

(E1.2.1.) ESTRATEGIA PARA LA GESTIÓN RESPONSABLE DEL FOSFATO

Interreg
Sudoe



Co-funded by
the European Union

Phos4Cycle

Índice

1. Introducción.....	2
1.1. Contexto.....	2
1.2. Objetivos.....	5
1.3. Estructura.....	6
2. Visión, Objetivos y Gobernanza.....	6
2.1 Visión.....	6
2.2 Objetivos.....	7
2.3 Gobernanza.....	8
3. Marco regulatorio y estratégico.....	9
4. Áreas de acción estratégica.....	11
4.1 Monitoreo Integrada.....	11
4.2 Modelo de pronóstico.....	15
4.3 Medidas preventivas y mejores prácticas.....	20
5. Estrategias agrícolas.....	21
5.1 Práctica Tradicional.....	21
5.2 Prácticas Alternativas.....	22
6. Plan de acción.....	23
6.1 Medidas.....	23
6.2 Programación.....	26
6.3 Instrumentos de apoyo y financiación.....	26
6.4 Indicadores.....	27
7. Plan de Entrenamiento.....	27
7.1 Objetivos del Plan de Formación.....	28
7.2 Público objetivo y contenido.....	28
7.3 Estructura de las actividades de formación.....	29
7.4 Evaluación y verificación de los resultados.....	30
8. Referencias bibliográficas.....	31

1. Introducción

1.1. Contexto

La región SUDOE enfrenta complejos desafíos territoriales, económicos y ambientales, que se ven intensificados por sus características: un sector primario y una actividad ganadera sólidos, y una extensa superficie agrícola. La gestión de las prácticas agrícolas y ganaderas tiene implicaciones directas y significativas para la calidad de los recursos hídricos y la salud de los suelos de la región.

Desde una perspectiva agrícola, las deficiencias en el manejo del suelo, en particular la aplicación inadecuada de fertilizantes fosfatados en la agricultura y la ganadería, provocan una acumulación excesiva de fósforo en el suelo, lo que resulta en su degradación y la contaminación de los cuerpos de agua. Este fenómeno, a menudo denominado contaminación difusa de origen agrícola y ganadero, se ve agravado por la erosión hídrica, las lluvias intensas y la configuración topográfica de las cuencas fluviales, que facilitan el transporte de fósforo particulado y disuelto a los cuerpos de agua. Desde la perspectiva de los cuerpos de agua, el fenómeno de eutrofización resultante de prácticas agrícolas deficientes compromete la cantidad y la calidad del agua, reduce la biodiversidad acuática y altera los servicios ecosistémicos de las cuencas fluviales. Además de la eutrofización de las aguas superficiales, el fósforo también puede llegar a las masas de agua subterráneas, aunque a través de mecanismos distintos y, por regla general, menos significativos. No obstante, la contaminación de los acuíferos por fósforo tiende a ser tan persistente como difícil de revertir. Muchos de los cuerpos de agua de la región SUDOE ya presentan presiones significativas asociadas a la contaminación por fosfatos, en particular en zonas con una elevada densidad agrícola y ganadera, sobre todo en explotaciones lecheras, avícolas y de producción de cereales.

Paralelamente, la Unión Europea depende en gran medida de las rocas fosfáticas, concentradas en un reducido número de países proveedores, lo que hace que la cadena alimentaria europea sea vulnerable a las crisis geopolíticas y a la fuerte volatilidad de los precios, amenazando así la seguridad del suministro agrícola. De acuerdo con diversas directrices europeas, en particular las relativas al fortalecimiento de soluciones basadas en la circularidad y la valorización local de los flujos de fósforo existentes, la gestión eficiente del fósforo en los sistemas agrícolas y ganaderos representa no solo una necesidad ambiental, sino también una oportunidad estratégica para afianzar la

competitividad del sector primario europeo y contribuir a la protección de los ecosistemas y a la soberanía alimentaria de la región SUDOE.

El «Diagnóstico», realizado inicialmente, permitió caracterizar las presiones sobre los cuerpos de agua y el suelo asociadas a las prácticas agrícolas en la zona SUDOE, identificar zonas sensibles y vulnerabilidades territoriales, y cartografiar el marco normativo y las iniciativas existentes. Los principales resultados de este diagnóstico sustentan las opciones estratégicas y sectoriales desarrolladas en este documento.

La “Estrategia para la Gestión Responsable de Fosfatos” busca contribuir a la respuesta necesaria ante un problema ambiental de gran relevancia, aunque menos conocido que la contaminación por nitratos. La contaminación del agua y el suelo por fosfatos de origen agrícola ha sido poco explorada en el ámbito de las políticas agroambientales europeas, a pesar de su impacto significativo y creciente en la calidad de las masas de agua y la integridad de los ecosistemas acuáticos en la región SUDOE.

Dar visibilidad al problema del fósforo, proporcionarle herramientas técnicas y traducirlo en directrices estratégicas concretas y adaptadas al territorio es, en definitiva, la contribución esencial que pretende ofrecer el proyecto Phos4Cycle. Esta contribución, construida a través de un proceso de cambio dinámico, secuencial y adaptativo (Figura 1), se basa en tres dimensiones interrelacionadas: los supuestos que hacen posible el cambio; la cadena de valor del conocimiento, que va desde el diagnóstico hasta la protección de los ecosistemas, pasando por la generación de conocimiento, el desarrollo de soluciones y la capacitación de técnicos y agricultores; y el horizonte de transformación a largo plazo, en el que las acciones locales convergen hacia los objetivos europeos de sostenibilidad, economía circular y protección de los recursos hídricos. El carácter adaptativo del proceso permite que este aprenda y evolucione con el tiempo. La sostenibilidad del espacio SUDOE es el resultado de un proceso de construcción colectiva, gradual y basado en la evidencia, en el que el conocimiento capacita, la capacitación moviliza y la acción transforma.

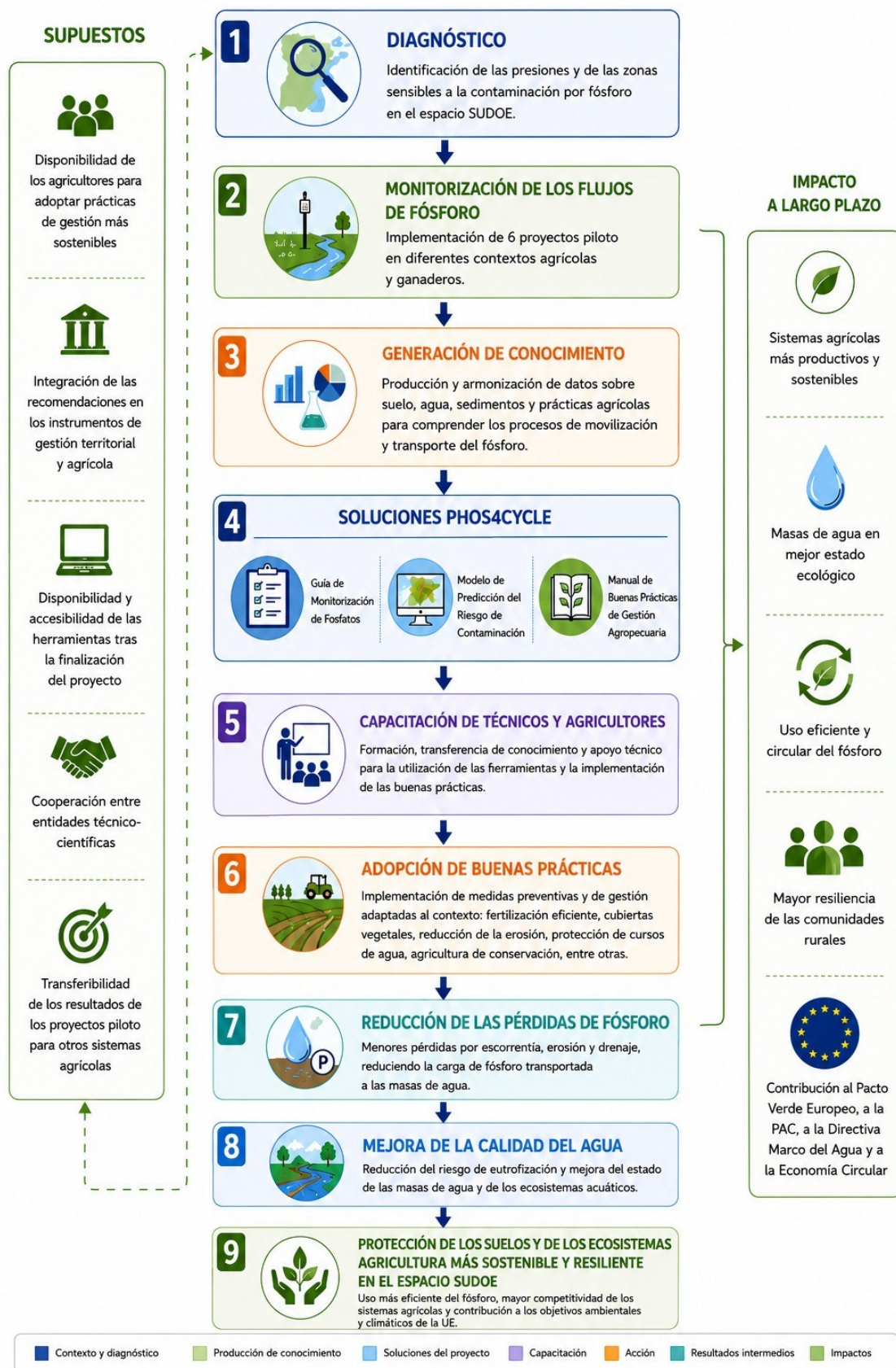


Figura 1 - Proyecto Phos4Cycle, cadena causal desde el diagnóstico hasta el impacto en el espacio SUDOE.

1.2. Objetivos

Este documento tiene como objetivo establecer una Estrategia para la Gestión Responsable de Fosfatos en la zona SUDOE, contribuyendo a la prevención y reducción de la contaminación por fosfatos y promoviendo prácticas agrícolas que favorezcan la protección, conservación y recuperación de suelos y cuerpos de agua. Se trata de un instrumento de orientación estratégica que busca sistematizar y traducir el conocimiento científico y técnico generado a lo largo del proyecto, en particular el derivado de la implementación de proyectos piloto en los diferentes sistemas agrícolas y ganaderos estudiados en el marco de Phos4Cycle, haciéndolos más competitivos.

Desde una perspectiva ambiental, el resultado final tiene como objetivo definir directrices concretas para el monitoreo, la previsión y la reducción de la contaminación por fosfatos proveniente de actividades agrícolas y ganaderas en la zona SUDOE, contribuyendo a la protección, conservación y recuperación de suelos y masas de agua superficiales y subterráneas afectadas o en riesgo de contaminación. Para ello, integra los resultados de seis proyectos piloto implementados en sistemas de producción representativos en Portugal, España y Francia, en una estrategia que identifica zonas de riesgo crítico, las prácticas de gestión más eficaces y las medidas preventivas y correctivas prioritarias para cada contexto territorial. Desde una perspectiva técnica y operativa, el documento tiene como objetivo proporcionar a las entidades asociadas, a los servicios del sector agrícola y a las autoridades competentes un marco de actuación estructurado que integre las tres soluciones desarrolladas: la Guía de Seguimiento de Fosfatos, el Modelo de Previsión del Riesgo de Contaminación y el Manual de Buenas Prácticas de Gestión Agropecuaria. La estrategia articula estos instrumentos en un plan de acción para la adopción efectiva de soluciones por parte de los productores y las organizaciones del sector. Desde la perspectiva de la gobernanza y la transferencia de conocimiento, el resultado tiene como objetivo apoyar la toma de decisiones en diferentes niveles (desde las explotaciones agrícolas hasta las administraciones regionales y nacionales), promoviendo la integración de recomendaciones técnicas en los instrumentos de política agroambiental existentes, a saber, los Planes de Gestión de Cuencas Hidrográficas, los Planes Estratégicos de la PAC y los esquemas agroambientales y climáticos PEPAC en Portugal, España y Francia. También contribuye a cumplir los indicadores de desempeño del Programa Interreg SUDOE 2021-2027, específicamente *RCO83* (estrategias y planes de acción desarrollados conjuntamente) y *RCR79* (estrategias y planes de acción comunes adoptados por las organizaciones, con la adopción por parte de cinco entidades del consorcio).

Este documento también busca garantizar la transferibilidad y replicabilidad de las soluciones desarrolladas en el marco del proyecto Phos4Cycle a otros territorios de la región SUDOE con características edafoclimáticas y productivas similares. El enfoque transnacional adoptado, que reunió a socios de tres países con sistemas de producción diferentes y contrastantes, asegura que las recomendaciones estratégicas cuenten con una sólida base empírica y un ámbito de aplicación que trascienda los límites geográficos de los proyectos piloto, contribuyendo así de manera sostenible a la gestión sostenible del fósforo en la región SUDOE.

1.3. Estructura

Este documento está estructurado en siete capítulos principales:

Capítulo 1 - Introducción, presenta el contexto territorial y ambiental, el diagnóstico de contaminación, la relevancia del proyecto y los objetivos del documento final.

Capítulo 2 - Visión, Objetivos y Gobernanza, define la visión estratégica, los objetivos generales y específicos, y el modelo de gobernanza propuesto.

Capítulo 3 - Marco Regulatorio y Estratégico, presenta el marco regulatorio europeo y nacional de cada país, haciendo referencia a los principales instrumentos de política europeos y nacionales relevantes para la gestión del fósforo en el área SUDOE.

Capítulo 4 - Ejes de Acción Estratégica, describe los tres ejes fundamentales de la estrategia: monitoreo georreferenciado, modelo de pronóstico y acción preventiva.

Capítulo 5 - Estrategias Agrícolas, presenta las estrategias agrícolas habituales y alternativas para cada sistema de producción estudiado en Phos4Cycle.

Capítulo 6 - Plan de Acción, programa la estrategia en un programa de medidas con un cronograma e indicadores.

Capítulo 7 - Plan de Capacitación, define el marco de capacitación para técnicos y agricultores.

2. Visión, Objetivos y Gobernanza

2.1 Visión

La “Estrategia para la Gestión Responsable del Fosfato” tiene como objetivo definir directrices para el monitoreo, la previsión y la reducción de la contaminación por fosfato mediante una gestión adecuada de las actividades agrícolas y ganaderas que puedan contribuir a la acumulación de fósforo en los suelos y a la eutrofización de las cuencas hidrográficas. La estrategia que se adoptará busca maximizar la productividad agrícola y proteger los recursos hídricos y del suelo, y se basa en un equilibrio riguroso entre la aplicación de las cantidades necesarias de fósforo a los cultivos y la prevención de su pérdida al medio ambiente.

La visión que guía esta estrategia surge de la necesidad urgente de proteger los cuerpos de agua dentro de la región SUDOE y del reconocimiento del fósforo como un recurso estratégico escaso. Esto se traduce en un compromiso colectivo para transformar la manera en que los sistemas agrícolas gestionan este nutriente, convirtiéndolo en un recurso valioso que debe comprenderse, conservarse y apreciarse.

"La zona SUDOE gestiona el fósforo como un recurso estratégico: monitorea sus flujos con rigor científico, previene su pérdida en los cuerpos de agua, lo recicla en las cadenas de valor agrícolas y capacita a sus productores para una agricultura sostenible, resiliente y competitiva convirtiendo así un reto medioambiental en una oportunidad estratégica para el sector primario y en una garantía para la protección de los ecosistemas acuáticos de la región "

Esta visión integra tres dimensiones complementarias: la dimensión ambiental, centrada en la protección de los ecosistemas acuáticos y la reducción de la contaminación difusa; la dimensión agronómica, orientada al uso eficiente de nutrientes y a la disminución de la dependencia de fertilizantes minerales importados; y la dimensión socioeconómica, que busca fortalecer la competitividad y la sostenibilidad de los sistemas agrícolas en la región SUDOE. La visión se alinea con los objetivos del Pacto Verde Europeo, la Estrategia «De la Granja a la Mesa», la Directiva Marco del Agua (2000/60/CE) y el Plan de Acción de Economía Circular de la Comisión Europea, contribuyendo a los objetivos de

reducción de la contaminación y uso sostenible de los recursos establecidos para 2030 y 2050.

2.2 Objetivos

La “Estrategia para la Gestión Responsable de Fosfatos” se basa en el trabajo desarrollado a lo largo del proyecto Phos4Cycle y en los resultados obtenidos, y contribuirá a apoyar a los responsables de la toma de decisiones y a los agentes económicos en un marco de acción que integre las actividades agrícolas y ganaderas desde una perspectiva de prevención y eficiencia. Su principal objetivo es contribuir a la reducción y mitigación de la lixiviación y escorrentía de fosfatos procedentes de la agricultura y la ganadería hacia las masas de agua de la zona SUDOE, garantizando el cumplimiento de la Directiva Marco del Agua y los objetivos de la UE para 2050. Al mismo tiempo, permite reducir la dependencia de los fertilizantes minerales importados y aumenta el valor de los productos agrícolas y ganaderos, asegurando su idoneidad mediante prácticas sostenibles.

La “Estrategia para la Gestión Responsable de los Fosfatos” también contribuirá a los siguientes objetivos específicos :

- Para mejorar el conocimiento sobre la dinámica del fósforo: implementar sistemas de monitoreo integrados y replicables que permitan a los productores y a las diversas entidades involucradas conocer con precisión los niveles de fósforo en el suelo y el agua, identificar zonas de riesgo y evaluar el impacto de las prácticas de manejo.
- Para prevenir la transferencia de fosfatos a los cuerpos de agua: definir y promover medidas preventivas adaptadas a cada sistema de producción, basadas en los resultados de los proyectos piloto, que reduzcan significativamente el riesgo de lixiviación y escorrentía superficial de fósforo.
- Para reducir la dependencia de los fertilizantes fosfatados minerales: promover una gestión eficiente de los nutrientes, la valorización de los efluentes orgánicos y la aplicación de enmiendas sostenibles (como el biocarbón), reduciendo así la aplicación de fertilizantes minerales sintéticos y los costes de producción asociados.
- Para capacitar a técnicos y agricultores: desarrollar e implementar un plan de capacitación integral que garantice la transferencia de los

conocimientos científicos y técnicos generados en el proyecto a los productores y entidades con responsabilidades en la gestión agroambiental.

- Para apoyar la toma de decisiones y la gobernanza: proporcionar a las autoridades competentes presentes en el territorio (administraciones regionales, entidades de gestión de cuencas hidrográficas y agencias de extensión rural, entre otras) instrumentos técnicos y estratégicos para la integración de la gestión del fósforo en las políticas agrícolas y ganaderas, la planificación del uso de la tierra y la protección del medio ambiente.
- Para fomentar la transferibilidad y la replicabilidad: asegúrese de que las soluciones desarrolladas en el marco de Phos4Cycle, la Guía de Monitoreo, el Modelo de Predicción de Riesgos de Contaminación y el Manual de Buenas Prácticas sean aplicables en otros territorios dentro del área SUDOE con condiciones similares.

2.3 Gobernanza

La implementación de la “Estrategia para la Gestión Sostenible de Fosfatos” implica un modelo de gobernanza basado en cuatro pilares. El primero es la participación de las partes interesadas, donde los agricultores, los técnicos agrícolas, las entidades de gestión de cuencas fluviales y las autoridades competentes deben reconocerse como participantes en la construcción e implementación de la estrategia, a través de procesos de consulta en territorios piloto, con el apoyo de las cooperativas agrícolas y la coordinación entre los socios del consorcio. El segundo es la recopilación sistemática de información orientada a la toma de decisiones; la red de monitorización que proporciona datos continuos sobre la dinámica del fósforo en el suelo, los sedimentos y el agua, cuyo análisis regular respalda las opciones estratégicas, evalúa la efectividad de las medidas y justifica los ajustes necesarios, siendo compartido entre todos los socios y autoridades competentes. El tercero es la promoción de interacciones entre los diferentes niveles y actores del sistema, creando puentes entre el conocimiento científico producido y su adopción práctica en el campo. La complejidad de la gestión del fósforo, que involucra a tres países con marcos regulatorios distintos, exige mecanismos que faciliten el intercambio de experiencias, el aprendizaje mutuo y la transferencia de conocimiento entre territorios. El cuarto es el desarrollo de la capacidad técnica; La adopción efectiva de buenas prácticas depende directamente de las habilidades de quienes las aplican. Por lo tanto, garantizar la capacitación de técnicos y

agricultores, proporcionar herramientas accesibles de apoyo a la toma de decisiones y mantener actualizados los conocimientos disponibles son condiciones indispensables para que la estrategia produzca resultados concretos y duraderos sobre el terreno.

La estructura de gobernanza propuesta se organiza en cuatro niveles. A nivel transnacional, el consorcio Phos4Cycle, liderado por ITAGRA.CT y que reúne a todos los beneficiarios de Portugal, España y Francia, se encarga de la coordinación de la estrategia, la armonización metodológica y la presentación de informes al Programa Interreg SUDOE. A nivel nacional y regional, las administraciones competentes de cada país —el Gobierno de La Rioja, el Ministère de l'Agriculture y, en Portugal, el INIAV (Instituto Nacional de Investigación Agraria y Veterinaria, I.P.) y la ARH Centro (Administración de la Región Hidrográfica del Centro), se encargan de trasladar las recomendaciones a las políticas nacionales y de integrarlas en los Planes de Gestión de Cuencas Hidrográficas y en los Planes Estratégicos de la PAC. A nivel sectorial y técnico, las entidades académicas, las cooperativas agrícolas y los servicios del sector agrícola garantizan la puesta en marcha de los proyectos piloto, la formación de técnicos y agricultores y la transferencia de los conocimientos generados. Por último, a nivel de explotación, los agricultores y ganaderos son los protagonistas del cambio, y les corresponde la adopción de buenas prácticas, el registro de datos y la participación en las acciones formativas previstas en el proyecto.

3. Marco regulatorio y estratégico

La gestión sostenible del fósforo en los sistemas agrícolas y ganaderos de la zona SUDOE se enmarca en el marco normativo europeo y nacional de cada país, que reconoce la contaminación por nutrientes como una de las principales amenazas para la calidad del agua y la salud del suelo. La Tabla 1 sistematiza los principales instrumentos políticos europeos y nacionales relevantes para la gestión del fósforo en la zona SUDOE, identificando para cada uno su ámbito de aplicación y su contribución específica a los objetivos de esta estrategia.

Tabla 1 – Resumen de los principales instrumentos políticos europeos y nacionales relevantes para la gestión del fósforo.

Instrumento	Relevancia para la gestión del fósforo
Directiva Marco del Agua (2000/60/CE)	Instrumento fundamental de la política hídrica europea. Define objetivos de calidad para las aguas superficiales y subterráneas, límites de concentración de fosfato, seguimiento obligatorio y planes de gestión de cuencas hidrográficas. El fósforo se controla como factor determinante de la eutrofización.
Directiva sobre nitratos (91/676/CEE)	Esto requiere la designación de Zonas Vulnerables a los Nitratos (ZV) y el desarrollo de Programas de Acción con límites para la aplicación de efluentes ganaderos (máx. 170 kg N/ha/año en las ZV). En la zona SUDOE, se han designado 611 ZV en España (aproximadamente el 55 % de la superficie agrícola), 1020 ZV en Francia (aproximadamente el 55 % del territorio agrícola) y 9 ZV en Portugal (aproximadamente el 4,5 % del territorio). Estas zonas también son sensibles a la contaminación por fosfatos.
Reglamento (UE) 2019/1009 — Productos fertilizantes	Establece estándares de control de calidad y composición para fertilizantes, incluyendo límites para los contaminantes (cadmio, plomo, arsénico) presentes en las rocas fosfáticas. Los fertilizantes fosfáticos convencionales pueden contener entre 2 y 100 mg/kg de cadmio, lo que tiene implicaciones para la salud del suelo.
PAC 2023-2027 — Regímenes ecológicos y medidas agroambientales	Integra los requisitos de gestión sostenible del suelo y los nutrientes en los pagos directos. Fomenta la adopción de cultivos de cobertura, la rotación de cultivos, la fertilización basada en análisis de suelo y la protección de los cursos de agua. Es un instrumento clave para la adopción voluntaria de las medidas de esta estrategia.
Directiva (UE) 2025/2360 del Parlamento Europeo y del Consejo de 12 de noviembre de 2025 relativa a la vigilancia y resiliencia del suelo (Directiva de vigilancia del suelo)	Establece el primer marco a escala de la UE para la evaluación y vigilancia de los suelos, con el objetivo general de lograr unos suelos sanos en toda Europa, con fecha objetivo 2050
Estrategia "De la granja a la mesa"	Establece objetivos para una reducción del 20 % en el uso de fertilizantes y del 50 % en el uso de pesticidas para 2030. Además,

	alinea los objetivos de eficiencia en el uso del fósforo con las metas de transición hacia sistemas alimentarios sostenibles.
Legislación nacional (PT/ES/FR)	Portugal: Ley de Aguas (58/2005), PGRH, Ordenanza 259/2012 (ZV), DL 276/2009 (lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales), ENEAPAI 2030. España: Texto reembolsado Ley de Aguas (2001), RD 47/2022, Planes hidrológicos 2022-2027. Francia: Code de l'environnement, Loi sur l'eau, SDAGE/SAGE, Programa Écophyto.

A pesar de la existencia de instrumentos integrales para la protección de masas de agua y suelos, la regulación específica del fósforo, a diferencia de la de los nitratos, sigue siendo incipiente en la mayoría de los Estados miembros. Las Zonas Vulnerables designadas en virtud de la Directiva sobre Nitratos son, a su vez, las áreas con mayor riesgo de contaminación por fosfatos, pero los Programas de Acción correspondientes se centran principalmente en los nitratos, dejando al fósforo sin instrumentos de gestión equivalentes. Esta laguna refuerza la relevancia y la oportunidad de Phos4Cycle: mediante el desarrollo de herramientas de monitorización, modelos predictivos y estrategias de gestión específicas para el fósforo, el proyecto contribuye a subsanar una laguna regulatoria y estratégica de creciente importancia en la zona SUDOE y se diferencia en el contexto de las iniciativas europeas relevantes sobre el fósforo, al tener un enfoque centrado en la prevención de la contaminación en origen, en los sistemas agrícolas y ganaderos.

4. Áreas de acción estratégica

La “Estrategia para la Gestión Responsable de Fosfatos” se estructura en torno a tres ejes complementarios, desarrollados a partir de los resultados de los proyectos piloto. Estos tres ejes permiten operacionalizar la estrategia, articulando el conocimiento (Eje 1: Monitoreo Integrada), el enfoque predictivo (Eje 2: Modelo Predictivo) y la perspectiva de intervención práctica (Eje 3: Acciones Preventivas y Buenas Prácticas).

4.1 Monitoreo Integrada

La gestión eficiente del fósforo en los sistemas agrícolas y ganaderos requiere un conocimiento preciso y actualizado de los niveles de fósforo en el suelo, los sedimentos y el agua. La Guía de Monitoreo de Fosfatos elaborada a partir de la experiencia de los seis proyectos piloto, constituye el instrumento metodológico de referencia para este eje. El enfoque se basa en el análisis integrado de tres matrices interdependientes: suelo, sedimentos y agua, a escala de cuenca o subcuenca. La escala de subcuenca demostró ser, en los proyectos piloto, la unidad funcional más adecuada para comprender la dinámica del fósforo, es decir, para establecer una relación directa entre las prácticas de manejo y la respuesta del sistema, identificar zonas de acumulación y transporte de fósforo dentro de cada sistema de producción e instalar puntos de monitoreo a lo largo de líneas de drenaje representativas. Las áreas de las subcuencas piloto variaron desde 2,10 ha (Aveiro, PT) hasta 47,16 ha (Fedehesa, ES), lo que demuestra la aplicabilidad de la metodología a diferentes escalas y sistemas de producción.

4.1.1 Monitoreo del suelo

El suelo constituye el principal reservorio de fósforo en los sistemas agrícolas y ganaderos. El monitoreo del suelo, basado en un diseño de muestreo estratificado sistemático distribuido en las subcuencas experimentales, busca capturar tanto la variabilidad hidrológica como la variabilidad edáfica interna de cada área piloto. La profundidad de muestreo considerada fue generalmente de 0 a 30 cm, correspondiente al horizonte superficial donde se concentra la mayor parte de la dinámica del fósforo asociada con el manejo agrícola y ganadero del suelo. La ubicación de los puntos de muestreo resultó de la integración de dos criterios complementarios: la delimitación hidrológica de las subcuencas, obtenida a partir de Modelos Digitales de Elevación (MDE), que identifica las zonas de producción, transporte y acumulación de flujos; y la variabilidad edáfica interna, caracterizada mediante mapas de conductividad eléctrica aparente del suelo, obtenidos con equipos de medición proximales instalados en plataformas móviles. Esta combinación permitió definir unidades relativamente homogéneas dentro de cada subcuenca y optimizó la representatividad del muestreo, con una densidad de aproximadamente cinco puntos por subcuenca, ajustada a la superficie y heterogeneidad de cada parcela

piloto. Toda la red de muestreo fue georreferenciada e integrada en un entorno SIG. Las campañas de muestreo, establecidas según un protocolo estructurado en seis fases (un muestreo de referencia inicial, cuatro muestreos intermedios en momentos clave del ciclo del cultivo y un muestreo final), permiten analizar la variabilidad estacional y la respuesta del sistema a las prácticas de manejo. En algunas parcelas piloto, episodios de precipitación intensa durante el invierno y principios de la primavera condicionaron el acceso a las parcelas, reduciendo el número de muestreos intermedios a tres, sin comprometer la validez del análisis ni la coherencia temporal del monitoreo. Los protocolos definidos establecen la determinación sistemática de las siguientes variables edáficas: fósforo disponible (método Olsen), como indicador de la fracción potencialmente movilizable; fósforo total, para la evaluación de la acumulación a largo plazo; textura del suelo, fundamental para interpretar la capacidad de retención de partículas y el riesgo de erosión; pH y carbonatos, que condicionan la solubilidad y fijación del fósforo; y materia orgánica, relacionada con la estabilidad estructural del suelo y la dinámica de nutrientes. Los parámetros analizados permiten evaluar simultáneamente el estado nutricional del suelo, el riesgo de movilización de fósforo y el efecto de las medidas implementadas. El monitoreo analítico se complementó sistemáticamente con el registro de las prácticas agronómicas y ganaderas aplicadas en cada subcuenca: tipo y dosis de fertilización, aplicación de biocarbón, establecimiento de la cubierta vegetal, carga ganadera y distribución del pastoreo. Esto permitió establecer una relación directa entre el manejo y la evolución de las variables monitoreadas, indispensable para interpretar la dinámica del fósforo y desarrollar el modelo predictivo del proyecto.

4.1.2 Monitoreo de sedimentos

Los sedimentos actúan como el principal vector para el transporte de fósforo particulado en sistemas agrícolas y ganaderos. La afinidad del fósforo por las fracciones finas del suelo implica que, durante los eventos de precipitación y erosión, una porción significativa del fósforo movilizado se asocia con los sólidos en suspensión. El monitoreo de sedimentos permite caracterizar el transporte de fósforo asociado a las partículas del suelo, considerado uno de los principales mecanismos de pérdida de fósforo en sistemas agrícolas y ganaderos. Dado que una porción significativa del fósforo del suelo se adsorbe a las fracciones finas, su movilización está directamente vinculada a los procesos de erosión y

escorrentía superficial, por lo que el análisis de sedimentos permite una evaluación integrada de la exportación de fósforo a escala de subcuenca. Los puntos de muestreo se definieron con base en criterios hidrológicos, priorizando las zonas de convergencia de los flujos de escorrentía, particularmente los puntos de salida de cada subcuenca, georreferenciados e integrados en un entorno SIG. El número de puntos de muestreo por piloto debe ajustarse a la configuración hidrológica de cada sistema: en pilotos con subcuencas que convergen en un único punto de salida, se estableció un único punto representativo; en pilotos con salidas diferenciadas, se definieron varios puntos, lo que permitió la caracterización independiente de cada unidad hidrológica. La frecuencia de muestreo se basó en dos campañas principales: una inicial, antes de la aplicación de medidas correctivas, y una final, después de su implementación. Esto permitió una comparación directa entre el estado inicial y el estado final del sistema y una evaluación del efecto de las prácticas adoptadas sobre el transporte de sedimentos y el fósforo asociado. Las muestras recolectadas se obtuvieron utilizando muestreadores de ventana que preservan la estructura original del material y permiten columnas de sedimentos continuas de hasta 1,5 m de profundidad. El procesamiento de laboratorio, en el que las muestras se subdividen por horizontes o intervalos de profundidad, permitió analizar la distribución vertical del fósforo, diferenciar las zonas de acumulación y transporte, y evaluar la relación entre las fracciones granulométricas del suelo y el material movilizado, proporcionando una visión integrada de los procesos de erosión, transporte y deposición en las subcuencas estudiadas.

4.1.3 Monitoreo del agua

El monitoreo de la calidad del agua, definido con base en criterios hidrológicos y priorizando zonas que actúan como puntos de integración de flujo dentro de la subcuenca, garantiza la representatividad de los puntos de medición, evitando ubicaciones con interferencia externa. Específicamente, los puntos considerados son los puntos de salida de subcuencas o sistemas de drenaje, zonas donde se concentra la escorrentía superficial o el drenaje artificial, y ubicaciones representativas del comportamiento hidrológico del sistema. El monitoreo de la calidad del agua en los puntos de salida de la subcuenca permite cuantificar la exportación de fósforo al medio acuático. El monitoreo del agua implementado a través de un enfoque combinado que integra el muestreo puntual y el monitoreo continuo permite capturar tanto la variabilidad

temporal del sistema como los eventos críticos de movilización de fósforo. Los parámetros monitoreados fueron fósforo disuelto y sólidos en suspensión obtenidos en los puntos de salida de la subcuenca o del sistema de drenaje, seleccionados con base en el análisis hidrológico del territorio y la verificación de campo. El muestreo puntual, con muestras recolectadas para análisis de laboratorio en momentos representativos, proporcionó mediciones que sirvieron como base de referencia y calibración para el sistema de medición continua. El monitoreo continuo, garantizado por estaciones multiespectrales inteligentes desarrolladas por AQUACORP, estima los parámetros fisicoquímicos del agua a partir de imágenes ópticas capturadas por cámaras multiespectrales, sin necesidad de contacto directo con el agua, lo que contribuye al desarrollo de un modelo de predicción del riesgo de contaminación por fosfatos. Este enfoque combinado, adoptado por Phos4Cycle, permitió, en cada proyecto piloto, registrar la dinámica del fósforo en condiciones reales de flujo y drenaje, identificar picos de concentración asociados a eventos hidrológicos y evaluar el efecto de las prácticas de gestión en la exportación de fósforo a los cuerpos de agua.

4.1.4 Monitoreo complementario en sistemas ganaderos

Para sistemas ganaderos, como el proyecto piloto ITAVI, el monitoreo se complementa con un conjunto de medidas específicas diseñadas para caracterizar la dinámica del fósforo desde su origen en el sistema de producción, integrando la perspectiva zootécnica con el monitoreo ambiental del suelo, sedimentos y agua. A lo largo del ciclo de producción, desde la entrada del animal hasta la salida y la recolección del estiércol, el registro de indicadores de monitoreo zootécnico, incluyendo la mortalidad diaria, el peso del animal, el consumo de alimento y agua, el manejo de la cama y las condiciones climáticas permite contextualizar la producción de estiércol y su impacto potencial en la acumulación y movilización de fósforo en el sistema. La caracterización del fósforo dentro del sistema de producción abarca tres componentes complementarios. En el alimento, se determinaron el fósforo total, proteína, grasa, calcio y sodio. En el estiércol fresco y compostado, el fósforo móvil se evaluó a través de pruebas de percolación que simulan condiciones de precipitación, estimando la fracción susceptible de lixiviación o movilización en el medio ambiente. También se realizó un balance de masas a escala del sistema, considerando el fósforo ingerido, el fósforo retenido en el crecimiento animal y el fósforo excretado, lo que permitió cuantificar la fracción potencialmente transferida al suelo. Los ensayos de mineralización en muestras biológicas

complementaron este análisis, evaluando la eficiencia de la utilización del fósforo por los animales. Este enfoque integrado es especialmente relevante en sistemas ganaderos, donde los aportes de fósforo al sistema están directamente vinculados al manejo animal, estableciendo la conexión entre la alimentación, la producción de estiércol y los flujos de fósforo observados en el monitoreo ambiental.

4.2 Modelo de pronóstico

El desarrollo de un modelo de predicción del riesgo de contaminación por fosfatos es una de las innovaciones del proyecto Phos4Cycle, coordinado por ITAGRA.CT con la colaboración de todos los socios. El modelo tiene como objetivo identificar, con antelación, los momentos y lugares de mayor riesgo de movilización y transferencia de fósforo a los cuerpos de agua, lo que permite la adopción oportuna de medidas preventivas. El modelo integra datos edafoclimáticos (características del suelo, regímenes de precipitación, temperatura), datos de cultivos y manejo agrícola (fertilización, riego, pastoreo) y datos de monitoreo ambiental (concentraciones de fósforo en suelo, sedimentos y agua) generados por los seis proyectos piloto. Su base de datos abarca los sistemas de producción contrastantes estudiados en Phos4Cycle, lo que garantiza una visión integral de la diversidad agrícola del área SUDOE.

El modelo de pronóstico permite:

- Identificar zonas de riesgo crítico, basándose en la intersección de datos edafoclimáticos y de gestión, cartografiando las áreas con mayor potencial de exportación de fósforo dentro de cada cuenca fluvial, para prever el efecto de los episodios de precipitaciones intensas sobre el riesgo de escorrentía superficial y erosión, con especial relevancia en sistemas con suelos de alto contenido de fósforo disponible.
- Simular escenarios de manejo alternativos, como modificar las tasas de fertilización, introducir cultivos de cobertura o aplicar biocarbón, y cuantificar su impacto potencial en la reducción del riesgo de contaminación.
- Apoyar el desarrollo de sistemas de alerta temprana dirigidos a las autoridades y productores pertinentes, en coordinación con las redes de monitoreo hidrológico existentes.

La transferibilidad del modelo a otros territorios dentro del área SUDOE con características edafoclimáticas y productivas similares a las de las áreas piloto estudiadas es un resultado esperado del proyecto. Su calibración y validación, basadas en datos reales de campo de seis sistemas distintos, le confieren un grado de robustez y representatividad superior al de los modelos desarrollados en condiciones de laboratorio o basados en datos bibliográficos.

El modelo desarrollado se ha implementado en una aplicación web cuya portada se muestra en la Figura 2.



Figura 2 - Página de inicio de la aplicación web del modelo desarrollado.

Esta aplicación recopila la información necesaria tanto del usuario como de Google Earth Engine, partiendo en primer lugar de una región de interés (ROI, del inglés *region of interest*) que proporcione el usuario de dos posibles formas:

- 1) Con un fichero vectorial (GeoJSON, GPKG, ZIP, etc.) que contenga un polígono con la ROI a analizar.
- 2) Construyendo el polígono de análisis en un mapa basado en Open Street Maps.

La interfaz para realizar esta selección se muestra en la Figura 3.



Figura 3 – Interfaz para seleccionar una región de interés (ROI).

Tras seleccionar la ROI, la herramienta descarga los diferentes mapas y la precipitación media anual en la ROI para generar el modelo RUSLE en la zona seleccionada. Además, solicita al usuario la concentración de fósforo en el suelo y el tipo de manejo que ha realizado (Figura 4), para tenerla en cuenta en los cálculos. Los tipos de manejo considerados son los siguientes: manejo tradicional, *biochar* combinado en la fertilización de fósforo o pastos, dosificación variable de fósforo según potencial agronómico, empleo de cubiertas vegetales, ajuste de fósforo en las raciones ganaderas, diseño de *key-line*, empleo de cultivos de relevo *intercropping* y manejo regenerativo/holístico de pastos. Estos son los manejos que se han realizado en el proyecto Phos4cycle, y los resultados de las experiencias realizadas se han utilizado para ajustar este modelo.

1. Contenido de fósforo en el suelo

Contenido de P (g P / kg suelo) ?

- +

2. Tipo de manejo (factor P del RUSLE)

Selecciona el tipo de manejo ?

▼

Factor P aplicado al RUSLE: 1.0

3. Calcular



Figura 4 – Interfaz para introducir la información necesaria en el modelo.

Tras el cálculo se genera un mapa interactivo en el que se muestra la capa RUSLE superpuesta, y donde se puede elegir el punto para calcular tanto la erosión acumulada como el fósforo acumulado (Figura 5).

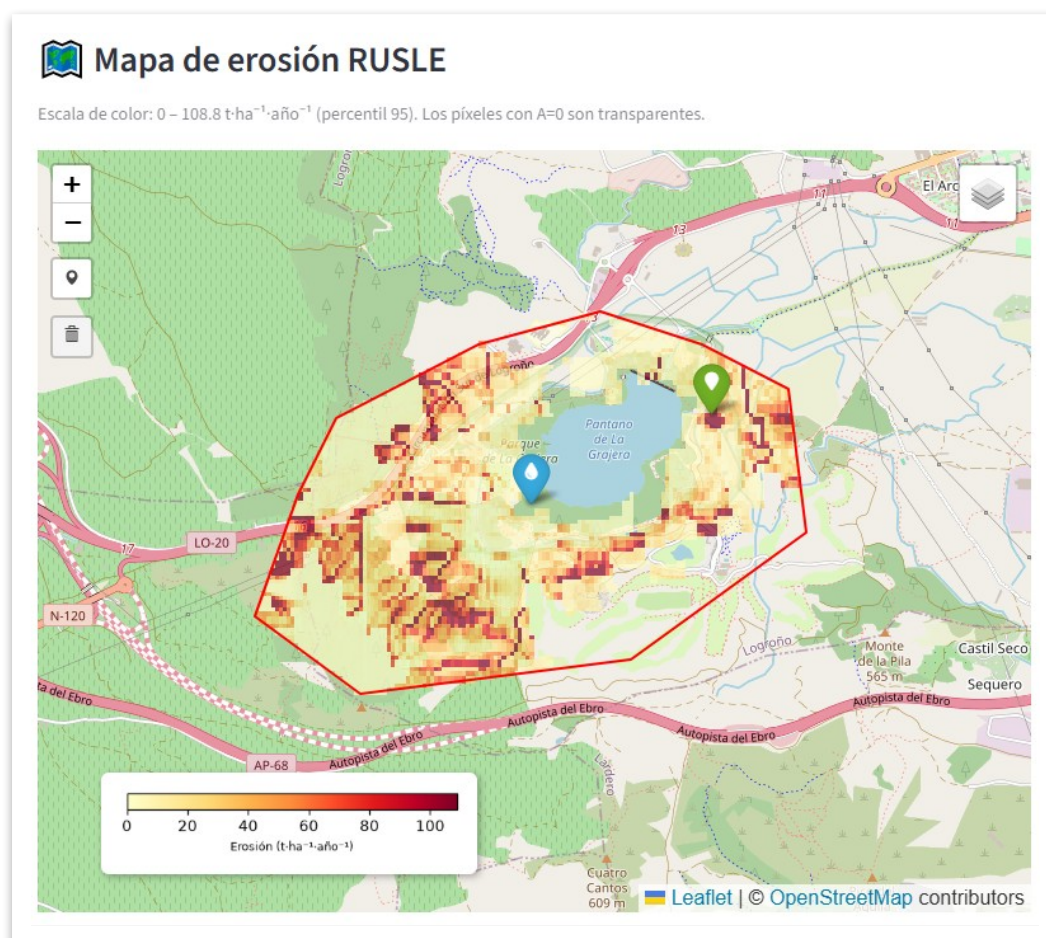


Figura 5 – Interfaz del mapa interactivo con la capa RUSLE superpuesta.

Una vez seleccionado el punto de sumidero, la herramienta realiza los cálculos correspondientes y genera un informe (Figura 6) que se puede consultar en la propia herramienta y exportar a un documento PDF descargable por el usuario. En ella el usuario puede ver el resultado para el tipo de manejo seleccionado, y también para todas las alternativas consideradas en el proyecto.

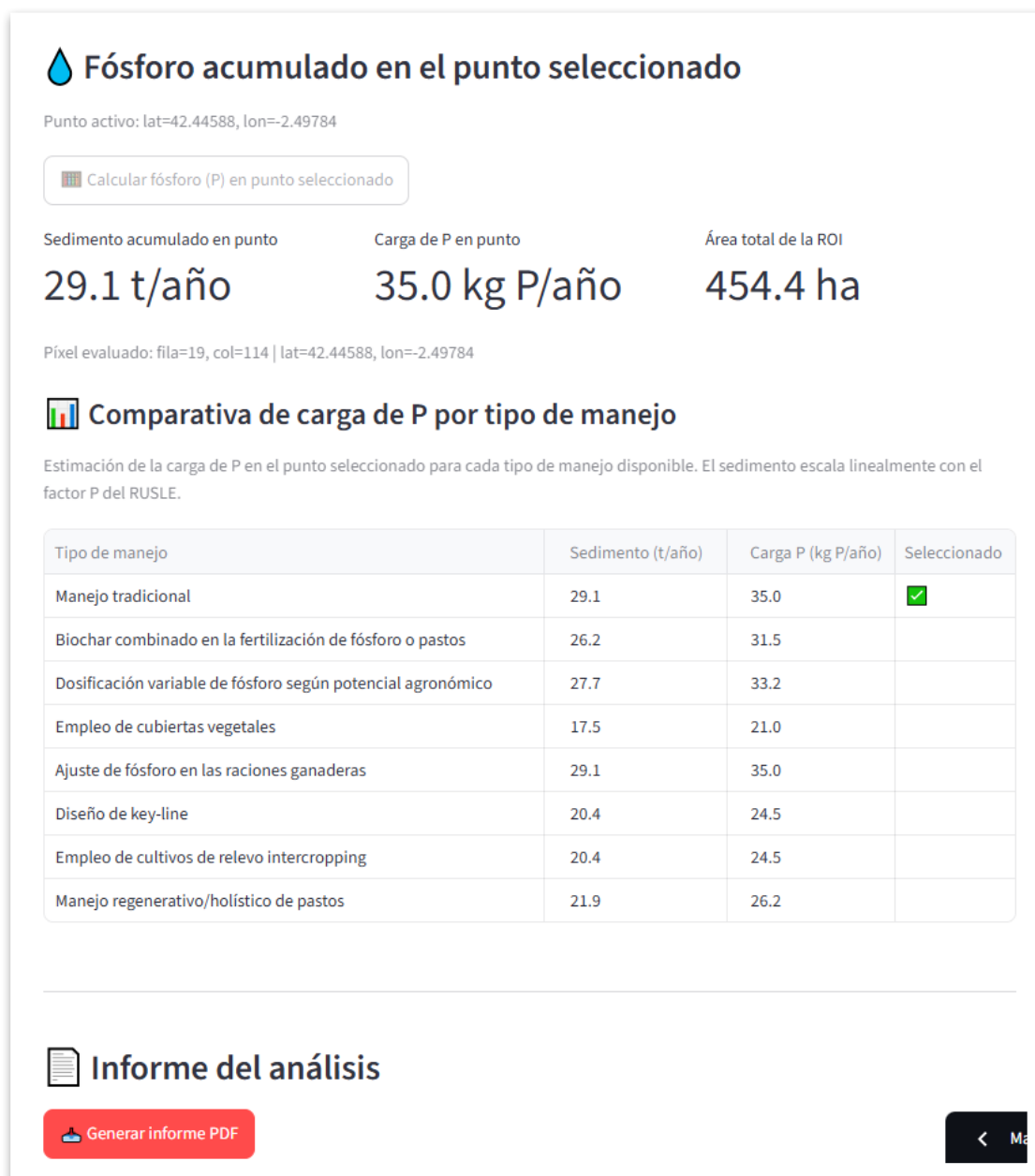


Figura 6 – Interfaz del informe generado por la aplicación.

A modo de resumen, el modelo implementado es capaz de estimar el riesgo de contaminación por fosfatos en una cuenca definida por un área de interés a partir del contenido de fósforo del suelo y del tipo de manejo que se realice en el

mismo. Además, la herramienta en la que se ha implementado dicho modelo permite trabajar con cualquier zona perteneciente a la región SUDOE y permite a cualquier usuario sin necesidad de conocimientos técnicos ni informáticos avanzados analizar una parcela o región y generar un PDF con toda la información relevante.

4.3 Medidas preventivas y mejores prácticas

El tercer eje de la estrategia se centra en la operacionalización de medidas preventivas para reducir el riesgo de lixiviación y escorrentía de fosfatos, identificadas a partir de los resultados de proyectos piloto y sistematizadas en el “Manual de Buenas Prácticas para Reducir el Impacto Ambiental de los Fosfatos en la Agricultura”. Este eje traduce el conocimiento científico y técnico en recomendaciones prácticas, adaptadas a las especificidades de cada sistema de producción y cada contexto territorial.

El Manual de Buenas Prácticas recopila, para cada sistema piloto, las variaciones observadas en la reducción de la erosión y la retención de fósforo asociadas a las diferentes estrategias de manejo probadas, junto con las consideraciones técnicas para su implementación. El Manual se organiza en torno a tres dimensiones transversales a todos los sistemas estudiados: «*Manejo del Fósforo del Suelo*», «*Fertilización*» y «*Protección de Cuerpos de Agua*», complementadas por una dimensión específica de manejo de la producción para el sistema avícola. La primera dimensión, «*Manejo del Fósforo del Suelo*», implica el diagnóstico periódico del estado de fertilidad del suelo, esencial para definir una estrategia eficiente de manejo del fósforo, medidas de protección y conservación del suelo y, finalmente, una referencia al uso de la tierra y manejo de los residuos agrícolas asociados a los sistemas de producción. La segunda dimensión, «*Fertilización*», desarrolla aspectos asociados a la fertilización fosfática, a saber, los principios fundamentales que deben observarse, la cantidad y el tipo de fertilizante a utilizar y el momento de aplicación. En el caso del uso de efluentes ganaderos, el análisis de laboratorio previo a la aplicación y el cálculo del balance de fósforo correspondiente son condiciones esenciales para evitar la sobrefertilización y el aumento innecesario del riesgo de contaminación difusa. La tercera dimensión, «*Protección de los cuerpos de agua*», reconoce el agua como el principal vector de movilización de fósforo, ya sea en forma disuelta por lixiviación y escorrentía superficial, o en forma particulada por erosión hídrica, y organiza las medidas de protección en torno a tres componentes: gestión eficiente del riego para minimizar la escorrentía y la lixiviación, mantenimiento

de zonas de amortiguación vegetadas a lo largo de los cursos de agua como barrera para interceptar el fósforo transportado, y diagnóstico sistemático de los factores de riesgo presentes en cada sistema de producción. En el caso específico de la gestión del fósforo para el sistema avícola, el «Manual de buenas prácticas para reducir el impacto ambiental de los fosfatos en la agricultura» incluye una cuarta dimensión específica asociada con la «Gestión de la producción avícola» que abarca aspectos relacionados con el bienestar animal, la ubicación de las estructuras de alojamiento y almacenamiento de efluentes, y la instalación de áreas de pastoreo.

El manual también incluye una herramienta de diagnóstico rápido, aplicable a todos los sistemas de producción, que permite a los agricultores y técnicos identificar, mediante una tabla de siete factores de riesgo, el nivel de riesgo de contaminación por fósforo en su parcela. Los factores considerados incluyen la textura del suelo, el contenido de materia orgánica, el pH, el contenido de P_2O_5 disponible, la pendiente de la parcela, el tipo de riego y la cobertura del suelo.

5. Estrategias agrícolas

Reconociendo la heterogeneidad de los sistemas agrícolas y ganaderos en la zona SUDOE, esta estrategia integra un componente sectorial asociado a cada proyecto piloto, adaptando las directrices generales a las especificidades de cada sistema de producción representado en los proyectos piloto. El diseño experimental adoptado, basado en el uso de subcuencas hidrográficas como unidades de estudio independientes y comparables, con diferentes escenarios de manejo implementados en condiciones reales de campo, constituye la base de evidencia sobre la cual se fundamentan las recomendaciones asociadas a cada proyecto piloto. Las fichas técnicas del Manual de Buenas Prácticas constituyen el instrumento operativo que respalda este componente, proporcionando recomendaciones técnicas específicas, criterios de diagnóstico y buenas prácticas validadas en campo para cada sistema.

El diseño experimental de Phos4Cycle se basa en el uso de subcuencas como unidades de estudio funcionales, estructuradas en cada proyecto piloto para permitir la comparación directa, en condiciones reales de campo, entre una subcuenca de referencia (*Práctica Tradicional*), representativa de las prácticas convencionales sin medidas preventivas, y subcuencas experimentales donde se implementan estrategias de manejo diferenciadas (*Prácticas Alternativas*). Este

enfoque permite evaluar, a partir de la evidencia generada en el campo, el efecto de cada medida preventiva sobre los procesos de transporte y acumulación de fósforo en el suelo y el agua, considerando la interacción entre las prácticas de manejo, las características edáficas y la conectividad hidrológica de cada sistema de producción.

5.1 Práctica Tradicional

En todos los proyectos piloto, se definió una subcuenca o parcela de referencia para representar las prácticas de manejo convencionales o tradicionales/habituales de cada sistema de producción sin la incorporación de medidas preventivas específicas. En los sistemas agrícolas (ITAGRA, IPC, Gobierno de La Rioja), esta referencia corresponde a la fertilización mineral o a la práctica tradicional del agricultor; en el sistema agroforestal FEDEHESA, a las prácticas ganaderas convencionales sin modificaciones destinadas a reducir el impacto en el suelo; y en el sistema avícola ITAVI, a las áreas habitualmente utilizadas por los animales sin intervención específica, representando las condiciones reales de deposición de estiércol. Esta línea base es fundamental para evaluar, en términos comparativos, la efectividad de las medidas preventivas implementadas en las subcuencas experimentales, proporcionando datos cuantitativos sobre las reducciones efectivas en las exportaciones de fósforo asociadas a cada estrategia de manejo.

5.2 Prácticas Alternativas

Las prácticas alternativas implementadas en las subcuencas experimentales (denominadas SM, véase la Tabla 2) se seleccionaron con base en la literatura científica, lo que permitió comparar el desempeño de este enfoque con las prácticas tradicionales. Se organizan en torno a cuatro mecanismos para controlar la dinámica del fósforo:

- i) Ajuste de la fertilización según el balance de nutrientes.
- ii) Aplicación de biocarbón.
- iii) Uso de cultivos de cobertura.

El ajuste de la fertilización según el balance de nutrientes, mediante la adaptación de los aportes de fósforo a la producción real de los cultivos y las reservas disponibles en el suelo, es una de las estrategias más efectivas para

reducir las pérdidas de fósforo. Esto se logra evitando el exceso de fósforo disponible en el suelo, reduciendo la fracción susceptible a la escorrentía o el drenaje y mejorando la eficiencia en el uso de nutrientes. El ajuste de la fertilización se considera un elemento clave para mitigar la contaminación difusa por fósforo en sistemas agrícolas intensivos.

La aplicación del biocarbón se basa en su elevada superficie específica, porosidad y la presencia de grupos funcionales que favorecen la adsorción de fósforo soluble, especialmente en suelos con baja capacidad de retención, con el objetivo de reducir la lixiviación y el transporte por escorrentía superficial, y de aumentar la interacción con cationes (Ca, Fe, Al) que estabilizan el fósforo en formas menos móviles. Su alta capacidad de adsorción, combinada con una mayor capacidad de intercambio del suelo, mejores propiedades físicas del suelo (porosidad y retención de agua y nutrientes) y estabilidad a largo plazo, convierten al biocarbón en una opción relevante en las estrategias de manejo del fósforo, reduciendo su pérdida hacia los cuerpos de agua.

Finalmente, el uso de cobertura vegetal contribuye a reducir las pérdidas de fósforo al disminuir la escorrentía superficial, la erosión del suelo y aumentar la infiltración y la estabilización estructural del mismo.

En los sistemas ganaderos, la gestión de la presión animal y la alimentación aborda dos aspectos complementarios: la distribución espacial del estiércol, mediante la exclusión del ganado en zonas de mayor riesgo hidrológico y la gestión adaptativa de la carga ganadera para una distribución más homogénea de los nutrientes en el territorio, y la reducción del fósforo excretado en origen, mediante la incorporación de fitasa al pienso animal, lo que permite la hidrólisis del fitato, la principal forma de fósforo en los alimentos vegetales, aumentando la digestibilidad y reduciendo la cantidad de fósforo excretado.

Tabla 2 – Prácticas alternativas consideradas en cada proyecto piloto.

Sistemas	Práctica tradicional	Práctica alternativa
1. Agrícola ITAGRA	Fertilización mineral o manejo agrícola tradicional sin incorporar estrategias de mitigación específicas.	SM1: ajuste de la fertilización en función del equilibrio de nutrientes. SM2: aplicación de biocarbón combinada con fertilización tradicional
GOBIERNO DE RIOJA		SM1: implementación de la cobertura vegetal SM2: aplicación de biocarbón
IPC		SM1: ajuste de la fertilización en función del equilibrio de nutrientes. SM2: aplicación de biocarbón

		combinada con fertilización tradicional
2. Agroforestería FEDEHESA	Ganadería convencional, sin modificaciones destinadas a reducir el impacto en el suelo o a redistribuir los nutrientes.	SM1: Gestión ganadera con un enfoque holístico SM2: zona de exclusión de ganado, prohibido el pastoreo o el pisoteo.
3. Ganadería ITAVI	Áreas comúnmente utilizadas por los animales sin intervención específica, que representan las condiciones reales para la deposición de excrementos.	SM1 ^(*) : aplicación de un ajuste de alimentación, destinado a modificar la composición del estiércol y, en consecuencia, su impacto en la dinámica del fósforo.

Nota: ^(*) Dentro de cada subcuenca, se identifica una variabilidad espacial asociada a la frecuencia de uso del suelo por animales, con mayor presión ganadera en áreas cercanas a edificios y menor en áreas más alejadas. Esta distribución introduce un gradiente funcional que influye en la acumulación de estiércol y el riesgo de movilización de fósforo, complementando el análisis comparativo entre subcuencas.

6. Plan de acción

El Plan de Acción programa la Estrategia para la Gestión Sostenible de Fosfatos mediante un programa de medidas técnicas, estableciendo el cronograma de acciones, los principales actores responsables de su ejecución y los indicadores y la evaluación de resultados. Su estructura refleja los tres ejes estratégicos definidos en el Capítulo 4 y se articula con el Plan de Capacitación, descrito en el Capítulo 7.

6.1 Medidas

Las medidas prioritarias del Plan de Acción se definieron con base en los resultados de los proyectos piloto y en las deficiencias de gestión identificadas en cada sistema de producción. Se organizan en tres grupos temáticos: conocimiento y monitoreo, intervención agronómica y transferencia y política, que corresponden a las diferentes fases del ciclo de manejo del fósforo: conocer, actuar e institucionalizar. En el área de conocimiento y monitoreo, la medida central consiste en implementar protocolos de muestreo integrados en todos los sistemas piloto, incluida la recogida de muestras de suelo y sedimentos, complementada con la instalación de sensores para la monitorización continua de la calidad del agua en los puntos de salida de las subcuencas. Esta medida, bajo la responsabilidad conjunta de ITAGRA, IPC, ITAVI, FEDEHESA y DGAG_G, deberá estar plenamente operativa durante el período 2024-2026 y constituye la

base de evidencia para todas las demás acciones. Adicionalmente, se planifican evaluaciones sistemáticas del contenido de fósforo disponible en el suelo antes de cada ciclo de fertilización, con la creación de mapas de fertilidad para zonas de manejo homogéneas en cada finca piloto. Esta evaluación, responsabilidad de todos los socios, es un requisito indispensable para racionalizar la fertilización fosfórica y reducir el riesgo de sobrefertilización.

En el ámbito de la intervención agronómica, las medidas prioritarias difieren según el sistema de producción. En los sistemas de cultivos leñosos permanentes de La Rioja y cereales de regadío en Castilla y León, la medida prioritaria es el establecimiento de cobertura vegetal entre hileras y franjas de protección ribereñas, con la selección de especies adaptadas a cada contexto mediterráneo, bajo la responsabilidad de la DGAG_GR e ITAGRA, implantada a partir de 2024 y consolidándose durante 2025. Paralelamente, y con aplicación en los proyectos piloto de Castilla y León, La Rioja y Portugal, se prevé la aplicación de biocarbón como enmienda del suelo en las subcuencas con mayor riesgo de exportación de fósforo, en el proyecto piloto de La Rioja, con seguimiento del efecto sobre el fósforo (P-Olsen) y sobre las concentraciones de fósforo en las aguas de drenaje durante todo el período del proyecto.

En los sistemas de producción animal, específicamente en la ganadería lechera de Aveiro (IPC, Portugal) y en la avicultura de las Landas (ITAVI, Francia), la medida prioritaria consiste en el desarrollo e implementación de planes de fertilización orgánica basados en análisis de laboratorio de efluentes y exportaciones de nutrientes de los cultivos, sustituyendo progresivamente el fósforo mineral cuando el diagnóstico del suelo lo justifique. Esta medida, responsabilidad de CALCOB e ITAVI, representa una de las vías más directas para reducir la dependencia de los fertilizantes minerales importados y para potenciar el valor agronómico de los subproductos ganaderos. Específicamente para la producción avícola, el plan también incluye el análisis del pienso con la enzima fitasa para reducir el contenido de fósforo excretado por los animales, cuantificando la reducción de las concentraciones de fósforo en la cama de las aves y evaluando la viabilidad económica de este enfoque.

En el ámbito de la transferencia de conocimientos y las políticas, dos medidas resultan especialmente relevantes. La primera es el desarrollo y la validación de un modelo de predicción del riesgo de contaminación por fosfatos, coordinado por ITAGRA con el apoyo técnico de AQUACORP, previsto para el periodo 2025-2026. El modelo integrará los datos generados por los seis proyectos piloto para producir una herramienta de simulación de escenarios de gestión que puedan

utilizar técnicos y autoridades competentes para apoyar la toma de decisiones preventivas. La segunda medida es la publicación y difusión del “Manual de Buenas Prácticas para Reducir el Impacto Ambiental de los Fosfatos en la Agricultura”, con fichas técnicas para cada sistema de producción, bajo la responsabilidad del IPC con contribuciones de todos los socios. El Manual se distribuirá a través de las cooperativas agrícolas, y otras entidades del sector agrícola y a los socios, constituyendo el instrumento de transferencia de conocimientos más directo para productores y técnicos. La Tabla 3 resume las medidas y la responsabilidad de su implementación.

Tabla 3 – Resumen de las medidas propuestas y responsabilidades para su implementación.

Medición	Sistemas	Acción concreta	Responsable	Término
M1 – Monitoreo integrado	Todos los sistemas piloto	Protocolos periódicos de toma de muestras de suelo y sedimentos; sensores continuos de calidad del agua en los puntos de salida de las subcuencas.	IPC, ITAGRA, CALCOB, ITAVI, FEDEHESA, DGAG_GR	2024-2026
M2 – Diagnóstico (P-Olsen)	Todos los sistemas	Análisis del fósforo disponible antes de cada fertilización; mapas de fertilidad por zona de manejo homogénea; eliminación del fósforo mineral en suelos saturados.	Todos los socios	2024-2026
M3 – Cobertura vegetal y franjas de protección	La Rioja; Castilla y León	Establecer una cubierta vegetal entre las hileras y a lo largo de las franjas ribereñas; seleccionar especies adaptadas al territorio y que minimicen la competencia por el agua.	DGAG_GR, ITAGRA	2024-2025
M4 – Aplicación de biocarbón	Cereales (PT, ES); La Rioja	Aplicar biocarbón, monitorear el P-Olsen y la exportación de fósforo en las aguas de drenaje.	ITAGRA, IPC, DGAG_GR	2024-2026
M5 – Planes de fertilización orgánica	Producción láctea; Avicultura	Análisis de laboratorio de los efluentes; planes basados en las exportaciones reales de cultivos; sustitución del fósforo mineral siempre que Olsen P lo justifique.	CALCOB, ITAVI	2024-2026
M6 – Ajuste	Producción	Realizar pruebas con piensos que	ITAVI	2025-2026

Phos4Cycle

de la alimentació n avícola (fitasa)	avícola (FR)	contengan la enzima fitasa; cuantificar la reducció del fósforo excretado; evaluar la viabilidad económica del método.		
---	--------------	---	--	--

Tabla 3 (cont.) - Resumen de las medidas propuestas y responsabilidades para su implementación.

Medición	Sistemas	Acción concreta	Responsable	Término
M7 – Modelo de pronóstico	Todos los territorios de SUDOE	Calibrar y validar el modelo predictivo con datos de los 6 proyectos piloto; proporcionar una herramienta de simulación de escenarios de gestión para técnicos y autoridades.	ITAGRA, AQUACORP	2025-2026
M8 – Manual de Buenas Prácticas	Todos los sistemas	Publicar un Manual de Buenas Prácticas con fichas técnicas para cada sistema de producción, incluyendo un estudio de costes; distribuirlo a través de cooperativas y servicios de extensión rural.	IPC, todos los socios	2026
M9 – Integración en las políticas	ES, PT, FR	Presentar una estrategia a las autoridades competentes (INIAV, DGAG_GR, Ministerio de Agricultura de Francia, ARH Centro) para su integración en los Planes de Gestión de Recursos Hídricos y en el Programa Nacional para la Aceleración del Crecimiento y la Protección del Medio Ambiente.	IPC, ITAGRA, ITAVI	2026-2027

6.2 Programación

La programación de las medidas sigue una lógica de construcción progresiva: las acciones de seguimiento y diagnóstico comienzan en 2024 y generan los datos que sustentan las intervenciones agronómicas a partir de 2024-2025; los resultados de estas intervenciones se incorporan al modelo predictivo y al Manual de Buenas Prácticas, que se completa en 2026; la difusión de la estrategia a las autoridades competentes tiene lugar en 2026-2027, lo que garantiza la continuidad más allá del horizonte del proyecto.

6.3 Instrumentos de apoyo y financiación

La sostenibilidad financiera de la implementación de la estrategia más allá de la duración del proyecto Phos4Cycle depende de su alineación con los instrumentos de política agrícola y ambiental disponibles. En Portugal, el PEPAC

(Programa para la Aceleración del Crecimiento) prevé ecoesquemas y medidas agroambientales que pueden incorporar prácticas como la gestión de fertilizantes basada en el análisis del suelo, el mantenimiento de la cubierta vegetal y la protección de los cursos de agua. La coordinación con la ARH (Autoridad Regional del Agua), socio asociado del proyecto, es crucial para integrar las recomendaciones en los Planes de Gestión de las Cuencas de los ríos Mondego y Vouga. En España y Francia, los equivalentes de los ecoesquemas en sus respectivos Planes Estratégicos de la PAC (Política Agrícola Común) ofrecen marcos similares, particularmente relevantes para las medidas sectoriales de La Rioja, Extremadura y Nueva Aquitania.

A nivel europeo, el programa LIFE, entre otros, representa una oportunidad para continuar y ampliar las acciones de seguimiento y demostración. El desarrollo de sistemas de pago por servicios ambientales que compensen a los agricultores por adoptar prácticas que reduzcan la contaminación por fosfatos constituye una vía de financiación que debe explorarse a medio plazo, en coordinación con las autoridades regionales y nacionales de cada país socio.

6.4 Indicadores

El seguimiento de la implementación del Plan de Acción se basa en un conjunto de indicadores de desempeño alineados con los indicadores de resultados del Programa Interreg SUDOE 2021-2027. Los indicadores de proceso incluyen el número de campañas de monitoreo realizadas por proyecto piloto, el número de planes de fertilización desarrollados, el área cubierta por las medidas de conservación del suelo y el número de agricultores y técnicos que recibieron capacitación. Los indicadores de resultados incluyen:

- i) la variación en las concentraciones de fósforo total en el agua de salida de las subcuencas experimentales en comparación con la línea base.
- ii) la reducción en las dosis de fertilizante fosfatado mineral aplicadas en las fincas participantes.
- iii) el número de entidades que adoptan formalmente la estrategia y al menos una de las soluciones técnicas desarrolladas en el proyecto.

La recopilación y el análisis de estos indicadores, compartidos entre todos los socios, garantizan la transparencia del proceso y proporcionan la base de evidencia necesaria para la adopción de la estrategia.

7. Plan de Entrenamiento

El Plan de Capacitación constituye el instrumento de fortalecimiento de capacidades que garantiza que el conocimiento técnico generado en el proyecto Phos4Cycle llegue eficazmente a sus destinatarios finales: agricultores, ganaderos, técnicos agrícolas y entidades con responsabilidades en la gestión agroambiental. La capacitación se entiende como un elemento estructurador de la estrategia; la adopción sostenible de buenas prácticas depende de la comprensión, las habilidades y la motivación de los actores que trabajan en el terreno, y no solo de la disponibilidad de herramientas técnicas. El Manual de Buenas Prácticas, mediante fichas técnicas detalladas y un plan de capacitación, tiene como objetivo crear una red de conocimiento que fomente la adopción voluntaria e informada de técnicas alternativas por parte de los productores.

7.1 Objetivos del Plan de Formación

El Plan de Formación persigue cuatro objetivos complementarios, que involucran a los diferentes públicos destinatarios del proyecto y reflejan la convicción de que la transferencia efectiva del conocimiento generado por Phos4Cycle requiere enfoques diferenciados según el perfil, las necesidades y el papel de cada actor en el sistema de gestión del fósforo:

- Capacitar a técnicos de organizaciones asociadas y servicios de transferencia y de extensión rural en la implementación de sistemas de monitoreo de fosfatos y en el uso del modelo de predicción de riesgo de contaminación.
- Dotar a los agricultores y ganaderos de los conocimientos prácticos necesarios para adoptar las medidas descritas en el Manual de Buenas Prácticas, centrándose en los contextos de producción específicos de cada territorio/proyecto piloto.
- Sensibilizar a las autoridades y a los responsables políticos pertinentes sobre la importancia de la gestión sostenible del fósforo y el potencial de integrar las soluciones de Phos4Cycle en las políticas agroambientales.
- Crear redes de conocimiento que fomenten el intercambio de experiencias y la adopción voluntaria de prácticas sostenibles entre los productores de la región SUDOE.

7.2 Público objetivo y contenido

La diferenciación de los públicos objetivo y sus respectivos contenidos y formatos refleja el reconocimiento de que la transferencia efectiva del conocimiento generado por Phos4Cycle requiere enfoques adaptados al perfil, nivel de especialización y rol de cada grupo de actores en la cadena de adopción de las soluciones desarrolladas. La Tabla 4 presenta, en resumen, una propuesta de contenido asociada a cada tipo de público objetivo.

Tabla 4 – Resumen del contenido asociado a cada tipo de público objetivo.

Público objetivo	Contenido principal	Formato
Técnicos e investigadores	Metodología de monitoreo integrado (suelo/sedimentos/agua); uso de la directriz E2.4.2; aplicación del modelo predictivo; interpretación de datos de campo.	Formación técnica avanzada (2-3 días); talleres por sistema de producción; visitas a plantas piloto.
Agricultores y criadores de ganado	Diagnóstico P-Olsen; buenas prácticas de fertilización; manejo de la cubierta vegetal y los efluentes; lectura de fichas técnicas; calculadoras de balance de nutrientes.	Sesiones prácticas de campo (de medio día a un día completo); demostraciones en sitios piloto; especificaciones técnicas simplificadas.
Técnicos y consultores de extensión rural	Interpretación de análisis de suelos; elaboración de planes de fertilización; recomendación de medidas adaptadas; uso de herramientas digitales.	Formación teórica y práctica (1-2 días); acceso a herramientas digitales; seguimiento de casos prácticos.
Autoridades y responsables de la	Marco regulatorio; resultados del proyecto; oportunidades de	Seminarios de transferencia (medio día); informes resumidos;

toma de decisiones	integración en las políticas agroambientales.	reuniones de difusión.
--------------------	---	------------------------

7.3 Estructura de las actividades de formación

Las actividades de capacitación se organizan en dos ciclos secuenciales y complementarios: un primer ciclo dirigido a técnicos e investigadores, que garantiza la capacitación especializada necesaria para la implementación y difusión de las soluciones del proyecto; y un segundo ciclo dirigido directamente a agricultores y ganaderos, centrado en la demostración práctica y la apropiación de buenas prácticas en el campo. La Tabla 5 resume la estructura de las actividades de capacitación.

Tabla 5 - Resumen de la estructura de las actividades de formación

Ciclo	Contenido
1º Formación de técnicos	- Dinámica del fósforo en sistemas agrícolas: ciclo del P, formas y comportamiento en el suelo, mecanismos de movilización y transferencia a cuerpos de agua, impactos de la eutrofización (4 horas) - Monitoreo integrado: metodología de la Guía para el Control de los Fosfatos, protocolos de muestreo de suelo/sedimento/agua, uso de la tecnología AQUACORP, interpretación de resultados (8 horas + visita de campo). - Modelo de previsión de riesgos: resultados del modelo, identificación de zonas de riesgo, simulación de escenarios de gestión, integración con datos de monitorización (4 horas) - Buenas prácticas: sesiones específicas por sistema de producción

	basadas en el Manual de Buenas Prácticas (4 horas)
2º Capacitación para agricultores	- Sesiones de campo en las parcelas piloto: visita guiada a las parcelas experimentales con demostración de las medidas implementadas y presentación de los resultados observados en la retención de fósforo y la calidad del agua. - Talleres prácticos sobre análisis de suelos: interpretación de análisis P-Olsen, determinación de las necesidades de fertilización y elaboración simplificada de planes nutricionales. - Demostración de equipos: presentación de sensores de monitoreo continuo de agua (tecnología AQUACORP) y equipos portátiles para análisis de suelos. - Acceso a herramientas digitales: introducción a las calculadoras de balance de nutrientes y a las fichas técnicas disponibles en línea.

7.4 Evaluación y verificación de los resultados

La evaluación de las actividades de capacitación se basa en un modelo de dos niveles: evaluación de la satisfacción y el aprendizaje inmediato (cuestionarios de satisfacción y pruebas de conocimientos previas y posteriores), aplicada a todas las actividades de capacitación; y evaluación de la transferencia y el impacto en el terreno (entrevistas y visitas de seguimiento después de la capacitación), aplicada a una muestra representativa de los participantes. Los indicadores incluyen:

- i) el número de técnicos y agricultores capacitados por territorio.
- ii) la tasa de adopción de las medidas recomendadas
- iii) la evolución de los indicadores de calidad del agua en los territorios de intervención.

8. Referencias bibliográficas

CE, Comisión Europea. (2019). El Pacto Verde Europeo. COM (2019) 640 final. Comisión Europea.

CE, Comisión Europea. (2020a). Estrategia «De la granja a la mesa»: por un sistema alimentario justo, saludable y respetuoso con el medio ambiente. COM(2020) 381 final. Comisión Europea.

UE, Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea. (2000). Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas. Diario Oficial de las Comunidades Europeas, L 327, 1-73.

CE, Comisión Europea. (2020b). Un nuevo Plan de Acción para la Economía Circular: Por una Europa más limpia y competitiva. COM (2020) 98 final. Comisión Europea.