7. La aplicación TheGreefa (derecha) comparada con un invernadero tradicional (izquierda).

Absorbedor

El absorbedor es un componente muy simple. Es un depurador de plástico de relleno aleatorio. El plástico es necesario debido al alto nivel de corrosión del TCF (solución salina).

El aire fluye de abajo hacia arriba, y el TCF de arriba hacia abajo. El envase aumenta la superficie de contacto y el tiempo de contacto entre el aire y el TCF.

Para garantizar un alto grado de absorción, se necesita un tiempo mínimo de permanencia de los dos fluidos dentro del absorbedor. Esto se hace estableciendo una velocidad máxima del aire y una densidad mínima de flujo del TCF.



Figura 8. Envases.

En la demostración suiza, el tiempo de permanencia es de 1,5 segundos y se fijan dos valores: 1 m/s para la velocidad del aire (absorbedor vacío) y 12 m³/ (h m²) para la densidad de flujo del TCF. Este parámetro de diseño da como resultado un diámetro de 0,4 m y una altura activa de 1,3 m (la altura activa es la parte del absorbedor donde hay contacto entre el aire y el TCF).

La estructura simple se muestra en la Figura 9: a la izquierda, se utiliza un prototipo transparente en las instalaciones de ZHAW. La parte "blanca" se rellena con envases y es la altura activa. A la derecha está el absorbedor instalado en el demostrador suizo.



Figura 9. Absorbedor transparente en ZHAW-lab (izquierda) y el absorbedor instalado en el demostrador suizo (derecha).

Absorbedor: componentes

El absorbedor consta de diferentes partes marcadas con diferentes colores (Figura 10):

- **Amarillo:** El distribuidor de TCF asegura que el TCF se distribuya de manera homogénea en toda la sección del absorbedor.
- **Azul:** Parte activa / empaquetado aleatorio: esta parte está llena de pequeños envases aleatorios. Aquí tiene lugar el proceso de absorción.
- **Rojo:** el empaquetado flotante evita la formación de aerosoles en el depurador.
- **Morado:** el sumidero recoge el TCF procedente de la parte activa y desde aquí el TCF se bombea de nuevo al absorbedor.
- **Verde:** el antivaho evita que la gota de líquido salga del absorbedor.

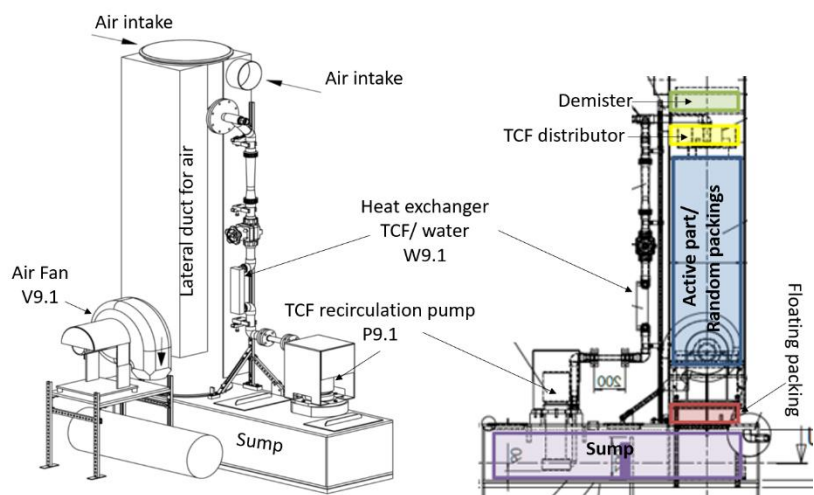


Figura 10. Componentes del absorbedor.

El aire es aspirado por el absorbedor a través de un ventilador (V9.1) que se encuentra en la salida de aire, el absorbedor funciona bajo la presión ambiente. Esta solución evita la fuga de aire no tratado del absorbedor.

El TCF se extrae del sumidero mediante una bomba de recirculación (bomba centrífuga sumergible P9.1) y se bombea a través del intercambiador de calor de placas (W9.1) al cabezal del absorbedor, donde se distribuye uniformemente sobre el empaquetado mediante un distribuidor de líquido.

El depurador se coloca por completo en el sumidero y tiene aberturas de salida para la solución salina en la parte inferior. Este sifón separa el aire en el depurador en el tanque receptor para que pueda funcionar atmosféricamente abierto al entorno del invernadero. Entre el depurador y la bomba de circulación de solución, hay un rebosadero en el tanque de almacenamiento que garantiza un flujo uniforme y evita así que se produzca una distribución heterogénea de la concentración de TCF.

Todas las partes del absorbedor en contacto con el TCF están hechas de polipropileno o cloruro de polivinilo y el intercambiador de calor tiene un recubrimiento de parileno en el lado de la solución.

Absorbedor: control de la temperatura y la humedad del aire

La humedad del aire está controlada por la concentración del TCF, mientras que la temperatura del aire está controlada por la temperatura del TCF.

La concentración de TCF dentro del absorbedor se mantendrá en un cierto porcentaje para permitir el proceso de absorción, solo de esta manera es posible controlar la humedad del aire en el invernadero. Un TCF demasiado diluido no puede controlar la humedad del aire.

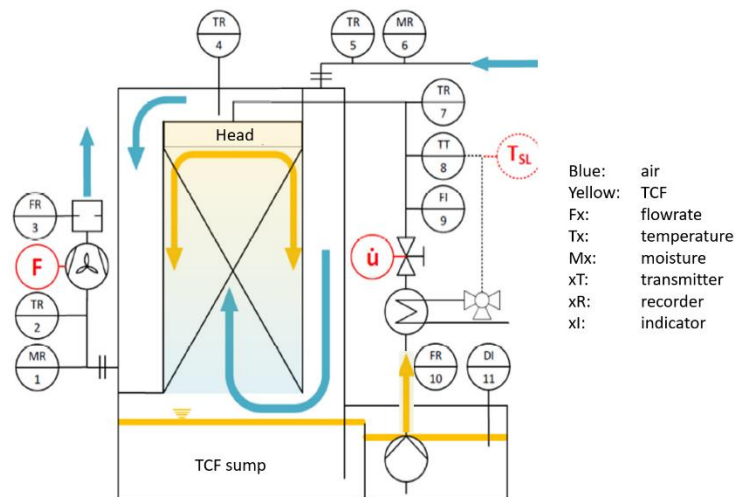


Figura 11. Absorbedor: control de la temperatura y humedad del aire.

El proceso para el control de la humedad se implementa como un proceso por lotes. Tan pronto como el punto de medición MR1 indica una humedad demasiado alta, el sumidero del TCF se drena y se llena con TCF concentrado.

La temperatura del aire se mide en la salida del absorbedor (TR 2). Si la temperatura está fuera del rango requerido, por ejemplo, demasiado baja o alta, el TCF se calienta o se enfría en el intercambiador de calor que se muestra en Figura 11. En el invernadero suizo, el intercambiador de calor es un intercambiador de calor TCF/agua.

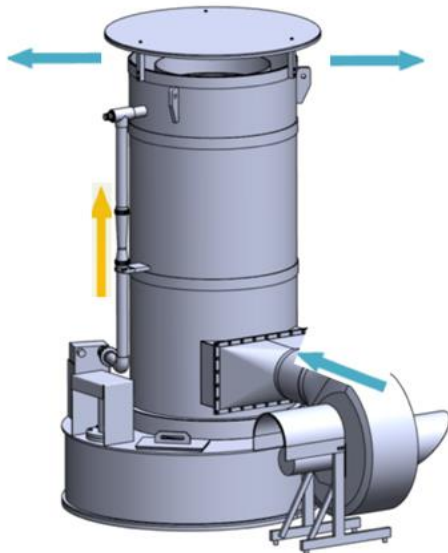


Figura 12. Modelo de desorbedor.

Desorbedor: Regeneración

El desorbedor se utiliza para regenerar (también se denomina concentrar) el TCF diluido.

El desorbedor tiene el mismo diseño que el absorbedor, pero funciona bajo presión positiva, el ventilador está en la entrada de aire. El aire entra en el desorbedor directamente desde la parte inferior y sale por la parte superior.

El intercambiador de calor se utiliza para proporcionar la entrada de energía necesaria para el proceso de desorción.

La temperatura en el desorbedor para el proceso de regeneración (por ejemplo, el proceso de evaporación del agua contenida en el TCF y su absorción por el aire)

influye en la velocidad necesaria para alcanzar la concentración requerida del TCF.

El funcionamiento del desorbedor también es un proceso por lotes y normalmente el sumidero del desorbedor está vacío. Para la regeneración, se llena con TCF diluido que se recircula desde y hacia el sumidero a través del desorbedor. A partir de la medición de la densidad y la temperatura de la solución, se determina la concentración del TCF. Si se alcanza la concentración máxima de TCF (en el demostrador suizo 32%), se finaliza el proceso de desorción y el TCF concentrado se bombea desde el sumidero del desorbedor al tanque de almacenamiento de TCF concentrado.

Puede encontrar más detalles en la página web de Cordis o en la página web de TheGreefa en la sección Descargas/Publicaciones, en el documento ***Concept for a fully automated system and operating manual***.

Enlaces:

Cordis: <https://cordis.europa.eu/project/id/101000801/results/>

TheGreefa: https://thegreefa.eu/wp-content/uploads/2024/06/THEGREEFA_D1.3-Control-system-and-operating-manual.pdf

2.1. Demostración en Suiza

Los resultados presentados aquí son para el demostrador suizo del proyecto TheGreefa. El demostrador suizo es un invernadero de 600 m², situado cerca de Zúrich, en Suiza. Está diseñado específicamente para el cultivo de orquídeas. En lugar de colocarse directamente en el suelo, los cultivos se sitúan en mesas, como se muestra en Figura 13.



Figura 13. Mesas de plantación en el demostrador suizo. El absorbedor está marcado en verde.

Balance energético en el demostrador suizo

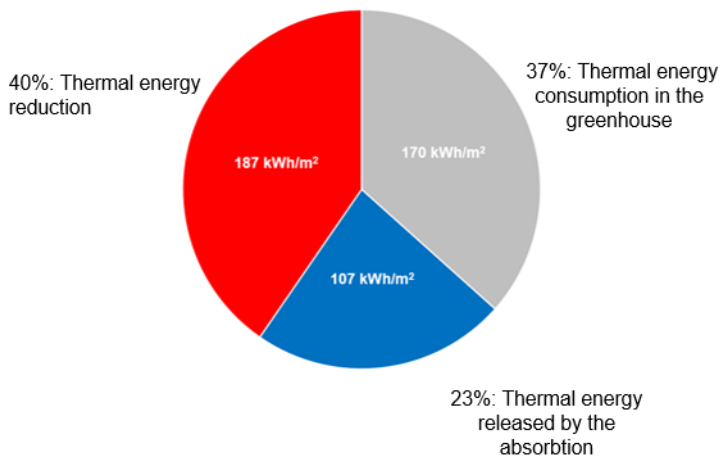


Figura 14. Balance anual de energía térmica en el demostrador suizo.

A partir de los datos medidos durante más de un año y su interpolación, se han estimado los ahorros energéticos que la tecnología TheGreefa ha aportado a los invernaderos suizos. El 100% en el gráfico circular (Figura 14) representa la energía térmica que se habría requerido en el invernadero sin TheGreefa. La parte roja indica la energía ahorrada por TheGreefa debido al control de humedad basado en absorción en lugar de liberar aire cálido y húmedo al exterior. La parte azul representa la energía térmica liberada durante el proceso de absorción, siendo la energía

necesaria para calentar el invernadero, pero no tiene que ser suministrada por el operador del invernadero. Es la energía necesaria para la regeneración del TCF, por ejemplo, la energía térmica a baja temperatura, que de otro modo no se utilizaría. La característica de TheGreefa es que la disponibilidad de esta energía no tiene por qué coincidir con el uso, en el tiempo y en el espacio. Esta energía puede almacenarse en forma de TCF concentrado durante largos períodos sin ninguna pérdida de energía, conservando el potencial de liberación de energía térmica en lugar de la energía térmica. Por último, la parte gris es la energía térmica que debe ser suministrada por el operador del invernadero.

Sin embargo, para el consumo de electricidad, la situación se invierte: el operador del invernadero debe suministrarla realmente.

Sin embargo, la situación se invierte al considerar el consumo de electricidad. Como se muestra en Figura 14, con la instalación de TheGreefa, el consumo eléctrico aumenta un 24%

aproximadamente. Es importante tener en cuenta que, en los componentes giratorios, como las bombas y los ventiladores instalados en el sistema TheGreefa, no se han optimizado el rendimiento eléctrico. Además, en el diseño de los conductos de aire y los intercambiadores de calor se ha dado prioridad al rendimiento térmico, lo que se traduce en importantes pérdidas por alta presión. Por lo tanto, existe potencial para reducir este consumo adicional a través de la optimización.

Si se considera el balance energético global del invernadero suizo, es evidente que la energía eléctrica tiene un impacto menor en comparación con la energía térmica. Si excluimos la energía utilizada para la regeneración, ya sea porque se gestiona por separado o porque se utiliza de otro modo, el ahorro total de energía supera el 50%. Incluso cuando se incluye la energía de regeneración, se consigue un ahorro sustancial de alrededor del 35%.

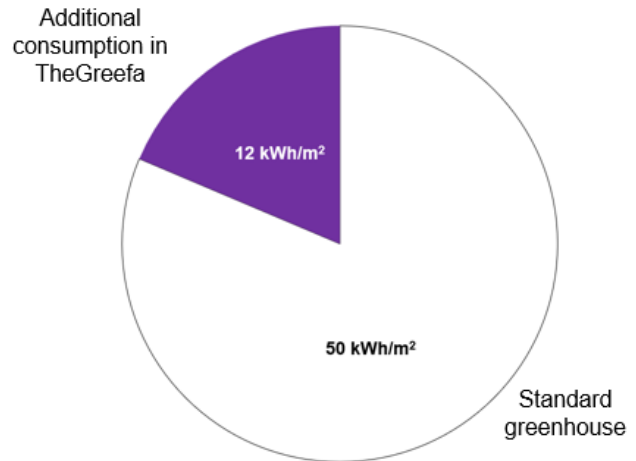


Figura 15. Consumo anual de electricidad en el demostrador suizo.

Tabla 1. Resumen del balance energético en el invernadero en Suiza.

	TheGreefa kWh/m ² año	Sin TheGreefa kWh/m ² año
Energía térmica	155	464
Energía eléctrica	62	50
Total	217	514
Energía para la regeneración (calor a baja temperatura)	107	
Total incluida regeneración	324	514

Resultados del TCF

A partir de los datos medidos del TCF concentrado utilizado en el demostrador (línea azul en Figura 16), se simuló la producción de TCF concentrado (línea verde en Figura 16) utilizando agua caliente como fuente de calor generada en paneles solares ubicados cerca del invernadero. Para el invernadero suizo, se necesitan aproximadamente 100 m² de paneles solares, lo que equivale a una sexta parte de la superficie del invernadero. Curiosamente, la regeneración del TCF se produce durante todo el año, ya que depende de la diferencia de temperatura entre el aire y el TCF, y no de la temperatura absoluta. La producción experimenta un ligero descenso durante los meses más fríos debido al acortamiento de los días y una mayor nubosidad.

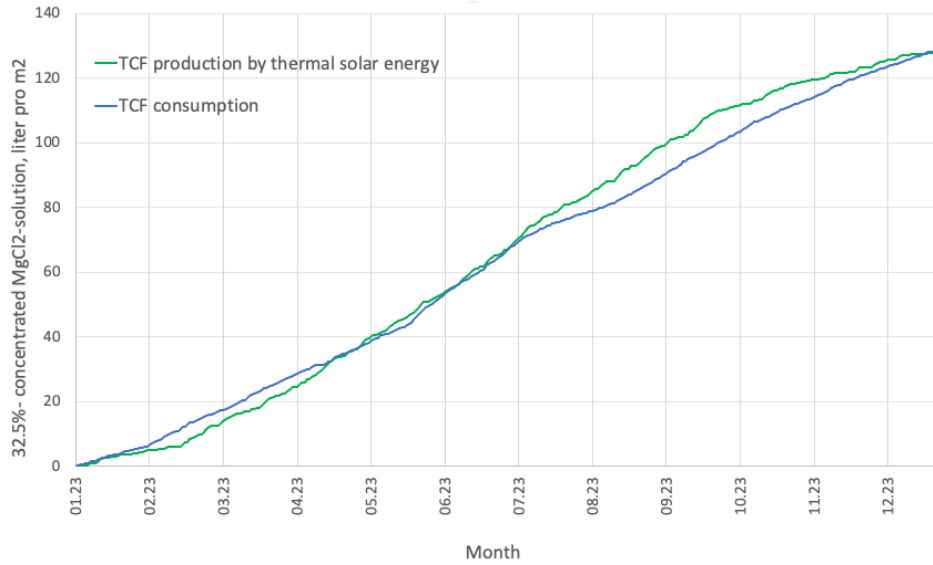


Figura 16. Absorción y regeneración de TCF (MgCl₂).

En función de la cantidad y el patrón de uso del TCF utilizado y regenerado, se ha determinado el tamaño mínimo requerido para el almacenamiento del TCF (Figura 17). Solo se necesita una unidad de almacenamiento, ya que las diferentes densidades de TCF concentrados y diluidos impiden que se mezclen. Durante la estación fría, el uso de TCF es alto y la regeneración es ligeramente inferior; al final de esta temporada (marzo) el almacenamiento está totalmente ocupado por TCF diluido. Por el contrario, al final de la temporada cálida, debido a las condiciones opuestas, el almacenamiento está totalmente ocupado por TCF concentrado. El volumen de almacenamiento necesario es de aproximadamente 175 litros por metro cuadrado de superficie de invernadero.

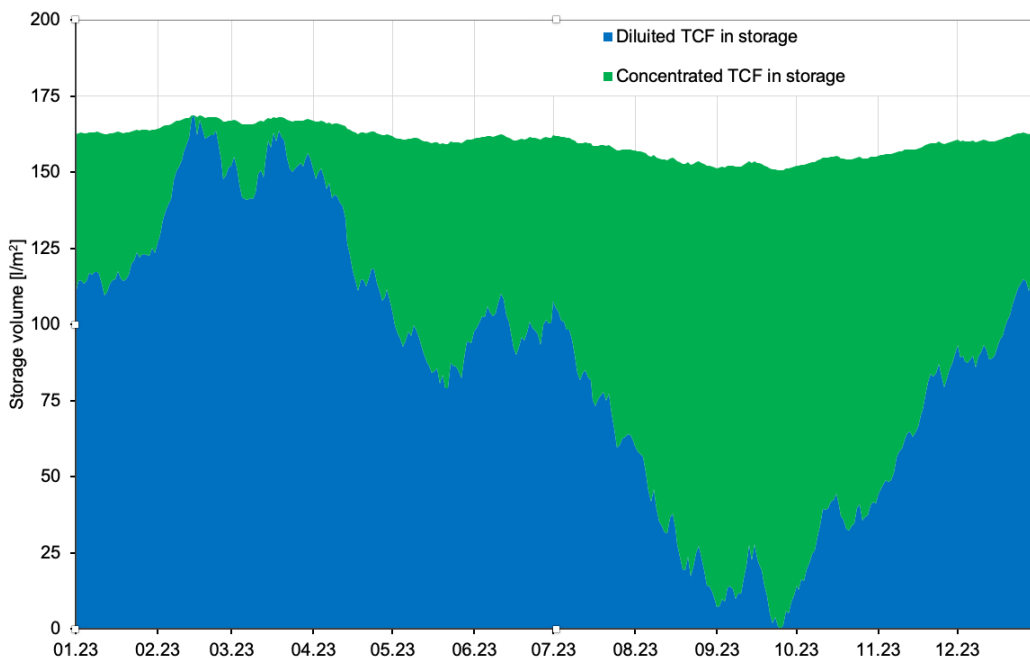


Figura 17. Volumen de almacenamiento.

Proceso de secado

El proceso de secado es muy similar al proceso de control de la humedad y la temperatura del aire. La diferencia es que, en este caso, el objetivo es deshumidificar el aire, sin control de temperatura.

Esta aplicación se explica en Figura 18. El aire se seca en un absorbedor a contracorriente con un TCF concentrado, pero no necesariamente se calienta, ya que el calor podría dañar las hojas/verduras y afectar su calidad. La configuración del absorbedor puede ser la misma que la utilizada en el invernadero. En un ciclo cerrado, el aire seco liberado se inyecta en la cámara de secado donde se puede extraer la humedad de las verduras.

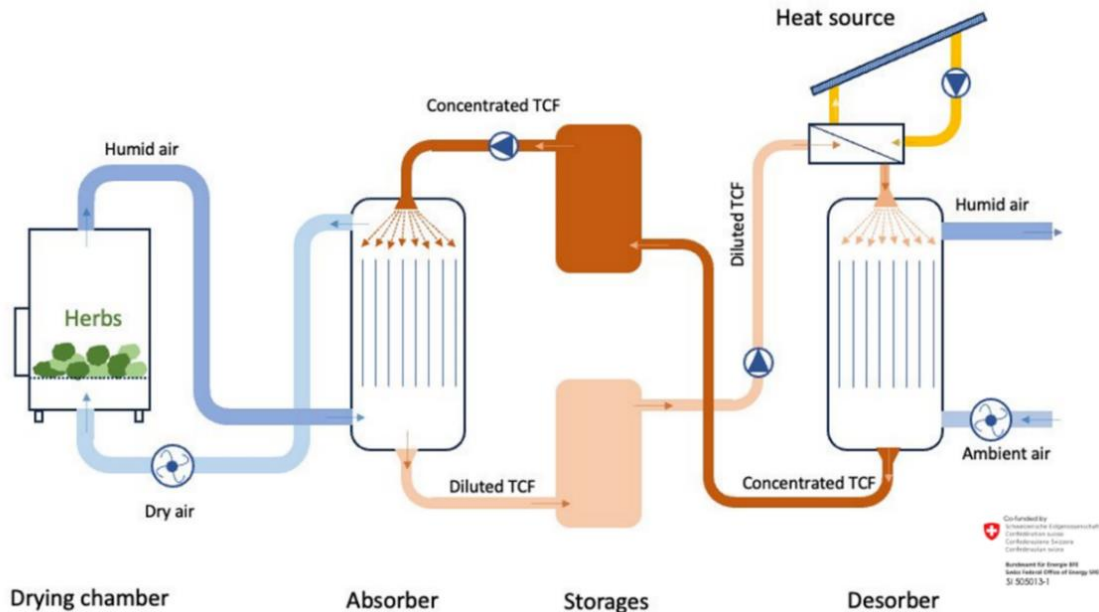


Figura 18. Proceso de secado mediante el absorbedor y el desorbedor.

A continuación, el TCF diluido puede almacenarse sin pérdidas térmicas y regenerarse cuando vuelva a disponerse de calor renovable (por ejemplo, calor solar). En comparación con las instalaciones de última generación que utilizan deshumidificadores de compresión, en un secador de sorción, el consumo de energía eléctrica se limita al funcionamiento de ventiladores y bombas de líquido, mientras que la energía térmica necesaria puede ser suministrada en su totalidad por una fuente de calor de baja temperatura, por ejemplo, puede ser totalmente renovable. Tras el proceso de regeneración, la energía suministrada también puede almacenarse sin pérdidas.

Selección TCF

La elección del TCF que debe utilizarse en la planta de secado es diferente a la del invernadero.

Figura 20 muestra la línea de equilibrio entre los diferentes TCF y el aire húmedo. Las líneas discontinuas representan el aire con diferentes niveles de humedad. Los puntos de intersección entre las líneas de solubilidad de los TCF y las del aire indican la humedad mínima que se puede alcanzar a una temperatura determinada. Por ejemplo, a 20 °C con una solución de $MgCl_2$, el grado máximo de deshumidificación no desciende por debajo del 35%. En el invernadero se eligió $MgCl_2$ por su disponibilidad y bajo coste, pero su higroscopicidad es limitada. A 20 °C, la humedad relativa del aire no puede reducirse por debajo del 35%. Mientras que para el cultivo de plantas este nivel de humedad es inaceptable porque es demasiado bajo, para un proceso de secado es demasiado alto. Una alternativa costosa podrían ser las soluciones $LiBr$ o $LiCl$.

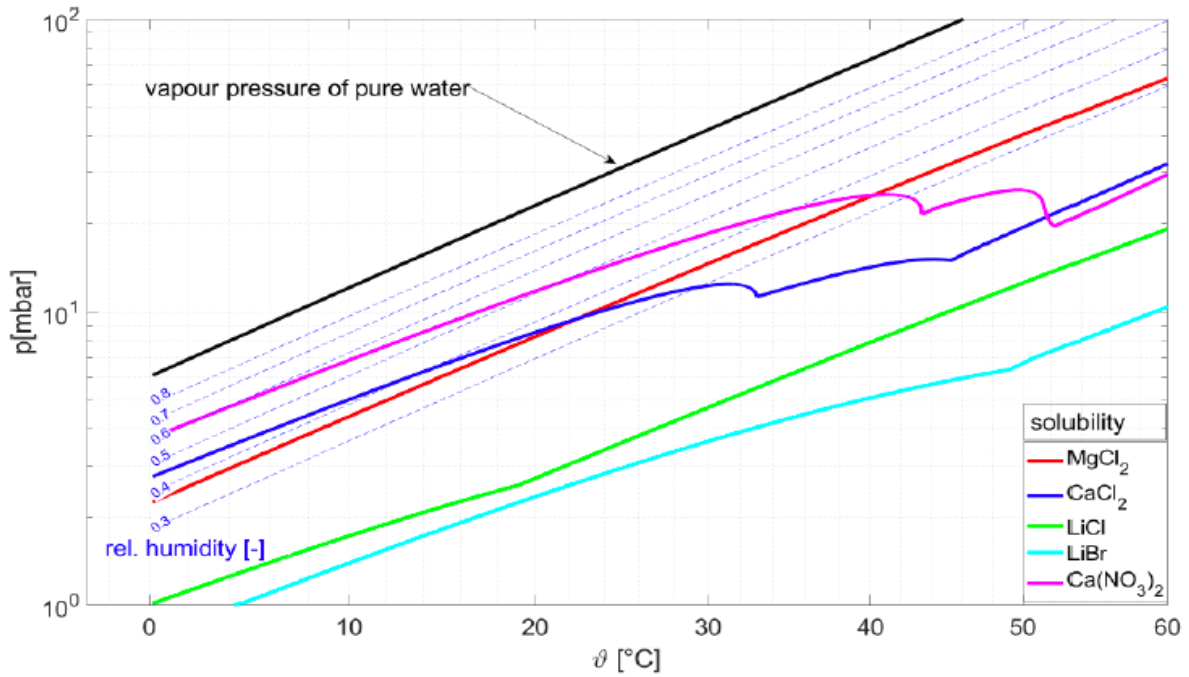


Figura 20. Comparativa de diferentes TCFs.



Figura 19. Interior de la secadora con hierbas secas.

Tabla 2. Diferentes TCFs probados para el proceso de secado.

Salt (TCF)	Chemical compounds	Air humidity at the equilibrium, 20°C
Caesium fluoride	CsF	3.38 %rH
Lithium bromide	LiBr	6.61 %rH
Zinc bromide	ZnBr ₂	7.94 %rH
Sodium hydroxide	NaOH	8.91 %rH
Potassium hydroxide	KOH	9.32 %rH
Lithium chloride	LiCl	11.31 %rH
Calcium bromide	CaBr ₂	16.50 %rH

Para el proceso de secado, nuestro objetivo era encontrar y probar un TCF con mejores propiedades higroscópicas que el MgCl₂, pero con costes asequibles. Además, debía ser un TCF compatible con la industria alimentaria. Las características de los diferentes TCF se muestran en la tabla 2 y se optó por el NaOH, que se usa ampliamente en panadería y cumple con estos requisitos.

Un problema que puede surgir con el uso del NaOH es su reactividad con el CO₂ presente en el aire. Esta reacción forma carbonatos que precipitan, por lo que hay que eliminar el precipitado y reponerse el NaOH reaccionado. El problema puede minimizarse, si no eliminarse, recirculando el aire en un circuito cerrado. En la Figura 21, el CO₂ que reacciona con el NaOH durante el proceso de regeneración se muestra en azul. La regeneración se llevó a cabo en la planta ZHAW como un ciclo abierto, en el que se suministraba continuamente aire ambiente nuevo. En este caso, es necesaria una reposición continua de NaOH.

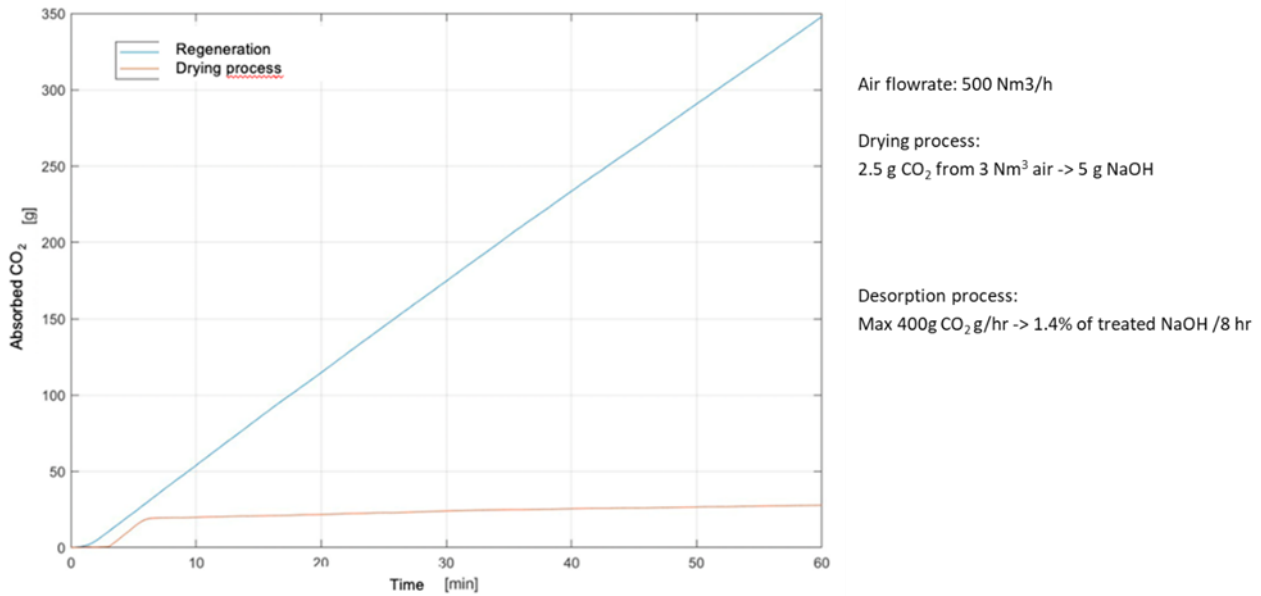


Figura 21. Reacción de CO₂ con NaOH.

En el absorbedor para deshumidificar el aire (proceso de secado), el aire se recircula continuamente. Como muestra la línea roja, el CO₂ reacciona con el NaOH solo al principio; una vez que su nivel cae por debajo del umbral de reacción, ya no se elimina. El NaOH no requiere reposición. Los carbonatos formados precipitan en una solución de NaOH y se pueden eliminar al final del ciclo de secado.

Optimización del proceso

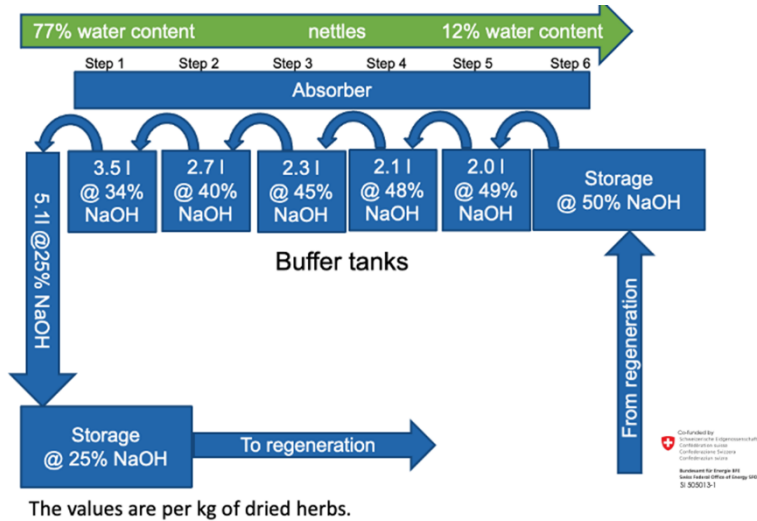


Figura 22. Concepto propuesto para el proceso de secado.

La concentración de TCF utilizada en las pruebas de laboratorio fue del 50% al inicio del proceso de secado y del 44% al final. Nunca se reemplazó durante todo el proceso de secado.

Por lo tanto, el poder de absorción fue mayor al principio que al final. Sin embargo, en las etapas finales, eliminar la humedad restante de las hierbas casi secas es más difícil.

Una alta concentración de TCF no es estrictamente necesaria al comienzo del proceso de secado, mientras que es esencial en las etapas finales. Por

esta razón, se propone el concepto ilustrado en Figura 22. El proceso comienza con un TCF diluido, que se reemplaza en las fases posteriores con TCF cada vez más concentrado. Esto puede lograrse reutilizando el TCF de la fase final de un lote de hierbas en la fase anterior del siguiente lote. Solo cuando el TCF esté tan diluido que ya no pueda absorberse se enviará para su regeneración o almacenado.

Utilizando un proceso escalonado, es posible reducir el volumen requerido por el almacenamiento, como se ilustra en Figura 23. La energía necesaria para la regeneración sigue siendo la misma, siendo igual que la cantidad de agua que hay que evaporar.

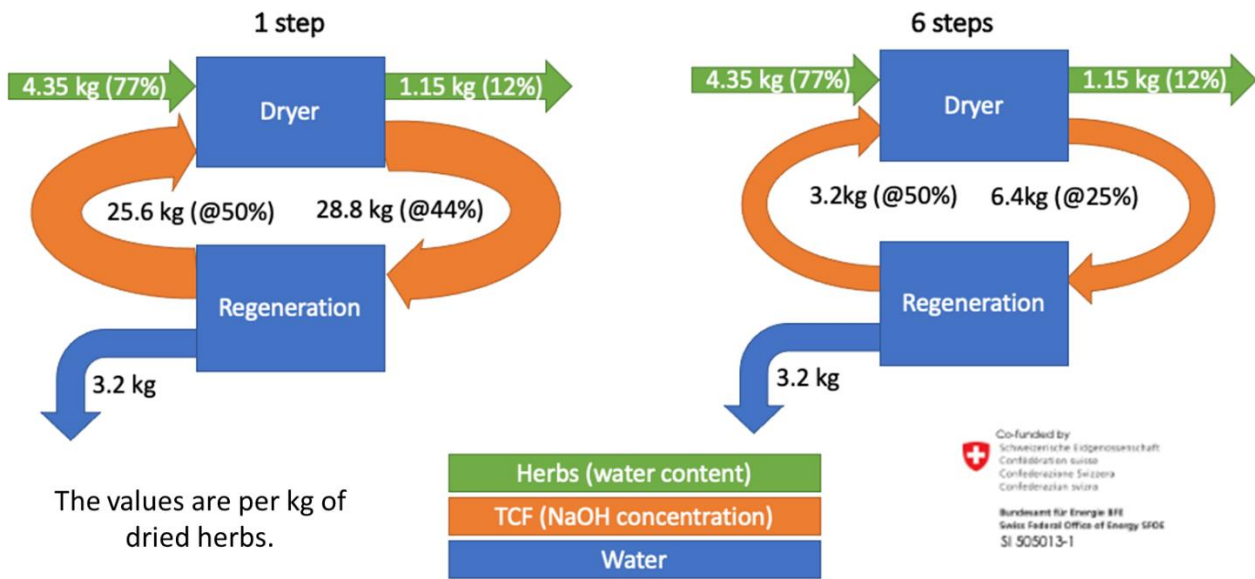


Figura 23. Reducción de volumen en proceso escalonado.

Comparativa energética

Se ha estimado el consumo específico de energía de toda la instalación, incluida la regeneración del TCF, y se han comparado con la instalación real. En la Figura 24, las flechas azules representan la energía eléctrica y las rojas la energía térmica.

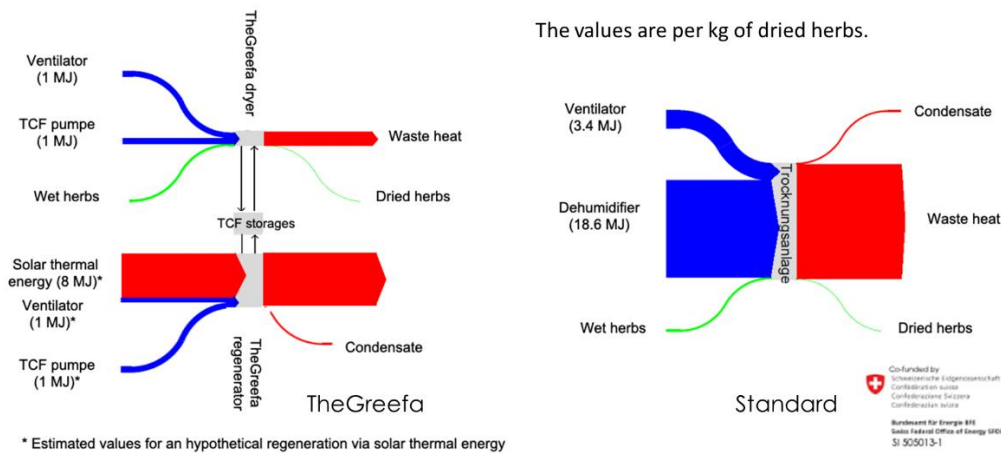


Figura 24. Comparación energética entre el proceso de secado TheGreefa y el secado estándar.

Teniendo en cuenta que la regeneración utilizará energía térmica que de otro modo no se utilizaría (digamos energía gratuita), la demanda energética específica de TheGreefa es claramente inferior a la del secado convencional con un deshumidificador. Es importante destacar que la gran ventaja de TheGreefa no es solo que el proceso requiere menos energía que una planta convencional, sino también que la energía térmica necesaria se desvincula del proceso de secado.

Esta energía térmica puede obtenerse en su totalidad de energías renovables o de calor residual a baja temperatura que, de otro modo, no se utilizaría. Además, el TCF puede almacenar energía térmica indirectamente durante mucho tiempo sin ninguna pérdida de energía.

2.2. Demostración en Túnez

El objetivo principal de este proyecto piloto en el invernadero de demostración en Túnez es evaluar el rendimiento de un Sistema Desecante Líquido a base de Salmuera (LDAS), utilizado para la climatización de invernaderos. Esta investigación se centra en evaluar la eficiencia de los LDAS en la creación de un clima equilibrado y controlado dentro del invernadero bajo las condiciones climáticas de Túnez. El sistema LDAS se implementa y se prueba en un innovador Invernadero de Ciclo de Agua, que se caracteriza por tener forma de acordeón diseñada para recolectar la máxima cantidad de agua condensada.

En el sistema, la atención se centra en los tres puntos:

1. Regeneración del desecante durante la noche utilizando el calor almacenado durante el día:
 - Acumulación y liberación de calor día/noche (recogida pasiva del frío de la noche).
 - Posibilidad de mejorar la regeneración con una fuente de calor adicional (colectores solares de plástico, calor potencialmente residual de la CSP).
 - Posibilidad de regeneración mediante calentador solar con funcionamiento 24 h.
2. Acumulación de CO₂ (1000 – 2000 ppm) en atmósfera cerrada:
 - Mejora de la fotosíntesis si también se satisfacen otros factores de crecimiento como agua/nutrientes.
 - Mejora de la producción.
 - Mejor aceptación del calor, lo que permite menos medidas de refrigeración (suministro suficiente de CO₂ incluso con estomas cerrados como resultado del estrés térmico y/o hídrico).
3. Recuperación de agua por evapo-condensación combinada:
 - Agua de la humedad del aire al desecante durante el día.
 - Agua del desecante al aire durante la noche.
 - Condensación de agua en la superficie interna del plástico.
 - Eliminación de gotas de agua mediante la modificación de la forma del techo, proporcionando una pendiente suficiente para la eliminación y recolección de gotas.
 - Eliminación de calor mediante la forma modificada del techo (zig-zag) para una mayor superficie total de eliminación de calor.

Componentes del sistema del demostrador tunecino

Los principales componentes del sistema piloto en Túnez son:

- El invernadero con forma de acordeón con el objetivo de maximizar la recolección de agua condensada.
- Dos dispositivos absorbedores.
- El circuito desecante (dos tanques de almacenamiento, bombas, tuberías, electroválvulas),
- El circuito de aire (conductos de aire, ventiladores),
- El sistema de monitoreo.

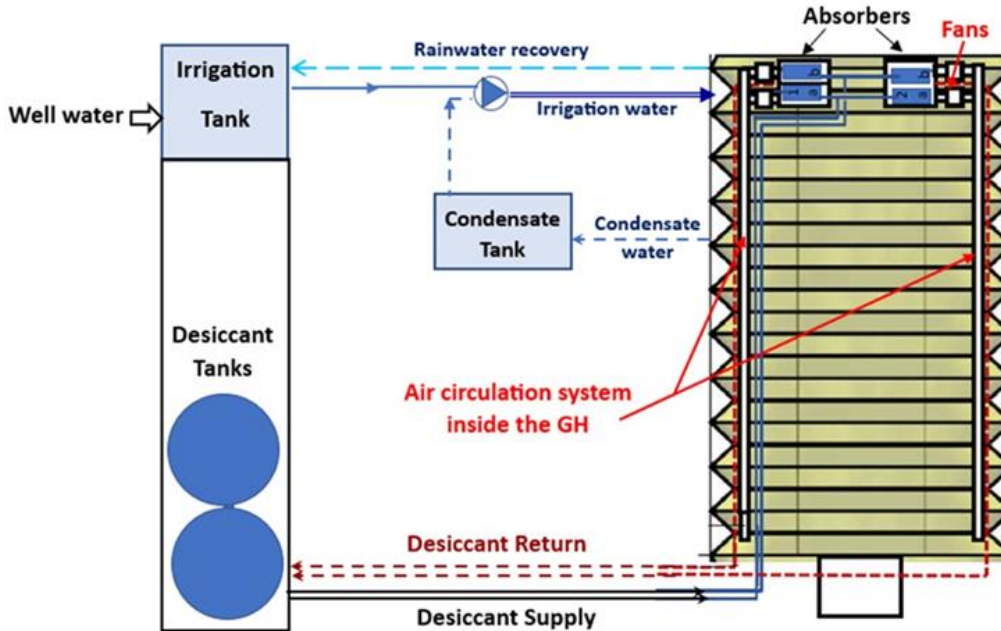


Figura 25. Esquema del sistema.

El nuevo diseño está orientado a recibir una superficie mucho mayor para el rechazo del calor. Al mismo tiempo, la recogida de gotas mejora gracias a la mayor pendiente de la lámina, especialmente en el nivel superior del túnel.

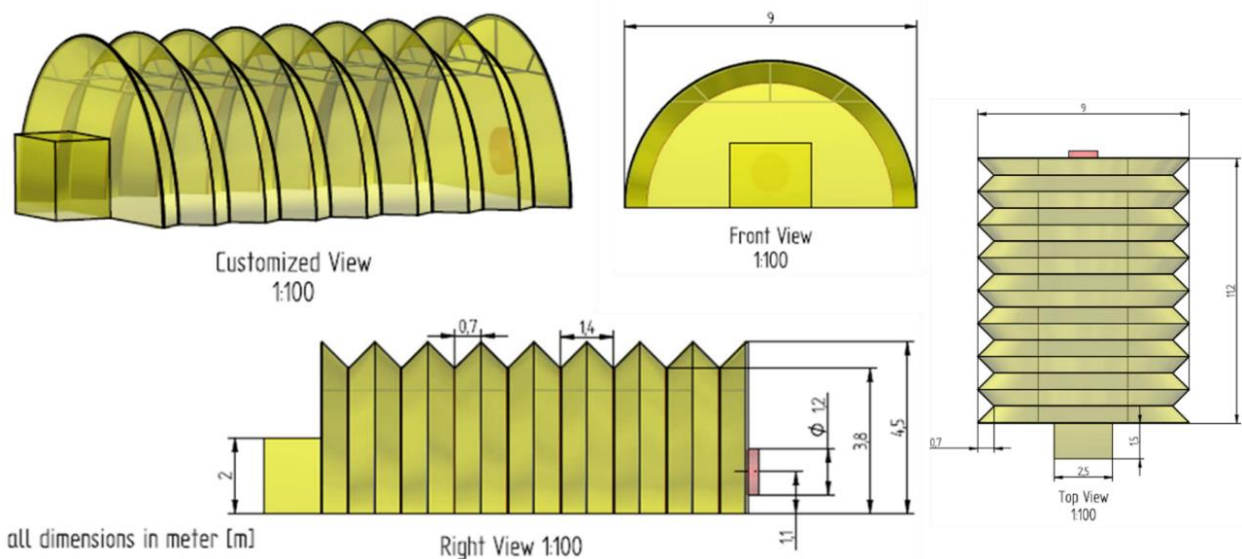


Figura 26. Especificaciones técnicas del invernadero – Forma de zig-zag (acordeón).

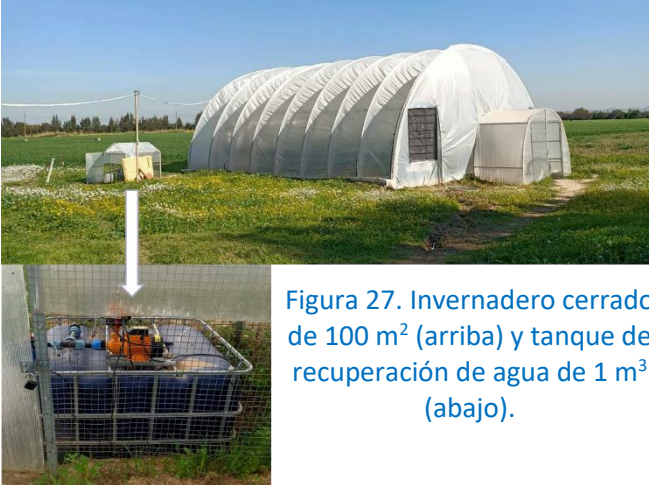


Figura 27. Invernadero cerrado de 100 m² (arriba) y tanque de recuperación de agua de 1 m³ (abajo).

El depósito de agua de la Figura 27 es un tanque combinado que recoge el agua de lluvia del tejado del invernadero y las gotas de agua condensada de la superficie interior del plástico del invernadero.

Diseño del absorbedor

El absorbedor es el componente principal del sistema de climatización del invernadero, ya que garantiza la circulación en contracorriente de la solución de salmuera y el aire extraído del invernadero.

Esta circulación permite regular tanto la temperatura como la humedad del aire al convertir el calor latente en calor sensible mientras absorbe la humedad del aire.

El absorbedor fue fabricado por el grupo de trabajo de la Universidad Técnica de Berlín (TUB) y Watergy GmbH.



Figura 28. El absorbedor instalado en el demostrador tunecino (izquierda) y la estructura interior del absorbedor (derecha).

Las pruebas iniciales del prototipo del absorbedor proporcionaron información clara sobre los déficits en la distribución del líquido. El análisis de infrarrojos (IR) (Figura 29) mostró que la liberación de calor en el proceso de funcionamiento es desigual debido a los diferentes caudales en el centro (bajo caudal) y en el perímetro (alto caudal).

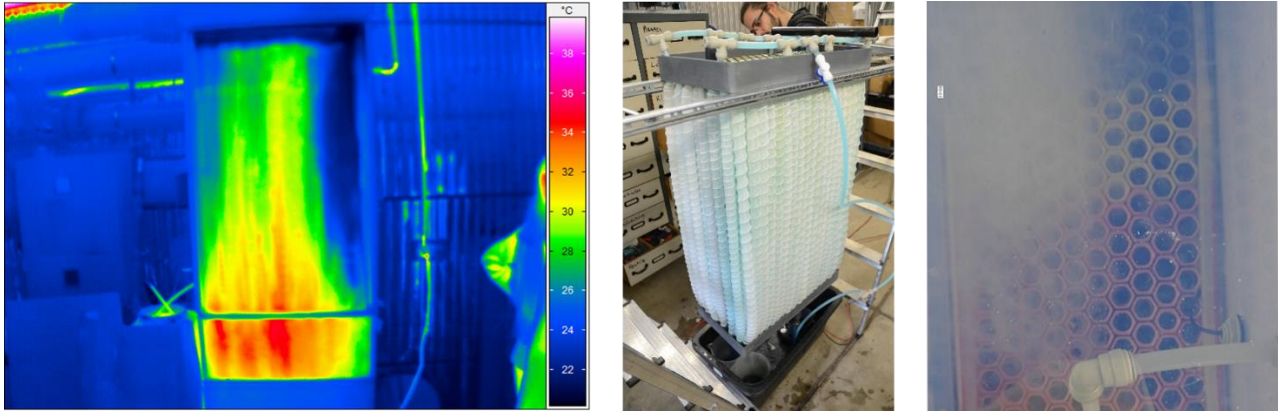


Figura 29. Análisis IR (izquierda), análisis de líquidos coloreados (centro) y análisis de niebla (derecha).

Mediante el uso de un líquido coloreado, también se demostraron problemas de distribución desigual. Las deficiencias mostradas por las pruebas dieron lugar a un nuevo diseño de los absorbentes. La distribución desigual del aire en la parte inferior del absorbente se demostró mediante análisis de niebla. El aire era conducido principalmente a la parte superior desde una zona próxima a la entrada de aire, debido a una configuración densa de los elementos absorbentes.

Un nuevo diseño proporcionó una forma de elementos absorbentes con diámetro decreciente hacia la parte inferior, permitiendo que el aire entrara en la zona interior del volumen.



Figura 30. El diseño del absorbente con estructura interna hexagonal impresa en 3D.

El nuevo diseño del elemento de distribución del desecante del absorbente tiene como objetivo un suministro total descentralizado de líquido entre las aberturas hexagonales.

Una entrada central está conectada a un sistema de canales internos en la pieza impresa, conduciendo el líquido a muchas aberturas.

El diseño está optimizado para un caudal de gran volumen (20 l/min, extracción de ~5 kW de calor a $\Delta T=5K$). La optimización se realiza para igualar el flujo de la solución.

Propiedades de la solución desecante

Comprobación del rendimiento del desecante:

- El efecto de la solución de salmuera proporcionada por Sallina Sfax (Mare Alb) se probó en condiciones climáticas de invernadero.
- Se han realizado mediciones del aire dentro de una botella de solución de salmuera y una botella de agua para comparar la temperatura y la humedad del aire.

Composición de la salmuera:

- Densidad: 1.350,
- Magnesio Mg: 112,65 g/l,
- Sulfato SO₄: 34,09 g/l,
- Otros residuos (Ca, Cl, K...): 428 g/l.

El funcionamiento del dispositivo absorbedor del sistema se basa en las propiedades higroscópicas del TCF utilizado, que es una solución de salmuera de solución de cloruro de magnesio (MgCl₂).



Figura 31. Medición con 2 botellas.

Las mediciones de la Humedad Relativa de Equilibrio (ERH) se realizaron durante el mes de enero de 2022, según el método de solución salina saturada, que consiste en colocar una muestra de la solución de salmuera en un recipiente sellado y medir la humedad relativa del aire en contacto con el BLD. Cuando el aire alcanza el equilibrio con el BLD, su humedad relativa corresponde a la ERH del fluido desecante.

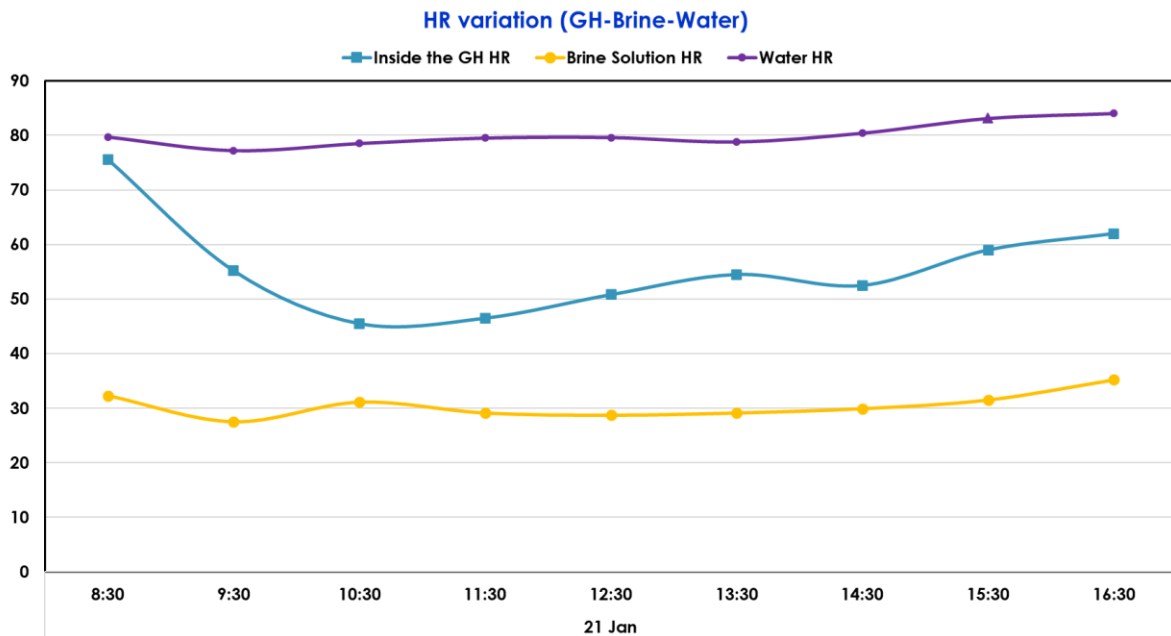


Figura 32. Efecto de la solución de salmuera: 21 de enero de 2022.

Los valores medidos de ERH concuerdan con el valor de referencia establecido en la bibliografía de $32,78 \pm 0,16\%$ para una solución saturada pura de MgCl₂ a 25 °C.

La curva amarilla en Figura 32 muestra el desecante que se encuentra a una humedad relativa baja. La curva morada muestra la humedad relativa en el otro recipiente, que contiene solo agua. Por lo tanto, se puede ver que tiene una humedad relativa muy alta, ya que el aire sobre el agua está saturado. La línea azul muestra la humedad relativa del aire que rodea los dos recipientes en el interior del invernadero.

Circulación del desecante en el sistema

En el sistema estudiado se utilizaron dos tanques de almacenamiento interconectados, con un volumen total de 15 m³ de la solución de salmuera. Los tanques de almacenamiento están conectados a los dispositivos de absorción a través de dos bombas y una instalación hidráulica. Los

dispositivos absorbedores se montaron en soportes a un nivel más alto que los tanques de almacenamiento para permitir el retorno de la solución del TCF por gravedad y reducir la complejidad del sistema.

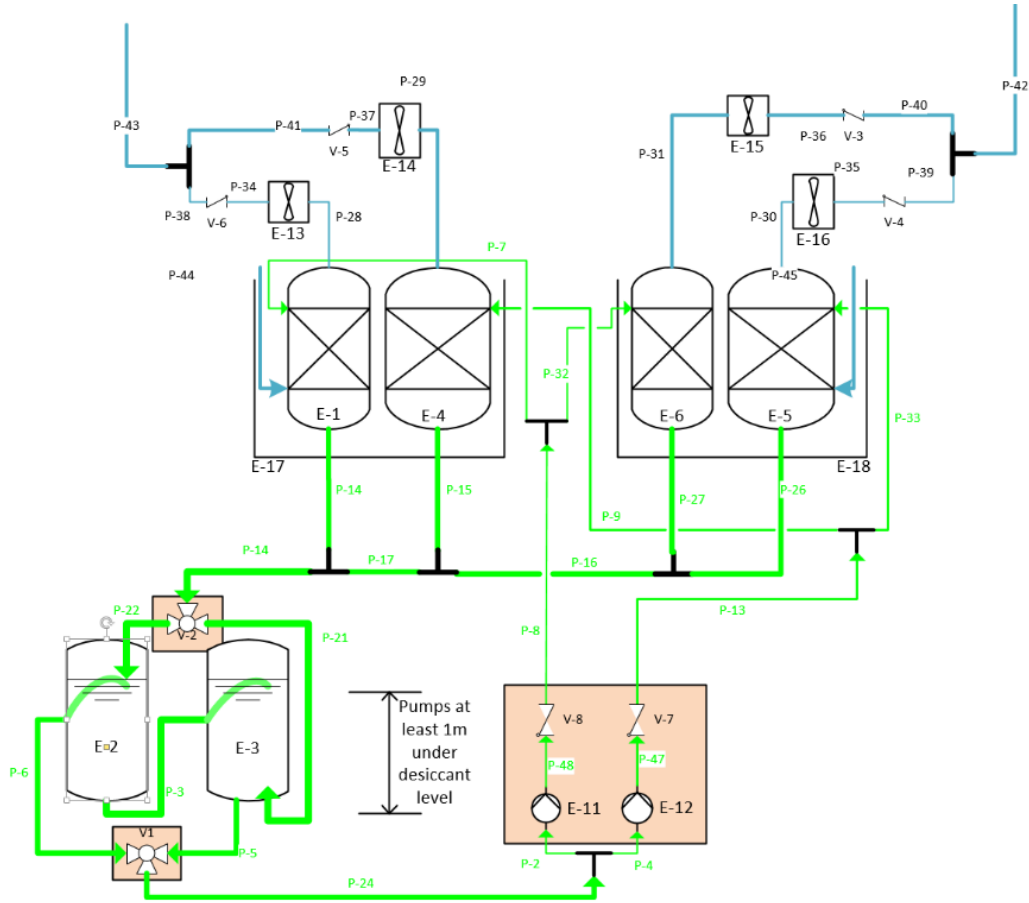


Figura 33. Instalación de los tanques de almacenamiento y conexión de los componentes del sistema desecante.



Figura 34. Bombas y electroválvulas.

Distribución del aire en el interior del invernadero

El aire se extrae del techo del invernadero y se conduce a través del absorbedor. Después de someterse al intercambio de calor y al proceso de deshumidificación/humidificación, el aire procesado se insufla en el invernadero al nivel de las plantas.



Figura 35. Instalación de los dispositivos absorbentes y del sistema de circulación de aire dentro del invernadero (ventiladores + conductos de aire).

La Figura 35 muestra los absorbedores ubicados en la parte trasera del invernadero y las tuberías de distribución de aire a los lados (foto de la izquierda). En la foto de la derecha se presenta la instalación del absorbedor.

Sistema de monitorización

La monitorización se implementó en el invernadero para poder supervisar y controlar el sistema mediante el ordenador de control. El control del funcionamiento del sistema desecante se realiza según tres etapas en los modos diurno y nocturno. El primer modo funciona con una sola bomba, el segundo modo con una segunda bomba más grande y en el tercer modo funcionarían las dos bombas de forma conjunta.

La monitorización implementada permite realizar mediciones de:

- Temperatura y humedad relativa.
- Caudal de desecante.
- Concentración de CO₂.
- Nivel de desecante dentro de los tanques de almacenamiento.

A partir de los datos monitorizados, es posible calcular el balance energético y la eficiencia del sistema.



Figura 36. Instalación de la caja de control, los sensores y el sistema de recogida de datos.

Conclusiones

Como última parte de la presentación de la demostración tunecina, a continuación, se presentan algunas conclusiones y aprendizajes:

- Es necesario un alto nivel de hermeticidad en el invernadero para alcanzar las condiciones de condensación.
- Se requiere de una ventilación de emergencia para corregir los errores, pero debe respaldar el concepto de estanqueidad.
- Instalación de absorbentes en el invernadero (no en el exterior).
- El diseño del absorbente permite reducir la complejidad y los costes.
- Las piezas impresas en 3D requieren de plásticos de alta calidad y resistentes al calor, así como de protección solar.
- El volumen de almacenamiento es caro y las conexiones hidráulicas son propensas a errores.
- Los desecantes necesitan mucha atención en lo que respecta a la corrosividad, fugas, eliminación y el reciclaje.

Los próximos pasos que se deben darse para mejorar el sistema y garantizar una mayor eficiencia y fiabilidad son los siguientes:

- El uso de material de cambio de fase (PCM) para el almacenamiento de calor permitirá reducir la cantidad de desecante en un 50-90%.
- La integración de PCM en el absorbente también puede reducir los costes de bombeo en un 50-90%, proporcionando también una ligera reducción de los requisitos de ventilación (~ 30%).
- PCM de bajo coste para un punto de fusión en torno a 30 °C (se puede considerar para tal uso la grasa reciclada o carbonato de sodio).
- Es posible una mayor simplificación de la construcción en zig-zag, finalmente no es mucho más cara que los invernaderos de túnel estándar.
- Se requieren más actividades de investigación, también debido a la falta de alternativas para superar la crisis del agua.

- Hay muchas actividades recientes en la construcción de climatización utilizando desecantes líquidos. Empresas emergentes como "Blue Frontier" (financiada por Bill Gates) y "7AC" han realizado recientemente inversiones. Existe una gran competencia en este tipo de investigaciones, no solo en el campo de los invernaderos.

3. Simulaciones y optimización – Casos de estudio

3.1. Casos de estudio

Los objetivos principales de los casos de estudio son analizar diferentes condiciones límite en dos regiones climáticas europeas representativas seleccionadas en el proyecto.

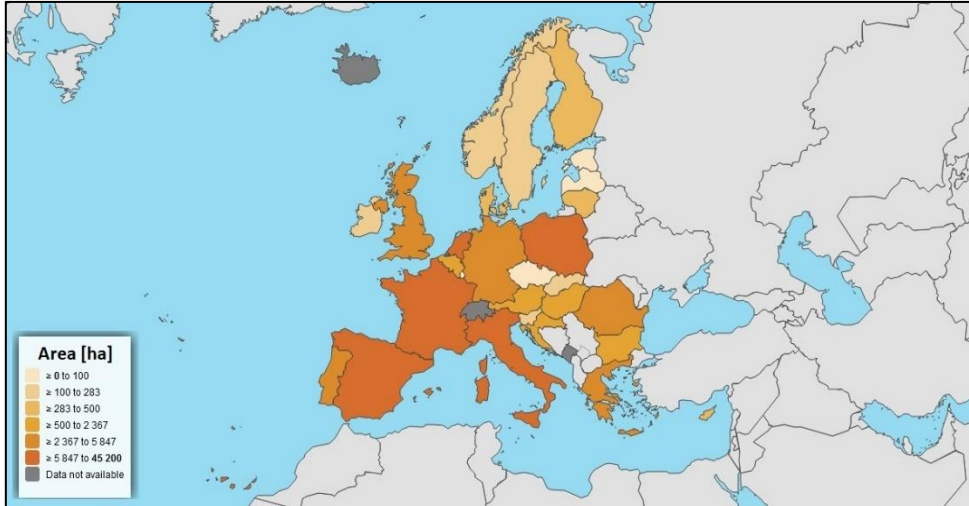


Figura 37. Distribución de invernaderos en los países de la Unión Europea UE-27 (EUROSTAT, 2023a).

España, con la mayor extensión de invernaderos hortícolas de Europa, fue elegida como el área prioritaria de estudio. En 2023, la superficie de invernaderos hortícolas fue de 77 923 ha.



Figura 38. Mapa de regiones españolas con diferentes superficies de invernaderos.

Italia, con una sólida industria de invernaderos, fue identificada en la Tarea T3.1 anterior – Evaluación de posibles mercados potenciales para TheGreefa. Aquí la superficie de invernaderos en 2023 era de 35 229 ha.

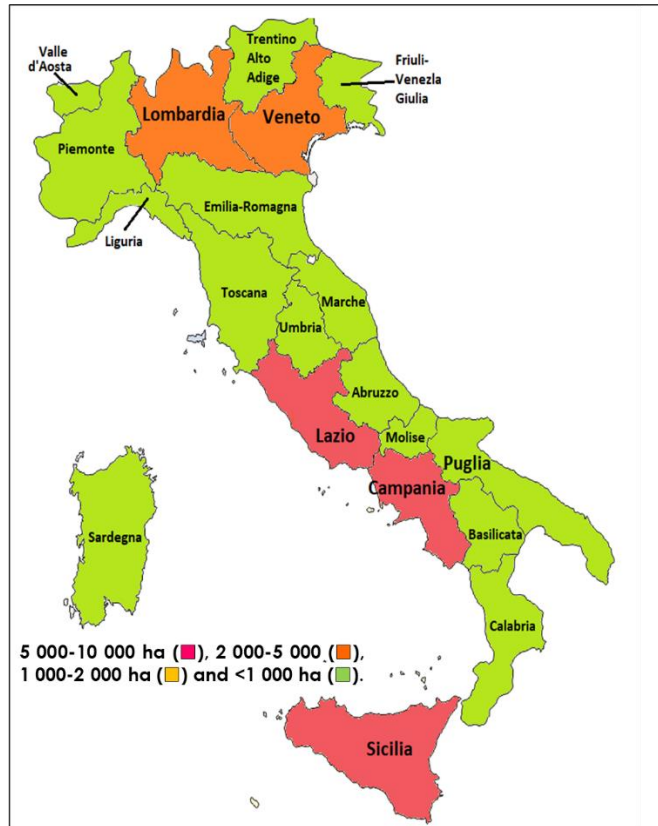


Figura 39. Mapa de las regiones italianas con diferentes superficies de invernaderos.

El alcance del análisis incluyó tres casos de estudio que han sido seleccionados en Almería (España):

- Invernadero tipo Almería sin calefacción y con ventilación natural.
- Invernadero multitúnel sin calefacción con controlador de clima.
- Invernaderos multitúnel calefactado con gas natural.

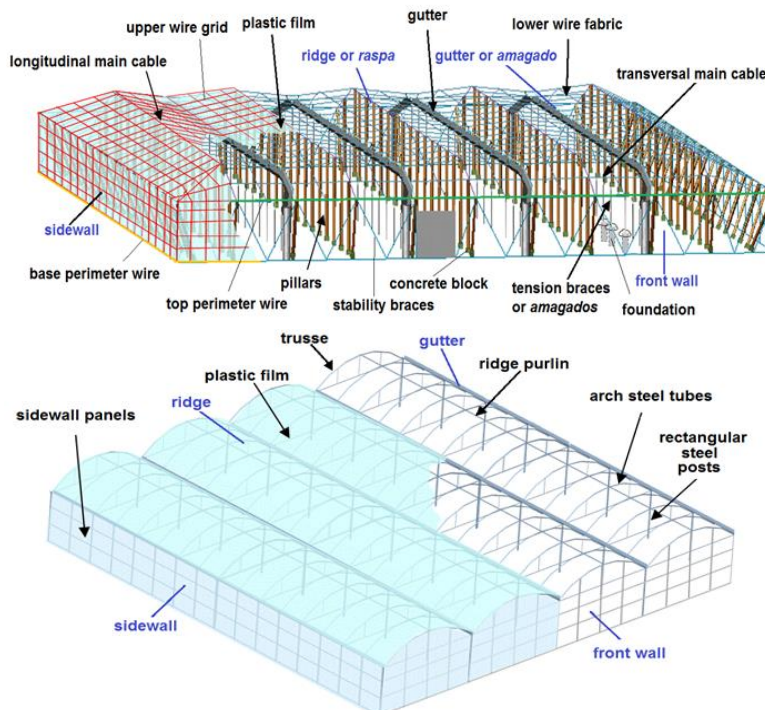


Figura 40. Invernadero sencillo tipo Almería con estructura en raspa y amagado (arriba) e invernadero de alta tecnología con estructura multitúnel (abajo).

En el invernadero tipo Almería de la Universidad de Almería se han analizado dos cultivos de tomate desarrollados en la campaña 2017/18 y en la actual campaña 2023/24. Durante el desarrollo del proyecto TheGreefa se han cultivado varias combinaciones de cultivos en invernaderos multitúnel sin calefacción: pepino-tomate, pepino-pimiento y tomate-calabacín.

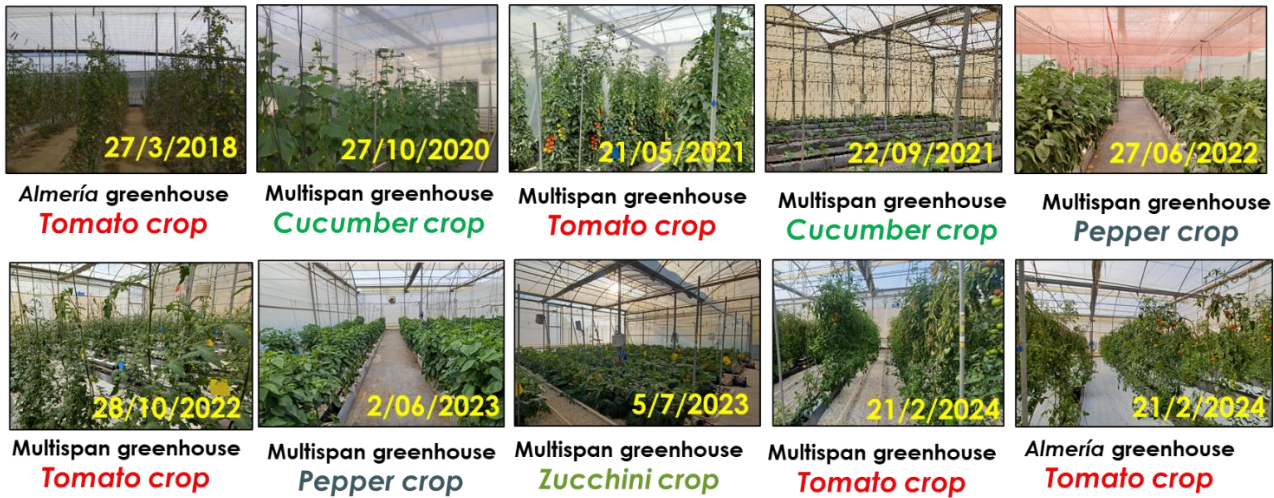


Figura 41. Los cultivos más importantes que se han analizado en Almería y los invernaderos multitúnel de la Universidad de Almería.

Se han seleccionado dos casos de estudio en Italia para la producción de tomate:

- Invernadero multitúnel sin calefacción.
- Invernaderos multitúnel calefactados con gas natural, gasóleo y virutas de madera.



Figura 42. Cultivo de tomate "cherry" en invernaderos multitúnel sin calefacción (izquierda) e invernadero multitúnel calefactado (derecha).

Fuentes de información

- La **caracterización técnico-productiva de los invernaderos de Almería** se ha realizado a través de una encuesta realizada durante el año **2022** por la **Sociedad Cooperativa Andaluza AFE** a 222 socios, abarcando **610 invernaderos** (el **1,4%** de la superficie total de Almería).
- Se ha analizado el **coste de producción de los invernaderos de Almería** para las campañas 2021-22 y 2022-23 para **invernaderos sin calefacción tipo Almería** para siete alternativas diferentes de ciclos de cultivo, a partir de los datos del **Observatorio de Precios y Mercados** de la Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible de la **Junta de Andalucía – JA**.

- Se han medido los costes de producción, el consumo de energía, agua, fertilizantes y productos fitosanitarios durante las campañas 2020-21, 2021-22, 2022-23 y 2023-24 para los invernaderos tipo Almería sin calefacción y multitúnel de la Universidad de Almería en los cultivos de tomate, pimiento y pepino.
- Los costes de producción de tomate de los invernaderos multitúnel sin calefacción en Italia, se han obtenido a partir de datos gubernamentales (Istituto di Servizi per il Mercato Agricolo Alimentare - ISMEA) y el consumo de energía y agua ha sido medido por Sfera Agricola en un invernadero multitúnel comercial con calefacción, estimando los costes de producción asociados.
- Se ha desarrollado una Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida (LCIA) estimando los principales factores de impacto ambiental para los cinco casos de estudio utilizando el modelo de simulación ambiental EXCEL EUPHOROS.

En el caso de estudio se han analizado los principales parámetros climáticos que afectan al desarrollo de los cultivos hortícolas en invernadero. La instalación del sistema de climatización mediante fluidos termoquímicos puede ayudar a mantener una temperatura y humedad adecuadas, incorporar CO₂ procedente del ambiente exterior y conseguir una mayor homogeneidad de estos parámetros climáticos. El diseño del sistema de distribución de aire debe evitar la pérdida de radiación a nivel del cultivo debido al sombreado.

Condiciones climáticas analizadas para el cultivo en invernadero:

- Temperaturas adecuadas del aire, de las hojas de las plantas y del suelo.
- Humedad relativa moderada para evitar condensaciones o estrés hídrico.
 - Alto nivel de radiación fotosintéticamente activa (PAR).
 - Concentración de CO₂ en el aire en torno al nivel exterior de 420 ppm.
 - Uniformidad de los diferentes parámetros climáticos.

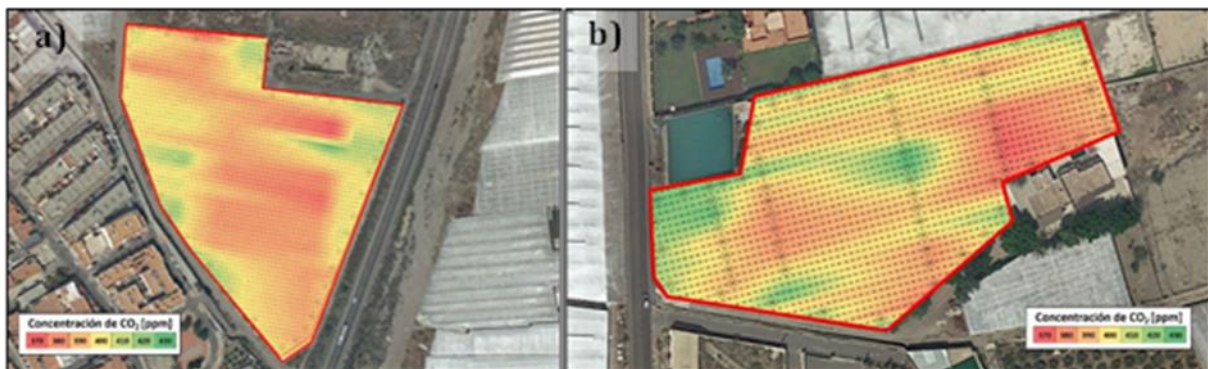


Figura 43. Distribución de CO₂ en el interior de invernaderos solares de Almería tipo "raspa y amagado" o simple (a) y "parral plano" o elemental (b).

Aunque existen múltiples opciones para controlar eficazmente el clima de los invernaderos, los sistemas activos requieren de un elevado consumo de energía y los sistemas pasivos a menudo están limitados por las condiciones climáticas externas. El uso de fluidos termoquímicos podría utilizarse como complemento de otros sistemas con el fin de reducir el uso de energía.

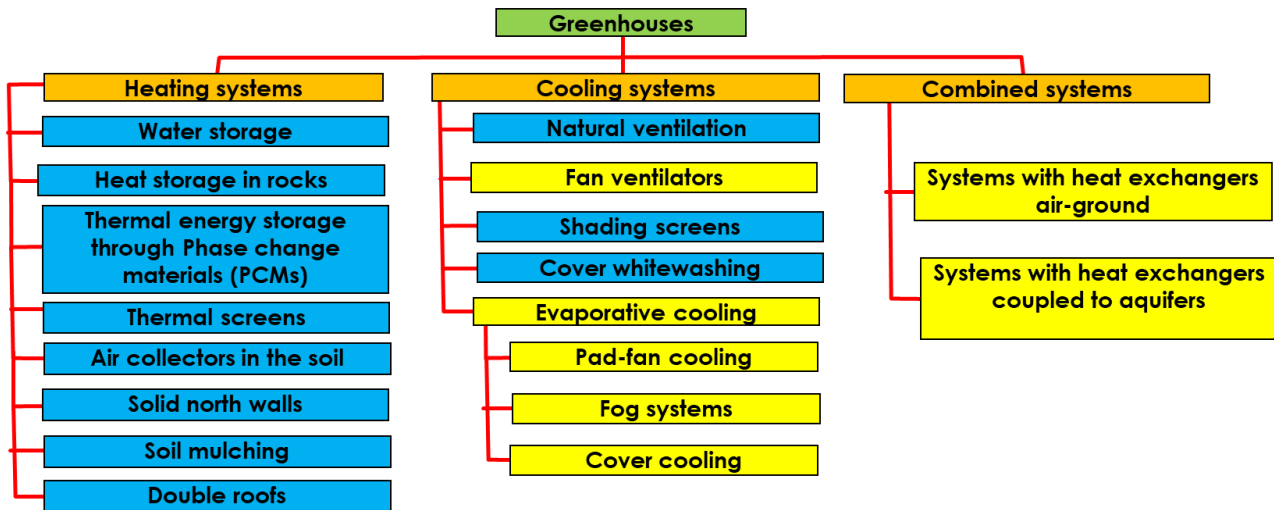


Figura 44. Clasificación de varios sistemas de control climático para invernaderos: métodos pasivos (marcados en azul).

El consumo de energía en los invernaderos se ve afectado por la necesidad de calefacción. En los invernaderos sin calefacción, el consumo oscila entre 30 a 100 GJ/ha, mientras que en los invernaderos con calefacción la energía necesaria puede superar los 20 000 GJ/ha.

Tabla 3. Consumo energético de la agricultura en invernadero en algunos países europeos (varios estudios).

Country	Greenhouse area (ha)	Energy (GJ/ha)		Total energy		Gas emission	
		Heating	Electricity	(GJ/ha)	(kWh/m ²)	(toe/ha) ^b	(tCO ₂ eq/ha) ^c
Spain	77 923	81 – 16 272	2.8	84 – 17 784	2.3 – 158	2.0 – 332.0	13.6 – 1 277
Italy	35 229	11.8 – 9 450	13.5 – 65.6	62 – 14 616	1.7 – 406	3.0 – 349	11.6 – 1 344
Netherland	10 636	10 303 – 14 990	1 300	11 603 – 22 689	325 – 630	277 – 365	1 389 – 1 820
France	9 813	180 – 11 412	158 – 5 976	6 156 – 11 412	171 – 317	45 – 273	354 – 1 049
Greece	5 100	56 – 8 138	1.1	57 – 8 550	1.6 – 237	1.4 – 204	9 – 786
Germany	3 199	12 612 – 13 000	-	3 981 – 16 308	111 – 453	302 – 390	1 163 – 1 499
Portugal	1 010	2 174 – 6 768	-	273 – 11 556	7.6	6.5	25
Total/Average	120 930	39 020 571	3 871 189	1 562	155	1 717	48

^a 1 GWh = 8.60x10⁻⁵ Mtoe - Mega tonne oil equivalent (Krey et al., 2014).

^b Using a factor emission of CO₂ for heat production of 0.331 tCO₂eq/MWh (Krey et al., 2014).

Mientras que en España la superficie de cultivos protegidos ha aumentado hasta un 18,7% en los últimos siete años, en Italia la superficie ocupada por invernaderos se mantiene muy estable.

Tabla 4. Superficie cubierta por invernaderos y producción de hortalizas en las diferentes regiones de España e Italia.

Evolution of surface of greenhouses in different regions of Spain (MAPA, 2024).

Year	Andalucía	Murcia	Canary Islands	Spain
2016	48 509	6 235	6 744	65 674
2020	55 138	6 491	5 491	71 783
2023	61 099	6 449	5 495	77 923

+18.7%

Evolution of greenhouse surface in different regions of Italy (ISTAT, 2024).

Year	Lazio	Campania	Sicilia	Veneto	Lombardia	Italy
2016	7 845	10 332	7 676	3 360	2 076	35 574
2020	9 001	9 994	7 121	3 285	1 949	35 574
2023	7 629	7 523	7 029	3 748	3 642	35 229

-0.9%

Los precios de los productos hortofrutícolas presentan una importante variabilidad en función de las condiciones meteorológicas en Europa o de factores que afectan a la comercialización (COVID,

Guerra de Ucrania). Los precios más altos se alcanzaron tanto en España como en Italia en 2023. En general, los precios de venta son entre un 15 y un 20% más altos en Italia.

Tabla 5. Precio medio [€/kg] obtenido por los agricultores por la producción en invernadero en España e Italia en las últimas campañas (JA, 2024a; ISMEA, 2024a).

Country	Spain				2017	Italy		
	2016/17	2018/19	2020/21	2022/23		2019	2021	2023
Standard tomato	0.66	0.61	0.60	0.94	0.93	0.83	0.93	1.21
Cherry tomato	1.28	1.12	1.23	1.56	1.57	1.12	1.21	1.64
Pepper	0.91	0.77	0.84	1.23	0.74	0.88	1.00	1.51
Cucumber	0.70	0.53	0.57	0.95	0.42	0.48	0.54	0.74
Watermelon	0.35	0.30	0.31	0.40	0.21	0.34	0.25	0.48
Zucchini	0.68	0.54	0.50	0.67	0.93	0.97	1.12	1.16
Melon	0.41	0.48	0.40	0.49	0.52	0.65	0.61	1.05
Eggplant	0.73	0.60	0.55	0.74	0.63	0.71	0.86	1.02
Bean	1.69	1.83	1.63	2.26	1.84	1.63	2.90	0.80
Average	0.63	0.65	0.63	0.90	0.76	0.78	0.86	1.05

Para cada uno de los cinco casos de estudio seleccionados, se han analizado los costes de producción, el consumo de agua y energía y su impacto ambiental. A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada uno de los cinco casos analizados.

3.2. Caso de estudio 1 – Invernadero tipo Almería sin calefacción

El primer caso analizado es el de los invernaderos tipo Almería, que suponen más del 70% en España. Su coste de inversión es de 15-20 €/m².

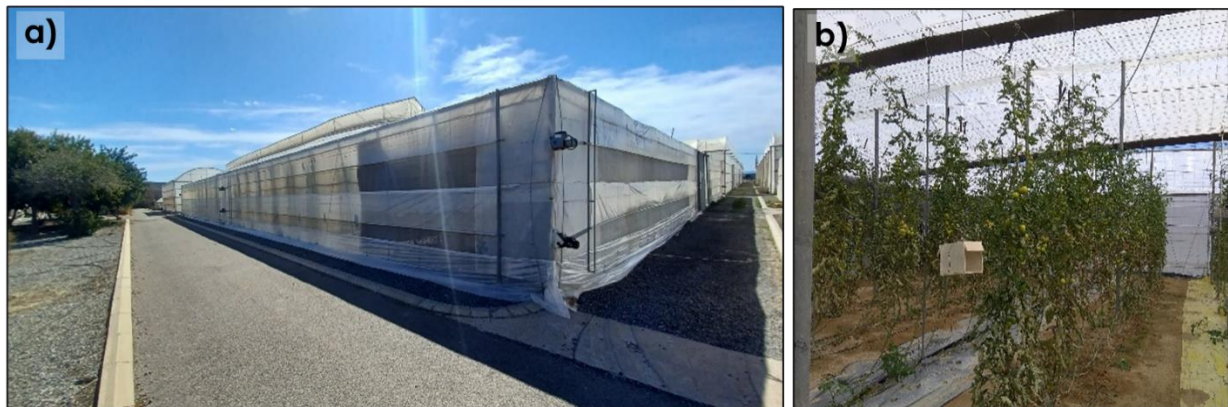


Figura 45. Invernadero tipo Almería (a) y cultivo de tomate en el interior (b) en la Estación Experimental UAL-ANECOOP en Almería (España).

Estos invernaderos alcanzan valores de productividad normalmente inferiores a 15 kg/m², con costes de producción de 0,7 a 1,0 €/kg. Dependiendo de los precios de cada año, los agricultores pueden obtener un beneficio de hasta 50.000 €/ha u obtener pérdidas.

Tabla 6. Costes de producción medidos para tomates cultivados en invernadero tipo Almería en las temporadas 2017/18 (costes actualizados a la campaña 2022/23) y 2023/24, ubicados en la Finca Experimental Universidad de Almería-ANECOOP.

Greenhouse type	Almería-type in "Raspa y amagado"			
Farm area [m ²]	28 152	Greenhouse surface [m ²]	1 917	
Commercial type	On vine or branch		Tomato Pears	
Cycle length [days]	225		194	
Type of soil	Sand mulching		Coconut fiber substrate	
Average marketable yield Y _{CS} [kg/m ²]	10.8		6.6	
Type of cost	€/ha			
Supplies	24 823		19 127	
Transport	2 181		1 153	
Labour	30 675		24 206	
Contracted external services	1 224		508	
Total variable or direct costs, C _V [€/ha]	58 903		44 994	
Investment cost [€/m ²]	Amortization [€/ha]	17.8	17 070	18.4
Total fixed or indirect costs C _F [€/ha]	17 743		20 995	
Total cost [€/ha]	76 645		65 990	
Unitary cost [€/kg]	0.71		1.00	
Average price A _p [€/kg]	1.03		0.94	
Total value crop [€/m ²]	11.12		6.21	
Production value P_V [€/ha]	111 240		62 111	
Annual operating income I _y [€/ha]	34 595		-3 879	

Estos invernaderos son los que requieren un menor consumo de energía, principalmente en el sistema de riego y en la apertura y cierre de las ventanas (cuando están motorizadas). El consumo de energía eléctrica varía entre 1 y 1,5 kWh/m², y el consumo de agua varía entre 15-75 l/m².

Tabla 7. Consumo de energía y agua medido en el invernadero experimental tipo Almería sin calefacción de la Universidad de Almería.

Season	2020-21	2021-22	2022-23	2023-24
Crops	Cucumber+tomato	Cucumber+pepper	Tomato+zucchini	Tomato
Energy consumption				
Electricity price [€/kWh]	0.145	0.159	0.143	0.132
Electricity for ventilation [kWh/m ²]	0.398	0.379	0.452	0.230
Total electricity [kWh/m ²]	1.194	1.064	1.442	0.924
Electrical consumption [GJ/ha]	43.0	38.3	51.9	33.3
Water consumption				
Water consumption [m ³ /ha]	2 185	5 242	4 854	2 945
Water price [€/m ³]	0.54	0.76	1.06	1.23
Water requirements [m ³ /t]	14.3	63.5	73.8	61.6

En estos invernaderos se logran los impactos ambientales más bajos. La estructura del invernadero y el sistema de riego son los que generan mayor impacto. Los valores calculados para los dos cultivos de tomate desarrollados en los invernaderos de la UAL son similares a los publicados, con emisiones entre 95 y 280 kg de CO₂ eq/tn.

Tabla 8. Factores de impacto ambiental totales proporcionados por el modelo de simulación EXCEL EUPHOROS (Torrellas et al., 2013) para cultivos de tomate en invernaderos tipo Almería sin calefacción de la Universidad de Almería (UAL) y calculados por Martín-Gorrioz et al., 2011 (MG) y por García Martínez, 2019 (GM) por unidad funcional (1 tonelada de tomate comercializable).

Crops	UAL 2017-18	UAL 2023-24	MG 2011	GM 2019
Yield [kg m ⁻²]	10.80	6.61	5.13	10.00
ADP - Abiotic depletion [kg Sb eq/tn]	1.66	2.00	0.01	0.79
AAP - Air acidification [kg SO ₂ eq/tn]	1.05	1.20	1.75	0.68
EUP - Eutrophication [kg PO ₄ eq/tn]	0.35	0.42	2.70	0.25
GWP - Global warming [kg CO ₂ eq/tn]	208.79	248.18	276.8	94.4
POP - Photochemical oxidation [kg C ₂ H ₄ /tn]	0.05	0.06	-	0.03
CED - Cumulative energy demand [MJ/tn]	4 346	5 210	2 242	1 725
Water consumption [m ³ /tn]	30.17	33.86	38.00	44.80

3.3. Caso de estudio 2 – Invernaderos multitúnel sin calefacción en España

Los invernaderos multitúnel sin calefacción representan alrededor del 2% de la superficie de invernaderos en España. El coste de este tipo de invernadero oscila entre los 25 y los 38 €/m².



Figura 46. Invernadero multitúnel sin calefacción (a) y cultivo de tomate en el interior (b) en la Estación Experimental UAL-ANECOOP en Almería (España).

En estos invernaderos se pueden alcanzarse producciones superiores a los 15 kg/m², dependiendo de la combinación de cultivos. Los costes de producción varían de 0,5 a 1,5 €/kg, lo que corresponde a 50-100 mil €/ha. Los costes de inversión más altos dificultan la obtención de beneficios si los productos se venden al precio medio. Normalmente, los agricultores con este tipo de invernaderos suelen obtener mejores precios de venta mediante contratos directos con empresas distribuidoras.

Tabla 9. Costes de producción en las temporadas 2020/21- 2023/24 de los cultivos cultivados en los invernaderos multitúnel experimentales sin calefacción ubicados en la Finca Experimental UAL-ANECOOP.

Season	2020-21	2021-22	2022-23	2023-24
Crops	Cucumber+tomato	Cucumber+pepper	Tomato+zucchini	Tomato
Greenhouse surface [m ²]	1 080	1 080	1 080	2 970
Days of crop	259	247	294	174
Marketable yield, Y _c [kg/m ²]	15.3	8.25	6.58	4.78
Supplies	26 791	24 323	36 802	17 163
Transport	5 096	3 654	8 303	2 307
Labour	27 161	26 232	34 147	18 141
External services	1 640	147	677	508
Total variable or direct costs, C _v [€/ha]	60 688	54 357	79 929	38 119
Total investment cost, C _i [€/m ²]	34.0	35.8	37.6	22.9
Amortization costs, C _A =C _i /N _y [€/ha]	19 374	20 558	21 566	13 172
Total fixed or indirect costs, C _f [€/ha]	20 014	22 018	22 699	15 816
Total cost, T _c [€/ha]	80 702	76 375	102 628	53 936
Unitary cost, U _c =T _c /Y _c [€/kg]	0.53	0.93	1.56	1.13
Average price, A _p [€/kg]	0.58	0.81	1.35	1.14
Total value crop, P _v =A _p ·Y _c [€/m ²]	8.89	6.68	8.87	5.45
Revenue of production, P _v =A _p ·Y _c [€/ha]	88 896	66 752	88 733	54 492
Annual operating income, I _v =P _v -T _c [€/ha]	8 194	-9 623	-13 895	556

El consumo de energía eléctrica es similar al del tipo Almería, oscilando entre 1 y 1,5 kWh/m², y con un consumo de agua que oscila entre 15 y 75 l/m².

Tabla 10. Consumo de energía y agua medido en invernaderos experimentales multitúnel sin calefacción de la Universidad de Almería.

Crops	Tomato 2022-23	Tomato 2023-24
Energy consumption		
Electricity price [€/kWh]	0.143	0.132
Ventilation electrical consumption [kWh/m ²]	0.350	0.411
Total electrical consumption [kWh/m ²]	1.576	1.053
Electrical consumption [GJ/ha]	56.7	37.9
Water consumption		
Water consumption [m ³ /ha]	3 258	2 238
Water price [€/m ³]	1.06	1.23
Water requirements [m ³ /t]	30.2	33.9

En cuanto al tipo Almería, la estructura del invernadero y el sistema de riego son los que generan mayor impacto. Como consecuencia del mayor uso de metal en la construcción del invernadero, los impactos son en general superiores a los del primer caso, con emisiones entre 150 y 1000 kg de CO₂ eq/tn.

Tabla 11. Factores de impacto ambiental totales proporcionados por el modelo de simulación EXCEL EUPHOROS (Torrellas et al., 2013) para cultivos de tomate en invernaderos multitúnel no calefactados de la Universidad de Almería (UAL) y calculados por Martínez-Blanco et al., 2011 (MB) y por Torrellas et al., 2012 (TR) por unidad funcional (1 tonelada de tomate comercializable).

Crops	UAL 2020-21	UAL 2022-23	UAL 2023-24	MB 2011	TR 2012
Yield [kg m ⁻²]	6.19	5.73	4.78	15.90	16.50
ADP - Abiotic depletion [kg Sb eq/tn]	7.92	7.60	6.63	1.06	1.26
AAP - Air acidification [kg SO ₂ eq/tn]	6.54	5.95	5.31	0.94	0.92
EUP - Eutrophication [kg PO ₄ eq/tn]	3.71	3.40	3.01	0.35	0.50
GWP - Global warming [kg CO ₂ eq/tn]	998.88	979.70	851.55	153.0	197.8
POP - Photochemical oxidation [kg C ₂ H ₄ /tn]	0.41	0.35	0.31	0.03	0.03
CED - Cummulative energy demand [MJ/tn]	19 678	18 888	16 560	2 554	3 067
Water consumption [m ³ /tn]	16.85	64.28	61.61	39.11	28.78

3.4. Caso de estudio 3 – Invernaderos multitúnel con calefacción en España

El último caso seleccionado para caracterizar los invernaderos españoles son los multitúnel calefactados, que representan menos del 2% de los invernaderos de España. El coste de este tipo de invernadero varía entre 45 y 58 €/m².



Figura 47. Invernadero comercial multitúnel calefactado con doble cubierta (a) y cultivo de tomate en el interior (b) de la empresa Natural Growers en Almería.

El uso de calefacción permite aumentar la productividad por encima de los 20 kg/m². El mayor coste de producción es el gas natural para calefacción, en torno al 40%. Dependiendo de los precios del combustible y las hortalizas, los agricultores pueden ganar o perder dinero. Al igual que en el caso anterior, si se considera el precio medio de venta, es normal obtener pérdidas. Los agricultores suelen firmar contratos directamente con las cadenas de supermercados para asegurar un beneficio.

Tabla 12. Costes de producción actualizados a la campaña 2022/23 de los cultivos cultivados en 2013/14 en tres invernaderos multitúnel calefactados de la empresa Natural Growers en Almería.

Greenhouse type		Plastic multispans with inflated double cover		
Farm area [m ²]		158 140		
Greenhouse surface [m ²]		35 200	11 600	7 200
Crops		Cucumber	Tomato "Cherry"	Tomato "Branch"
Cycle length [days]		280	308	308
Average marketable yield Y_{cs} [kg/m ²]		20.98	8.21	19.79
Type of cost	Subtype of cost	€/ha		
Supplies		107 762	110 164	111 041
Energy for heating		72 792	72 792	72 792
Transport		2 713	1 781	3 896
Labour		39 829	45 168	45 814
External services		1 147	520	1 722
Total variable or direct costs C_v [€/ha]		151 451	157 633	162 473
Investment cost [€/m ²]		52.8	Amortization [€/ha]	27 646
Total fixed or indirect costs C_f [€/ha]		31 210	31 768	30 480
Total cost, T_c [€/ha]		182 661	189 401	192 953
Unitary cost, $U_c=T_c/Y_c$ [€/kg]		0.87	2.31	0.98
Average price, A_p [€/kg]		0.88	1.66	0.97
Total value crop, $P_v=A_p \cdot Y_c$ [€/m ²]		18.40	13.63	19.16
Revenue of production, $P_v=A_p \cdot Y_c$ [€/ha]		184 048	136 341	191 648
Annual operating income, $I_v=P_v-T_c$ [€/ha]		1 387	-53 059	-1 305

El uso de calefacción aumenta el consumo de energía por encima de los 120 kWh/m². El consumo de agua también puede aumentar debido a la mayor transpiración del cultivo, con valores de 60 - 150 l/kg.

Tabla 13. Consumo de energía y agua medido en tres invernaderos multitúnel calefactados de la empresa Natural Growers en Almería con precios actualizados a la temporada 2022/23.

Crop	Cucumber	Tomato "Cherry"	Tomato "Branch"
Energy consumption			
Electricity price [€/kWh]	0.143	0.143	0.143
Consumption in ventilation [kWh/m ²]	0.242	0.242	0.242
Total electrical consumption [kWh/m ²]	2.800	2.800	2.800
Electrical consumption [GJ/ha]	100.8	100.8	100.8
Natural gas price [€/m ³]	0.607	0.607	0.607
Natural gas consumption [m ³ /m ²]	11.99	11.99	11.99
Heating energy consumption [kWh/m ²]	128.7	128.7	128.7
Heating energy consumption [GJ/ha]	4632	4632	4632
Water consumption			
Water consumption [m ³ /ha]	19 198	11 982	11 982
Water price [€/m ³]	0.75	0.75	0.75
Water requirements [L/kg] or [m ³ /t]	91.5	145.9	60.5

El uso de calefacción también aumenta significativamente las emisiones a valores de 900-3500 kg de CO₂ eq/tn.

Tabla 14. Factores de impacto ambiental totales proporcionados por el modelo de simulación ambiental EXCEL EUPHOROS (Torrellas et al., 2013) para los cultivos cultivados en tres invernaderos multitúnel calefactados de la empresa Natural Growers (NG) en Almería con producción ecológica (sin uso de insecticidas ni fungicidas) y calculados por Pérez Neira et al., 2018 (PN) para cultivos de tomate por unidad funcional (1 tonelada de tomates comercializables).

Crops	Cucumber	T. Cherry	T. Branch	PN 2018
Yield [kg m ⁻²]	20.98	8.21	19.79	15.30
ADP - Abiotic depletion [kg Sb eq/tn]	11.83	30.35	12.59	-
AAP - Air acidification [kg SO ₂ eq/tn]	1.45	3.78	1.57	-
EUP - Eutrophication [kg PO ₄ eq/tn]	0.17	0.90	0.23	-
GWP - Global warming [kg CO ₂ eq/tn]	1 389.7	3 568.9	1 481.2	920.0
POP - Photochemical oxidation [kg C ₂ H ₄ /tn]	0.11	0.28	0.11	-
CED - Cumulative energy demand [MJ/tn]	24 927	63 967	26 544	13 140
Water consumption [m ³ /tn]	91.51	145.94	60.55	-

3.5. Caso de estudio 4 – Invernadero multitúnel sin calefacción en Italia

El primer caso seleccionado en Italia son los invernaderos multitúnel sin calefacción. Su coste varía entre 20 y 80 €/m².



Figura 48. Invernadero comercial multitúnel sin calefacción (a) y cultivo de tomate en el interior (b) en Italia (COSER. 2024; De Marinis, 2023).

En estos invernaderos, la producción no es muy elevada, por lo que muchos agricultores optan por cultivos de alto valor como el tomate cherry. Al igual que en el caso de España, la elevada inversión obliga a los agricultores a garantizar precios de venta superiores a la media para evitar incurrir en pérdidas.

Tabla 15. Costes de producción estimados para el tomate "Cherry" cultivado en invernaderos comerciales sin calefacción en Italia en la temporada 2022/23 (ISMEA, 2024 a-c).

Greenhouse type	Multispan		
Farm area [m ²]	100 000	Greenhouse surface [m ²]	10 000
Farm type	Average of commercial	Location	Ragusa (Italy)
Crop specifications			
Commercial type	Cherry	Crop type	Grafted
Cycle	6 months	Cycle length	180 days
Average marketable yield Y _{CS} [kg/m ²]	5.55		
Type of cost	€/ha		
Total variable or direct costs, C _V [€/ha]			40 550
Investment cost [€/m ²]	Amortization [€/ha]	25.5	22 462
Total fixed or indirect costs C _F [€/ha]			10 303
Total cost [€/ha]			108 331
Unitary cost [€/kg]			1.96
Average price A _P [€/kg]			1.60
Total value crop [€/m ²]			8.83
Production value P _V [€/ha]			88 331
Annual operating income I _Y [€/ha]			-20 000

El consumo de energía y agua es similar al de los invernaderos multitúnel sin calefacción de España. Sin embargo, el coste del agua es de aproximadamente 0,25 €/m³ siendo muy inferior al de Almería (0,75-1,25 €/m³).

Tabla 16. Consumo de energía y agua estimado para los invernaderos comerciales multitúnel sin calefacción en Italia para la temporada 2022/23.

Energy consumption		Source
Electricity price [€/kWh]	0.210	ARERA (2023)
Total electrical consumption [kWh/m ²]	1.9	Estimated from ISMEA (2024 a)
Electrical consumption [GJ/ha]	67	Calculated
Water consumption		
Water consumption [m ³ /ha]	4 570	Bacci et al. (2005)
Water price [€/m ³]	0.25	CBTC, 2024
Water requirements [m ³ /t]	82.7	Calculated

La estructura metálica de los invernaderos multitúnel genera emisiones entre 750-1200 kg de CO₂ eq/tn.

Tabla 17. Factores de impacto ambiental totales proporcionados por el modelo de simulación ambiental EXCEL EUPHOROS (Torrellas et al., 2013) para tomate "Cherry" cultivado en invernaderos multitúnel sin calefacción en Italia y calculados por Cellura et al., 2012 (CL) por unidad funcional (1 tonelada de tomates comercializables).

Crops	Tomato "Cherry" 2022-23	CL - Tomato	CL – Tomato "Cherry"
Yield [kg m ⁻²]	5.53	-	-
ADP - Abiotic depletion [kg Sb eq/tn]	5.73	-	-
AAP - Air acidification [kg SO ₂ eq/tn]	4.71	5.70	9.80
EUP - Eutrophication [kg PO ₄ eq/tn]	3.52	2.10	3.70
GWP - Global warming [kg CO ₂ eq/tn]	868.8	740.0	1 245.9
POP - Photochemical oxidation [kg C ₂ H ₄ /tn]	0.21	0.30	0.50
CED - Cumulative energy demand [MJ/tn]	14 141	16 200	23 000
Water consumption [m ³ /tn]	82.64	88.90	77.70

3.6. Caso de estudio 5 – Invernaderos multitúnel de alta tecnología con calefacción en Italia

El último caso seleccionado corresponde a invernaderos calefactados en Italia con un alto nivel de tecnología en sistemas de control climático. El coste de estos invernaderos es el más alto, con valores de 70-160 €/m².



Figura 49. Invernadero comercial multitúnel calefactado (a) y cultivo de tomate en sustrato con tubos calefactores (b) de Sfera Agricola en Italia.

En estos invernaderos el coste de la energía para calefacción representa entre el 20 y el 40% de los costes totales. La calefacción permite aumentar la producción por encima de los 50 kg/m². El riesgo económico se incrementa considerablemente, por lo que tanto los beneficios como las pérdidas pueden ser mucho mayores que en los invernaderos sin calefacción.

Tabla 18. Estimación de los costes de producción del tomate "Cherry" cultivado en invernaderos comerciales multitúnel de alta tecnología en Italia calefactados con gas natural en la campaña 2013/14 (costes de Battistel, 2014 actualizados a la temporada 2022/23) y calefactados con gasóleo y pellets de madera en la campaña 2022/23 (energía medida por Sfera Agricola).

Greenhouse type	Heated multispans high-tech	
Greenhouse surface [m ²]	50 000	119 232
Cycle length [days]	320	343
Average marketable yield Y _{CS} [kg/m ²]	50.0	15.0
Type of cost	€/ha	
Supplies	365 387	117 094
Heating energy consumption - gas	245 000	0
Heating energy consumption - diesel fuel	0	36 068
Heating energy consumption - wood	0	47 325
Transport	11 275	3 383
Labour	149 940	44 982
External services	47 200	0
Total variable or direct costs, C _v [€/ha]	573 802	165 459
Investment cost [€/m ²]	Amortization [€/ha]	74.8
Total fixed or indirect costs C _f [€/ha]	42 000	26 000
Total cost [€/ha]	662 409	238 066
Unitary cost [€/kg]	1.32	1.59
Average price A _p [€/kg]	1.65	1.65
Total value crop [€/m ²]	82.7	24.8
Production value P _v [€/ha]	826 500	247 950
Annual operating income I _y [€/ha]	164 091	9 884

El consumo energético para calefacción es muy superior en estos invernaderos, entre 9000-13000 GJ/ha, que el requerido en Almería, con un clima más templado.

Tabla 19. Consumo de energía y agua estimado para un invernadero comercial multitúnel de alta tecnología calefactado con gas natural y medido en un invernadero calefactado con diésel y pellets de madera (por Sfera Agricola) en Italia para la campaña 2022/23.

Heating energy source	Natural gas	References	Diesel and wood pellets
Energy consumption			
Electricity price [€/kWh]	0.276	ARERA (2023)	0.210
Total electrical consumption [kWh/m ²]	15.0	Battistel (2014)	11.4
Electrical consumption [GJ/ha]	540	Calculated	410
Natural gas price [€/m ³]	0.980	ARERA (2023)	-
Natural gas consumption [m ³ /m ²]	25.0	Battistel (2014)	-
Diesel fuel price [€/m ³]	-	-	1.050
Diesel fuel consumption [L/m ²]	-	-	3.44
Wood price [€/tons]	-	-	75.0
Wood consumption [kg/m ²]	-	-	63.1
Heating energy consumption [kWh/m ²]	270.8	Calculated	350.9
Heating energy consumption [GJ/ha]	9 747	Calculated	12 631
Water consumption			
Water consumption [m ³ /ha]	10 000	Battistel (2014)	300
Water price [€/m ³]	0.25	CBTC (2024)	0.25
Water requirements [m ³ /t]	20.0	Calculated	2.0

Estos invernaderos generan emisiones más elevadas, de unos 1400 kg de CO₂ eq/tn.

Tabla 20. Factores de impacto ambiental totales proporcionados por el modelo de simulación ambiental EXCEL EUPHOROS (Torrellas et al., 2013) para tomate "Cherry" cultivado en invernaderos multitúnel comerciales de alta tecnología calefactados con gas natural, diésel y pellets de madera en Italia para la campaña 2022/23 por unidad funcional (1 tonelada de tomates comercializables).

Heating source	Natural gas	Diesel and wood pellets
Yield [kg m ⁻²]	50.00	15.00
ADP - Abiotic depletion [kg Sb eq/tn]	11.79	9.72
AAP - Air acidification [kg SO ₂ eq/tn]	2.50	5.16
EUP - Eutrophication [kg PO ₄ eq/tn]	1.16	2.01
GWP - Global warming [kg CO ₂ eq/tn]	1 444.0	1 415.6
POP - Photochemical oxidation [kg C ₂ H ₄ /tn]	0.15	0.24
CED - Cumulative energy demand [MJ/tn]	25 552	24 120
Water consumption [m ³ /tn]	20.00	2.00

3.7. Conclusiones

En los invernaderos calefactados de España e Italia podrían utilizarse fluidos termoquímicos para reducir el coste de la energía para calefacción y reducir su impacto ambiental.

El sistema de climatización basado en fluidos termoquímicos podría utilizarse en invernaderos multitúnel sin calefacción para la refrigeración y el control de la humedad.

Las empresas de tamaño medio-grande (20-50 ha) son las más susceptibles de incorporar este tipo de tecnología en España.

Los agricultores consultados indicaron que realizarían una inversión de 5.000-15.000 €/ha con un periodo de retorno de 2-10 años.

4. Impactos de TheGreefa

La sección del manual de formación de TheGreefa se centra en la presentación de los resultados del análisis de los repercusiones ambientales y económicos relacionados con la implementación de la tecnología TheGreefa en invernaderos. La tecnología principal analizada es el sistema de control climático para su aplicación en el interior de invernaderos.

4.1. Impacto ambiental

En el proyecto TheGreefa, los beneficios ambientales relacionados con la aplicación de la tecnología TheGreefa en invernaderos se han identificado en el Análisis de Ciclo de Vida realizado dentro del Paquete de Trabajo 3 del proyecto, centrado en la evaluación de las tecnologías desarrolladas.

El estudio se llevó a cabo de acuerdo con los principios y el marco para el LCA, que se definen en la norma internacional para el LCA, ISO 14040 e ISO 14044.

Se recopilaron datos de los demostradores de TheGreefa y de los casos de estudio para analizarlos en términos de consumo de energía, agua, combustibles fósiles y producción de los invernaderos para comparar los impactos ambientales antes y después de la implementación del sistema TheGreefa basándose en datos reales (demostradores) o simulaciones (casos de estudio). El estudio de LCA permite analizar y presentar la eficiencia global a largo plazo de la tecnología TheGreefa y cómo puede tener un impacto positivo sobre el medio ambiente y las personas.

El LCA se llevó a cabo en base a datos reales obtenidos de los invernaderos de TheGreefa ubicados en una zona de clima continental medio (Suiza) y de clima mediterráneo (Italia, Toscana).

Metodología LCA

Hay cuatro pasos distintos en un estudio de LCA, descritos en las normas ISO mencionadas.

La primera es la definición del objetivo y el alcance del estudio, para garantizar que el LCA se realice de forma coherente.

- El LCA modela el ciclo de vida de un producto, servicio o sistema. Un modelo es una simplificación de una realidad compleja y, como ocurre con todas las simplificaciones, esto significa que la realidad estará distorsionada de alguna manera. El reto para un profesional del LCA es asegurarse de que la simplificación y las distorsiones no influyan demasiado en los resultados. La mejor manera de hacerlo es definir cuidadosamente el objetivo y el alcance del estudio de LCA.

A continuación, podemos pasar a la segunda etapa, la del análisis de inventario de extracciones y emisiones.

- En el análisis de inventario, se analizan todas las entradas y salidas ambientales asociadas con un producto o servicio. Un ejemplo de un insumo ambiental, algo que se extrae del medio ambiente para incluirlo en el ciclo de vida del producto, es el uso de materias primas y energía. Los impactos ambientales, que el ciclo de vida del producto emite al medio ambiente, incluyen la emisión de contaminantes y los flujos de residuos. En conjunto, ofrecen una imagen completa del ciclo de vida del producto o del proceso.

Una vez completado el inventario, podemos pasar a la fase de evaluación del impacto del ciclo de vida.

- En la evaluación de impacto de ciclo de vida (LCIA) se extraen las conclusiones que permiten tomar mejores decisiones empresariales. Los impactos ambientales se clasifican y evalúan en función de lo que es más importante para una empresa y se traducen en términos ambientales como el calentamiento global o la salud humana. La elección más importante que hay que tomar es el grado de integración de los resultados. Existe la opción de una única puntuación para mostrar el grado de sostenibilidad del producto, o para poder ver si el diseño mejora las emisiones de CO₂ y otros factores del cambio climático. Esto suele depender del tipo de público al que se dirija y de su capacidad para comprender resultados detallados.

Por último – cuarta etapa, necesitamos interpretar los resultados obtenidos en la fase anterior.

- Durante la fase de interpretación, se comprueba si las conclusiones están bien fundamentadas. La norma ISO 14044 describe varios controles para comprobar si las conclusiones están adecuadamente respaldadas por los datos y por los procedimientos utilizados.

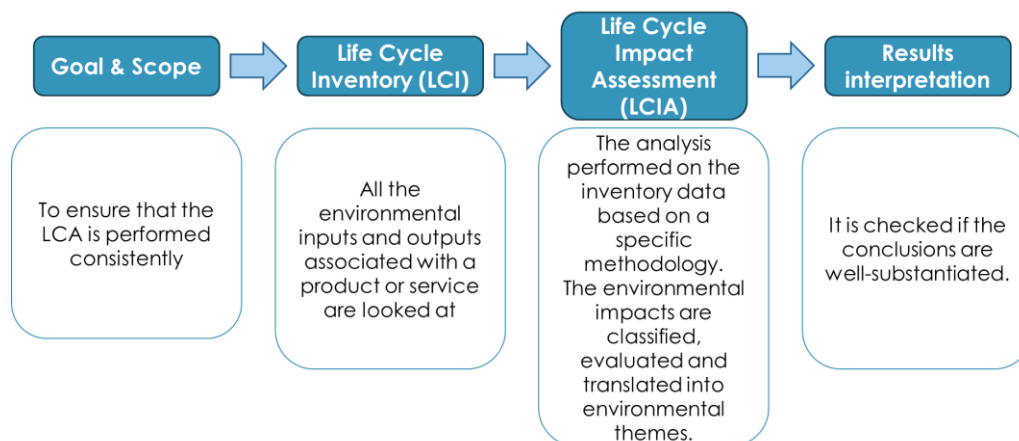


Figura 50. Cuatro pasos para realizar una LCA.

Para el proyecto TheGreefa, el objetivo del estudio de LCA fue analizar y comparar los impactos ambientales resultantes de 15 años de funcionamiento de los invernaderos, considerando el invernadero antes y después de la implementación del sistema de control climático TheGreefa.

LCA boundaries		Life cycle stages	Life cycle stage designation and description	
Cradle to cradle (C2C)	Cradle to grave (C2G)	Cradle to gate	Product stage	A1 Raw material extraction and processing, processing of secondary material input A2 Transport to the manufacturer A3 Manufacturing
			Installation process stage	A4 Transport to the Building site A5 Installation into the Building site
				Use stage – information modules related to the Product/Material
	Use stage – information modules related to the operation of the Customer site	B6 Operational energy use B7 Operational water use		
		End-of-life stage	C1 Deconstruction, demolition C2 Transport to waste processing C3 Waste processing for reuse, recovery and/or recycling (3R) C4 Disposal	
	Benefits and loads beyond the system boundary		D Reuse, recovery and/or recycling (3R) potentials	

Figura 51. Etapas del ciclo de vida de un producto o servicio.

A continuación, se deben definir los límites del análisis. La tabla presenta los límites, incluyendo todas las etapas del ciclo de vida del producto o servicio. Desde la adquisición de las materias primas, pasando por la fabricación, el uso, el desmantelamiento, hasta la disposición final o el reciclaje de los materiales.

En el análisis, para cada invernadero se estudia el período de operación de 15 años para una superficie de 1 ha del invernadero. Por lo tanto, solo se considera la fase de funcionamiento del ciclo de vida para identificar y comparar los impactos. Las diferencias están relacionadas con el consumo de energía y combustible por parte de los sistemas energéticos de los invernaderos en su funcionamiento.

Para realizar el análisis se utilizó el software SimaPro.

Categorías de impacto

Las normas ISO definen las categorías específicas de impactos que describen las cargas ambientales. Las principales categorías de impacto consideradas en el LCA son:

- **Potencial de agotamiento abiótico:** se refiere al consumo de recursos no biológicos como combustibles fósiles, minerales, metales, agua, etc. Indica la disminución de dichos recursos. La categoría se expresa en MJ para los combustibles fósiles y en kg equivalentes de antimonio (Sb) para los demás minerales.
- **Cambio climático / Potencial de calentamiento global:** se define como el cambio en la temperatura global causado por el efecto invernadero que genera la liberación de "gases de efecto invernadero" por parte de la actividad humana.
- **Potencial de agotamiento de la capa de ozono:** degradación de la capa de ozono estratosférica debida a las emisiones antropogénicas de sustancias que agotan la capa de ozono. Puede causar un aumento de la radiación ultravioleta UV-B y el número de casos de enfermedades cutáneas.
- **Potencial de toxicidad humana:** índice calculado que refleja el daño potencial de una unidad de productos químicos liberados en el medio ambiente, y se basa tanto en la toxicidad inherente de un compuesto como en su dosis potencial. Estos subproductos, principalmente arsénico, dicromato de sodio y fluoruro de hidrógeno, son causados en su mayor parte, por la producción de electricidad a partir de fuentes fósiles.
- **Potencial de ecotoxicidad acuática en agua dulce:** efectos tóxicos de los productos químicos en los ecosistemas, en este caso en el agua dulce, causando la pérdida de biodiversidad y/o la extinción de especies.
- **Potencial de ecotoxicidad acuática marina:** efectos tóxicos de los productos químicos en los ecosistemas de los embalses marinos, causando la pérdida de biodiversidad y/o la extinción de especies.
- **Potencial de ecotoxicidad terrestre:** efectos tóxicos de los productos químicos en los ecosistemas terrestres, causando la pérdida de biodiversidad y/o la extinción de especies.
- **Potencial de oxidación fotoquímica (potencial de creación de ozono fotoquímico):** define el potencial para la creación de niebla con humo, provocada por el efecto de la luz solar, el

calor y los compuestos orgánicos volátiles no metánicos (NMCOV) y los óxidos de nitrógeno (NOx).

- **Potencial de acidificación:** reducción del pH debido a los efectos acidificantes de las emisiones antropogénicas. Está relacionado con las emisiones de gases como NH₃, NOx y SO_x, que se mezclan con el agua de la atmósfera y provocan lluvias ácidas que aumentan la acidez de los sistemas de agua y suelo.
- **Potencial de eutrofización:** define el potencial de acumulación de nutrientes en los sistemas acuáticos. Los indicadores de impacto son el aumento de la concentración de nitrógeno y fósforo y la formación de biomasa (por ejemplo, algas).

Inventario del ciclo de vida – Invernadero suizo

El invernadero Meyer Orchideen es el demostrador de TheGreefa, donde el sistema a escala real está implementado y en funcionamiento. En el invernadero de Meyer Orchideen AG en Suiza, cerca del aeropuerto de Zúrich, se demostró el control de la humedad, la calefacción y la refrigeración de TheGreefa en un solo sistema a través de un solo proceso.



Figura 52. Invernadero Meyer Orchideen

El invernadero analizado tiene un área de 600 m², en el que se han instalado 9 unidades de control climático (absorbedores), cada una de ellas con una potencia de 8 kW con capacidad de calefacción/refrigeración, cada una de las cuales abastece a aproximadamente 50 m² de mesas de plantación.



Figura 53. La unidad de absorción (izquierda) y las mesas de plantación (derecha) en el invernadero en Suiza.

El TCF utilizado en el proyecto es $MgCl_2$ y los 9 sistemas son atendidos por un desorbedor instalado fuera del invernadero. Los sistemas energéticos están integrados con el sistema renovable del invernadero, incluyendo caldera de leña, bomba de calor de agua subterránea, paneles fotovoltaicos y agua de pozo.

La energía solar se utiliza para la regeneración del TCF y se instalan almacenes intermedios para almacenar el TCF diluido y concentrado.

Los datos recopilados para la evaluación ambiental debían permitir comparar las repercusiones, como los impactos ambientales o los impactos en la salud humana, entre el invernadero de 600 m² que funcionaba sin el sistema TheGreefa y con el sistema implementado en un período de 15 años. El análisis se ha realizado para una unidad de referencia de 1 ha del invernadero analizado. Por lo tanto, ha sido necesario recalcular los insumos recogidos para 1 ha de superficie y el período de tiempo diseñado.

La atención se centró en los insumos que permitieron comparar la eficiencia energética del invernadero, considerando la electricidad, el agua y los combustibles utilizados. La mayor parte del agua del invernadero se utiliza en un ciclo cerrado o se recupera de la lluvia. El agua necesaria para el proceso de refrigeración se incluyó en el análisis.

En la tabla 21 se representan los datos iniciales proporcionados por la Universidad de Ciencias Aplicadas de Zúrich, con la ayuda de los cuales IZNAB realizó otros cálculos adicionales, como la determinación de la cantidad de peso de los combustibles y el número de transportes. Estos datos eran necesarios para el análisis con el software SimaPro. Además de la base de datos SimaPro, en el análisis se utilizó la base de datos Ecoinvent para proporcionar las entradas y salidas necesarias en los procesos tecnológicos del ciclo de vida del invernadero.

Tabla 21. Datos de consumo de energía y combustible recopilados del invernadero suizo.

	1 season for 600 m ² greenhouse		1 season for 1 ha greenhouse	
	Standard greenhouse	TheGreefa system	Standard greenhouse	TheGreefa system
Electricity consumption (pumps, fans and heat pump)	43 178.69 kWh	39 945.54 kWh	719 645 kWh	665 792 kWh
Oil consumption	1 350 kWh	320 kWh	22 500 kWh	5 333 kWh
Wood consumption	228 150 kWh	54 080 kWh	3 802 500 kWh	901 333 kWh
Water consumption	0 m ³	23 m ³	0 m ³	383.3 m ³

Inventario del ciclo de vida – Invernadero italiano

El siguiente caso es el sistema de invernadero italiano de Sfera Agricola, que representa el sistema de alta tecnología y uno de los nuevos métodos de producción agrícola de alta calidad. Realiza un caso de estudio con recuperación de agua y eficiencia energética en invernaderos. El invernadero se encuentra en el sur de la Toscana, en Italia.

El caso de estudio de la empresa Sfera representa un ejemplo ideal de los retos de la agricultura mediterránea intensiva y de alta calidad, particularmente en las áreas de desafío de la eficiencia hídrica y energética. El invernadero asumió el papel de caso de estudio en el proyecto TheGreefa.

El objetivo de las actividades del caso de estudio son analizar los datos recogidos durante el año, en función de las variaciones climáticas y las necesidades culturales del invernadero, para definir las mejores necesidades de diseño para reducir aún más los costes energéticos y mejorar la calidad y la productividad.

Los datos recogidos para la evaluación ambiental son resultados de simulaciones realizadas por los socios del proyecto TheGreefa. Los datos representan una campaña completa de funcionamiento en 1 ha de superficie de invernadero.



Figura 54. Invernadero de Sfera Agrícola: sistema de techo (arriba a la izquierda), sistema de calefacción por tuberías (arriba a la derecha) y las plantas de tomate con sensores (abajo).

El calor en el invernadero se suministra con calderas de leña y gasoil. El sistema tiene una potencia de 7.000 kW. Los principales tipos de madera utilizados como combustibles son el abeto, el pino, la encina y el castaño. El consumo de gasoil es de aprox. 600 l/h. El sistema de calefacción consume alrededor del 28% de la electricidad utilizada por el invernadero, principalmente para equipos auxiliares, como bombas.

Tabla 22. Datos de consumo de energía y combustible recopilados del invernadero italiano.

	Standard system	TheGreefa
Heating season	1 year for 1 ha greenhouse	
Electricity	90 330 kWh	99 363 kWh
Oil	34 350 l	27 480 l
Wood	631 †	505 †

Análisis de ciclo de vida

Los dos invernaderos mencionados anteriormente han sido evaluados considerando dos escenarios:

- Escenario 1_ Invernadero existente (antes de la modernización). El análisis del ciclo de vida del invernadero se ha realizado antes de la implementación del sistema TheGreefa.
- Escenario 2_ Invernadero reacondicionado (después de la modernización). El análisis del ciclo de vida del invernadero se ha llevado a cabo después de la implementación del sistema TheGreefa.

Invernadero suizo

En primer lugar, se presentan los resultados de la evaluación ambiental para el invernadero suizo. Al realizar el cálculo del LCA utilizando la metodología de referencia CML-IA, se dan los resultados para las principales categorías de impacto. En cada categoría se puede observar el impacto positivo-menor o mayor- de la implementación del sistema TheGreefa en el invernadero. La reducción de los impactos en caso de que el sistema TheGreefa funcione puede alcanzar entre el 37% y el 76%.

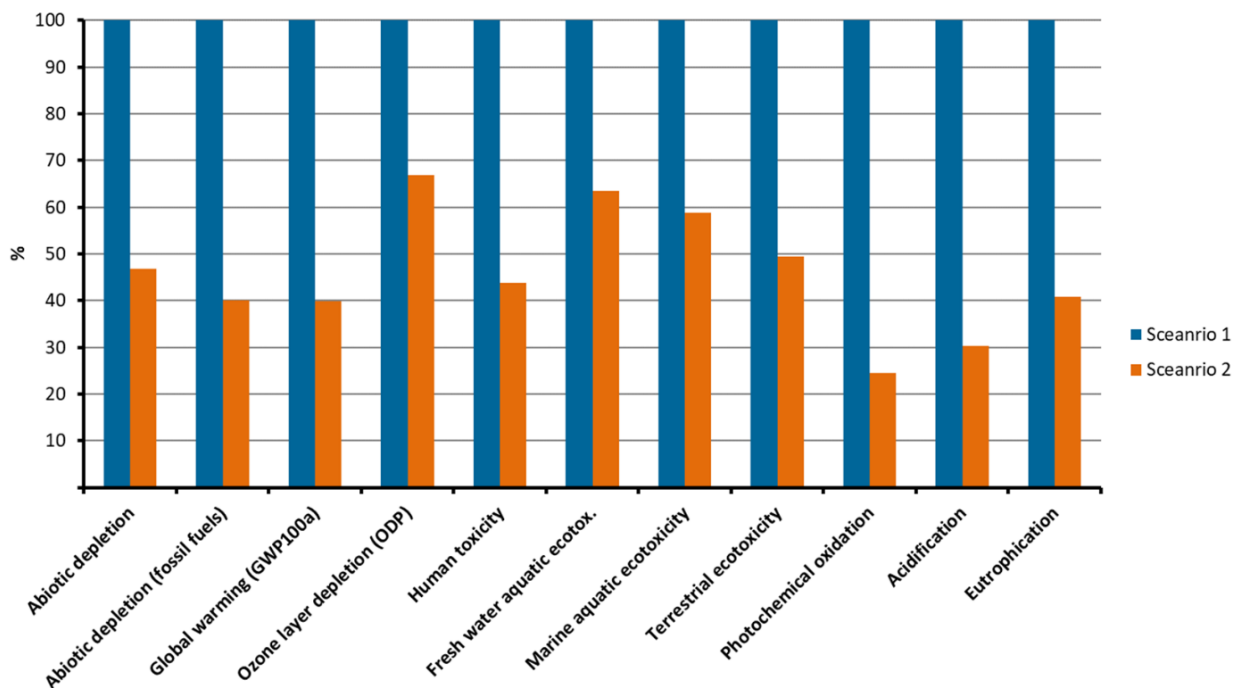


Figura 55. Evaluación ambiental: Demostrador suizo – Comparación Escenario 1 y Escenario 2 (SimaPro 8.3.0). Método: CML-IA línea base V3.04 / EU25 / Caracterización por categorías de impacto.

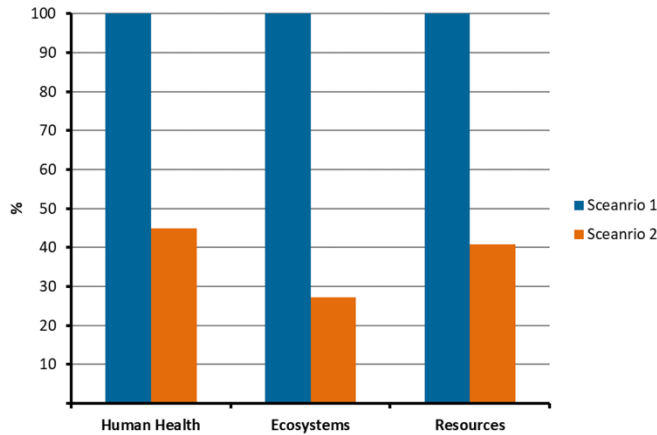


Figura 56. Comparación de la evaluación de daños: Demostrador suizo – Escenario 1 y Escenario 2. Método: ReCiPe Endpoint (E) v1.13 / Europe ReCiPe E/A.

Para una mejor presentación, se realizó otro análisis utilizando la metodología European ReCiPe Endpoint. Presenta los impactos agrupados en 3 factores principales: salud humana, ecosistemas y uso de recursos.

Según los resultados obtenidos, durante 15 años de funcionamiento del sistema TheGreefa en el invernadero suizo puede resultar en una reducción de aproximadamente el 55% en los impactos en la salud humana, una reducción del 60% en caso de agotamiento de los recursos y una reducción de aproximadamente el 73% de los impactos en los ecosistemas.

Las fases operativas comparadas entre ambos escenarios y sus impactos ambientales están dominadas principalmente por la energía consumida en el invernadero en diferentes formas: electricidad y calor.

Otra forma de presentar los beneficios ambientales es analizar específicamente la categoría de Potencial de Calentamiento Global expresada en kg de CO₂ equivalente emitido.

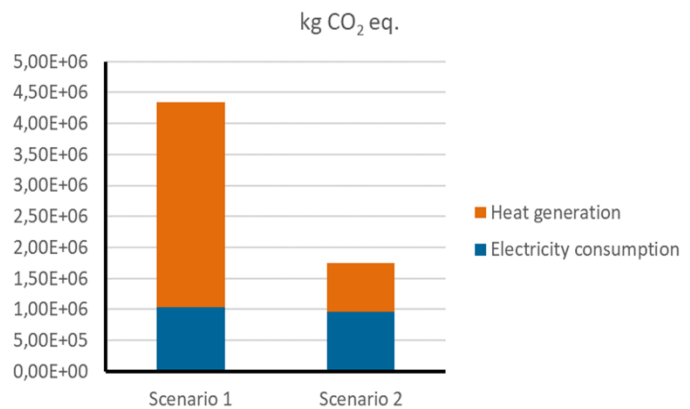


Figura 57. Potencial de Calentamiento Global (GWP) del demostrador suizo en ambos escenarios.

En términos de CO₂, durante los 15 años la tecnología TheGreefa permitirá ahorrar 2.680 toneladas de emisiones de CO₂ en 1 ha del invernadero. En términos porcentuales, supone una reducción del potencial de calentamiento global de alrededor del 60%. Sin embargo, la cantidad de CO₂ y el porcentaje muestran claramente que el cultivo en invernadero es una industria intensiva.

Invernadero italiano

Ahora, pasando al caso italiano, utilizando la metodología de referencia CML-IA, de manera similar al demostrador suizo, en cada categoría se puede observar el impacto positivo de la implementación del sistema TheGreefa en el invernadero también para el caso de estudio italiano. Sin embargo, en el invernadero italiano la reducción de impactos es menos visible en el gráfico, ya que para cada categoría la reducción varía entre el 10-20%.

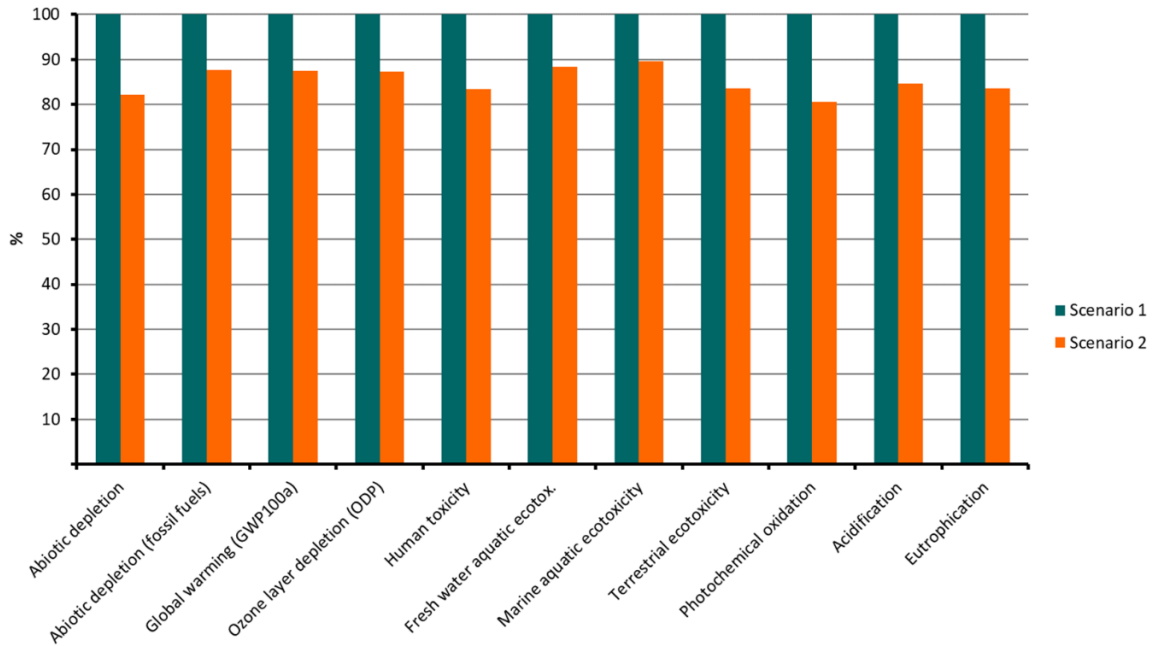


Figura 58. Evaluación ambiental: caso de estudio italiano – Comparativa Escenario 1 y Escenario 2 (SimaPro 8.3.0). Método: CML-IA línea base V3.04 / EU25.

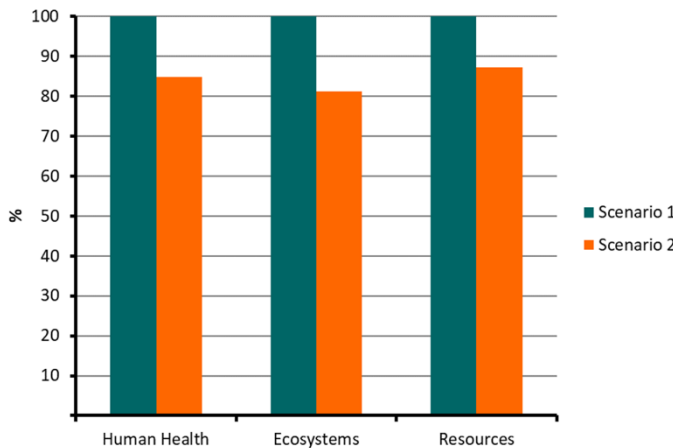


Figura 59. Comparación de la evaluación de daños: estudio de caso italiano – Escenario 1 y Escenario 2. Método: ReCiPe Endpoint (E) v1.13 / Europe ReCiPe E/A.

Utilizando la metodología europea ReCiPe Endpoint, durante 15 años de funcionamiento del sistema TheGreefa en el invernadero italiano puede dar lugar a una reducción de aproximadamente el 15% en los impactos en la salud humana, una reducción del 13% en caso de agotamiento de los recursos y una reducción de aproximadamente el 19% de los impactos en los ecosistemas.

También en este caso, los impactos ambientales están dominados principalmente por la energía consumida en el invernadero en diferentes formas: electricidad y calor.

En términos de ahorro de CO₂, la tecnología TheGreefa permitirá ahorrar más de 362 toneladas de emisiones de CO₂ en 1 ha de invernadero en un período de funcionamiento de 15 años. En porcentaje, supone una reducción del potencial de calentamiento global de casi un 13%.

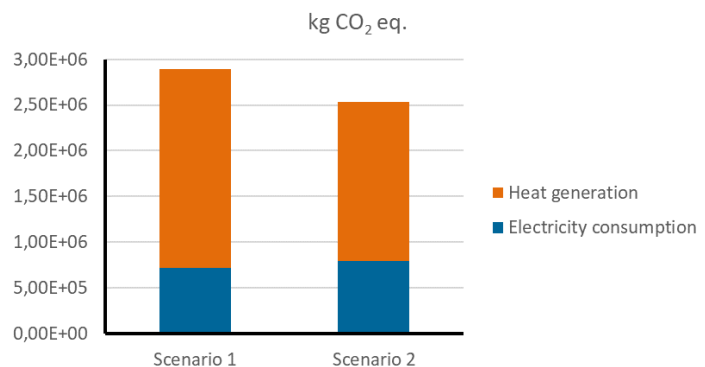


Figura 60. Potencial de Calentamiento Global (PCA) del caso de estudio italiano en ambos escenarios.

4.2. Impacto económico

El impacto económico de TheGreefa se analizó en la evaluación tecnoeconómica realizada sobre el sistema de climatización. El estudio se ha realizado en estrecha relación con la evaluación ambiental presentada en el apartado 4.1. En el estudio económico se utilizaron los mismos datos sobre la energía y los combustibles consumidos en los invernaderos de TheGreefa, además de considerar también la información sobre los costes relacionados con la energía y los combustibles. Los resultados del estudio debían ser la estimación del posible retorno de la inversión para la implementación del sistema TheGreefa, así como el coste del propio sistema que ofreciera un retorno aceptable de la inversión. Otro resultado del análisis es la evaluación de la viabilidad de implementación del sistema en invernaderos de diferentes zonas climáticas.

Realizando los cálculos de un invernadero en los dos escenarios se obtiene el ahorro anual de costes de un invernadero comparando el funcionamiento del invernadero con y sin el sistema TheGreefa. Para comparar los invernaderos del proyecto, se procesaron los datos recogidos para comparar la superficie de 1 ha de los invernaderos.

La recopilación de datos estaba disponible para el demostrador de TheGreefa, el invernadero de Meyer Orchideen en Suiza, y del caso de estudio, el invernadero de tomates de Sfera Agricola en Italia.

Coste de insumos para la evaluación económica

Los datos ambientales utilizados para el estudio ya se han presentado en la sección anterior. Aquí se han recogido los datos de costes.

Invernadero suizo

La energía térmica para el invernadero proviene de una empresa externa. El propietario del invernadero paga los siguientes precios por la energía suministrada: 96 €/MWh de calor procedente del petróleo y 45,12 €/MWh de calor procedente de la madera. El coste de la electricidad es de 197,76 €/MWh.

Los datos recogidos para la evaluación debían permitir comparar las repercusiones económicas entre el invernadero de 600 m² que funcionaba sin el sistema TheGreefa y con el sistema implantado en un período de funcionamiento a largo plazo. El análisis se ha realizado para los 600 m², así como para una unidad de referencia de 1 ha del invernadero analizado. Por lo tanto, ha sido necesario volver a calcular los insumos recogidos para una superficie de 1 ha.

En cuanto al coste de inversión relacionado con la implantación del sistema TheGreefa en el invernadero suizo, el coste fue de 153.600 euros. Desglosando este coste, en coste de materiales y de mano de obra, se estima que la relación es 50/50. En Suiza, el coste de la mano de obra utilizado en el estudio es de 120 €/hora. El coste de inversión representa la implantación del sistema en el invernadero de 600 m².

Tabla 23. Coste estacional de insumos para el invernadero suizo: 600 m².

	Invernadero estándar	Coste	Sistema TheGreefa	Coste
Consumo eléctrico (bombas, ventiladores y bomba de calor)	43,18 MWh	8.539,02 €	39,95 MWh	7.900,03 €
Consumo del petróleo	1,35 MWh	129,60 €	0,32 MWh	30,72 €
Consumo de madera	228,15 MWh	10.294,13 €	54,08 MWh	2.440,09 €

 Tabla 24. Coste de implantación del sistema TheGreefa en el invernadero suizo de 600 m².

Coste de materiales	76.800,00 €
Coste de la mano de obra	76.800,00 €
Coste total de la inversión	153.600,00 €

Como ya se ha mencionado, para poder comparar los resultados del estudio con el invernadero italiano de 1 ha, se calcularon los costes y el consumo de energía y combustibles para 1 ha. Entonces el coste de inversión es de 2.560.000 euros.

Tabla 25. Coste estacional de insumos para el invernadero suizo: 1 ha.

	Invernadero estándar	Coste	Sistema TheGreefa	Coste
Consumo eléctrico (bombas, ventiladores y bomba de calor)	719,65 MWh	142.317,98 €	665,79 MWh	131.666,63 €
Consumo de petróleo	22,50 MWh	2.160,00 €	5,33 MWh	511,68 €
Consumo de madera	3 802,50 MWh	171.568,80 €	901,33 MWh	40.668,01 €

Mesa 26. Costo estimado de implementación del sistema TheGreefa en el invernadero suizo de 1 ha.

Coste de materiales	1 280 000,00 €
Coste de la mano de obra	1 280 000,00 €
Coste total de la inversión	2 560 000,00 €

Invernadero italiano

El calor del invernadero es suministrado por calderas de leña y gasoil. El sistema tiene una potencia de 7 000 kW. Los principales tipos de madera utilizados como combustibles son el abeto, el pino, la encina y el castaño. El consumo de aceite es de aprox. 600 l/h. El sistema de calefacción consume alrededor del 28% de la electricidad utilizada por el invernadero, principalmente para equipos auxiliares, como bombas. Los costes unitarios de energía y combustibles suministrados por Sfera son: 0,22 € por 1 kWh de electricidad, 1,05 € por 1 litro de petróleo y 75 € por 1 tonelada de madera. El coste anual estimado del transporte de combustibles es de 5 000 euros.

Tabla 27. Coste estacional de insumos para el invernadero italiano: 1 ha.

	Sistema estándar	Coste	Sistema TheGreefa	Coste
Electricidad	90 330 kWh	19.872,60 €	99 363 kWh	21.859,86 €
Petróleo	34 350 l	36.067,50 €	27 480 l	28.854,00 €
Madera	631 t	47 325,00 €	505 t	37.860,00 €

En cuanto al coste de inversión, se estimó basándose en el coste del invernadero suizo. Se utilizó la misma proporción de costes de materiales y mano de obra. En cuanto al coste de la mano de obra, en Italia es más barato que en Suiza, y es de 40 €/hora. Se tomaron como base de cálculo los 2.560.000 euros del coste de inversión del invernadero suizo de 1 ha. El coste de la mano de obra asciende a 426.600 €. Incluyendo los materiales, el valor total del coste de inversión del invernadero italiano es de 1.706.600 euros.

Tabla 28. Coste de implementación estimado del sistema TheGreefa en el invernadero italiano de 1 ha.

Coste de materiales	1 280 000,00 €
Coste de la mano de obra	426 000,00 €
Coste total de la inversión	1 706 600,00 €

Evaluación tecnoeconómica

Para poder realizar la evaluación tecnoeconómica de la implantación del sistema TheGreefa, se han analizado los dos invernaderos en dos escenarios:

- Sistema estándar – funcionamiento del invernadero antes de la implantación del sistema TheGreefa.
- Sistema TheGreefa – funcionamiento del invernadero con el sistema de control climático TheGreefa implementado.

Invernadero suizo

La simulación del período de retorno de la inversión se calculó considerando los gastos anuales de funcionamiento del invernadero (sistemas energéticos) con el sistema estándar y con el sistema TheGreefa. El ahorro anual calculado es de 8.591,91 euros. Basándonos en la simulación y considerando el coste de inversión de 153.600 €, el periodo de retorno de la inversión es de 18 años. Tal cantidad de tiempo es aceptable y esperada tanto por el propietario del invernadero Meyer, como por la Oficina Federal Suiza de Energía que colabora en la demostración del invernadero suizo.

El período de retorno de inversión logrado es aceptable para el propietario del invernadero. Sin embargo, en el estudio de mercado del proyecto TheGreefa, se identificó que el tiempo más esperado y aceptable para la mayoría de los invernaderos es de 7 a 10 años. El Figura 61 se muestran los resultados de la simulación en la que se han comprobado otros valores de costes de inversión y sus períodos de retorno.

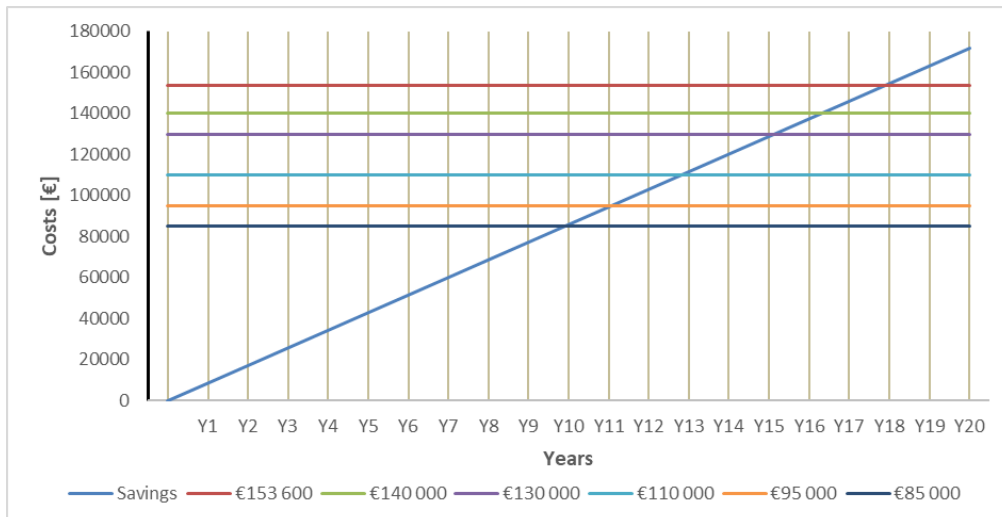


Figura 61. Simulación del período de retorno de la inversión para diferentes costes de inversión: invernadero suizo de 600 m².

El objetivo es hallar cuál debería ser el coste de inversión para cumplir el intervalo mencionado del tiempo previsto para el retorno de la inversión. El valor inicial es de 153.600 euros, lo que supone un plazo de 18 años. Limitando el coste a 110.000 euros, el retorno de la inversión puede lograrse en 13 años. Sin embargo, solo si el coste es casi 2 veces inferior al valor inicial (85.000 €) se consigue el plazo previsto de 10 años.

A efectos comparativos, la simulación se realizó también para un invernadero suizo de 1 ha. El coste de inversión estimado fue de 2.560.000 euros. En este caso, el plazo de retorno de la inversión también es de 18 años.

Invernadero italiano

La simulación del período de retorno de la inversión se calculó considerando los gastos anuales de funcionamiento del invernadero (sistemas de energéticos) con el sistema estándar y con el sistema TheGreefa. El ahorro anual calculado es de 14.691,24 euros. Basándonos en la simulación y considerando el coste de inversión de 1.706.600 €, el periodo de retorno de la inversión es de 100 años. Un período tan largo es totalmente inaceptable e inalcanzable en la vida real. El largo período se debe a un ahorro de costes proporcionalmente pequeño en comparación con el invernadero suizo analizado anteriormente. En el caso del sistema de control climático para invernaderos en el proyecto TheGreefa, su objetivo es reducir las pérdidas de calor y reducir el consumo de electricidad y combustibles para satisfacer la demanda de calor del invernadero. Cuanto mayor sea la demanda de calor del invernadero, mayor será el ahorro resultante de la implementación del sistema. Durante el análisis de los invernaderos suizos e italiano, se observó que la demanda de calor del caso italiano es 10 veces inferior que la del caso suizo. La diferencia se debe, por supuesto, a la ubicación en diferentes zonas climáticas. La proporción también es visible comparando el ahorro de costes. Para un invernadero de 1 ha en Suiza, el ahorro de costes es de 143.200,46 € al año, mientras que para un invernadero italiano de 1 ha es de sólo 14.691,24 €.

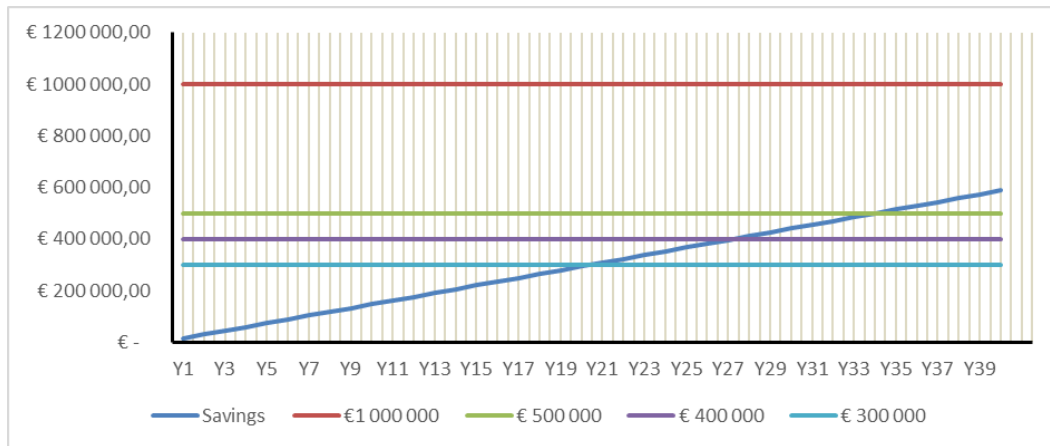


Figura 62. Simulación del período de retorno de la inversión para diferentes costes de inversión: invernadero italiano de 1 ha.

La simulación también se realizó para ver cuál debería ser el coste del sistema para tener un período de retorno de inversión comparable al del invernadero suizo. Los resultados presentados en la Figura 62 muestran que solo si el coste de implantación del sistema es de 300.000 €, entonces el período de retorno de la inversión es de 21 años. Sin embargo, por ahora no es posible lograr ese coste para un invernadero de 1 ha.

4.3. Conclusiones

Los resultados obtenidos en el Análisis del Ciclo de Vida (LCA) presentado han demostrado que el uso de la nueva tecnología TheGreefa en invernaderos contribuye a reducir visiblemente el impacto ambiental de las operaciones en invernaderos. La calefacción, la refrigeración y el control de la humedad son procesos que consumen mucha energía en el funcionamiento del invernadero. La producción de calor y el consumo de electricidad son responsables de la mayoría de las cargas ambientales. Por lo tanto, la aplicación de mejoras en estos aspectos es el camino correcto que puede ayudar a alcanzar los objetivos climáticos de la UE mediante la reducción del uso de electricidad y recursos naturales.

Además, las menores emisiones de gases de efecto invernadero (ahorro de CO₂) no son los únicos beneficios de la implantación del sistema TheGreefa. Por supuesto, son responsables del cambio climático. Pero hay otros aspectos en los que TheGreefa aporta mejoras a largo plazo. Gracias a la gran reducción de factores como la toxicidad humana o los potenciales de oxidación fotoquímica, el uso del nuevo sistema puede suponer una reducción de entre el 20% y más del 50% del impacto negativo global sobre la salud humana.

El uso de recursos como la madera y el petróleo, o incluso el gas natural, es menor, pero puede reducirse más cuando se implantan más fuentes de energía renovables en los sistemas energéticos de los invernaderos: bombas de calor, energía geotérmica y otros.

La evaluación tecnoeconómica arrojó resultados prometedores en el caso del invernadero suizo del proyecto TheGreefa, ubicado en el clima continental medio. El coste de inversión de la implantación de la tecnología del proyecto dará lugar a un periodo de retorno estimado de 18 años. Si el coste de implementación del sistema TheGreefa fuera casi la mitad (85.000 € para un invernadero de 600 m²

y 1.416.000 € para un invernadero de 1 ha), podría dar un periodo de retorno de la inversión de 10 años o menos.

En cuanto al invernadero italiano, el estudio ha demostrado que el sistema TheGreefa, con su coste actual, no puede ofrecer un periodo de retorno de la inversión aceptable. La demanda de calor del invernadero es demasiado baja para que el ahorro pueda cubrir el coste de implantación del nuevo sistema.

Como el sistema TheGreefa aún no está listo para entrar en el mercado como producto, todavía existe una posibilidad, y se intentará reducir el coste del sistema. También habría que analizar las posibles limitaciones en cuanto a los requisitos de los invernaderos en los que podría implementarse el sistema. En primer lugar, debe analizarse la demanda de calor del invernadero. El estudio del invernadero suizo puede utilizarse como referencia para la clasificación de las posibles opciones de implementación.

5. Aspectos y políticas sociales

Teniendo en cuenta el campo de aplicación y las ventajas que ofrece la tecnología propuesta en el proyecto, las recomendaciones deben basarse en la revisión de cinco áreas fundamentales: agricultura, energía, agua, productos químicos y seguridad alimentaria. En esta presentación, vamos a ver los principales documentos estratégicos y normativos en cada una de estas áreas a nivel europeo y luego, sobre esa base, identificaremos algunas recomendaciones políticas que creemos que podrían facilitar el despliegue de la tecnología propuesta.

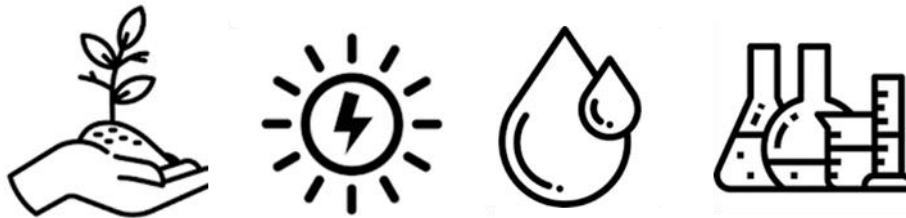


Figura 63. Principales áreas en las que basar la revisión de las políticas: agricultura, energía, agua y productos químicos.

5.1. Marco estratégico europeo en agricultura

El cambio climático y la degradación del medio ambiente son una amenaza existencial para Europa y el mundo. Para superar estos retos, el Pacto Verde Europeo pretende transformar la UE en una economía moderna, competitiva y eficiente en el uso de los recursos, que garantice que no se produzcan emisiones netas de gases de efecto invernadero de aquí a 2050, que el crecimiento económico se disocie del uso de los recursos y que ninguna persona ni ningún lugar se queden atrás.

La Estrategia «De la Granja a la Mesa» está en el centro del Pacto Verde Europeo, cuyo objetivo es lograr que los sistemas alimentarios sean justos, saludables y respetuosos con el medio ambiente. Promueve un sistema alimentario más sostenible y entre sus principales objetivos está garantizar alimentos suficientes, y que sean asequibles y nutritivos, sin sobrepasar los límites del planeta.

Se presentará una propuesta de marco legislativo para los sistemas alimentarios sostenibles con el fin de apoyar la aplicación de la estrategia y el desarrollo de una política alimentaria sostenible.

La PAC 2023-27 entró en vigor el 1 de enero de 2023. Los planes aprobados están diseñados para hacer una contribución significativa a las ambiciones del Pacto Verde Europeo, la Estrategia «De la Granja a la Mesa» y la Estrategia sobre Biodiversidad, con la modernización de la agricultura mediante el desarrollo de prácticas agrícolas más sostenibles, al tiempo que se protege la naturaleza y se lucha contra el cambio climático.

Entre los instrumentos que seguirán fomentando las prácticas agrícolas sostenibles en toda la UE, la futura PAC incluye la condicionalidad, que vincula los pagos de la PAC por superficie y por animales a una serie de obligaciones. Además, también introduce los nuevos "eco-esquemas" que tienen como objetivo recompensar a los agricultores por ir más allá en la implementación de prácticas agrícolas sostenibles. Estas prácticas pueden incluir la implantación de sistemas de producción respetuosos con el medio ambiente como la agroecología, la agrosilvicultura y la agricultura ecológica. El marco de desarrollo rural también incluye compromisos de gestión ambiental y climática, cuyo objetivo es compensar a los agricultores y otros beneficiarios por comprometerse voluntariamente a implementar prácticas sostenibles.

5.2. Marco regulatorio europeo en materia de energía

La Directiva 2023/1791 aumenta significativamente la ambición de la UE en materia de eficiencia energética, obligando a los países de la UE a garantizar colectivamente una reducción adicional del 11,7 % en el consumo de energía para 2030, en comparación con las proyecciones del escenario de referencia de 2020.

También otorga por primera vez rango jurídico al «principio de eficiencia energética», de modo que los países de la UE deben tenerlo en cuenta en todas las decisiones políticas y de inversión importantes que se adopten en los sectores energético y no energético. De hecho, el mayor nivel de ambición requiere una mayor promoción de medidas rentables de eficiencia energética en todos los ámbitos del sistema energético y en todos los sectores pertinentes en los que la actividad afecta a la demanda de energía, como la agricultura.

Además, en virtud de esta Directiva revisada, los países de la UE tendrán que garantizar un nivel adecuado de competencia para los profesionales relacionados con la eficiencia energética, adaptándolos a las necesidades del mercado y aplicando requisitos más claros y estrictos para las competencias necesarias. Esto incluye proveedores de servicios energéticos, auditores energéticos, gestores energéticos e instaladores.

El Reglamento (UE) 2017/1369 establece un marco que se aplica a los productos o sistemas relacionados con la energía comercializados o puestos en servicio. Prevé su etiquetado y el suministro de información normalizada relativa a la eficiencia energética, el consumo de energía y de otros recursos durante su uso, así como información complementaria, lo que permite a los clientes elegir productos más eficientes para reducir el consumo de energía. Su artículo 7.2 establece que, cuando los estados miembros ofrezcan incentivos para un producto, deberán aspirar a las clases más altas de eficiencia energética.

La nueva directiva sobre energías renovables eleva el porcentaje de energías renovables en el consumo total de energía de la UE al 42,5 % para 2030, con un suplemento indicativo adicional del 2,5 % para permitir alcanzar el objetivo del 45 %. Cada Estado miembro contribuirá a este objetivo común.

Por último, hay que mencionar la Recomendación de la Comisión Europea de 14 de marzo de 2023 sobre el almacenamiento de energía – Apoyar un sistema energético de la UE descarbonizado y seguro (2023/C 103/01) establece una lista de recomendaciones para garantizar un mayor despliegue del almacenamiento de energía.

5.3. Marco regulatorio europeo en materia de agua

El marco regulatorio sobre el agua reconoce que las aguas de la Comunidad Europea están sometidas a una presión cada vez mayor debido al continuo crecimiento de la demanda, y que es necesario lograr una mayor integración de la protección y la gestión sostenible del agua en ámbitos de la política comunitaria, como la agricultura. Teniendo esto en cuenta, promueve el uso sostenible del agua basado en una protección a largo plazo de los recursos hídricos disponibles.

El proceso de planificación hidrológica es crucial para lograr este objetivo y se basa en la planificación integrada de la gestión de los recursos hídricos por cuencas o distritos hidrográficos. Los estados miembros velarán por que se elabore un plan hidrológico para cada demarcación hidrográfica situada íntegramente en su territorio, que compatibilice la consecución de los objetivos

medioambientales de las masas de agua y los ecosistemas asociados con la atención a las demandas de los diferentes usos del agua, tanto en cantidad como en calidad.

Asimismo, debe establecerse un programa de medidas para alcanzar los objetivos medioambientales y los estados miembros pueden incluir en él medidas de gestión de la demanda, entre otras cosas, el fomento de la producción agrícola adaptada, como los cultivos que requieren poca agua en las zonas afectadas por la sequía.

Por otro lado, debemos referirnos al régimen económico-financiero del agua, basado en el principio de recuperación de costes establecido en la WFD (=el coste de las inversiones realizadas por las administraciones públicas para posibilitar el suministro de agua a los particulares se recupere mediante el pago por el uso del agua por parte de los diferentes usuarios finales). La aplicación de este principio debe hacerse de forma que se fomente el uso eficiente del agua y, por lo tanto, contribuye a los objetivos medioambientales perseguidos, con una adecuada contribución de los distintos usos, de acuerdo con el principio de quien contamina paga, y considerando al menos los usos de abastecimiento, agrícolas e industriales. En virtud de este principio, las administraciones públicas competentes deben establecer mecanismos de repercusión de los costes, que normalmente incluyen bonificaciones para el uso agrícola cuando se demuestre la aplicación de buenas prácticas agrarias.

5.4. Marco regulatorio europeo en materia de productos químicos

Las normativas REACH y CLP afectan a todas las empresas que utilizan productos químicos en el curso de sus actividades industriales o profesionales (usuarios intermedios), no solo a las que producen o importan productos químicos.

De acuerdo con esta normativa, el cloruro de magnesio es una mezcla no clasificada como peligrosa, pero podemos identificar las siguientes obligaciones principales para el uso del cloruro de magnesio en la agricultura profesional de invernadero:

- Utilizar la mezcla únicamente de acuerdo con las medidas de control de riesgos proporcionadas con la información recibida de la cadena de suministro.
- Garantizar que los trabajadores dispongan de información adecuada sobre la mezcla.

5.5. Conclusiones

Tal y como hemos podido comprobar por el análisis realizado, la tecnología propuesta está estrechamente alineada con las recomendaciones estratégicas y la normativa que rige las zonas afectadas por el proyecto.

No obstante, podemos identificar las siguientes recomendaciones de política para facilitar el despliegue de la tecnología propuesta por el proyecto:

1. Garantizar que los profesionales dedicados a la eficiencia energética conozcan la tecnología propuesta y comprendan las ventajas que ofrece en términos de eficiencia energética, en línea con el nuevo mandato de la Directiva (UE) 2023/1791 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 13 de septiembre de 2023, relativa a la eficiencia energética, para garantizar un nivel adecuado de competencia a los profesionales relacionados.

2. La adopción por la Comisión de un acto de conformidad con el artículo 17 del Reglamento (UE) 2017/1369 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 4 de julio de 2017, por el que se establece un marco para el etiquetado energético, con el fin de completar el presente Reglamento mediante el establecimiento de requisitos detallados relativos a las etiquetas para la tecnología propuesta, de modo que los estados miembros puedan ofrecer incentivos para ello de conformidad con el artículo 7.2.
3. En las demarcaciones hidrográficas afectadas por la sequía, incorporación por parte de los estados miembros de medidas de fomento de cultivos que requieren poca agua.
4. Consideración de la tecnología propuesta por parte de las autoridades públicas competentes como buena práctica agrícola merecedora de una bonificación en el régimen económico y financiero del agua.
5. Formación de los trabajadores en el uso seguro del cloruro de magnesio.

Referencias

Sitio web y redes sociales



<https://thegreefa.eu>



<https://x.com/TheGreefa>



<https://www.linkedin.com/company/thegreefa/>



<https://www.youtube.com/@thegreefaprojekt>



https://zenodo.org/communities/thegreefa_h2020_project/



https://explore.openaire.eu/search/project?projectId=corda_h2020::0172da9ca5a679fbb4d0a5f045bd5029

Socios y personas involucradas en TheGreefa

Zurich University
of Applied Sciences



School of
Engineering

IEFE Institute of Energy Systems
and Fluid Engineering

ZHAW

**Zurich University of Applied Sciences – Institute for Energy
Systems and Fluid Engineering**

Serena Danesi – Coordinadora del proyecto

serena.danesi@zhaw.ch

Raphael Baumann

baap@zhaw.ch



WATERGY

Watergy GMBH

Martín Buchholz

martin.buchholz@watergy.de



BAÑERA

Technische Universität Berlin

Reiner Buchholz

reiner.buchholz@tu-berlin.de



INRGREF

**National research Institute of rural engineering, Water and
Forests**

Thameur Chaibi

thameurchaibi@gmail.com

Meriem Soussi

soussi.meriem@gmail.com



SFERA

Sfera società agricola srl

Claudio La Carbonara

claudio.lacarbonara@sferaagricola.it



Hyperborea

HIPERBÓREA

Hyperborea Srl

Norma Zanetti

n.zanetti@hyperborea.com



MEYER

Meyer Orchideen AG

Hanspeter Meyer

hanspeter.meyer@swissorchid.ch

STRANE

STRANE INNOVATION SA

Raphaël Hercelin

raphael.hercelin@strane-innovation.com

Nathalie Vallée

nathalie.vallee@strane-innovation.com

IZNAB

IZNAB SPOLKA Z OGRANICZONA ODPOWIEDZIALNOSCIA

Jakub Pluta

jakub.pluta@iznab.pl

UAL

Universidad de Almería

Francisco Domingo Molina Aiz

fmolina@ual.es

MAS

Moragues y Scade Abogados

Juan Luis Moragues

jlm@mas-abogados.com

Begoña Benito

bbg@grupomas.net

LUH

Leibniz Universität Hannover

Philipp Geyer

philipp.geyer@iek.uni-hannover.de



www.thegreefa.eu



"Este proyecto ha sido financiado por el programa de investigación e innovación Horizonte 2020 de la Unión Europea en virtud del acuerdo de subvención N° 101000801"