

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

A continuación, se describen los resultados y conclusiones del proyecto, para cada una de las fases realizadas:

1. Fase documental: esta fase se ha desarrollado y ha concluido con éxito.

Gracias a la recopilación de datos y resultados de diversos proyectos en la parcela experimental, tanto ya finalizados como en marcha, se pudo definir el punto de partida del proyecto "AXARQUÍA SOSTENIBLE" y se propusieron una serie de mejoras a implementar en la fase experimental. Así, se ha elaborado un informe completo con toda esta información detallada. Además, se ha preparado un informe con mejoras propuestas en el sistema de regeneración de aguas residuales y se ha elaborado un informe con propuestas de mejora para el diseño del sistema de riego para los cultivos objeto de estudio. Por tanto, se puede concluir que los indicadores de progreso y resultados esperados para esta fase documental han sido alcanzados satisfactoriamente.

2. Fase experimental: esta fase se ha desarrollado y ha concluido con éxito.

Durante esta fase se ha adaptado la parcela experimental para llevar a cabo los estudios previstos en cultivos de pitaya y maracuyá, y se han ido implementando distintas acciones para el mantenimiento de la parcela e invernadero a lo largo del proyecto. También se han implementado las mejoras propuestas para sustituir el uso de la planta de tratamiento y regeneración "RichWater" por un tratamiento terciario y una desinfección, capaz de producir agua regenerada para emplearla en cultivos de pitaya y maracuyá. También se ha instalado el sistema de riego en el invernadero y se han instalado 4 puntos de sensorización. Por otro lado, se ha llevado a cabo un seguimiento exhaustivo de la calidad del agua local de pozo y del agua regenerada para riego de los cultivos. Con gran éxito, también se han definido los patrones de riego, el estado nutricional y fisiológico de los cultivos.

Se concluye que se ha implementado y aplicado con éxito el riego de precisión con agua local y agua regenerada, se han definido los patrones de riego óptimos para cada cultivo de pitaya y maracuyá, se han instalado los sensores correspondientes en suelo (macetas) y se ha transferido la información mediante sensores digitales y plataforma nube a la app-web (accesible en web/móvil) para la toma de decisiones. El seguimiento de los estados hídrico y nutricional de los dos cultivos han permitido comprobar que las consignas de riego y fertilización utilizadas se han adaptado muy bien a las necesidades de las plantas, y que el riego con agua regenerada permitió el cultivo sin la aplicación de abonos y sin apenas desajustes fisiológicos, al menos en maracuyá.

Los resultados obtenidos reflejan una buena adaptación de ambas especies al entorno de cultivo en maceta y al manejo agronómico implementado, especialmente en lo referente al riego. Las plantas no mostraron síntomas de desequilibrio hídrico y los niveles de drenaje fueron adecuados, confirmando la eficacia de las consignas de riego definidas a través del sistema IKOS Connect.

En maracuyá, las mediciones de conductancia estomática y potencial hídrico evidenciaron cierto estrés hídrico en las plantas regadas con agua regenerada, aunque sin comprometer su desarrollo. A nivel nutricional, los análisis foliares no detectaron deficiencias relevantes ni acumulaciones perjudiciales, destacando la ausencia de metales pesados y una adecuada concentración de nutrientes clave, incluso sin la aplicación de fertilizantes en el tratamiento con agua regenerada.

En pitaya, se realizaron análisis similares, incluyendo el estudio del contenido de agua y nutrientes en diferentes secciones del cladodio. Al igual que en maracuyá, el riego con agua regenerada resultó viable sin consecuencias fisiológicas negativas destacables.

Como innovación metodológica, se avanzó en la implementación de una técnica de análisis de savia en aguacate y mango, con resultados prometedores que podrían mejorar la precisión y agilidad en el diagnóstico nutricional.

En conclusión, se respalda la viabilidad del uso de agua regenerada como recurso sostenible para el riego de cultivos subtropicales, permitiendo una producción eficiente y respetuosa con el entorno, sin comprometer la salud fisiológica de las plantas.

No obstante, el análisis comparativo de los datos ha evidenciado que el agua regenerada contiene una carga significativa de nutrientes potencialmente beneficiosos, pero también ciertos iones como el sodio (Na^+), que podrían ser perjudiciales para algunas especies vegetales si no se gestionan adecuadamente. Esta información ha sido clave para ajustar las estrategias de fertirrigación y garantizar un uso eficiente y seguro del agua regenerada en sistemas agrícolas.

3. Fase de evaluación: esta fase se ha desarrollado y ha concluido con éxito.

Durante esta fase se ha realizado el estudio y evaluación de distintos parámetros p.ej. análisis de aguas, consumo de fertilizantes, estado nutricional y fisiológico de los cultivos, determinación de la producción y calidad de la cosecha, gasto energético, etc. y el análisis comparativo entre tipos de agua de riego (agua regenerada y agua convencional).

Por un lado, se ha realizado un estudio energético analizando y proponiendo la implementación de una instalación de paneles fotovoltaicos para mejorar y optimizar la eficiencia energética y poder reducir costes operativos del sistema, lo que supondría un ahorro del 57% del consumo energético anual del sistema de regeneración. Para reducir la demanda energética, se ha propuesto la instalación de 15 paneles fotovoltaicos de 575 Wp cada uno (potencia total de 8,63 kWp), conectados a la red y

orientados al sur con una inclinación de 10°. Esta instalación podría cubrir en promedio el 57% del consumo energético anual del sistema, alcanzando un rendimiento máximo en los meses de mayor insolación. Desde el punto de vista económico, la implementación de la instalación fotovoltaica reducirá el gasto eléctrico anual de 4.763 € a 2.587 €, lo que representa un ahorro del 46%. Con una inversión inicial de 16.518,78 €, se estima un período de retorno de entre 5,7 y 7,7 años, y un ahorro acumulado a 25 años de hasta 43.525 €, dependiendo del escenario energético considerado.

También se ha realizado un análisis coste-beneficio (ACB) y se ha evaluado la viabilidad económica del uso de aguas regeneradas en la agricultura de la comarca de la Axarquía. Se han tenido en cuenta aspectos económicos clave como los costes de inversión (CAPEX), los costes de operación y mantenimiento (OPEX), el ahorro en fertilizantes y los ingresos por la venta de agua regenerada. El ACB realizado demuestra que el uso de aguas regeneradas en agricultura puede ser una solución técnica viable y con un balance positivo, especialmente si se optimizan las condiciones de escala y se consideran los beneficios económicos indirectos. Sin embargo, para lograr su adopción efectiva y sostenible, es necesario ajustar ciertos factores económicos y ampliar el enfoque de análisis. Los resultados muestran que, en escenarios de pequeña escala (planta de 72 m³/día), el coste del agua regenerada (1 €/m³) no es competitivo frente al coste del agua convencional (0,15 €/m³), incluso si se consideran los ahorros en fertilización. En cambio, al escalar la capacidad (planta de 150 m³/día), el precio por m³ se reduce significativamente (0,27 €/m³), acercándose a la viabilidad económica, especialmente para cultivos como pitaya y aguacate, donde el ahorro en fertilizantes justifica el sobrecoste. Por otro lado, ajustando el precio del agua regenerada a 0,22 €/m³, se logra una situación económicamente favorable para todos los cultivos analizados. Esto subraya la importancia de establecer modelos de negocio e incentivos públicos que permitan internalizar los beneficios ambientales y sociales, de modo que los proyectos sean rentables más allá del equilibrio financiero inmediato. Además, el análisis realizado no incluye los costes de infraestructura de distribución, asumiendo la existencia de redes disponibles, ni incorpora el valor económico de las externalidades ambientales y sociales. Si se incluyeran aspectos como la reducción de emisiones de CO₂, la menor huella hídrica o los beneficios asociados a la resiliencia hídrica y la economía circular, los resultados serían aún más favorables. El uso de aguas regeneradas se alinea por tanto con múltiples estrategias regionales, nacionales y europeas de adaptación al cambio climático, transición ecológica y modernización del regadío. En este sentido, los proyectos de reutilización no solo deben evaluarse desde una lógica financiera clásica, sino también como inversiones estratégicas que refuerzan la sostenibilidad del sistema agroalimentario en zonas vulnerables como la Axarquía.

Finalmente, se ha llevado a cabo una evaluación del uso de agua regenerada para riego en cultivos de maracuyá y pitaya, analizando tanto los efectos agronómicos y nutricionales de esta práctica como la calidad del agua utilizada. Así, se compararon dos tratamientos: uno con agua de red y fertilización convencional, y otro con agua regenerada sin aporte adicional de fertilizantes. En ambos cultivos, el agua regenerada permitió prescindir de fertilización externa, gracias a su alto contenido en nutrientes esenciales (N, P, K), lo que representa un ahorro potencial para el agricultor. En maracuyá, los parámetros de crecimiento fueron similares entre tratamientos, aunque la producción de frutos fue mayor en plantas con agua de red (12,7 vs. 7,5 frutos/planta en la cosecha principal). En pitaya, el crecimiento y la floración fueron notablemente inferiores con agua regenerada, lo que afectó la producción, aunque sin diferencias estadísticamente significativas en peso de fruto ni en grados Brix.

Desde el punto de vista químico, el agua regenerada mostró una composición rica en nutrientes, especialmente nitrógeno, potasio, calcio y magnesio. Sin embargo, su alta conductividad eléctrica, derivada principalmente del contenido elevado de cloruros por intrusión marina, representa una limitación importante para su uso agrícola directo, requiriendo dilución o tratamiento adicional.

En cuanto a los parámetros biológicos, se logró en general una buena calidad microbiológica del agua. El 87% de las muestras cumplieron los requisitos de la clase A.C. para riego (según el Real Decreto 1085/2024), y un 85% incluso alcanzaron la clase A.B., más exigente. Las incidencias con *E. coli* fueron puntuales y relacionadas con operaciones de mantenimiento en la EDAR.

El agua de red presentó una composición más estable y menor salinidad, aunque con niveles elevados de nitratos, confirmando la condición de zona vulnerable por contaminación agrícola. Pese a esto, su menor contenido en nutrientes limita su uso como fuente de fertilización pasiva.

Se concluye que el uso de agua regenerada en agricultura puede contribuir a una fertilización más sostenible y al ahorro de insumos, siempre que se controlen adecuadamente su salinidad y su calidad microbiológica. Es necesario seguir evaluando su impacto a largo plazo en diferentes cultivos y considerar estrategias complementarias para reducir su contenido en sales, especialmente cloruros y sodio.

Estos resultados preliminares se presentaron en la jornada final del proyecto el 26/02/2025 en Vélez-Málaga, frente a un gran número de participantes, teniendo una gran acogida entre las personas asistentes.

4. Fase de divulgación: esta fase se ha desarrollado y ha concluido con éxito.

Durante los 24 meses de proyecto, se han llevado a cabo numerosas actividades para divulgar y comunicar acerca del grupo operativo "AXARQUÍA SOSTENIBLE", incluyendo sus objetivos y actividades principales, resultados y conclusiones, creación de la página web, perfiles en redes sociales, desarrollo y distribución de material de difusión, etc.

Al comienzo del proyecto se creó la página web del Grupo Operativo (i.e., www.axarquiasostenible.es) (que ha alcanzado las 1000 visitas durante el proyecto) y permanecerá activa hasta dos años tras su finalización. Se puede destacar la creación de una sección dedicada a "Resultados", diseñada con un enfoque visual y dinámico, en formato de carrusel. También la sección

dedicada a “Axarquía Sostenible App”, la herramienta digital innovadora orientada a la mejora de la gestión del fertirriego en cultivos objeto de estudio. También se han creado cuentas corporativas del proyecto en LinkedIn y en X, logrando más de 460 seguidores.

Asimismo, se han elaborado y publicado tres boletines de noticias (newsletters) del grupo operativo a lo largo del proyecto. De igual forma, se han impreso 400 flyers del proyecto, 100 libretas y bolígrafos, 1 roll-up, 1 póster permanente, y se ha llevado a cabo la grabación de un video-reportaje del grupo operativo en la parcela experimental.

Por otro lado, a lo largo del proyecto, se han llevado a cabo 2 talleres de formación y capacitación con actores clave, involucrando a más de 70 participantes. El primer taller se organizó el 8 de octubre de 2024 en la parcela experimental, cuando el estudio comparativo de fertirriego con agua regenerada y agua local ofrecía varios meses de resultados, mientras que el segundo taller se organizó el 26 de febrero de 2025 en Vélez-Málaga, junto a la jornada final del proyecto, cuando la herramienta-aplicación web digital para control de nutrientes estaba desarrollada y disponible para ser utilizada.

También se han realizado diversas actividades de “networking” para explorar sinergias y vías de colaboración, que han servido para maximizar el impacto del proyecto y sus resultados, llegando a organizar 15 actividades de “networking”. Asimismo, se han llevado a cabo numerosas actividades de sensibilización y difusión orientadas al público en general y a otros agentes clave como agricultores, autoridades, regantes, etc. a través de 5 visitas a la parcela experimental, realización de 3 jornadas técnicas, etc. y también mediante asistencia y participación de diversos eventos organizados a nivel local, regional e internacional.

Finalmente, se ha elaborado un “practice abstract” (ficha técnica) siguiendo la plantilla de la Asociación Europea de Innovación de agricultura (EIP-Agri, por sus siglas en inglés) cuyo objetivo ha sido facilitar y promover la comunicación de los resultados del proyecto.

5. Fase de coordinación: esta fase se ha desarrollado y ha concluido con éxito.

En esta fase se ha desarrollado la coordinación y gestión del proyecto durante todo el proyecto. Todas sus tareas se han llevado a cabo con éxito, asegurando la correcta realización de las actividades de cada fase y la colaboración entre todos los miembros del grupo operativo. Entre las actividades principales se incluye la supervisión técnica y administrativa del proyecto y la preparación y entrega de toda documentación requerida (p.ej. informe de seguimiento, informe final, informes técnicos, informes financieros, etc.).

Se han llevado a cabo un total de 13 reuniones de seguimiento entre los socios del proyecto, en modalidad presencial y online, además de 3 reuniones generales del proyecto (inicial-M1, intermedia-M12 y final-M24). Todas las actas de las reuniones han quedado recogidas en un informe detallando los temas tratados y los acuerdos alcanzados. Asimismo, se han realizado numerosas visitas de campo a la parcela demostrativa, por parte de todos los miembros del grupo operativo, para implementación de las acciones técnicas y supervisión de los trabajos realizados.

También cabe destacar la elaboración de un “Plan de difusión y explotación de resultados” que ha sido firmado por cada miembro beneficiario del grupo operativo.

En esta fase también se ha coordinado y supervisado la elaboración de los informes técnicos y financieros requeridos a lo largo del proyecto, para su correspondiente entrega en tiempo y forma. Un total de 18 informes técnicos han sido elaborados y entregados para justificar el trabajo realizado a lo largo de todo el proyecto, abarcando todas las acciones y fases establecidas.