

Interreg



Cofinanciado por
la Unión Europea
Cofinanciado pela
União Europeia

RISC_PLUS

España - Portugal

Prevención, Preparación y Digitalización

**Resiliencia frente a los Riesgos de Inundaciones y Sequías
derivados del impacto del Cambio Climático en las
Cuencas Internacionales de los ríos Miño y Limia**

risc-plus.eu



Universidade de Vigo



El proyecto 0031_RISC_PLUS_6_E está cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional FEDER en el marco del programa Interreg VI A España - Portugal (POCTEP) 2021-2027

INDICE DE CONTENIDOS

Evaluación preliminar de la vulnerabilidad de la cuenca del Miño-Limia frente al cambio climático: implicaciones para la gestión del riesgo de inundación.

Entregable UVIGO: Actividad 3. Acción 3.1.

1. Introducción y contexto.....	3
2. Objetivo	3
3. Datos y metodología climática.....	4
4. Marco conceptual de vulnerabilidad	5
5. Implicaciones hidrológicas de los cambios proyectados	6
6. Vulnerabilidad frente a inundaciones.....	7
7. Elementos de la cuenca potencialmente más sensibles	9
8. Recomendaciones	10
9. Conclusiones	12
10. Bibliografía	13

1. Introducción y contexto.

El cambio climático constituye un factor de presión adicional sobre las cuencas hidrográficas transfronterizas, al modificar tanto los valores medios de las variables climáticas como la frecuencia, duración e intensidad de los episodios extremos. En las cuencas internacionales de los ríos Miño y Limia, estos cambios pueden afectar simultáneamente a la disponibilidad de recursos hídricos, a la dinámica de las crecidas, a la gestión de infraestructuras hidráulicas y a la capacidad de respuesta ante inundaciones y sequías.

El proyecto RISC_PLUS se orienta a reforzar la prevención, preparación y digitalización frente a los riesgos de inundaciones y sequías derivados del impacto del cambio climático en las cuencas internacionales de los ríos Miño y Limia. En este marco, la evaluación de la vulnerabilidad climática de la cuenca constituye un paso intermedio entre la generación de información climática de alta resolución y su aplicación práctica en herramientas de planificación, modelización y alerta temprana.

La vulnerabilidad de una cuenca no depende únicamente de la magnitud del cambio climático proyectado, sino también de la forma en que el territorio, los usos del suelo, las infraestructuras, los ecosistemas fluviales y los sistemas de gestión responden a dicho cambio. Por ello, una reducción de la precipitación media anual no debe interpretarse automáticamente como una reducción del riesgo de inundación. Las inundaciones están asociadas a episodios concretos de precipitación intensa, a la humedad antecedente del suelo, al estado de los cauces, a la regulación existente, a la ocupación de las llanuras de inundación y a la eficacia de los sistemas de alerta y respuesta.

Este informe se apoya en los entregables previos del proyecto. Por una parte, la base de datos climática con reducción dinámica de escala proporciona series diarias de precipitación y temperatura a 2 m para el periodo histórico y para escenarios futuros ([Fernández-Nóvoa et al., 2026](#)). Por otra, el informe sobre patrones futuros de variables climáticas resume los cambios medios esperados bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5. Finalmente, el entregable relativo a los sistemas de alerta temprana y su modelización asociada permite conectar la información climática con la cadena operativa de simulación hidrológica e hidráulica, en la que la precipitación alimenta modelos hidrológicos y los caudales resultantes pueden emplearse como condiciones de contorno en modelos hidráulicos.

A partir de esta información, el presente documento interpreta los cambios climáticos proyectados en términos de vulnerabilidad de la cuenca Miño-Limia, con especial atención a sus implicaciones para la gestión del riesgo de inundación. El análisis tiene carácter preliminar y cualitativo, pero permite identificar mecanismos de impacto, elementos territoriales sensibles y recomendaciones útiles para la actualización de sistemas de alerta, herramientas de modelización y estrategias de adaptación transfronteriza.

2. Objetivo.

El objetivo general de este informe es analizar las implicaciones de los cambios climáticos proyectados sobre la vulnerabilidad de la cuenca Miño-Limia, con especial atención al riesgo de inundación y a la utilidad de esta información para los sistemas de alerta temprana.

Para ello se parte de los resultados del entregable “Informe sobre patrones futuros de variables climáticas”, centrado en la evolución futura de la precipitación y la temperatura bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5. El informe no pretende sustituir a un estudio hidrológico-hidráulico detallado ni a una

actualización normativa de mapas de peligrosidad, sino proporcionar una interpretación climática e hidrológica preliminar que sirva de base para la integración del cambio climático en la planificación del riesgo, la modelización hidrológica e hidráulica y las medidas de adaptación.

De forma específica, el informe persigue: identificar los principales cambios medios esperados en precipitación y temperatura; valorar sus posibles consecuencias hidrológicas; interpretar la vulnerabilidad relativa de la cuenca bajo distintos horizontes temporales y escenarios de emisiones; señalar los elementos territoriales y operativos más sensibles; y proponer recomendaciones para reforzar la resiliencia de la cuenca y la utilidad de los sistemas de alerta temprana en un contexto climático no estacionario.

3. Datos y metodología climática.

La información climática utilizada procede de la base de datos desarrollada en la Actividad 1 del proyecto RISC_PLUS. Dicha base de datos incluye dos variables atmosféricas fundamentales para el ciclo hidrológico: la precipitación y la temperatura del aire a 2 m. El conjunto de datos cubre las condiciones climáticas históricas del periodo 1985-2014 y proyecciones futuras para 2020-2100 bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 (Fernández-Nóvoa et al., 2026).

Los campos atmosféricos se obtuvieron a partir de simulaciones climáticas CMIP6 regionalizadas dinámicamente mediante el modelo Weather Research and Forecasting (WRF). Para este proyecto se extrajeron los puntos de malla que cubren las cuencas de los ríos Miño y Limia, generando un conjunto de datos espacialmente coherente y adaptado al análisis hidrológico. La base de datos se proporciona en formato NetCDF, con resolución espacial de $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ y resolución temporal diaria.

Sobre esta base se elaboró el entregable de patrones futuros de variables climáticas, en el que se calcularon medias para el periodo histórico de referencia 1985-2014 y para dos horizontes futuros: 2030-2059 y 2070-2100. Los cambios se expresaron como diferencias absolutas y porcentuales respecto al periodo histórico. La **Tabla 1** resume los principales resultados utilizados en este informe y añade una primera lectura orientada a la vulnerabilidad de la cuenca.

Escenario	Horizonte	Cambio precipitación	Cambio temperatura	Lectura para vulnerabilidad
SSP2-4.5	2030-2059	-0,14 %	+1,19 °C	Cambio medio moderado; aumento térmico ya claro. Menor disponibilidad
SSP2-4.5	2070-2100	-6,36 %	+2,12 °C	hídrica y mayor evapotranspiración.
SSP5-8.5	2030-2059	-7,61 %	+1,60 °C	Señal más desfavorable ya a medio plazo.
SSP5-8.5	2070-2100	-8,18 %	+3,91 °C	Escenario de mayor estrés climático.

Tabla 1. Cambios medios proyectados de precipitación y temperatura en la cuenca Miño-Limia respecto al periodo histórico 1985-2014.

Los resultados muestran una señal térmica robusta y espacialmente coherente: la temperatura aumenta en todos los escenarios y horizontes temporales, con una intensificación clara hacia finales de siglo. La

precipitación presenta una respuesta más heterogénea espacialmente, aunque la señal media evoluciona hacia una reducción progresiva, especialmente bajo SSP5-8.5.

Como antecedente metodológico directamente relacionado con el área de estudio, [Fernández-Nóvoa et al. \(2022\)](#) aplicaron una aproximación multiescala al río Miño en Ourense, combinando proyecciones climáticas regionales, modelización hidrológica con HEC-HMS y modelización hidráulica bidimensional con Iber/Iber+. Sus resultados muestran que, bajo escenarios de cambio climático, pueden incrementarse la frecuencia e intensidad de los caudales extremos y retrasarse la estación de inundaciones. No obstante, dichos resultados corresponden específicamente al sistema Miño-Sil en Ourense y a un conjunto de escenarios y modelos climáticos diferente, por lo que en el presente informe se utilizan como referencia metodológica y apoyo interpretativo, no como una extrapolación cuantitativa directa al conjunto Miño-Limia.

Desde el punto de vista metodológico, el presente informe realiza una interpretación cualitativa de vulnerabilidad. Esta interpretación no se basa únicamente en los cambios medios anuales, sino en los mecanismos hidrológicos que dichos cambios pueden activar o intensificar. Por ello, los resultados deben entenderse como una base para orientar análisis posteriores más específicos, en particular estudios de extremos de precipitación, simulaciones hidrológicas con HEC-HMS, simulaciones hidráulicas con Iber/Iber+ y evaluación espacial de elementos expuestos.

4. Marco conceptual de vulnerabilidad.

En este informe, la vulnerabilidad se entiende como la predisposición de la cuenca a experimentar impactos negativos asociados al cambio climático. Esta predisposición resulta de la interacción entre tres componentes: exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación.

La exposición hace referencia a la presencia de personas, infraestructuras, actividades económicas, ecosistemas o servicios esenciales en zonas susceptibles de verse afectadas por fenómenos hidrometeorológicos. En el caso de las inundaciones, la exposición se relaciona especialmente con la ocupación de llanuras de inundación, márgenes fluviales, cruces viarios, zonas urbanas próximas al cauce y áreas agrícolas o industriales situadas en zonas bajas.

La sensibilidad describe el grado en que estos elementos pueden verse afectados por un determinado episodio. Una misma crecida puede generar impactos muy diferentes dependiendo de la pendiente de la cuenca, la capacidad de infiltración del suelo, el estado de la vegetación, la regulación hidráulica, la conectividad de la red de drenaje, la existencia de defensas o el grado de impermeabilización del territorio.

La capacidad de adaptación se refiere a la disponibilidad de herramientas, infraestructuras, protocolos y conocimiento para anticipar, reducir y gestionar los impactos. En el contexto de RISC_PLUS, esta componente incluye la calidad de la información climática e hidrológica, la red de observación, los modelos hidrológicos e hidráulicos, los sistemas de alerta temprana, la coordinación transfronteriza y la integración de la información en la toma de decisiones. La **Tabla 2** resume los principales componentes conceptuales de la vulnerabilidad de la cuenca.

Componente	Interpretación en la cuenca	Relación con el cambio climático
Exposición	Localización de población, infraestructuras, servicios, cultivos y ecosistemas en zonas potencialmente inundables.	Puede aumentar si crecen los usos vulnerables en márgenes fluviales o llanuras de inundación.
Sensibilidad	Respuesta física y socioeconómica ante lluvias intensas, crecidas, sequías o alternancia de extremos.	Puede aumentar por mayor temperatura, menor humedad media, cambios en vegetación, erosión o pérdida de resiliencia ecológica.
Capacidad de adaptación	Disponibilidad de datos, modelos, protocolos, coordinación institucional y medidas preventivas.	Debe actualizarse para incorporar escenarios futuros y evitar decisiones basadas solo en el clima histórico.

Tabla 2. Componentes conceptuales de la vulnerabilidad considerados en el informe.

En consecuencia, la vulnerabilidad no se interpreta como una propiedad fija de la cuenca, sino como una condición dinámica. Puede aumentar aunque el riesgo medio aparente disminuya, por ejemplo, si los eventos extremos se concentran en menos episodios, si se reduce la capacidad de respuesta de los sistemas naturales o si los umbrales de alerta no se actualizan para las nuevas condiciones climáticas.

Esta aproximación es especialmente relevante en cuencas transfronterizas, donde la gestión del riesgo requiere continuidad espacial de la información, compatibilidad de metodologías y coordinación entre administraciones. La vulnerabilidad climática de la cuenca Miño-Limia debe entenderse, por tanto, como un problema físico e institucional: depende tanto de la evolución de la precipitación y la temperatura como de la capacidad para transformar esa información en decisiones operativas.

5. Implicaciones hidrológicas de los cambios proyectados.

La reducción proyectada de la precipitación media anual apunta a una posible disminución de los recursos hídricos medios disponibles en la cuenca. Esta señal es débil a medio plazo bajo SSP2-4.5, pero se vuelve más clara a finales de siglo y bajo el escenario SSP5-8.5. En términos hidrológicos, una menor precipitación media puede traducirse en menores aportaciones anuales, reducción de caudales base y mayor presión sobre los usos del agua durante los periodos secos.

El aumento generalizado de la temperatura constituye una señal más robusta que la de la precipitación. Un incremento térmico de entre +1,19 °C y +3,91 °C puede intensificar la evapotranspiración potencial, reducir la humedad del suelo durante periodos secos y modificar las condiciones antecedentes antes de un episodio de lluvia. Estas condiciones antecedentes son relevantes para la generación de escorrentía, ya que determinan qué fracción de la precipitación se infiltra, se almacena temporalmente o se transforma rápidamente en caudal.

La combinación de menor precipitación media y mayor temperatura puede favorecer una mayor alternancia entre periodos de déficit hídrico y episodios de respuesta hidrológica rápida. En periodos secos, los suelos pueden presentar menor humedad inicial, lo que en algunos casos aumenta la capacidad de almacenamiento inicial. Sin embargo, si la lluvia se produce con intensidad elevada, esa capacidad puede superarse rápidamente. Además, los suelos degradados, compactados, quemados o

con baja cobertura vegetal pueden generar escorrentía de forma muy eficiente incluso tras periodos secos.

Desde el punto de vista de las inundaciones, la señal media anual debe interpretarse con cautela. Una disminución de la precipitación media no implica necesariamente una reducción proporcional del riesgo de inundación, ya que este depende sobre todo de la intensidad, duración y extensión espacial de los episodios extremos, de la sincronización entre subcuencas, de la humedad antecedente, de la regulación de embalses, del estado de los cauces y de la ocupación de zonas inundables.

El cambio climático también puede afectar a la estacionalidad del régimen hidrológico. Aunque este informe no realiza un análisis estacional detallado, la reducción de los recursos medios y el calentamiento pueden alterar la distribución temporal de caudales, las necesidades de regulación y la gestión preventiva de embalses. Esta cuestión es relevante para la vulnerabilidad porque las decisiones de operación hidráulica deben equilibrar objetivos que pueden entrar en conflicto: almacenamiento para periodos secos, laminación de avenidas, mantenimiento de caudales ecológicos y seguridad de personas e infraestructuras.

Esta interpretación es coherente con estudios previos desarrollados en la cuenca del Miño-Sil ([Fernández-Nóvoa et al., 2022](#)), donde se ha identificado unaposible intensificación del régimen hidrológico futuro: aumento de la frecuencia de caudales bajos, reducción de caudales intermedios e incremento de los caudales más extremos. Este tipo de respuesta implica que la vulnerabilidad de la cuenca no debe evaluarse únicamente a partir del volumen medio anual de precipitación, sino también a partir de la redistribución de los caudales y de la frecuencia de situaciones críticas.

En términos de modelización, los resultados climáticos disponibles permiten alimentar análisis posteriores más detallados. Las series diarias de precipitación y temperatura pueden utilizarse para construir escenarios hidrológicos futuros, mientras que los hidrogramas resultantes pueden emplearse como entrada en modelos hidráulicos. De esta forma, la información climática puede traducirse progresivamente en caudales, calados, velocidades, extensión de inundación y mapas de impacto potencial.

6. Vulnerabilidad frente a inundaciones.

La vulnerabilidad frente a inundaciones no debe evaluarse únicamente a partir de los cambios en precipitación media. Aunque las proyecciones muestran una disminución media de la precipitación, especialmente bajo SSP5-8.5, el propio análisis climático indica que una atmósfera más cálida puede contener mayor cantidad de vapor de agua y favorecer eventos de precipitación más intensos cuando concurren condiciones meteorológicas favorables. Por ello, la vulnerabilidad futura de la cuenca dependerá de la evolución de los extremos de precipitación, de la frecuencia de episodios persistentes y de la respuesta hidrológica de los principales tributarios.

La evaluación cualitativa realizada en este informe considera cuatro niveles relativos de vulnerabilidad climática-hidrológica. Estos niveles no representan una zonificación espacial ni sustituyen a un mapa de peligrosidad, sino que sintetizan el grado de estrés climático esperable bajo cada escenario y horizonte temporal. La **Tabla 3** resume esta interpretación.

Escenario	Vulnerabilidad climática-hidrológica potencial
SSP2-4.5, 2030-2059	<u>Baja a moderada.</u> El cambio medio en precipitación es pequeño, pero el calentamiento ya puede alterar evapotranspiración, humedad del suelo y condiciones antecedentes.
SSP5-8.5, 2030-2059	<u>Moderada.</u> La reducción de precipitación media es mayor y el calentamiento aumenta el estrés climático de la cuenca ya a medio plazo.
SSP2-4.5, 2070-2100	<u>Moderada a alta.</u> Se consolida la reducción de precipitación y aumenta la temperatura, con posibles efectos sobre caudales medios, gestión de embalses y resiliencia de ecosistemas fluviales.
SSP5-8.5, 2070-2100	<u>Alta en términos de estrés climático-hidrológico potencial.</u> Es el escenario más desfavorable por combinar el mayor calentamiento y una reducción media de precipitación, aunque la traducción concreta en frecuencia, caudal punta y extensión de inundación requiere simulaciones hidrológicas e hidráulicas específicas.

Tabla 3. Interpretación cualitativa de la vulnerabilidad climática-hidrológica por escenario y horizonte temporal.

A medio plazo, el escenario SSP2-4.5 muestra una vulnerabilidad baja a moderada porque la precipitación media apenas cambia. Sin embargo, el aumento térmico ya es suficiente para modificar procesos hidrológicos relevantes, como la evapotranspiración y la humedad antecedente. Por tanto, incluso en este caso, la hipótesis de estacionariedad climática comienza a perder validez para la planificación de riesgos.

El escenario SSP5-8.5 a medio plazo presenta una señal más desfavorable, ya que combina una reducción media de precipitación superior al 7 % con un calentamiento próximo a +1,6 °C. Este resultado sugiere una mayor presión sobre la disponibilidad hídrica y una mayor necesidad de interpretar los eventos de avenida dentro de un régimen hidrológico más variable.

A finales de siglo, la vulnerabilidad aumenta en ambos escenarios. En SSP2-4.5, la reducción de precipitación se hace apreciable y el calentamiento supera los +2 °C. En SSP5-8.5, el calentamiento se aproxima a +4 °C, configurando el escenario de mayor estrés climático. Este escenario no implica necesariamente que todos los episodios de inundación sean más frecuentes, pero sí que la cuenca funcionará bajo condiciones térmicas e hidrológicas diferentes de las históricas.

Para los sistemas de alerta temprana, esta interpretación implica que los umbrales definidos a partir del clima histórico pueden perder representatividad. La relación entre lluvia observada, humedad antecedente, caudal generado y extensión de inundación puede cambiar. En consecuencia, la vulnerabilidad operativa dependerá de la capacidad para actualizar bases de datos, recalibrar modelos y revisar umbrales de aviso conforme se disponga de nueva información climática e hidrológica.

Un aspecto especialmente relevante para la gestión operativa es que los umbrales de alerta no deben definirse únicamente a partir de criterios estadísticos generales, sino también a partir de los caudales que producen impactos observables en zonas vulnerables. Estudios previos en Ourense ([Fernández-Nóvoa et al., 2022](#)) han utilizado umbrales locales de caudal para identificar situaciones de prealerta y alerta, permitiendo relacionar directamente la simulación hidrológica con afecciones en espacios

frecuentados por peatones e infraestructuras. Este enfoque resulta especialmente útil para RISC_PLUS, ya que conecta la información climática con decisiones operativas de alerta temprana.

El entregable de la Actividad 3.2 muestra una cadena de modelización en la que HEC-HMS proporciona series de caudal y el modelo Iber/Iber+ utiliza dichas series como condiciones de entrada para generar resultados hidráulicos, incluidos rásteres de calado y velocidad que pueden visualizarse en sistemas de información geográfica. Esta cadena es especialmente útil para traducir escenarios climáticos o eventos de precipitación en información espacial de impacto, lo que refuerza el vínculo entre vulnerabilidad climática y gestión operativa del riesgo.

7. Elementos de la cuenca potencialmente más sensibles.

La vulnerabilidad de la cuenca se manifiesta de forma diferente según el elemento considerado. La **Tabla 4** resume los principales elementos sensibles, el mecanismo climático o hidrológico relevante y la implicación esperada para la gestión del riesgo.

Elemento vulnerable	Mecanismo climático relevante	Implicación para la vulnerabilidad
Llanuras de inundación	Episodios de precipitación intensa y crecidas fluviales.	Mayor exposición de núcleos, cultivos, equipamientos e infraestructuras si se ocupan zonas inundables.
Núcleos urbanos ribereños	Aumento de caudales punta en episodios concretos y drenaje urbano insuficiente.	Posibles daños en viviendas, servicios básicos, redes de saneamiento, movilidad y actividad económica.
Embalses y regulación	Alternancia entre sequías y episodios intensos; cambios en aportaciones medias.	Mayor dificultad de operación preventiva y necesidad de equilibrar almacenamiento, laminación y caudales ecológicos.
Red hidrográfica secundaria	Respuesta rápida a lluvias intensas localizadas.	Crecidas súbitas en subcuencas pequeñas, con tiempos de reacción reducidos para los sistemas de alerta.
Infraestructuras viarias y pasos fluviales	Anegamiento, erosión, socavación y arrastre de materiales.	Interrupciones de movilidad y aumento de daños en puntos críticos de cruce o drenaje.
Sistemas de alerta temprana	Cambios en patrones de precipitación, caudal y condiciones antecedentes.	Necesidad de actualizar umbrales, automatizar flujos de datos, reforzar control de calidad y revisar protocolos.
Modelización hidrológica e hidráulica	No estacionariedad climática y mayor incertidumbre en extremos.	Necesidad de ensayar escenarios futuros, eventos sintéticos y análisis de sensibilidad en HEC-HMS e Iber/Iber+.
Ecosistemas fluviales	Menor caudal medio, mayor temperatura y episodios extremos más contrastados.	Estrés ecológico, pérdida de resiliencia, alteración de hábitats y reducción de servicios ecosistémicos.
Usos agrícolas y abastecimiento	Menor disponibilidad media y mayor evaporación.	Mayor competencia por el recurso durante periodos secos y mayor sensibilidad a restricciones o daños por inundación.

Tabla 4. Elementos potencialmente sensibles de la cuenca y mecanismos de vulnerabilidad asociados.

Las llanuras de inundación y los núcleos urbanos ribereños concentran una parte importante de la exposición. En estos espacios, el riesgo depende tanto de la magnitud del evento hidrológico como de la ocupación del territorio. Por ello, la adaptación debe combinar información climática, mapas de peligrosidad, ordenación del territorio y medidas de autoprotección.

Los elementos operativos, como los sistemas de alerta y las cadenas de modelización, representan una dimensión específica de la vulnerabilidad: la vulnerabilidad institucional y tecnológica. Una cuenca puede disponer de información climática avanzada, pero si esta información no se traduce en umbrales revisados, simulaciones actualizadas y protocolos claros, la capacidad de adaptación será limitada.

La red hidrográfica secundaria merece una atención particular. En subcuencas pequeñas, los tiempos de concentración son reducidos y las crecidas pueden producirse con poco margen de anticipación. En estos casos, la mejora de la monitorización, la automatización de modelos y la comunicación temprana pueden ser tan importantes como las medidas estructurales.

Finalmente, los ecosistemas fluviales y los usos del agua pueden experimentar impactos acumulativos. La menor disponibilidad hídrica media y el aumento de temperatura pueden reducir la resiliencia ecológica y aumentar la competencia entre usos durante periodos secos. Esta situación puede condicionar la gestión preventiva de avenidas, ya que las decisiones sobre regulación deben considerar simultáneamente sequía, inundación, abastecimiento, caudales ecológicos y conservación ambiental.

8. Recomendaciones.

A partir de los resultados climáticos disponibles y de su interpretación en términos de vulnerabilidad, se proponen las siguientes recomendaciones para reforzar la adaptación de la cuenca Miño-Limia frente al cambio climático y mejorar la gestión del riesgo de inundación:

- 1. Integrar los escenarios climáticos en la modelización hidrológica e hidráulica.** Las series de precipitación y temperatura regionalizadas deben emplearse para construir escenarios hidrológicos futuros. Estos escenarios pueden alimentar modelos como HEC-HMS y, posteriormente, modelos hidráulicos como Iber/Iber+ para evaluar cambios en caudales punta, extensión inundada, calados y velocidades.
- 2. Analizar extremos además de promedios.** El análisis de medias anuales debe complementarse con indicadores de precipitación extrema, como precipitación máxima diaria, precipitación acumulada en varios días, días por encima de percentiles altos, duración de periodos secos y secuencias de días húmedos.
- 3. Incorporar el análisis estacional.** Los cambios medios anuales pueden ocultar diferencias relevantes entre estaciones. Es recomendable evaluar si la reducción de precipitación se concentra en determinados periodos y si los episodios de lluvia intensa cambian de estación, duración o persistencia.
- 4. Revisar las condiciones antecedentes en los modelos.** La humedad del suelo, la evapotranspiración y el estado de la vegetación condicionan la transformación de lluvia en escorrentía. El aumento de temperatura hace especialmente recomendable incorporar estas variables en los análisis de sensibilidad.

5. Revisar la estacionalidad de los umbrales y protocolos de alerta. La planificación operativa no debería asumir que la distribución mensual histórica de las crecidas se mantiene constante. Estudios previos en el Miño-Sil indican un posible desplazamiento de la estación de inundaciones hacia meses más tardíos del invierno, por lo que conviene analizar la evolución mensual y estacional de los episodios extremos en los nuevos escenarios climáticos. Se recomienda revisar progresivamente umbrales de precipitación y caudal, considerando escenarios climáticos, incertidumbre y capacidad de respuesta de la cuenca.

6. Reforzar la automatización y control de calidad de los sistemas de alerta. Un sistema operativo debe incorporar recuperación automática de datos, validación, ejecución programada de modelos, generación de avisos y trazabilidad de resultados. La automatización reduce tiempos de respuesta y facilita la repetibilidad.

7. Actualizar mapas de exposición y elementos críticos. La información climática debe cruzarse con zonas inundables, población, infraestructuras, servicios esenciales, estaciones de aforo, captaciones, depuradoras, puentes y usos del suelo para identificar puntos especialmente vulnerables.

8. Evaluar medidas basadas en la naturaleza. La recuperación de llanuras de inundación, la restauración de riberas, la mejora de la conectividad fluvial y la conservación de suelos pueden reducir la escorrentía rápida, aumentar la laminación natural y mejorar la resiliencia ecológica.

9. Considerar la gestión conjunta de sequías e inundaciones. La cuenca puede experimentar simultáneamente menor disponibilidad media de agua y episodios extremos intensos. Las estrategias de adaptación deben evitar tratar ambos riesgos como problemas independientes.

10. Reforzar la coordinación transfronteriza. La continuidad hidrológica de las cuencas Miño y Limia requiere metodologías compatibles, intercambio de datos, protocolos coordinados y herramientas compartidas para planificación, alerta y respuesta.

11. Mantener y documentar la base de datos climática. La disponibilidad de datos en formatos abiertos y trazables facilita la reproducción de análisis, la actualización de escenarios y la transferencia de resultados a administraciones y usuarios técnicos.

La **Tabla 5** resume estas recomendaciones en términos de prioridad operativa y finalidad principal.

Prioridad	Acción recomendada	Finalidad principal
Alta	Analizar extremos y actualizar umbrales de alerta.	Evitar que la gestión del riesgo dependa solo de promedios o de condiciones históricas.
Alta	Conectar escenarios climáticos con HEC-HMS e Iber/Iber+.	Traducir cambios climáticos en caudales, calados, velocidades y extensión inundada.
Media-alta	Actualizar inventarios de elementos expuestos.	Identificar zonas, infraestructuras y servicios más sensibles.
Media-alta	Reforzar automatización, control de calidad y trazabilidad.	Mejorar la robustez de los sistemas de alerta temprana.
Media	Evaluar soluciones basadas en la naturaleza y restauración fluvial.	Reducir vulnerabilidad física y aumentar resiliencia ecosistémica.
Transversal	Consolidar coordinación transfronteriza.	Garantizar coherencia técnica e institucional en toda la cuenca.

Tabla 5. Síntesis de recomendaciones prioritarias para la adaptación y la gestión del riesgo.

9. Conclusiones.

Los resultados climáticos disponibles indican que la cuenca Miño-Limia experimentará un calentamiento generalizado durante el siglo XXI, acompañado de una tendencia media hacia la reducción de la precipitación. El escenario SSP5-8.5 representa la situación más desfavorable, especialmente a finales de siglo, al combinar una disminución de la precipitación media con un aumento térmico próximo a +4 °C.

Desde el punto de vista de la vulnerabilidad de la cuenca, estos cambios sugieren un incremento del estrés hidrológico general y una posible reducción de la disponibilidad media de recursos hídricos. El calentamiento puede intensificar la evapotranspiración, alterar la humedad antecedente del suelo y modificar la respuesta hidrológica de la cuenca ante episodios de precipitación.

No obstante, la vulnerabilidad frente a inundaciones no puede inferirse únicamente a partir de la precipitación media anual. La persistencia de episodios extremos, la mayor capacidad de una atmósfera cálida para contener vapor de agua y la respuesta hidrológica de subcuencas concretas pueden mantener o incluso intensificar determinados episodios de riesgo, aunque la precipitación media disminuya.

La interpretación cualitativa realizada muestra una vulnerabilidad baja a moderada en el escenario SSP2-4.5 a medio plazo, moderada bajo SSP5-8.5 a medio plazo, moderada a alta bajo SSP2-4.5 a finales de siglo y alta bajo SSP5-8.5 a finales de siglo. Esta clasificación debe entenderse como una guía preliminar para orientar análisis posteriores, no como una zonificación definitiva del riesgo.

Los elementos más sensibles incluyen llanuras de inundación, núcleos urbanos ribereños, red hidrográfica secundaria, infraestructuras viarias, sistemas de alerta temprana, modelos hidrológicos e hidráulicos, embalses, ecosistemas fluviales y usos del agua. La vulnerabilidad de estos elementos depende tanto del cambio climático como de decisiones de planificación, mantenimiento, regulación y coordinación institucional.

La adaptación al cambio climático en la cuenca debe combinar el análisis de tendencias medias con el estudio de extremos hidrometeorológicos, la actualización de sistemas de alerta temprana, la mejora de la modelización hidrológica e hidráulica y la integración de la información climática en la planificación transfronteriza del riesgo.

Debe tenerse en cuenta que la respuesta hidrológica futura no dependerá únicamente del clima. La gestión de embalses, los cambios en usos del suelo, la modificación de márgenes fluviales, la evolución de la cobertura vegetal, la demanda de agua y las infraestructuras hidráulicas pueden amplificar o amortiguar los efectos climáticos. Por tanto, los escenarios climáticos deben interpretarse como una componente esencial, pero no única, de la vulnerabilidad futura.

En síntesis, el valor añadido de este entregable reside en conectar la información climática de alta resolución generada en el proyecto con la gestión práctica de la vulnerabilidad. Esta conexión permite avanzar desde la descripción de cambios futuros hacia una interpretación aplicada, orientada a la prevención, la preparación y la toma de decisiones en la cuenca Miño-Limia.

10. Bibliografía.

- Fernández-Nóvoa, D., García-Feal, O., González-Cao, J., deCastro, M., Gómez-Gesteira, M. (2022). Multiscale flood risk assessment under climate change: the case of the Miño River in the city of Ourense, Spain. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 22, 3957–3972. <https://doi.org/10.5194/nhess-22-3957-2022>
- Fernández-Nóvoa, D., Barreiro-Fonta, H., Gonzalez-Cao, J., García-Feal, O., Thomas, B., deCastro, M., Gomez-Gesteira, M. (2026). High-Resolution Climate Database for Hydrological Applications over the Miño–Limia River Basins Based on Dynamically Downscaled CMIP6 Simulations [Dataset]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.21242716>

Interreg

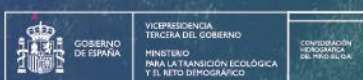


Cofinanciado por
la Unión Europea
Cofinanciado pela
União Europeia

RISC_PLUS

España - Portugal

risc-plus.eu



Universidade de Vigo



El proyecto 0031_RISC_PLUS_6_E está cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional FEDER en el marco del programa Interreg VI A España - Portugal (POCTEP) 2021-2027