

Plan Piloto de Gestión de Sedimento en el Tramo Bajo del Río Nalón (Trubia – Soto del Barco)

Síntesis



2021- 2023

APOYO CIENTÍFICO-TÉCNICO

Plan Piloto de Gestión del Sedimento en el Tramo bajo del Río Nalón (Trubia – Soto del Barco, Asturias)

El presente documento resume los trabajos de investigación desarrollados por el Instituto de Recursos Naturales y Ordenación del Territorio de la Universidad de Oviedo (INDUROT) en el marco del proyecto “Plan Piloto de Gestión de Sedimento en el Tramo Bajo del Río Nalón (Trubia – Soto del Barco)”, por encargo de TRAGSA para la Confederación Hidrográfica del Cantábrico (CHC), y dentro del Proyecto de “Obras de implantación de medidas de gestión de las reservas naturales fluviales y otros cauces de interés ambiental en la cuenca Hidrográfica del Cantábrico”, Plan de Impulso al Medio Ambiente para la Adaptación al Cambio Climático (PIMA Adapta Agua), del Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico (01.499-0090/2111).

Elaborado por el INDUROT (Universidad de Oviedo):

Dirección – Coordinación Contrato

Gil González Rodríguez (Director del INDUROT - Catedrático de Estadística e Investigación Operativa)

Coordinación INDUROT

Elena Fernández Iglesias (Dra. Geología - Coordinadora de la Unidad de Geomorfología fluvial y litoral aplicadas)

Equipo Geomorfología

María Fernández García (Lic. Ciencias Ambientales, Unidad de Geomorfología fluvial y litoral aplicadas)

Elena Fernández Iglesias (Dra. Geología, Coordinadora de la Unidad de Geomorfología fluvial y litoral aplicadas)

Laro Incera Sañudo (Graduado en Geología, Unidad de Geomorfología fluvial y litoral aplicadas)

Rosana Menéndez Duarte (Dra. Geología, Profesora Dpto. Geología adscrita al INDUROT)

Daniel Vázquez Tarrío (Dr. Geología. Prof. Univ. Complutense de Madrid, colaborador del INDUROT)

Equipo Geoquímica ambiental

José Luis Rodríguez Gallego (Dr. Ing. Minas. Catedrático Dpto. Explotación y Prospección de Minas, Secr. INDUROT)

Eduardo Rodríguez-Valdés (Dr. Ing. Minas. Coordinador de la Unidad de Geoquímica Ambiental)

Equipo Vegetación

Eduardo Cires Rodríguez (Dr. Biología. Profesor Dpto. BOS adscrito al INDUROT)

Pilar García Manteca (Dra. Biología. Coordinadora de la Unidad de Ecología y diseño y análisis SIG)

Mauro Sanna (Dr. Biología. Unidad de Conservación vegetal y espacios protegidos)

Jesús Valderrábano Luque (Lic. Biología. Coordinador de la Unidad de Conservación vegetal y espacios protegidos)

Equipo Fauna

Antonio Torralba Burrial (Dr. Biología. Profesor Didáctica Ciencias experimentales adscrito al INDUROT)

Equipo Estadística

Gil González Rodríguez (Catedrático de Estadística e Investigación Operativa)

Ana Belén Ramos Guardado (Dra. Profesora Estadística e Investigación Operativa, adscrita al INDUROT)

Personal de apoyo

Juan Carlos Fernández Iglesias (Servicio de delineación y desarrollo GIS)

Luján Infanzón Díaz (Servicio de Administración y apoyo técnico a los proyectos)

Con la colaboración de:



Otros colaboradores:

Javier Álvarez Pulgar (Estaciones sísmicas: Catedrático Dpto. Geología, Profesor colaborador del INDUROT)
Jesús Díaz Sanz (Macroinvertebrados: Inenvex Environmental Consulting)
Mónica Doblás (Lic. Biología)
Aránzazu Estrada Fdez. (Estudiante Máster Biotecnología aplicada a la Gestión Sostenible Recursos Vegetales)
Saüc Gual Caballero (Graduado en Geografía)
Ángel Montero Andrino (Vuelos y batimetrías: NB-Geo Geospatial Solutions)
Álvaro Montes Fernández (Estudiante de Grado de Geología)
Arzu Olari Cupchía (Estudiante de Grado de Biología)
Marcos Rodríguez Fernández (Lic. Geología)
Elisa Suárez Rey (Estudiante Grado Geología)

En relación con la información procedente de estaciones sísmicas, se ha contado con la colaboración de los siguientes proyectos del Plan Nacional I+D+i (MITECO):

CANALAB (PID2020-118228RB-C21)
MISTERIOS (CGL2013-48601-C2)

Cita del documento:

INDUROT (2023). *Plan Piloto de Gestión del Sedimento en el Tramo bajo del Río Nalón (Trubia – Soto del Barco, Asturias)*. Informe científico-técnico para TRAGSA, financiado por la Confederación Hidrográfica del Cantábrico dentro del PIMA Adapta del MITECO. Universidad de Oviedo, 79 pp.

Octubre 2023

CONTENIDO

1. Presentación del proyecto	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Área de estudio.....	2
1.3. Objetivos.....	6
2. Análisis morfosedimentario	7
2.1. Identificación de actuaciones artificiales con potencial impacto	8
2.2. Identificación y jerarquización de avenidas fluviales.....	12
2.3. Estudio geomorfológico del río Nalón desde 1945.....	14
2.3.1. Cambios en la anchura del cauce	16
2.3.2. Cambios en la presencia de orillas erosivas	19
2.3.3. Cambios en la presencia de afloramientos rocosos en el lecho.....	21
2.3.4. Cambios en sinuosidad y trenzamiento	22
2.4. Análisis integrado: potenciales causas de los reajustes en el cauce	24
2.4.1. Incidencia de procesos naturales	25
2.4.2. Incidencia de actividades de origen antrópico	26
3. Análisis biológico del corredor fluvial	32
3.1. La cubierta vegetal.....	32
3.1.1. La vegetación en las márgenes erosivas.....	32
3.1.2. Análisis florísticos y de la estructura de la vegetación	34
3.1.3. Cartografía de vegetación	37
3.1.4. Especies Exóticas e Invasoras (EEI) vegetales.....	40
3.2. Análisis y caracterización faunística	43
4. Problemática y medidas de actuación	46
5. Monitorización del sedimento	49
5.1. Caracterización del sedimento	49
5.1.1. Granulometrías del material grueso.....	49
5.1.2. Grado de acorazamiento del lecho.....	51
5.1.3. Análisis geoquímico del sedimento fino.....	52
5.2. Monitorización del sedimento grueso.....	53
5.2.1. Clastos trazadores	54
5.2.2. Métodos geofísicos: placas de impacto con geófono	57

5.2.3. Sísmica pasiva: sismógrafo	59
5.3. Monitorización de sedimento arenoso.....	61
5.3.1. Muestreo de susceptibilidad magnética base o natural.....	62
5.3.2. Depósito de la magnetita y redistribución tras una pequeña crecida.....	65
5.3.3. Interpretación de los resultados	68
6. Baipás sedimentario.....	68
6.1.1. Estudio de emplazamientos y compatibilidad sedimentaria.....	69
6.1.2. Ejecución del baipás de sedimento	69
7. Conclusiones	71
8. Bibliografía	74

1. Presentación del proyecto

1.1. Antecedentes

En las últimas décadas el tramo bajo del río Nalón (Asturias) ha mostrado signos de inestabilidad y reajustes hidromorfológicos, que se han acelerado durante los últimos años. Entre ellos pueden mencionarse los estrechamientos del cauce y encajamientos del lecho que en numerosos puntos superan los 2 m (Figura 1).

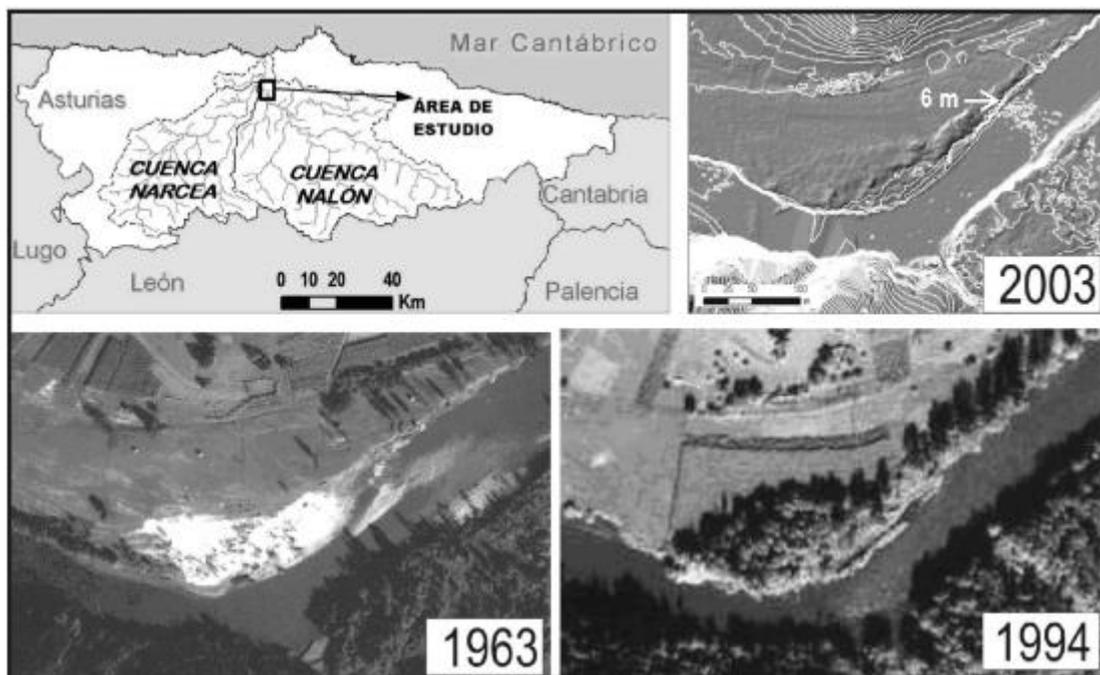


Figura 1. Estrechamiento y encajamiento del tramo bajo del río Nalón, aguas arriba de la confluencia con el río Narcea (Fuente: Fernández-Iglesias y Anadón, 2010).

Esta inestabilidad vertical ha ido acompañada en algunos casos de una divagación lateral del canal, así como de ensanchamientos del cauce, ambas situaciones evidenciadas por la presencia de orillas erosivas e inestables en varios emplazamientos que provocan una importante fragmentación del bosque de ribera. Esta situación, junto a otras alteraciones del medio, ha dado como resultado un ecosistema ripario con diversos signos de degradación.

Como consecuencia de estos reajustes en el canal se están produciendo daños en infraestructuras con descalces y socavamientos, fragmentación del bosque de ribera o pérdida creciente de terrenos por erosión de márgenes y afección a emplazamientos vulnerables, entre otros aspectos.

Si bien existen factores climáticos ligados al aumento de avenidas extremas que pueden estar repercutiendo en los aspectos descritos anteriormente, la reducción en los aportes de sedimentos a lo largo de la cuenca hidrográfica del río Nalón representa un factor a tener especialmente en cuenta en el desequilibrio hidromorfológico del cauce y en la pérdida de biodiversidad del corredor fluvial. Concretamente, la retención de sedimento denominado de carga de fondo (material con tamaño de grano de tipo arena y superior), que se produce a lo largo de diversas barreras transversales al canal, tiene potencial incidencia en el equilibrio hidromorfológico del cauce al controlar la morfología del canal (e.g. Ashmore y Church, 1998; Church, 2006).

Esta reducción en los aportes de sedimentos que se está produciendo a lo largo de numerosas cuencas hidrográficas está derivada de los efectos sostenidos a largo plazo de diversas intervenciones antrópicas, siendo sobre todo la fragmentación sedimentaria provocada por diferentes obstáculos transversales (presas y azudes) entre las más documentadas en la literatura científica (e.g. Álvarez García et al., 2006; Schmidt y Wilcock, 2008; Vázquez-Tarrío et al., 2019a). Hay que añadir también el efecto de la retención de sedimento que puede derivarse de las canalizaciones, que han estrechado la zona activa en numerosos tramos de ríos trenzados, así como los cambios en los usos del suelo ligados al aumento de la vegetación arbórea (e.g. Beguería et al., 2006; Zhang et al., 2014; *Riverchanges*, 2016-2019; Magliulo et al., 2021), ya constatado en varias cuencas del ámbito cantábrico (Proyecto *Riverchanges*, 2016-2019). El declive en la población de salmónidos o la disminución en las reservas de sedimento en los arenales costeros del Cantábrico se encuentran entre otros potenciales impactos derivados de estas alteraciones en los flujos de sedimento fluvial.

Abordar por tanto el proceso del transporte sedimentario urge tanto desde un punto de vista científico como de gestión del territorio, precisamente en un periodo donde los pronósticos de cambio climático apuntan hacia un agravamiento de la erosión fluvio-costera y de la peligrosidad de inundaciones.

1.2. Área de estudio

El ámbito cantábrico constituye un laboratorio natural ideal para estudiar las relaciones entre la evolución temporal de los aportes de sedimento fluvial, las potenciales

conexiones con las zonas litorales y los efectos de impactos antrópicos de diverso tipo (presas, cambios de usos de suelo, canalizaciones).

Entre las diversas cuencas cantábricas destaca la del río Nalón, la más grande de la vertiente norte de la Cordillera Cantábrica (Figura 2). El tramo bajo de este sistema fluvial, ubicado desde el embalse de El Furacón en Trubia hasta el Dominio Público Marítimo Terrestre (DPMT) en la localidad de Peñaullán en Pravia (Figura 3), presenta unas condiciones apropiadas para el estudio del sedimento, el análisis de repercusiones derivadas de tramos embalsados y el diseño de medidas de mitigación de potenciales impactos en el corredor fluvial. Tiene una longitud de unos 35 km y una anchura media de cauce y canal activo de entre 106 y 71 m respectivamente. Se trata de un río de trazado meandriforme que recorre llanuras de alta inundabilidad a lo largo de un valle de unos 400 m de anchura media.



Figura 2. Cuenca del río Nalón en el ámbito de la Confederación Hidrográfica del Cantábrico.

Por otro lado, el área de estudio incluye dos ámbitos hidrológicamente diferentes, uno de 29 km asociado a una cuenca mediana de 2914 km² de superficie y otro de unos 6 km tras la confluencia del río Narcea asociado a una cuenca con 4763 km² de superficie (Figura 3).

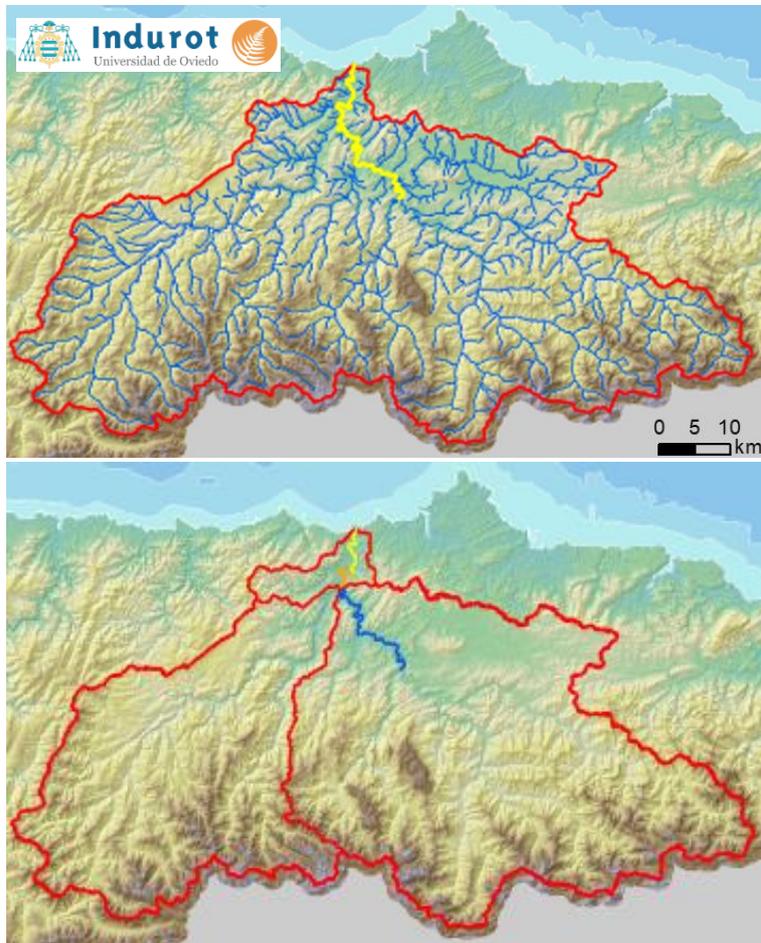


Figura 3. En la imagen superior en amarillo el tramo bajo del río Nalón ubicado aguas abajo de la presa de El Furacón. En rojo envoltentes de cuencas hidrográficas dentro del Sistema del río Nalón. Abajo se muestran los diferentes tramos en función del tamaño de la cuenca: a) Tramo superior en azul de 29 km, entre el embalse del Furacón hasta la confluencia del río Narcea y b) tramo inferior de unos 6 km tras la confluencia con el río Narcea (naranja). Los últimos 10 km, fuera del área de estudio, representan la zona perteneciente al DPMT (amarillo).

Para la presentación e interpretación de resultados, el curso fluvial del río Nalón en estudio, se ha subdividido en cuatro tramos aprovechando las confluencias con 3 afluentes de entidad: río Nora, río Cubia y río Narcea (Tabla 1 y Figura 4).

TRAMO	LOCALIZACIÓN	LONGITUD (km)	Q MEDIO ANUAL (m ³ /s) ¹	SUP. CUENCA (km ²)	% SUP. CUENCA
1. Tramo alto	Desde embalse Furacón hasta confluencia Nalón-Nora	4,4	44,4	2147	44,3
2. Tramo medio	Desde confluencia Nalón-Nora hasta confluencia Nalón-Cubia	9,1	50,8	2859	59,0
3. Tramo bajo	Desde confluencia Nalón-Cubia hasta confluencia Nalón-Narcea	15,7	81,1	2914	60,1

¹ Datos de caudal obtenidos para cada uno de los tramos de las estaciones de aforo de 1371- Río Nalón en Palomar, 1375- Río Trubia en Trubia (Machón), 1343 Río Nora en San Cucao, 1368- Río Nalón en Grullas y 1360- Río Narcea en Quinzanas.

TRAMO	LOCALIZACIÓN	LONGITUD (km)	Q MEDIO ANUAL (m ³ /s) ^I	SUP. CUENCA (km ²)	% SUP. CUENCA
4. Tramo Nalón-Narcea	Desde confluencia Nalón-Narcea hasta límite con DPMT	6,2	143,1	4849 ^{II}	100,0

Tabla 1. Tramos en los que se ha dividido el área de estudio ordenados de aguas arriba a aguas abajo y sus principales características (Q- Caudal; SUP- Superficie).

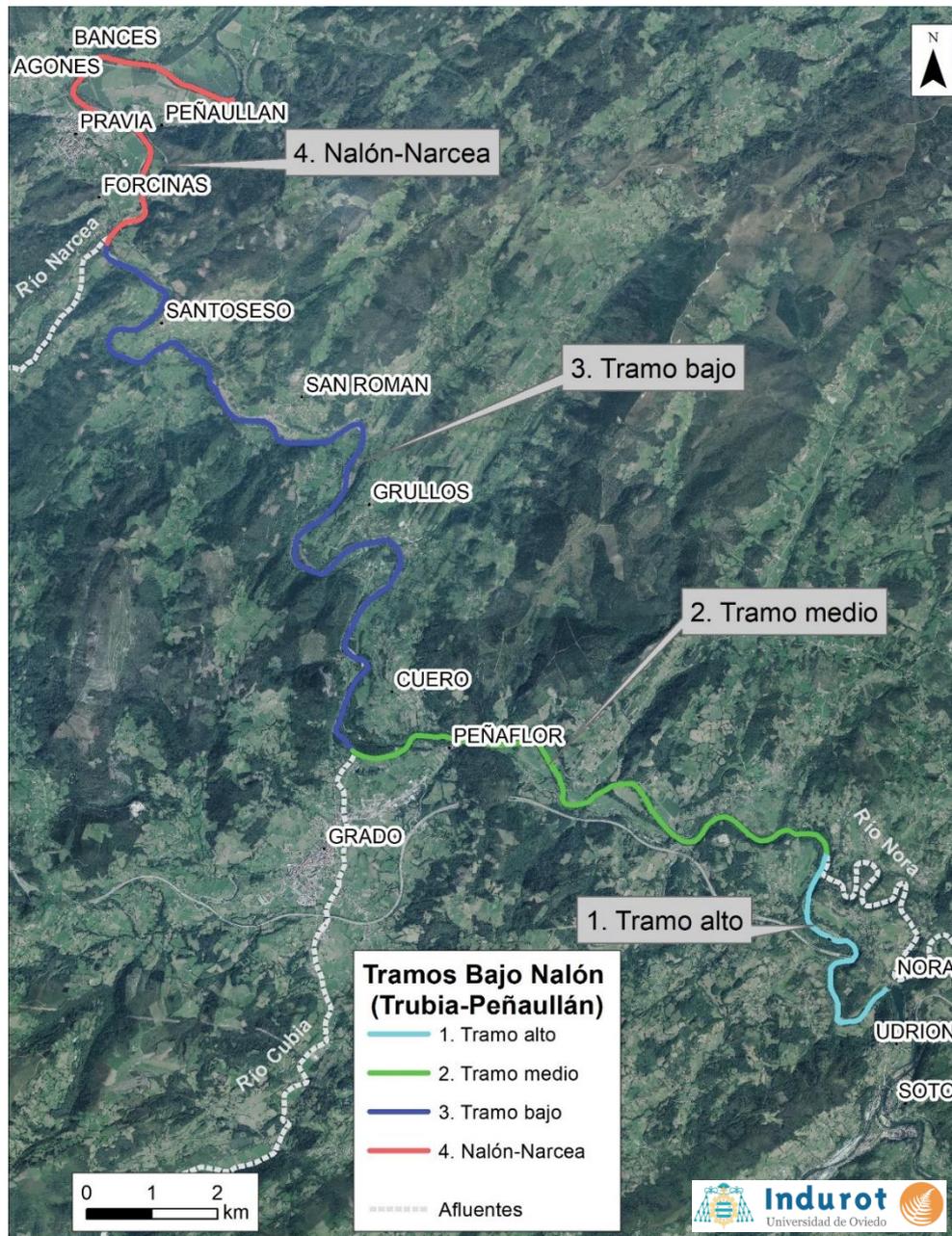


Figura 4. Tramos en los que se ha subdivido el área de estudio.

^{II} Dato obtenido del Anejo XIV de la Propuesta de Proyecto de Plan Hidrológico 2022-2027.

1.3. Objetivos

Para profundizar en la mitigación de problemas ecológicos y morfodinámicos detectados, que según los análisis preliminares muestran una relación con un déficit de sedimento en el sistema, y con el objetivo de mejorar el conocimiento sobre los procesos de transporte de los caudales sólidos, se plantean tres grupos de medidas:

1. Fortalecimiento del bosque de ribera (revegetación, bioingeniería, etc.) que persigue reducir la fragmentación de la orilla, problema creciente de los últimos años. También es objetivo incrementar la conectividad del corredor fluvial y contribuir a mejorar el estado de conservación del hábitat de interés comunitario y prioritario 91E0* Bosques aluviales de *Alnus glutinosa* y *Fraxinus excelsior* (*Alno-Padion*, *Alnion incanae*, *Salicion albae*).
2. Configuración de un observatorio de sedimento. Dirigido a la investigación de técnicas y metodologías de seguimiento de los flujos de sedimento y a la implantación de herramientas para la adquisición de los primeros datos de transporte de material grueso, información clave para completar el plan de gestión de sedimento en el río Nalón.
3. Baipás de sedimento. En línea con las actuaciones que vienen desarrollando otros países para mitigar los problemas derivados del déficit sedimentario, se plantea la reubicación de áridos desde aguas arriba de las barreras transversales que están reteniendo material sólido del río, hacia aguas abajo de las mismas.

El proyecto, como plan piloto, no contempla la aplicación de medidas en grandes extensiones, pero sí persigue establecer las bases experimentales y metodológicas para contribuir a desarrollar un programa u observatorio de sedimento de carga de fondo a más largo plazo, dirigido a profundizar en la comprensión cuantitativa del fenómeno de transporte de carga de fondo y sus efectos tanto en el sistema fluvial como en los ambientes litorales conectados.

Para la consecución de dichas medidas, se plantean las siguientes fases de trabajo:

1. Análisis morfosedimentario del cauce:
 - a) Identificación de actuaciones artificiales con potencial impacto
 - b) Identificación y jerarquización de avenidas fluviales históricas
 - c) Estudio geomorfológico del río Nalón desde 1945
 - d) Análisis integrado: potenciales causas de los reajustes en el cauce
2. Análisis biológico del corredor fluvial:
 - a) Caracterización de la cubierta vegetal
 - b) Análisis y caracterización faunística
3. Problemática y medidas de actuación

4. Monitorización del sedimento:
 - a) Caracterización del sedimento
 - b) Monitorización del sedimento grueso
 - c) Monitorización de sedimento arenoso
5. Baipás sedimentario:
 - a) Estudio de emplazamientos y compatibilidad sedimentaria
 - b) Ejecución del baipás sedimentario

2. Análisis morfosedimentario

El análisis multitemporal del sistema fluvial a partir de fotografías aéreas disponibles desde los años 40 persigue determinar tendencias evolutivas hasta la actualidad. Para ello se realiza una cuantificación de cambios a lo largo del cauce y se integran tanto las transformaciones de origen artificial, locales y a escala de cuenca, como los procesos naturales, relacionados principalmente con el efecto de grandes avenidas (e.g. Surian y Rinaldi, 2003; Magliulo et al., 2021).

En esta dirección, además de un análisis de la bibliográfica de la problemática en general y de la propia del área de estudio, se ha recopilado la secuencia de fotografías aéreas históricas y modelos digitales del terreno que permitan obtener una base sobre la que desarrollar la cartografía del cauce en diferentes años. Concretamente, se han considerado los fotogramas de 13 fechas diferentes, relativas a los años 1945, 1956, 1970, 1985, 1994, 2003, 2006, 2009, 2011, 2015, 2017, 2020 y 2022, mostrando una selección de algunas de ellas en la Figura 5.



Figura 5. Algunas de las fotografías aéreas disponibles en el área de estudio en la zona de la presa de Valduno II.

También se han identificado las actuaciones artificiales con potencial impacto sobre el cauce, así como las avenidas fluviales que han tenido lugar durante el periodo de estudio. En los siguientes apartados se detallan los análisis aplicados y resultados obtenidos.

2.1. Identificación de actuaciones artificiales con potencial impacto

Se han identificado las principales modificaciones antrópicas ejecutadas directamente en el cauce y en la llanura aluvial que pueden repercutir en los procesos de transporte/disponibilidad de sedimento y, por tanto, en el comportamiento geomorfológico de los cauces fluviales. En la Tabla 2 se resumen algunos datos relevantes sobre obras artificiales y canalizaciones en el tramo de estudio, así como las presas más próximas a la zona.

ACTUACIÓN	DESCRIPCIÓN	
Carretera AS-369	Estrechamiento por relleno artificial (Pravia)	<ul style="list-style-type: none"> • Años: 1998-2000 • Longitud: 520 m
Polígono industrial	Estrechamiento por relleno artificial (Pravia)	<ul style="list-style-type: none"> • Años: década de 1980 • Superficie: 15 ha
Canalizaciones	Estructuras estabilización orillas	<ul style="list-style-type: none"> • Años: 1945/1994/1996/2003/2013 • Longitud: 1795 m
Presas	La Florida (Río Narcea)	<ul style="list-style-type: none"> • Fecha: 31/12/1952 • Superficie de la cuenca: 1005 km² • Capacidad: 0,75 hm³
	La Barca (Río Narcea)	<ul style="list-style-type: none"> • Fecha: 31/12/1966 • Superficie de la cuenca: 1266 km² • Capacidad: 33,15 hm³
	El Furacán (Río Nalón)	<ul style="list-style-type: none"> • Fecha: 31/12/1952 • Superficie de la cuenca: 2180 km² • Capacidad: 0,52 hm³
	Priañes (Río Nora)	<ul style="list-style-type: none"> • Fecha: 31/12/1953 • Superficie de la cuenca: 340 km² • Capacidad: 1,91 hm³
	Valduno I (Río Nalón)	<ul style="list-style-type: none"> • Fecha: principios de los 90 • Superficie de la cuenca: 3200 km² • Capacidad: 0,380 hm³
	Valduno II (Río Nalón)	<ul style="list-style-type: none"> • Fecha: 01/04/2000 • Superficie de la cuenca: 2500 km² • Capacidad: 0,30 hm³

Tabla 2. Elementos artificiales con potencial repercusión en el transporte/disponibilidad de sedimento en el tramo de estudio.

De entre las actuaciones presentes en el tramo de estudio, destacan por su interferencia en el transporte de sedimento las barreras transversales al cauce, concretamente las presas que se muestran en la Figura 6. En la Figura 7 se muestran unas imágenes de la presa de El Furacán en Trubia.

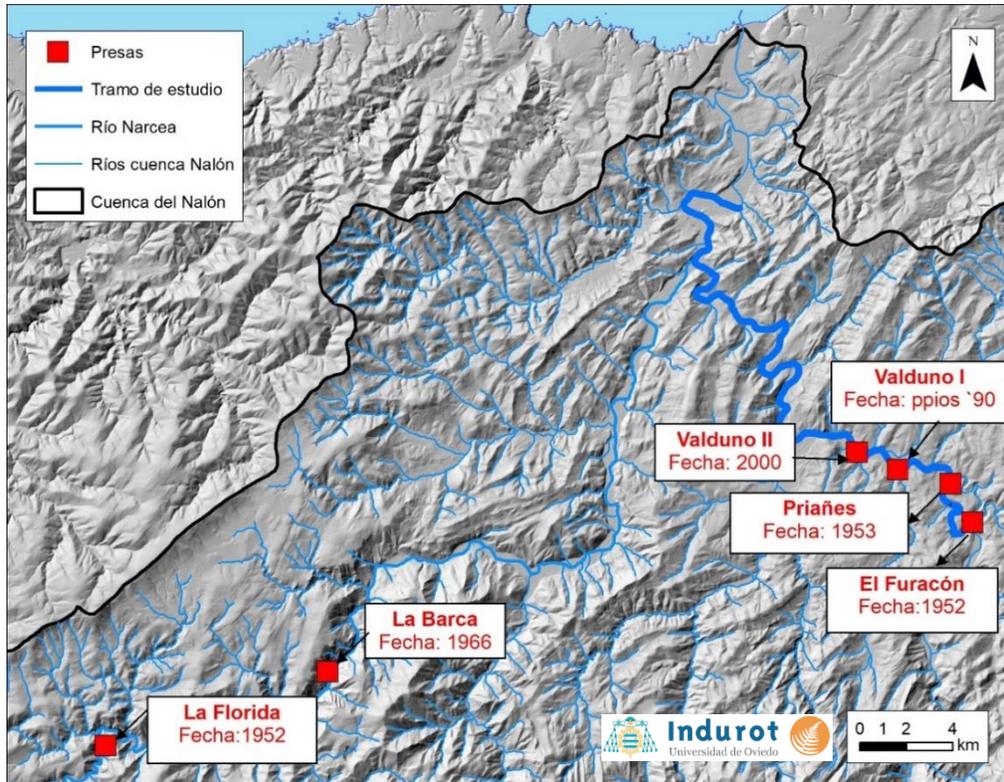


Figura 6. Localización de las presas y su fecha de construcción que afectan al área de estudio dentro de la cuenca del Nalón.



Figura 7. Arriba izquierda vista del sedimento retenido tras el embalse de El Furacón (Fuente: <https://www.iagua.es/data/infraestructuras/presas/furacón>), a la derecha vista actual. Abajo izquierda fotografía aérea del año 1945 y a la derecha del año 1956.

La superficie de cuenca afectada por embalses en el tramo de estudio es muy significativa para los diferentes subtramos, con valores comprendidos entre el 79 y 99%, con un valor medio para todo el tramo del 90% (Tabla 3 y Figura 8).

Subtramos área de estudio	Superficie cuenca (km ²)	Superficie afectada por embalses (km ²)	Cuenca afectada por embalses (%)
Tramo alto	2147,12	2141,36	99,73
Tramo medio	2858,99	2632,10	92,06
Tramo bajo	2913,75	2632,10	90,33
Nalón-Narcea	4849,10	3833,17	79,05

Tabla 3. Superficie de las cuencas de cada uno de los subtramos del área de estudio y superficie de las mismas afectada por la presencia de embalses.

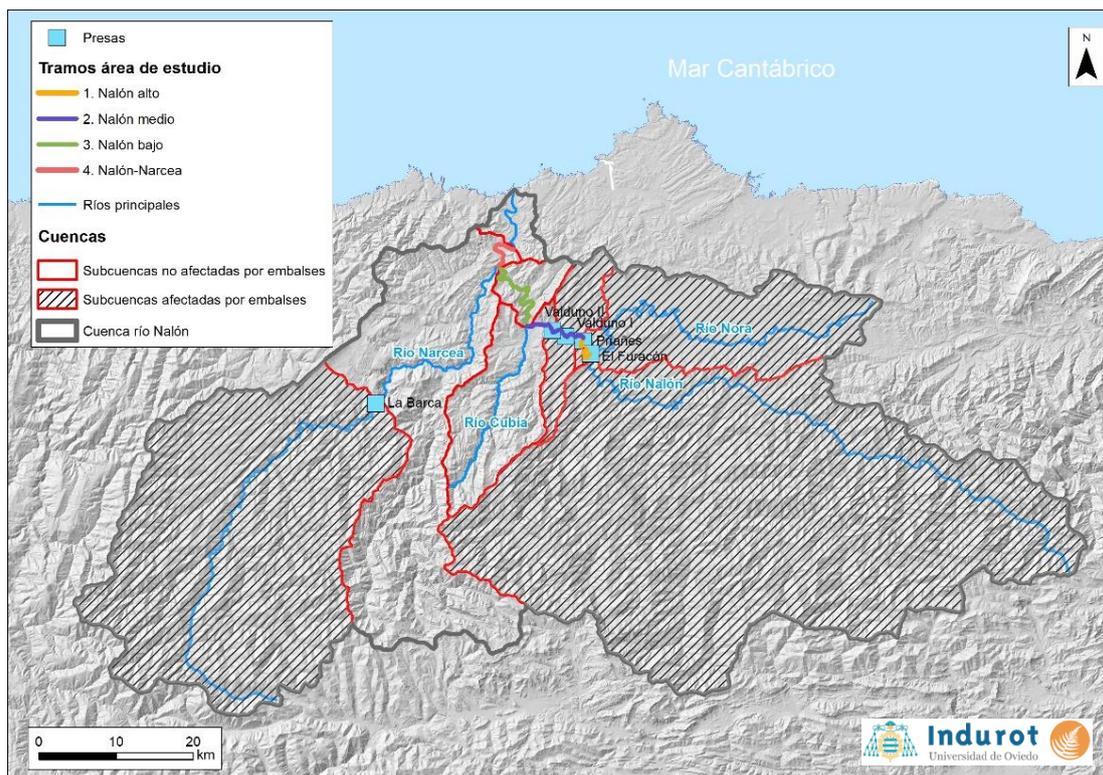


Figura 8. Cuenca del río Nalón y subcuencas de los tramos en los que se ha dividido el área de estudio. En rayado se muestra la superficie afectada por la presencia de los embalses de La Barca (Narcea), Priañes (Nora), El Furacón, Valduno I y Valduno II (Nalón).

Mencionar también algunas obras que, aunque no realizadas directamente en el cauce, pueden estar interfiriendo en la hidrodinámica del sistema fluvial.

2.2. Identificación y jerarquización de avenidas fluviales

Para analizar la información sobre eventos fluviales de cierta envergadura y reconstruir una secuencia de avenidas, se han consultado, por un lado, los valores máximos de nivel o caudal disponibles en varias estaciones de aforo de la cuenca del río Nalón y, por otro lado, para completar el periodo sin datos por las estaciones de aforo, se han consultado diversos referentes históricos sobre inundaciones.

De las estaciones presentes en el río Nalón, por disponibilidad de datos y por su proximidad al tramo de estudio se han seleccionado las estaciones de Grullos (1368) y Palomar (1371) en el Nalón y Quinzanas (1360) en el Narcea. Asimismo, se ha completado el registro con la estación de El Condado (1335) cerca de Pola de Laviana, que aunque más alejada permite abarcar un periodo de 46 años (Figura 9). De forma complementaria se han utilizado los datos más antiguos de la estación del Grado.

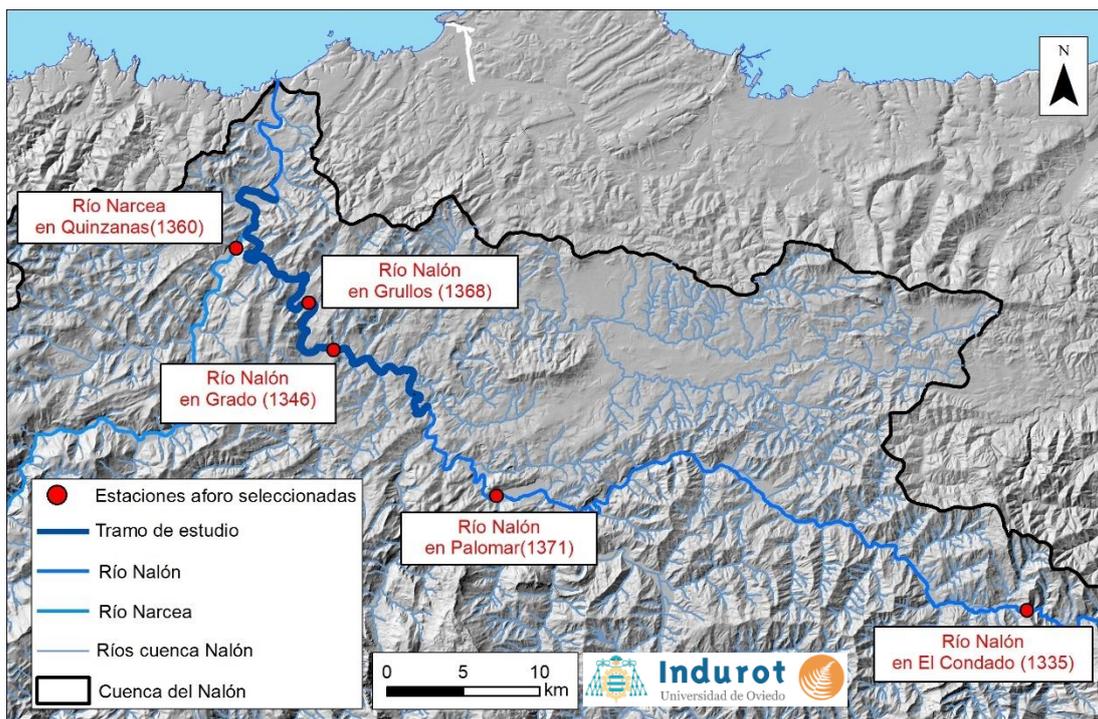


Figura 9. Localización de las estaciones de aforo seleccionadas para el estudio.

Hay que tener en cuenta que los caudales que circulan la mayor parte del tiempo por un río no producen cambios morfológicos significativos en el sistema. Son las avenidas de cierta entidad las que tienen capacidad de cambio geomorfológico. Teniendo en cuenta los umbrales estimados en el trabajo de Vázquez-Tarrío (2013) en el río Pigüeña y Vázquez-Tarrío *et al.* (2019b) en el río Esva, se han seleccionado las avenidas con periodo

de retorno entre 2 y 3 años como límite inferior preliminar para identificar avenidas con potencial efecto morfodinámico.

Con el fin de llevar a cabo la reconstrucción de la serie histórica de avenidas fluviales, se han utilizado los trabajos desarrollados en la Guía Metodológica para el desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables - SNCZI (MAGRAMA, 2011), ampliando la información hasta el año 2023. En dicha guía se plantea la recopilación de referentes sobre avenidas en fuentes documentales, encuestas a la población ribereña y técnicos fluviales, así como datos de las estaciones SAI de la Confederación Hidrográfica del Cantábrico, la posterior validación de eventos y finalmente un proceso para estimar su magnitud, basado en la jerarquización de las avenidas en función de su envergadura.

Con aquellos eventos de los que se dispone de información suficiente, se procedió a realizar una jerarquización de los mismos. Para realizar este análisis se ha aplicado el método establecido en la Guía Metodológica del SNCZI (MAGRAMA, 2011), incluyendo procedimientos complementarios publicados en Fernández et al. (2012). Se trata de un método que incluye estimaciones por intervalos basadas en métodos *Bootstrap* (Qi, 2008; Kumar y Chatterjee, 2009 y 2010), incluyendo el *studentized bootstrap* (Efron y Tibshirani, 1994).

Para ello, se utilizaron 5 indicadores relacionados con datos de caudal, alusiones a la magnitud del evento, número de encuestas que mencionan el evento de inundación, superficie afectada por la avenida y menciones al evento en otras fuentes documentales. La importancia de cada indicador es diferente, por lo que se computa como un intervalo de valores, con un máximo y un mínimo sobre la magnitud de cada evento. Con este procedimiento se persigue obtener una referencia de magnitud para aquellas crecidas que carecen de información de caudal, en este caso anteriores al año 1980, ofreciendo información relevante sobre todo a la hora de identificar las avenidas fluviales de mayor envergadura.

Este método ha permitido realizar la siguiente jerarquización de avenidas para el tramo bajo del área de estudio, tras la confluencia con el río Narcea:

$$1953 > 1959 > 2010 (T \approx 88) \geq 1980 > 1993 > 2019-1 (T \approx 30) \geq 2003 \geq 2007$$

Respecto al resto de avenidas, los resultados señalan que representan eventos de magnitud moderada a baja. Hay que tener en cuenta que los valores del periodo de retorno mostrados deben tomarse como orientativos, pudiendo estar sobredimensionando la magnitud, tal y como señalan algunos trabajos de hidrología cuando el periodo de datos con caudales es corto (e.g. Benito y Thorndycraft, 2004).

Adicionalmente, destacar que en el análisis estadístico de tendencias utilizando las avenidas de magnitud superior al evento de 2007, de periodo de retorno de 26 años, dirigido a valorar si existe alguna tendencia de cambio en la ocurrencia de grandes eventos o bien se mantiene constante, tras varios tratamientos, suponiendo normalidad y aplicando el test de Welch al nivel de significación del 5%, se puede afirmar que el tiempo medio entre eventos importantes a partir de 2000 ha disminuido notablemente con respecto al del periodo previo al año 2000 (Fernández-Iglesias et al., 2021).

2.3. Estudio geomorfológico del río Nalón desde 1945

El estudio evolutivo del cauce persigue identificar los cambios morfológicos en planta que se han producido desde los años 40 hasta la actualidad. El objetivo es cuantificar esos cambios y analizar las relaciones causa-efecto con determinados cambios tanto artificiales (presas, usos del suelo, canalizaciones) como naturales. Concretamente, desde el punto de vista geomorfológico, se han estudiado los cambios en la anchura del cauce y en el canal activo, además de otros índices morfométricos e identificadores como la sinuosidad, trenzamiento, número de islas, longitud de orillas erosivas, afloramientos rocosos en el lecho, etc. que pueden aportar información sobre la tendencia estable o cambiante de morfologías y procesos en el río Nalón.

Los métodos de cuantificación de cambios se han abordado seleccionando los fotogramas de las 13 fechas comprendidas entre el año 1945 y 2022. Por un lado, determinada información como la anchura del cauce y el canal activo se ha obtenido a partir del estudio de 71 perfiles trasversales al canal separados entre sí una distancia de unos 500 m (Figura 10). En la Figura 11 se muestra un ejemplo de dos perfiles próximos a la localidad de Pravia para el año 2020. Por otro lado, se ha utilizado información de longitudes procedente de líneas como las relativas a las orillas erosivas, sinuosidad, trenzamiento y canalizaciones. También se ha utilizado información de tipo polígonos para la cartografía de los afloramientos rocosos en el lecho del canal.

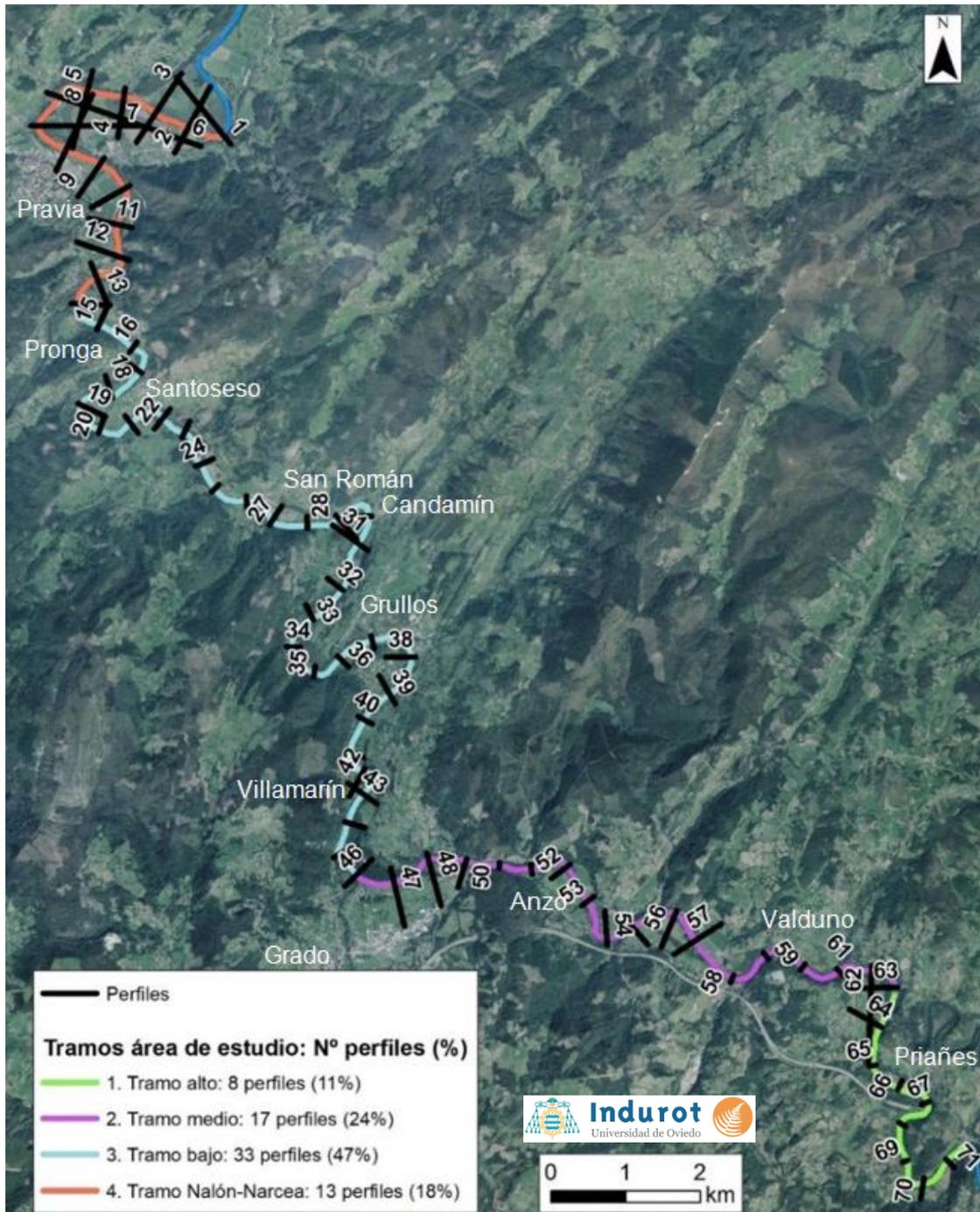


Figura 10. Ubicación de los perfiles transversales al cauce en el tramo de estudio entre el DPMT y el embalse del Furacón.

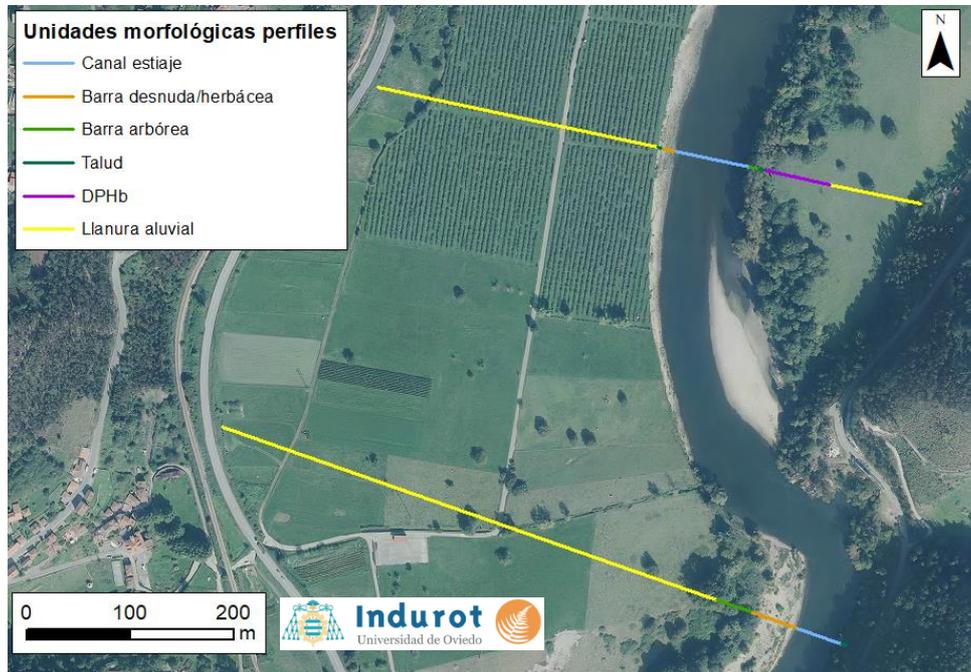


Figura 11. Perfiles realizados en un sector del área de estudio, en el entorno de Forcinas para el año 2020.

2.3.1. Cambios en la anchura del cauce

Según el análisis realizado, la anchura media del río Nalón en el tramo de estudio en los años 40 y 50 era similar, de unos 124 m. A partir de este momento se inicia un periodo de estrechamiento del río, que es más acusado durante el periodo 1994-2003, con una reducción media en la anchura de 0,6 m/año. En el año 2003 cesa esta tendencia y comienza un periodo sin cambios significativos que se extiende hasta el año 2019, seguido de un periodo hasta la actualidad en el que se produce un aumento en la anchura media. En síntesis, desde los años 50 el cauce se ha estrechado un valor medio de 16,1 m, que representa un 10,8% de su anchura original. En la Figura 12 y en la Figura 13 se muestran algunos ejemplos.

Podemos, por tanto, diferenciar 3 fases:

- Fase 1 de estrechamiento: 1956-2003
- Fase 2 sin cambios significativos: 2003-2019
- Fase 3 de ensanchamiento: 2019-2022

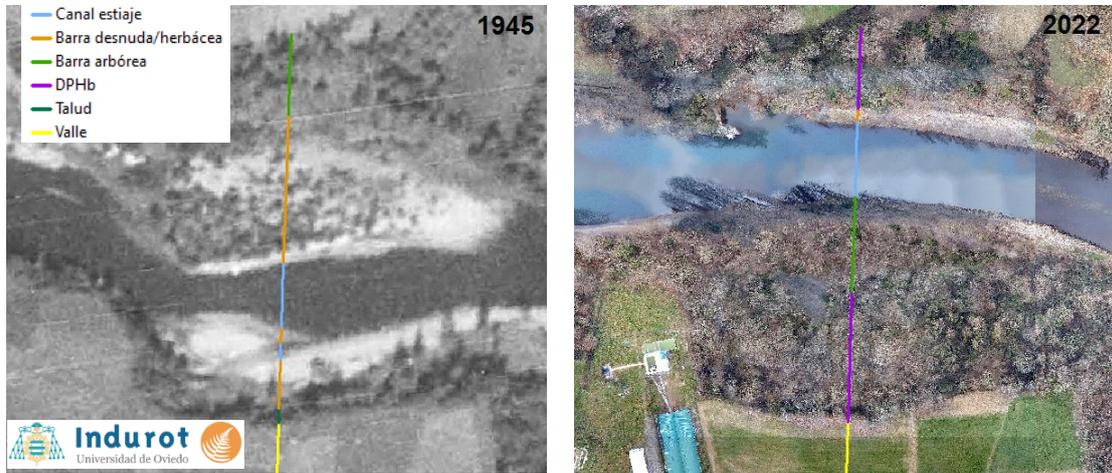


Figura 12. Imágenes comparativas del perfil número 62 en los años 1945 (izquierda) y 2022 (derecha) en el río Nalón aguas abajo de la confluencia con el río Nora.

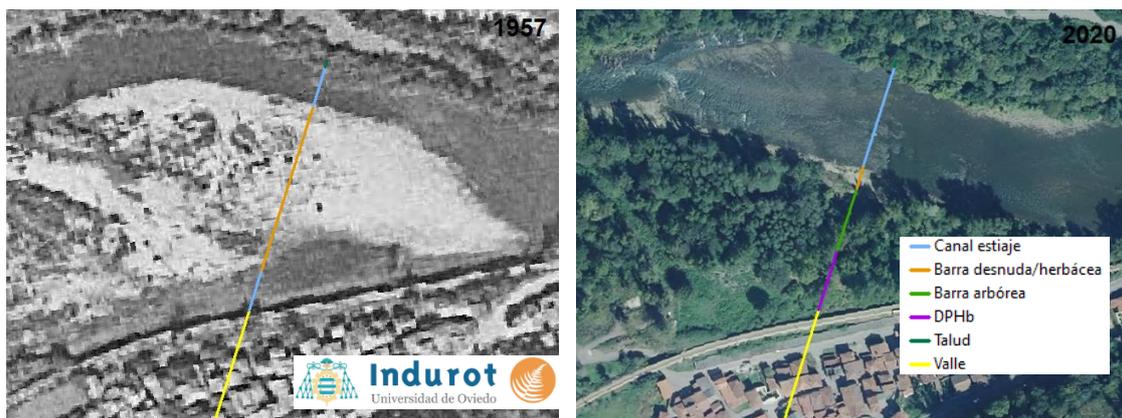


Figura 13. Imágenes comparativas del perfil número 49 en los años 1957 (izquierda) y 2020 (derecha) a la altura de Peñafior (Grado).

De los 71 perfiles repartidos a lo largo de la zona de estudio, 7 son perfiles que por causas naturales o artificiales no reflejan cambios significativos en las dimensiones del cauce (confinamiento rocoso, canalizaciones, láminas de agua embalsadas). Tomando de referencia lo que ha cambiado el cauce con respecto al que había en el año 1956, en el 47% de los perfiles se observa un estrechamiento, en un 14% se detecta un ensanchamiento y en el 39% restante no se reconocen cambios significativos en la anchura del canal (Figura 14). Esta variación por subtramos refleja que los sectores con ensanchamiento se concentran aguas abajo de la confluencia del río Cubia. No obstante, cabe destacar que los tramos sin aparentes cambios en anchura podrían estar experimentado procesos de encajamiento e incisión en la vertical, no visibles en las fotografías aéreas, tal y como se observa en varios sectores del área de estudio (Figura 15).

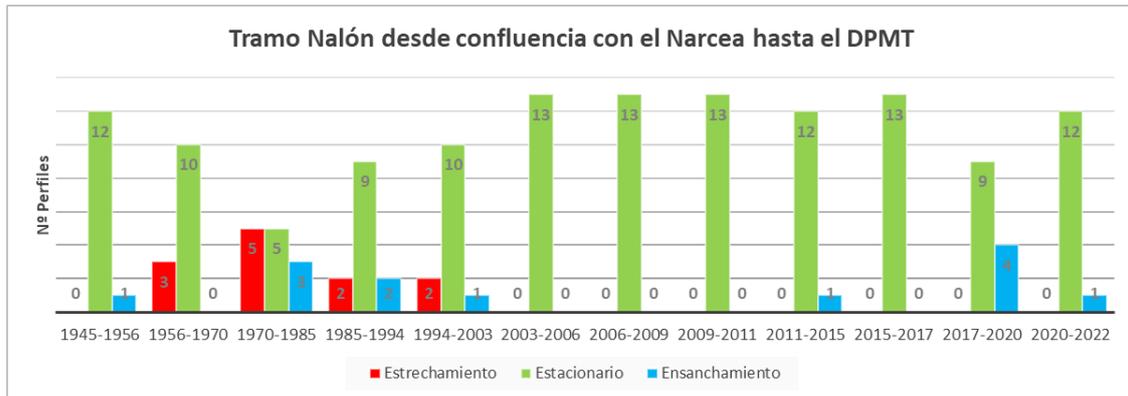
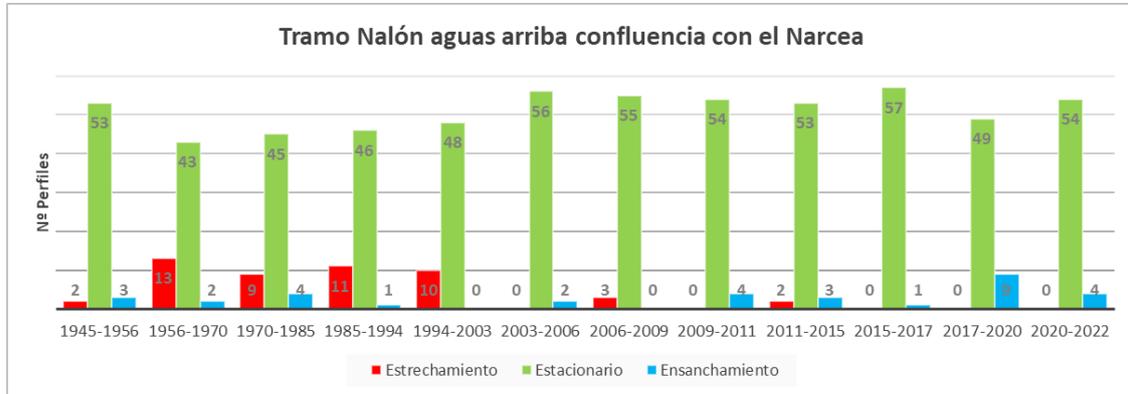


Figura 14. Evolución del ancho del cauce en cada período atendiendo al número de perfiles que muestran un ensanchamiento, estrechamiento o sin cambios significativos (estacionario).



Figura 15. Ejemplos de procesos de encajamiento e incisión del cauce en el área de estudio: a) en el pilar del puente de San Román (arriba izquierda), b) socavación en la base del muro del ferrocarril en el entorno de la localidad de Peñaflores (arriba derecha) y c) árboles con las raíces descubiertas cerca del embalse de Valduno II (abajo).

2.3.2. Cambios en la presencia de orillas erosivas

La identificación de orillas que muestran signos evidentes de erosión se ha realizado mediante fotografías aéreas y trabajos de campo (Figura 16). Se trata de una característica fluvial de interés para identificar potenciales situaciones de reajuste fluvial, sobre todo cuando son persistentes en el tiempo.



Figura 16. Trabajos de campo realizados para la identificación de orillas erosivas. A la izquierda mediante GPS y a la derecha en embarcación con cámara 360º.

Tras los análisis realizados, en las últimas dos décadas se puede observar una tendencia creciente de la erosión que continua en la actualidad (Figura 17 y Figura 18). Concretamente, casi un 17% de las orillas aluviales del área de estudio están sufriendo procesos erosivos activos. Este valor baja a un 14% si se considera el tramo previo a la confluencia del río Nalón con el Narcea (tramos alto, medio y bajo) y asciende a un 27% en el tramo tras la confluencia Nalón-Narcea.

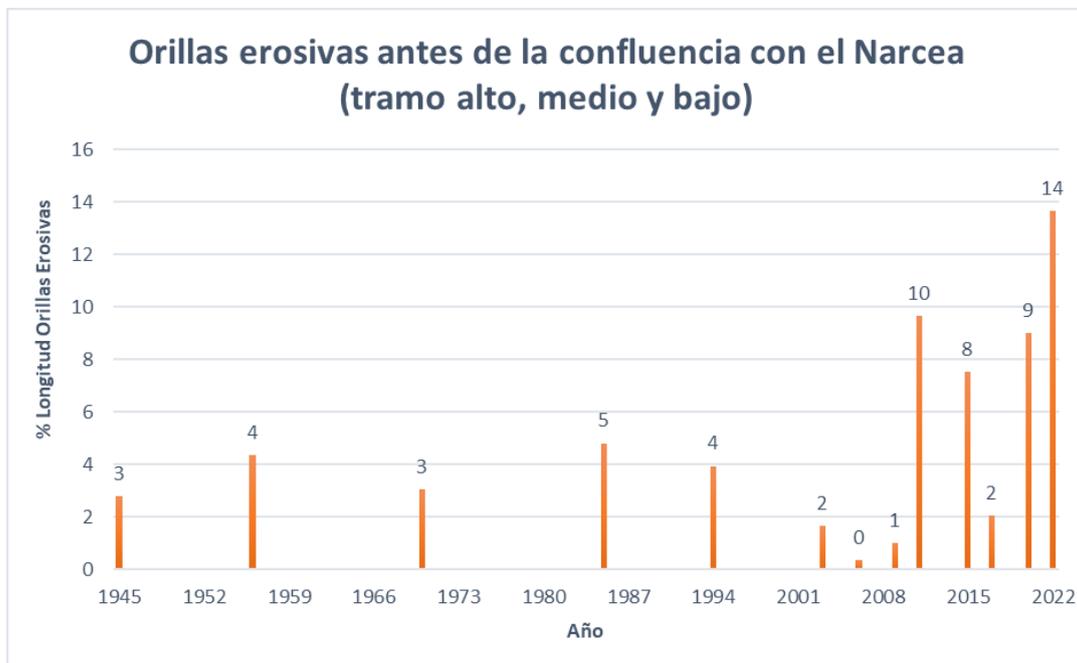


Figura 17. Evolución de orillas erosivas en el tramo del río Nalón antes de la confluencia con el río Narcea.

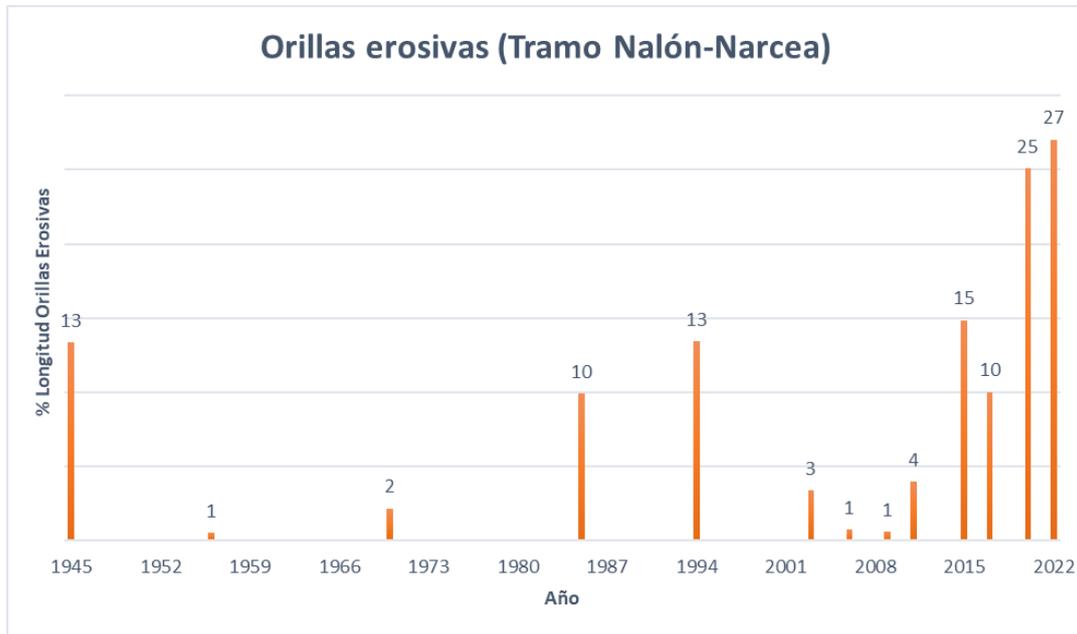


Figura 18. Evolución de orillas erosivas en el tramo bajo Nalón-Narcea.

2.3.3. Cambios en la presencia de afloramientos rocosos en el lecho

La cartografía de afloramientos rocosos se ha realizado en las fotografías aéreas que muestran caudales similares y bajos, seleccionado para ello las de los años 1970, 2003, 2017 y el vuelo dron del año 2022 como referencia. Los resultados muestran un aumento de los afloramientos rocosos en el lecho del cauce (Figura 19).



Figura 19. Afloramientos rocosos en el entorno de la localidad de Peñaflor.

En los dos tramos superiores (Figura 4) se concentra el 98% de los afloramientos rocosos identificados, tramos donde se localizan las presas del área de estudio, El Furacón,

Valduno I y Valduno II construidas en 1952, a principios de los 90 y en el año 2000 respectivamente. En el tramo más bajo, correspondiente al Nalón-Narcea, no se han identificado afloramientos de este tipo (Figura 20).

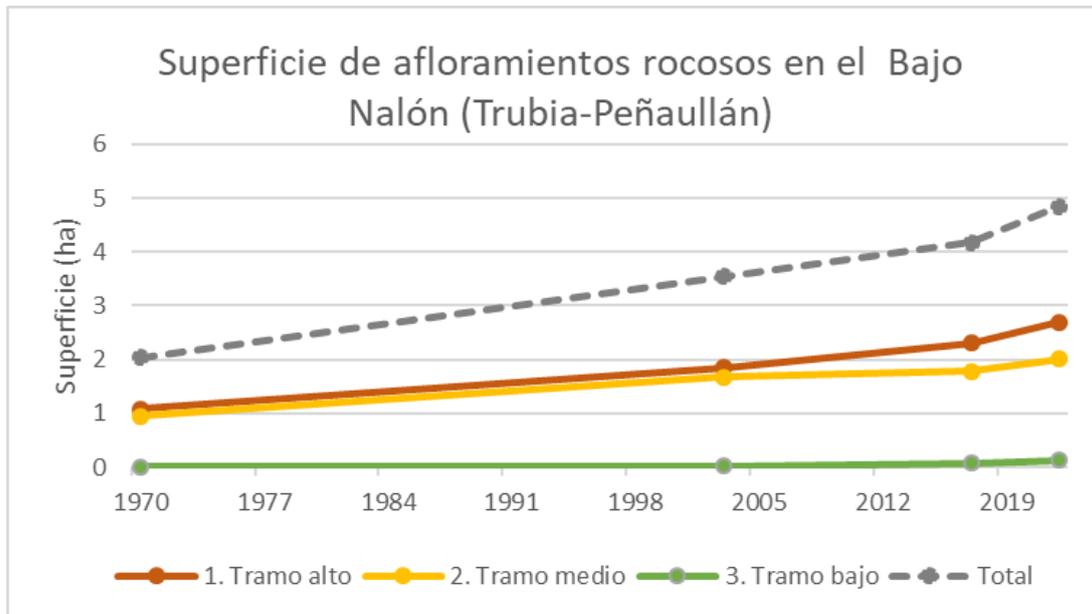


Figura 20. Evolución de la superficie cartografiada de afloramientos rocosos para cada uno de los tramos del área de estudio con presencia y el total.

2.3.4. Cambios en sinuosidad y trenzamiento

Se han estimado los índices de sinuosidad y trenzamiento. En el primer caso (Figura 21) se ha aplicado el método definido por Leopold y Wolman (1957) para cada una de las 13 fechas con fotografías aéreas disponibles.

Los resultados muestran que el tramo de estudio ha presentado valores de sinuosidad por encima de 2 durante el periodo analizado, desde el año 1945 hasta el año 2022, valores representativos de un río meandriforme.

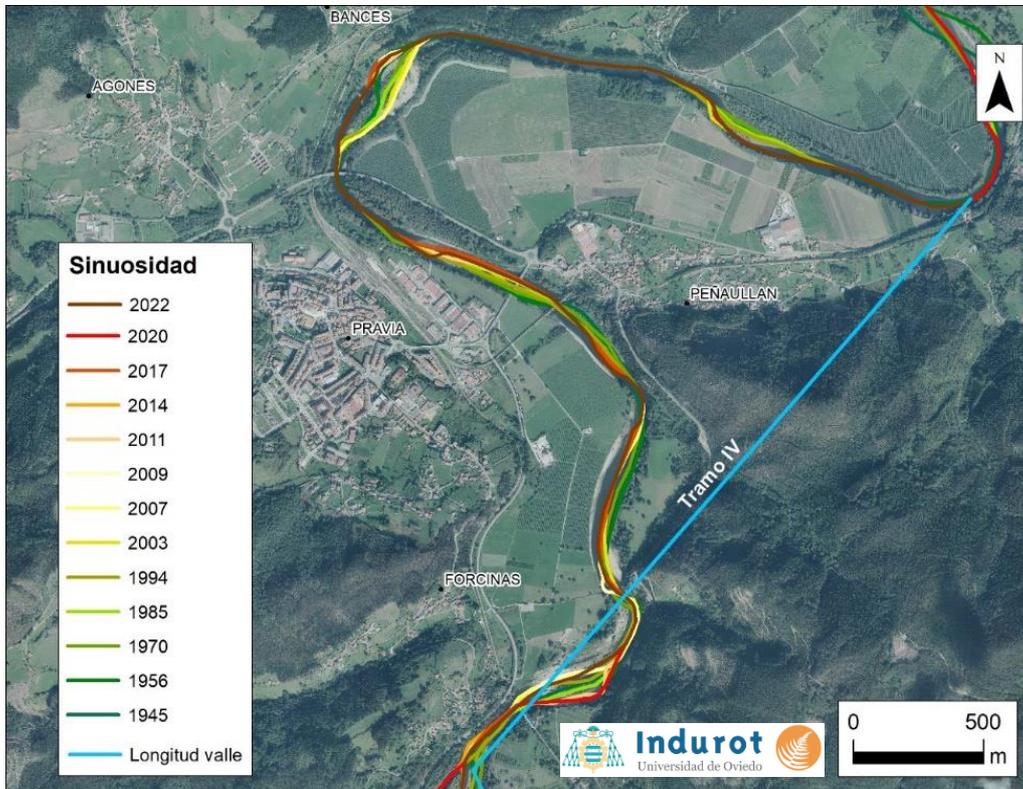


Figura 21. Cartografía del índice de sinuosidad en el último tramo del área de estudio para cada uno de los años analizados.

Aunque se reconocen algunas tendencias contrapuestas en el periodo analizado (Figura 22), con una variación ascendente entre 1945 al año 2009, seguida en el periodo 2009-2022 de una disminución progresiva hasta la actualidad, los valores de cambio son bajos.

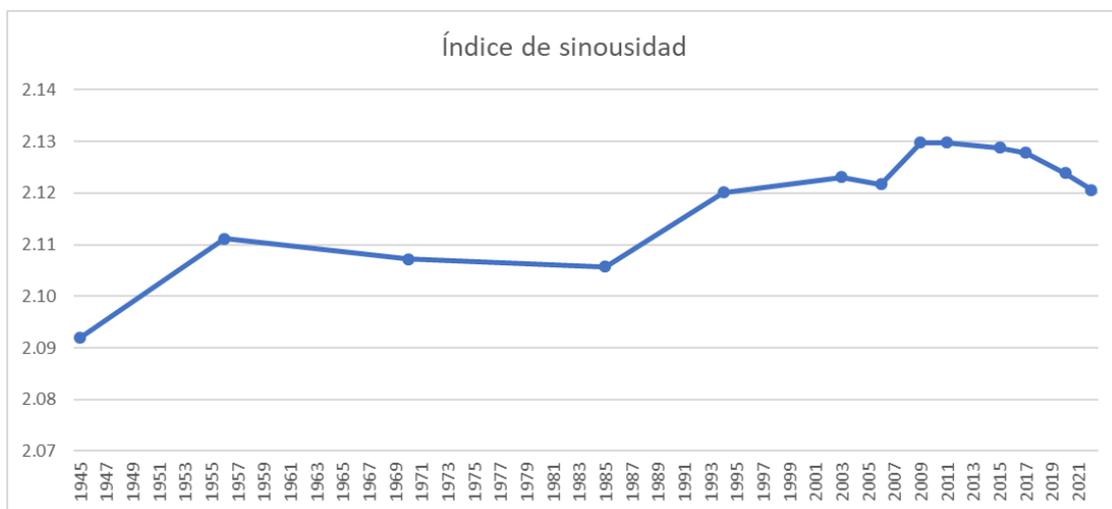


Figura 22. Evolución del índice de sinuosidad en el área de estudio.

Por otro lado, el índice de trenzamiento (*braiding*) calculado según Mosley (1981) indica que se trata de un tramo moderadamente trenzado de tipo *wandering*. Las variaciones de este índice también son reducidas (Figura 23).

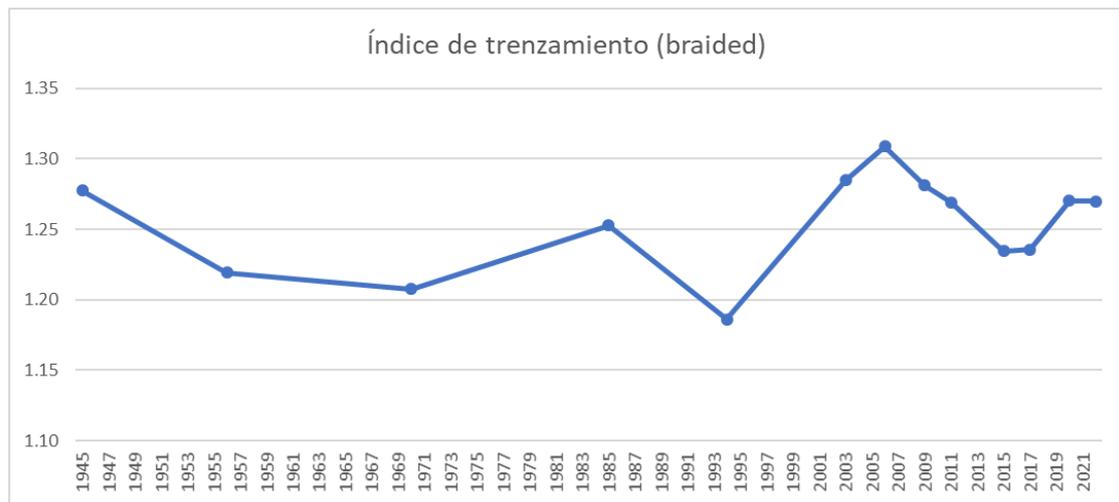


Figura 23. Evolución del índice de trenzamiento *braided* en el área de estudio.

En algunos de los cambios de estos índices puede reconocerse el efecto de avenidas de envergadura, como la disminución de sinuosidad tras la crecida de junio de 2010 o el aumento de trenzamiento tras la de enero de 2019. También el déficit de sedimento aguas abajo de las principales presas podría estar participando en la variación de sinuosidad en el periodo entre 1956 y 2009. No obstante, estas variaciones no son de gran envergadura y deben complementarse con otros análisis para poder realizar interpretaciones.

2.4. Análisis integrado: potenciales causas de los reajustes en el cauce

La balanza hidrosedimentaria que definió Lane (1955) ilustra muy bien los ajustes que puede experimentar la morfología de un río a las variaciones en las cantidades de los caudales líquido y sólido (Figura 24). Concretamente, Lane expresó la relación $LD \sim QS$, donde D es el tamaño de grano del material del lecho, L es la carga de sedimento transportado, Q es el caudal y S es la pendiente. Dicha relación señala que en el caso de que el aporte de sedimento al canal disminuya, ante un caudal que no varía de forma significativa, el lecho del río trataría de compensar esa carencia mediante un aumento de la granulometría del lecho o mediante una disminución de la pendiente. A continuación, se analizan las causas que pueden cambiar las variables implicadas, diferenciando entre las de origen natural de las artificiales.

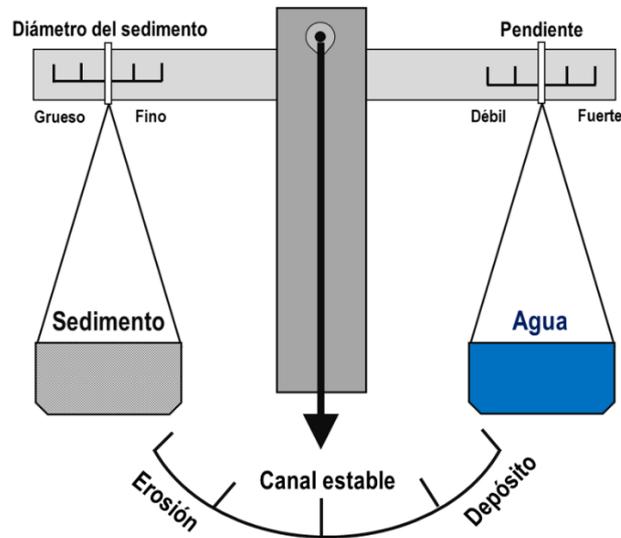


Figura 24. Balanza de Lane (Fuente: D. Vázquez-Tarrío, modificado de Lane, 1955).

2.4.1. Incidencia de procesos naturales

Teniendo en cuenta la balanza de Lane (1955), una variación en la cantidad de caudal líquido puede provocar cambios en el cauce. En este sentido, entre los procesos naturales que podrían hacer variar este caudal se encuentra el aporte de agua al sistema.

Si atendemos a la cantidad de lluvia total, a priori no se estima que se hayan producido variaciones significativas durante el periodo analizado que puedan explicar las transformaciones observadas en el tramo de estudio. No ocurre lo mismo si tenemos en cuenta la ocurrencia de episodios extremos. Algunos de los trabajos que analizan la cantidad de lluvia horaria, detectan un aumento del número de episodios tormentosos cortos o de pocas horas en la zona central de Asturias (Fernández-Iglesias et al., 2019a y 2019b), aunque dicha variación tendrá más repercusión en arroyos de tipo torrencial más que ríos grandes como el analizado.

Respecto a los eventos de mayor duración, ya con potencial incidencia en tramos como el bajo Nalón, el análisis estadístico de avenidas realizado en el apartado 2.2 *Identificación y jerarquización de avenidas fluviales* señala para el periodo 1938-2020 un aumento en la frecuencia de avenidas de gran magnitud, al detectarse que el tiempo medio entre eventos durante ha disminuido estadísticamente de forma efectiva (Fernández-Iglesias et al., 2021).

Hay que tener en cuenta que el impacto geomorfológico de avenidas extremas, ampliamente documentado en la bibliografía, es definido como la cantidad de cambio morfológico causado y el tiempo posterior requerido para que el cauce recupere unas

determinadas condiciones de contorno. Aunque la respuesta de un cauce a estos eventos es variable y dependiente de múltiples factores, la concatenación de varias avenidas de envergadura recorta los tiempos de recuperación y adaptación del cauce. Por lo tanto, un aumento en la frecuencia de avenidas intensas puede repercutir en la morfología del río Nalón, tanto en los cambios ya observados, como en los previsible a corto y medio plazo. No obstante, destacar que estos eventos, que son el motor de las transformaciones, no pueden explicar por sí solos determinados ajustes de carácter global y persistentes en el tiempo que ha experimentado el río Nalón.

Al representar las avenidas de entidad junto con las variaciones en la anchura del cauce, se pone de relieve la influencia de otras variables diferentes a la ocurrencia de grandes avenidas (Figura 25). Se observa que a pesar de la ocurrencia de avenidas de envergadura significativa entre los años 50 y los 2000, el cauce ha mantenido su tendencia al estrechamiento. Por otro lado, la avenida del año 2019 ha provocado mayor ensanchamiento que la de junio de 2010, a pesar de su menor envergadura.

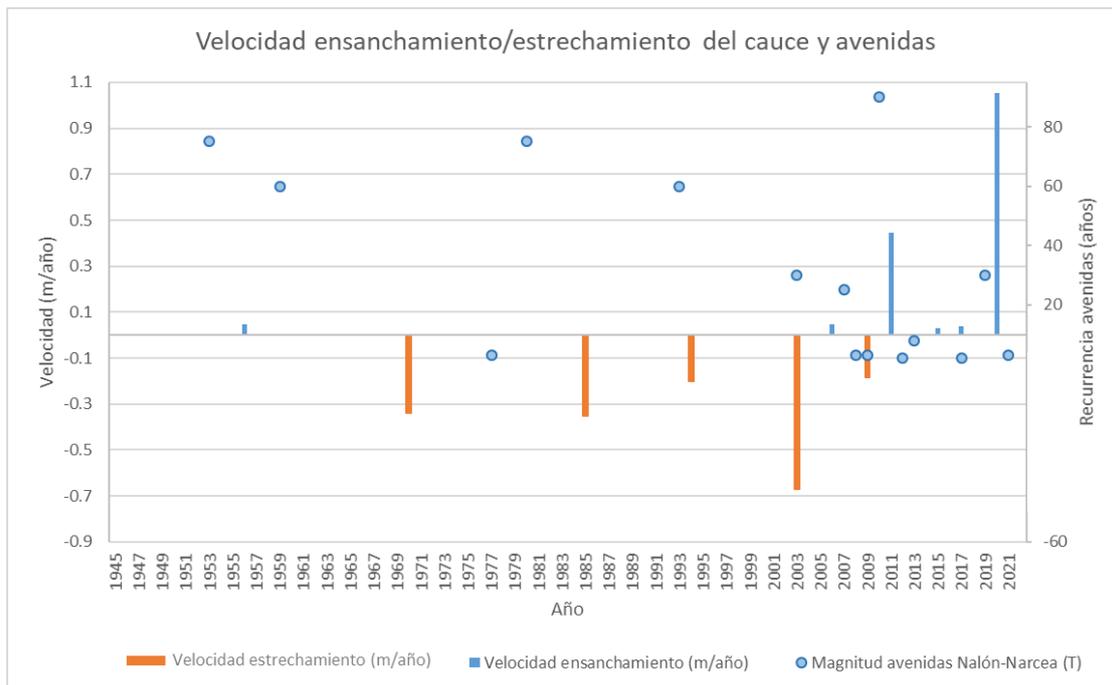


Figura 25. Se representan las avenidas de entidad, junto a la evolución la velocidad promedio de la anchura del cauce.

2.4.2. Incidencia de actividades de origen antrópico

Como se ha indicado previamente, entre las acciones del hombre con potencial incidencia en la morfodinámica fluvial, se encuentran las presas más cercanas al área de

estudio. Varios embalses fueron construidos en el río Narcea y en el Nora en las décadas de los años 50 y 60, y en el Nalón más recientemente en los años 90 y 2000, que pueden afectar de forma diferente al tramo del área de estudio comprendido entre el embalse del Furacón y la confluencia con el Narcea, y el ubicado aguas abajo de esta confluencia hasta el límite con el DPMT.

Hay que tener en cuenta que estas obras podrían modificar tanto el régimen de flujo como el transporte sedimentario. En relación con este último, en el trabajo de Dethier et al. (2022) se estimó, tras estudiar 40 presas, que un 49% del sedimento en suspensión queda atrapado por estas estructuras. Teniendo en cuenta el cómputo total de sedimento tanto el de suspensión como el de fondo, la retención podría ser del 70%. Sin embargo, centrándose exclusivamente en la denominada carga de fondo, algunos autores apuntan que estas infraestructuras pueden llegar a retener hasta el 99% de este material sedimentario más grueso (Williams and Wolman, 1984).

La superficie de cuenca afectada por embalses en el tramo de estudio es muy significativa para los diferentes subtramos, con valores entre 79 y 99%, con un valor medio para todo el tramo del 90% (Tabla 3 y Figura 8). Si bien estas obras podrían causar cambios en el balance sedimentario debido a variaciones en la magnitud de las avenidas, los estudios disponibles en el tramo de estudio señalan que la capacidad de laminación para avenidas de periodo de retorno significativo es despreciable (<5% en el embalse de La Barca) o inexistente (Jiménez et al., 2011). En el análisis para avenidas de periodo de retorno de 2 años, aplicando el método Jiménez et al. (2011) en el Furacón, tampoco se observa laminación para el tramo Nalón y se estima que, de existir en la presa de La Barca, sería de baja repercusión para el tramo Nalón-Narcea más bajo del área de estudio. Por lo tanto, aguas abajo de las presas los flujos líquidos serían competentes para la evacuación de sedimento y para poder producir incisión y encajamiento del canal.

No obstante, y aunque el efecto en los flujos de agua de las presas y de las variaciones en la cantidad total de lluvia puedan no ser de gran entidad durante el periodo analizado, no se descarta que en las últimas décadas se haya producido alguna disminución de caudales en relación con los cambios de los usos del suelo. Representan variaciones que pueden repercutir en los caudales de sección llena o de desbordamiento o en los caudales que superan el umbral de arrastre de un tamaño de grano de referencia y, por tanto, en la morfodinámica de los ríos. Esta situación se relaciona con el aumento de la superficie forestada en la cuenca, como consecuencia de la migración de la población desde las zonas rurales hacia las zonas urbanas que ha tenido lugar en Asturias desde los años 60 y 70, así como de la gestión del territorio. Algunos trabajos realizados en el ámbito cantábrico han cuantificado estos cambios en varias cuencas fluviales, estimando un aumento de la superficie forestada de hasta el 30% (Marquínez

et al, 2018). También se ha cuantificado una disminución en el caudal asociado a estos cambios, que para las avenidas de periodo de retorno de 2 y 5 años alcanzan valores de 24 y 15% respectivamente, que han ido acompañados por estrechamientos del cauce.

También son esperables afecciones en el balance sedimentario derivadas de las canalizaciones realizadas los tramos medios y altos del río Nalón y Caudal, obras realizadas entre los años 70 y 90 que han retenido material en las llanuras aluviales y que suelen implicar encajamientos del canal (Brookes, 1987; Simon y Rinaldi, 2000). Aunque estos procesos ya han sido identificados en algunas canalizaciones en el río Narcea (Fernández-Iglesias et al., 2006; Vázquez et al., 2011), no se dispone de datos cuantitativos sobre su potencial repercusión en los caudales sólidos.

Por lo expuesto, en el tramo de estudio se ha producido una disminución significativa en el suministro de sedimentos, especialmente importante en el sedimento de fondo teniendo en cuenta que al menos el 90% de la cuenca de drenaje está afectada por presas. También puede haberse dado alguna variación de caudales en relación con los cambios en los usos del suelo, aunque proporcionalmente no comparable a la alteración del sedimento. Teniendo en cuenta la relación de Lane (1955), dicha alteración implica que la capacidad de transporte del flujo es mayor que el correspondiente al aporte de material grueso, y que son esperables reajustes morfológicos y erosión en el canal, procesos ampliamente documentados en la bibliografía. El aumento de los afloramientos rocosos identificado en el lecho del cauce (Figura 19 y Figura 20) y observado desde al menos los años 70 sería acorde con esta menor llegada de sedimento.

El modelo evolutivo del canal asociado a una alteración de sedimento como la identificada en el tramo de estudio (Schumm et al., 1984; Simon, 1989; Surian y Rinaldi, 2003; Thompson et al., 2016) describe ajustes en la geometría del canal mediante dos mecanismos principales (e.g. Brandt, 2000; Chien, 1985): una fase inicial de profundización y estrechamiento del cauce, seguido de una socavación y derrumbamiento de la orilla, que finalmente conducen a la ampliación del canal (Figura 26 y Figura 27). Este modelo describe las siguientes fases:

1. Estadio I o *pre-modificado*, que corresponde al estadio de las condiciones previas a la implantación de cambios en el sistema fluvial. Esta fase en el Nalón estaría representada en el periodo 1945-1956. Entre 1952 y 1966 se construyen varios embalses en los ríos Nalón y Narcea. Puede considerarse la situación del cauce en el año 1957 como representativa de condiciones “naturales” o imagen de referencia, época en que los embalses estaban recién construidos y apenas había canalizaciones.

2. Estadio II o modificado. Los procesos de degradación del lecho han comenzado. Esta fase en el Nalón estaría representada durante el periodo 1956-1970. Los índices de sinuosidad y trenzamiento disminuyen, la presencia de orillas erosivas es significativa y al menos en 15 perfiles de los analizados ya se detectan procesos de estrechamiento del canal. Estas evidencias señalan que los procesos de degradación del lecho han comenzado, con una reducción media de la anchura del cauce del 3,9%.

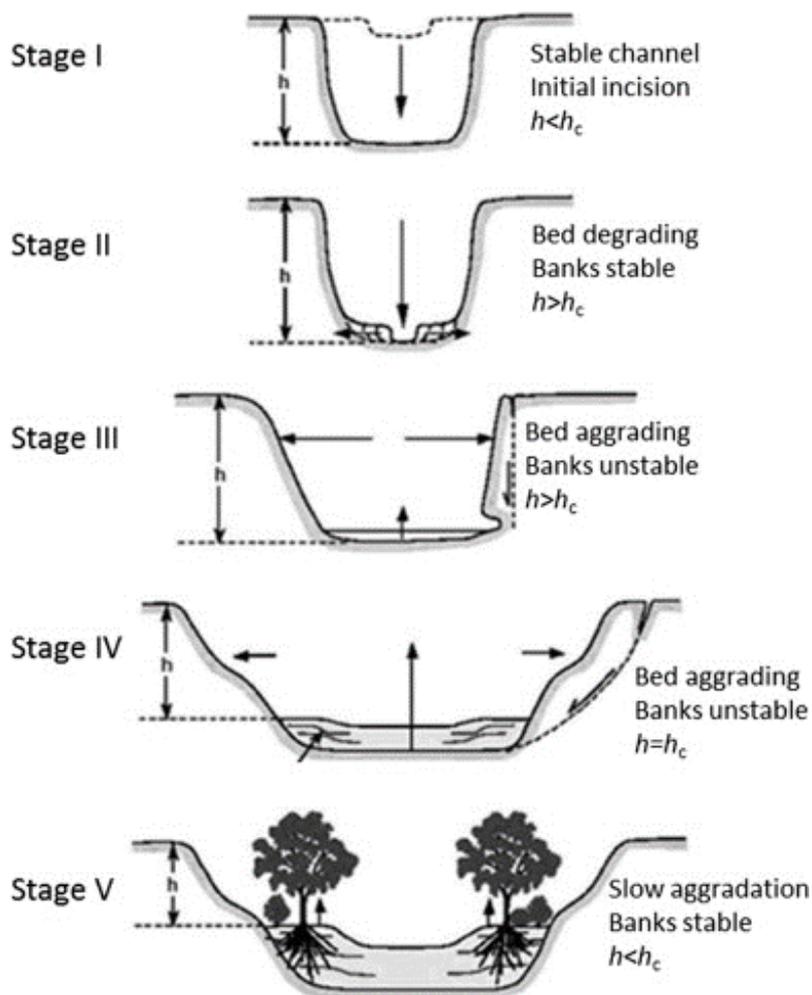


Figura 26. Modelo evolutivo del canal (Fuente: Schumm et al., 1984), donde h es la altura de orilla y h_c es la altura de orilla crítica.

3. Estadio III encajamiento y degradación. El encajamiento del lecho alcanza una envergadura que genera orillas de altura críticas y vulnerables, comenzando a generarse desplomes y orillas erosivas que derivan en algunos ensanchamientos del cauce. Esta fase en el Nalón estaría representada durante el periodo 1970-1994. El encajamiento ya afecta a una parte importante de los perfiles, y se estima una reducción media en la anchura del cauce del 2% adicional al del periodo anterior, mostrando una mayor progresión en el tramo más bajo tras la

confluencia con el Narcea. El índice de trenzamiento alcanza su valor mínimo, situación que sería acorde con una disminución en los aportes de sedimento, y la altura de la orilla crítica ya se ha alcanzado en al menos 9 perfiles, donde los desplomes han comenzado a generar ensanchamientos del cauce.

4. Estadio IV ensanchamiento y agradación. El colapso y desestabilización de las orillas alcanza mayores dimensiones, los ensanchamientos del cauce son de mayor entidad, a la vez que comienza un proceso de agradación del lecho con aumento de barras en el interior del cauce, como consecuencia del sedimento aportado por las orillas que están colapsando. Esta fase en el Nalón estaría representada en el periodo 1994-2003. La agradación/sedimentación del lecho ya se evidencia con un cambio de tendencia desde 1983, acorde con el aumento del índice de trenzamiento. Si bien se estima que el estrechamiento prosigue, a partir del año 2003 se produce un aumento de los procesos de ensanchamiento y estabilización del cauce.
5. Estadio V de Quasi-Equilibrio, V. Este proceso de agradación continuará hasta que el sistema configure una morfología en equilibrio, adaptada a las nuevas condiciones hidrosedimentarias del sistema fluvial, aumentado la colonización por vegetación de ribera de las áreas activas. El mayor ensanchamiento detectado en algunos tramos podría apuntar a una mayor cercanía hacia este estadio, aunque es difícil concretarlo para todo el área de estudio dado el desigual desarrollo de las fases (Figura 14).

Hay que tener en cuenta que la velocidad o duración de las variaciones en la geometría del cauce vendrá determinado por la magnitud del déficit de sedimentos, la magnitud y momento de las avenidas fluviales y la erosionabilidad del lecho y márgenes del canal.



Figura 27. Variaciones en la anchura del cauce en el río Nalón en las inmediaciones de la confluencia con el río CUBIA acordes con las diferentes fases del modelo evolutivo del canal.

3. Análisis biológico del corredor fluvial

El río y su entorno incluyen un conjunto diverso de ecosistemas adaptados a diferentes condiciones muy variables tanto en la dimensión espacial como temporal. Pocos centímetros son suficientes para marcar una clara línea que separa ambientes muy diferentes, constituyendo claros ecotonos. Simultáneamente una misma posición puede sufrir, a lo largo del año, variaciones ambientales drásticas siendo necesaria la adaptación de sus elementos biológicos a esta alta inestabilidad. Todo ello confiere a los ecosistemas fluviales unas características que los hace valiosos, biodiversos y frágiles.

En este capítulo se incluyen los análisis realizados para evaluar el estado de los ecosistemas fluviales terrestres y acuáticos del área de estudio abordando esta tarea a través del análisis de la vegetación y la fauna. El área de estudio seleccionada abarca la envolvente del cauce o Dominio Público Hidráulico Cartográfico delimitado en el visor del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables.

3.1. La cubierta vegetal

Según la información del Instrumento de Gestión Integrado (IGI) de la Zona Especial de Conservación (ZEC) del Río Nalón (ES1200029) existen al menos cinco Hábitats de Interés Comunitario (HIC) y uno de ellos es prioritario, el correspondiente al hábitat 91E0* (Bosques aluviales de *Alnus glutinosa* y *Fraxinus excelsior* (*Alno-Padion*, *Alnion incanae*, *Salicion albae*). Este hábitat es el más abundante de los HIC presentes y representa la etapa forestal madura esperable en la ribera fluvial del Nalón. Además, en el IGI, es el único que se considera de relevancia y con necesidad de aplicar medidas de gestión.

El análisis de la cubierta vegetal terrestre y acuática, se ha abordado desde diferentes perspectivas usando análisis florísticos para definir las comunidades vegetales presentes y a través de una cartografía detallada de su distribución. Estos estudios han permitido valorar el estado actual de la vegetación a través del cálculo de varios indicadores. Además, se han georreferenciado focos de Especies Exóticas e Invasoras (EEI) presentes en el área de estudio para poder establecer medidas de control sobre esta amenaza medioambiental.

3.1.1. La vegetación en las márgenes erosivas

Se ha analizado la calidad del bosque de ribera en 31 tramos con márgenes erosivas en las riberas del río Nalón. Siguiendo la metodología propuesta en Munné et al. (1998; 2003), se calculó el Índice de Calidad del Bosque de Ribera (QBR, *Índex de qualitat del*

bosc de ribera). Los valores del índice, establecidos como múltiplos de 5, se definen en el conjunto de las dos márgenes fluviales y oscilan entre 0 (mínima calidad) y 100 (máxima calidad).

En la Figura 28 se muestran los resultados de valoración de la calidad del bosque de ribera (Índice QBR) para cada uno de los tramos analizados.

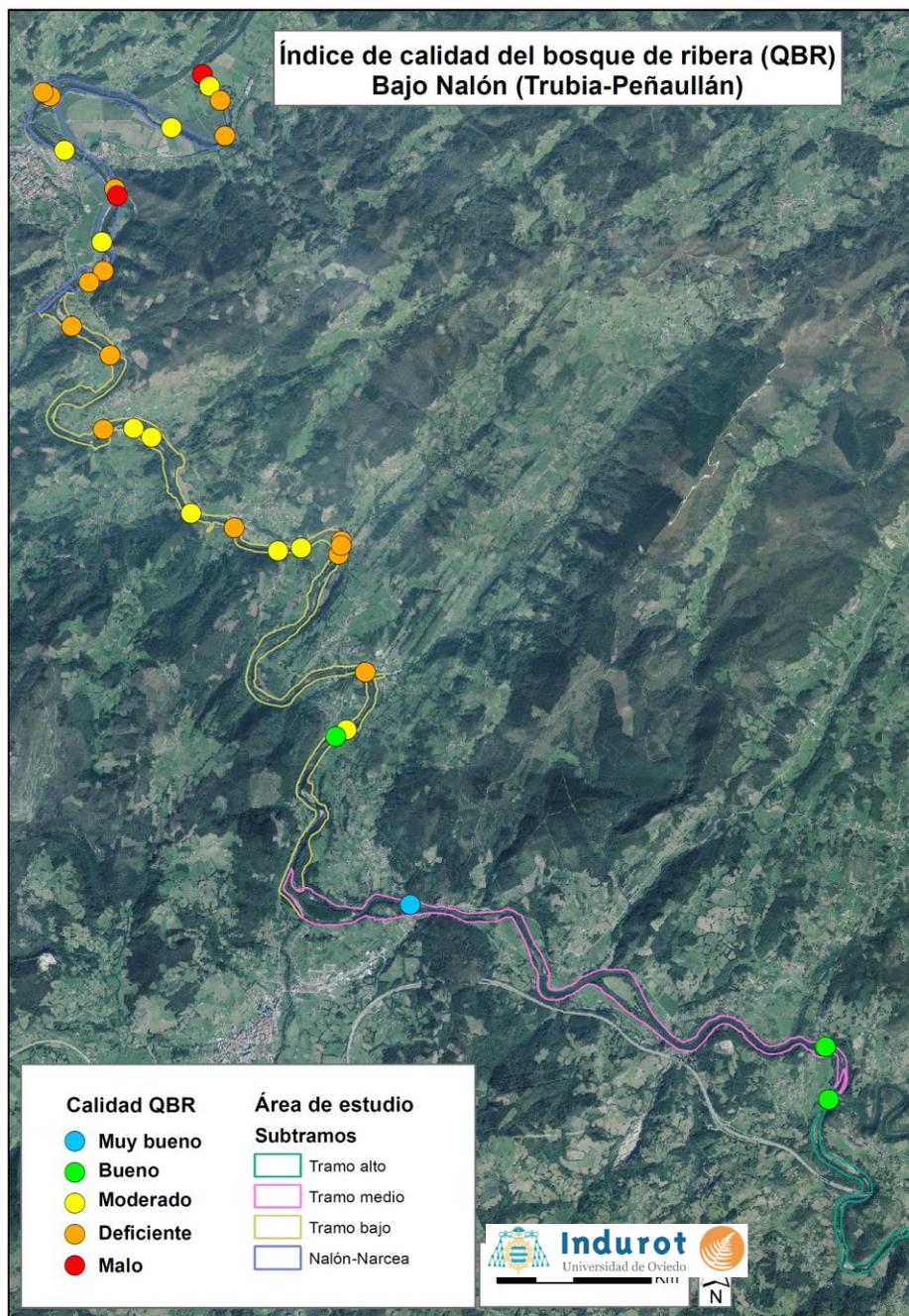


Figura 28. Índice de calidad del bosque de ribera (QBR) en el área de estudio.

Los resultados muestran que, en la mayor parte de los tramos con procesos erosivos analizados, el bosque de ribera presenta problemas de conservación significativos, por sus reducidas dimensiones, el alto grado de fragmentación y la masiva presencia de especies alóctonas e invasoras que, en ocasiones, llegan a constituir la masa principal del arbolado ribereño. Los mejores resultados han sido en los emplazamientos ubicados en los tramos superiores. Dos de los emplazamientos ubicados en el tramo más bajo, próximos a las localidades de Peñauillán y Pravia, han dado un resultado de QBR malo, y el resto se han clasificado como moderado y deficiente.

3.1.2. Análisis florísticos y de la estructura de la vegetación

El objetivo principal de este análisis es la caracterización de la vegetación que medra en diferentes unidades geomorfológicas del área de estudio.

Para la recolecta de los datos florísticos se usó la metodología de la escuela fitosociológica sigmatista de Zürich-Montpellier (Braun-Blanquet, 1979) y se recopilaron en las fichas de campo los siguientes parámetros descriptivos:

- Geolocalización.
- Datos fisiográficos: altitud, pendiente, orientación.
- Cobertura total de la vegetación (%).
- Cobertura por estrato de la vegetación (%).
- Abundancia/dominancia de cada especie (Braun-Blanquet, 1979).
- Estrato al que pertenece cada especie (arbóreo, arbustivo, matorral, lianas, herbáceo).

Durante la primavera-verano 2022 se realizaron un total de 47 inventarios, 45 de ellos a lo largo del río Nalón y dos adicionales en las riberas del río Cubia, afluente del Nalón.

3.1.2.1 Resultados

3.1.2.1.1 Riqueza florística y tipos de vegetación

En la totalidad de las áreas inventariadas se encontraron 245 taxones, de los cuales 214 (87%) son autóctonos y los restantes 31 (13%) son alóctonos (Figura 29). Entre los taxones alóctonos destacan, por su capacidad invasora, *Buddleja davidii*, *Fallopia japonica* y *Tradescantia fluminensis* que están incluidos en el Catálogo español de especies exóticas invasoras (Real Decreto 630/2013, de 2 de agosto) y que requieren medidas de gestión, control y posible erradicación.

Entre los taxones de plantas nativas, 67 (27% del total) son características del hábitat 91E0* Bosques aluviales de *Alnus glutinosa* y *Fraxinus excelsior* (*Alno-Padion*, *Alnion*

incanae, *Salicion albae*). Este hábitat de interés comunitario está incluido en el Anexo 1 de la Directiva 92/43/CEE como prioritario (amenazado de desaparición en territorios europeos) indicando que su conservación supone una responsabilidad especial para la UE.

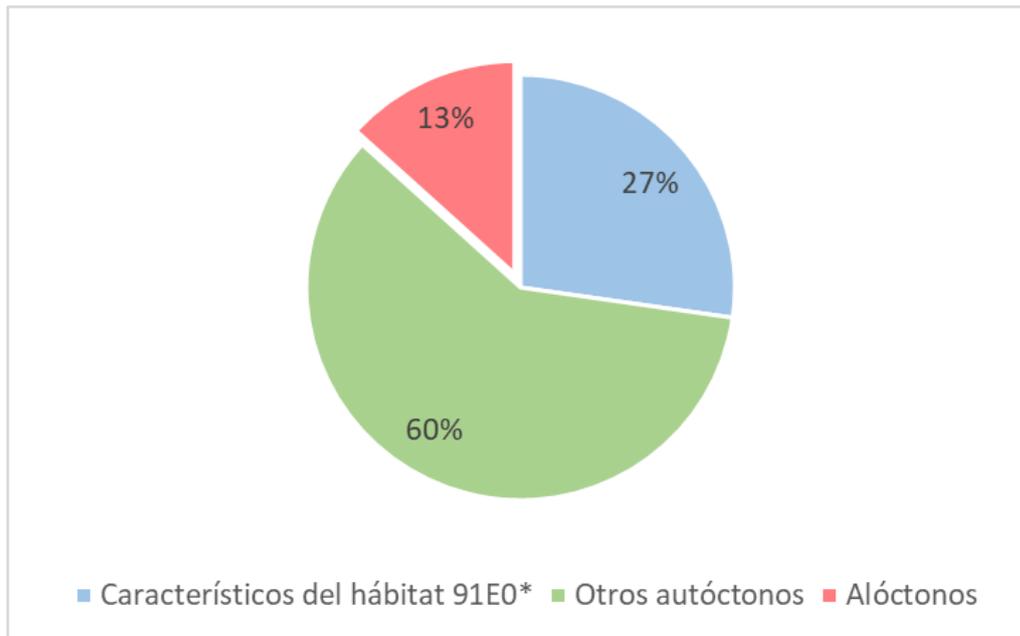


Figura 29. Porcentaje de los taxones vegetales característicos del hábitat 91E0* Bosques aluviales de *Alnus glutinosa* y *Fraxinus excelsior*, otros taxones autóctonos, y alóctonos recopilados en los inventarios florísticos realizados.

La mayor riqueza florística (número de taxones en un área determinada) se ha encontrado en las barras fluviales y en las riberas jóvenes.

En el caso de los taludes erosivos, se nota una disminución de las especies vegetales autóctonas. Las especies que mejor se adaptan a los taludes erosionados y les dan algo de estabilidad estructural son los equisetos, que poseen una resistente y extensa red de rizomas.

Las riberas maduras presentan un buen número de especies características de los bosques ribereños, y probablemente si no estuviesen perturbadas por las actividades humanas (ej. cultivos forestales) su bosque potencial sería el bosque higrófilo dominado por alisos, fresnos y sauces (sobre todo *Salix atrocinerea*).

El bosque de ribera es la unidad de vegetación que presenta más riqueza florística en especies nativas y características de las alisedas atlánticas, seguido por las comunidades pioneras y los pastizales y zarzales. La unidad de vegetación que menos especies nativas ha presentado es la de las comunidades anfibias, debido a la alta especialización que tienen que tener las plantas para poder sobrevivir en un medio que está casi siempre

inundado. Por el contrario, en las plantaciones forestales hay una reducción de la riqueza debida a causas antrópicas, que según los datos supone un decremento del número de taxones autóctonos del 30% respecto al bosque de ribera. Hay que tener en cuenta que las plantaciones forestales donde se realizaron los inventarios poseían un sotobosque poco manejado en el que la vegetación autóctona, aunque con dificultad se podía desarrollar. En el bajo Nalón hay plantaciones forestales muy densas de robinias y eucaliptos en las que el sotobosque nativo no consigue prosperar y cuya riqueza florística sería más baja que la estimada en este trabajo. Se ha observado que se puede desarrollar un bosque maduro bajo la sombra de los chopos de grandes dimensiones (más de 40 m) que, aunque disminuyan la radiación solar y la superficie disponible, no impide que sauces, olmos y alisos lleguen a crecer hasta los 25-30 m y que se forme un sotobosque con vegetación autóctona. Para sacar unas conclusiones más realistas se necesita de un estudio centrado en el efecto de las plantaciones forestales sobre la biodiversidad del bosque ribereño atlántico.

3.1.2.1.2 Especies exóticas en las áreas inventariadas

En el área de estudio, las barras fluviales y las riberas jóvenes son las unidades que presentan un mayor número de taxones exóticos seguidas por las riberas maduras. Los valores más bajos se han encontrado en los taludes erosionados y en las llanuras aluviales. Estos resultados revelan una cierta tendencia de colonización por especies exóticas que se dispersan por el agua y que colonizan las barras y las orillas jóvenes siendo estas formaciones donde se acumulan grandes cantidades de materia en la que se encuentran semillas y fragmentos de tallos con poder vegetativo. El contacto barra-canal de estiaje no presenta un número de exóticas muy alto, probablemente porque no hay muchas exóticas que puedan sobrevivir a ese ambiente.

Para estimar la abundancia (superficie ocupada en términos relativos) de las especies exóticas se utilizó el Indicador de Abundancia de Especies Exóticas Invasoras (IAbEEI) que tiene en cuenta la superficie ocupada por estas especies, respecto a la superficie total (García et al., 2023).

Los resultados muestran que las riberas maduras son las que presentan un mayor promedio de este indicador. Esta alta presencia de exóticas es debida mayoritariamente a la presencia de cultivos de especies forestales exóticas de gran porte como *Eucalyptus globulus*, *Robinia pseudoacacia* y *Populus* sp. En las barras fluviales, las exóticas herbáceas como *Artemisia verlotiorum*, pueden llegar a ocupar más del 80 % de la superficie.

3.1.3. Cartografía de vegetación

Se ha realizado la cartografía de la vegetación utilizando una adaptación de las unidades *Corine Land Cover* (CLC) (IGN 2002) de nivel 5 a escala 1:5000 en todo el área de estudio (Figura 30) identificándose 28 unidades de las cuales 3 son artificiales.

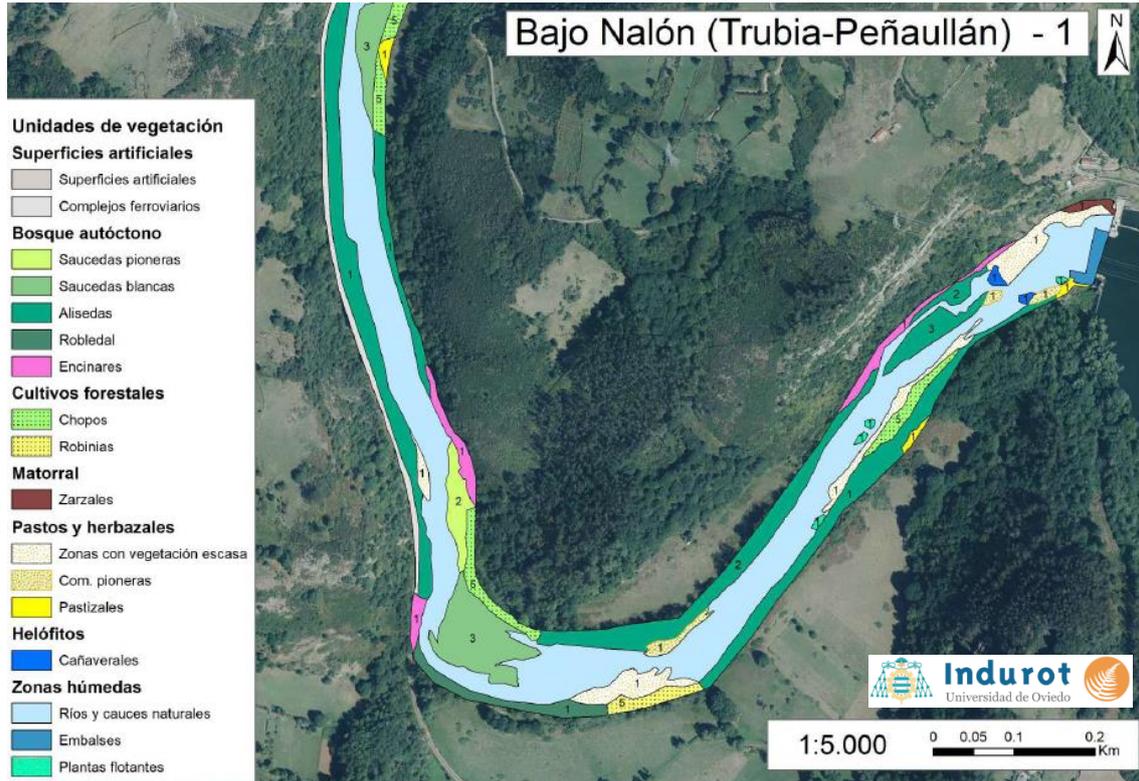


Figura 30. Ejemplo de mapa con la cartografía de la vegetación a escala 1:5.000. Los números en los polígonos indican la cobertura de especies exóticas en una escala de 1 a 5.

Excluyendo las superficies de agua, el bosque de ribera (alisedas, saucedas y arcedas) es la unidad más abundante en toda el área de estudio (Figura 31) ocupando un total de 138,1 ha (45,9%) que si se suman a las 16,3 ha, ocupadas por otros bosques de frondosas (5,4%) llegamos a una superficie de bosque autóctono de 154,4 ha (51,3%). Las plantaciones forestales de eucaliptos, chopos y robinias ocupan una amplia superficie, llegando a cubrir un total de 49,6 ha (16,1%). Las comunidades pioneras, presentes mayoritariamente en las barras, y los pastizales naturales que incluyen también los herbazales higrófilos, ocupan superficies similares, rondando las 30 ha cada una.

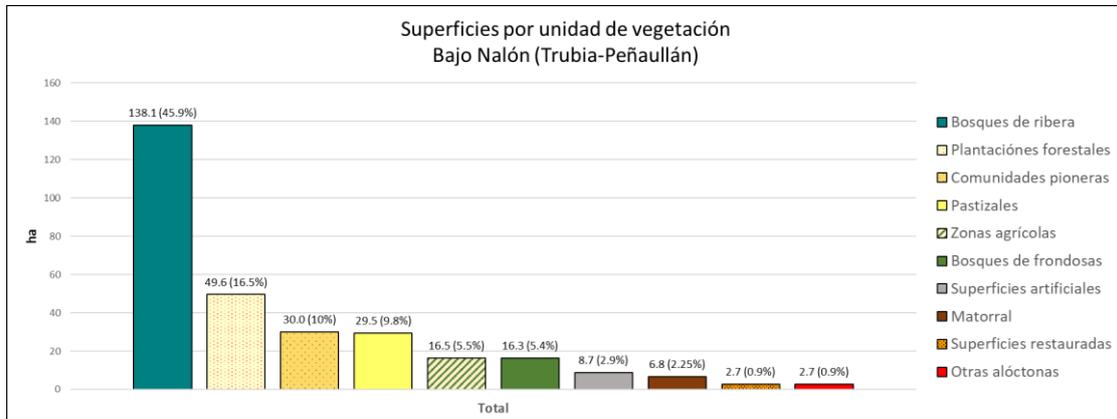


Figura 31. Superficie ocupada por las diferentes unidades según la cartografía de vegetación.

Analizando los porcentajes de ocupación de superficie de cada unidad de vegetación en cada subtramo estudiado (Figura 32), se observa que la proporción del bosque de ribera disminuye notablemente en el tramo Nalón-Narcea (26,8%) respecto a los otros tres tramos (44,3-56,3%), ya que existe una mayor superficie ocupada por plantaciones forestales (23,8%) y zonas dedicadas a la agricultura (20,1%) que restan espacio al bosque autóctono. Las plantaciones forestales en los cuatro subtramos ocupan desde el 12% del tramo bajo al 23,8% del tramo del Nalón-Narcea. Destacan también los pastizales y herbazales, más abundantes en el tramo medio (20%) que en los otros tramos. Las comunidades pioneras, sobre todo de barras fluviales, resultan ser más abundantes en el tramo bajo y en el Nalón-Narcea que en los dos tramos más aguas arriba. Finalmente, los polígonos correspondientes a *Otras alóctonas* (bambú, falsas acacias de generación natural, etc.) son más abundantes en el tramo alto, donde las falsas acacias pueden llegar a formar densas masas arbóreas en grandes superficies de las barras fluviales.

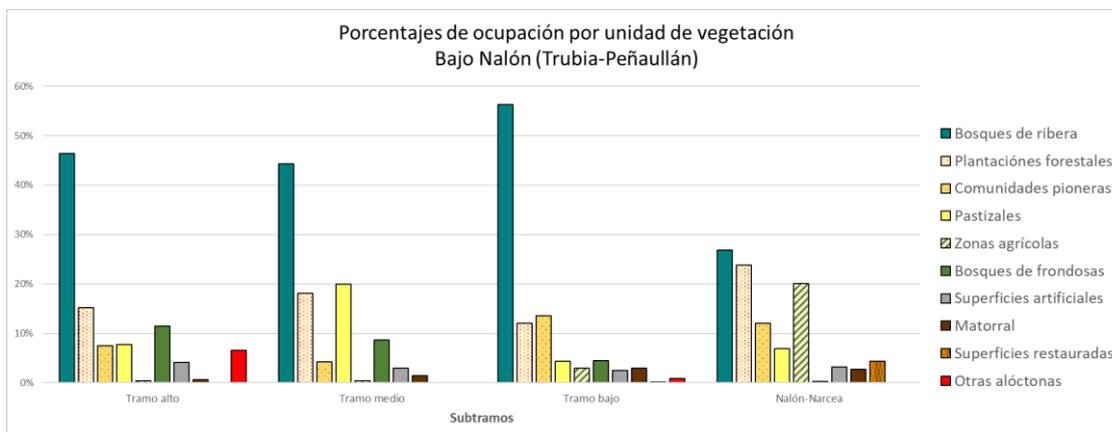


Figura 32. Porcentaje de superficie ocupada por las diferentes unidades según la cartografía de vegetación en los cuatro subtramos estudiados.

En el área de estudio se ha estimado un 45,3% de cobertura de plantas exóticas presentes en las riberas fluviales (Figura 33) con una tendencia creciente desde el tramo alto (32,2%) al tramo Nalón–Narcea (50%).

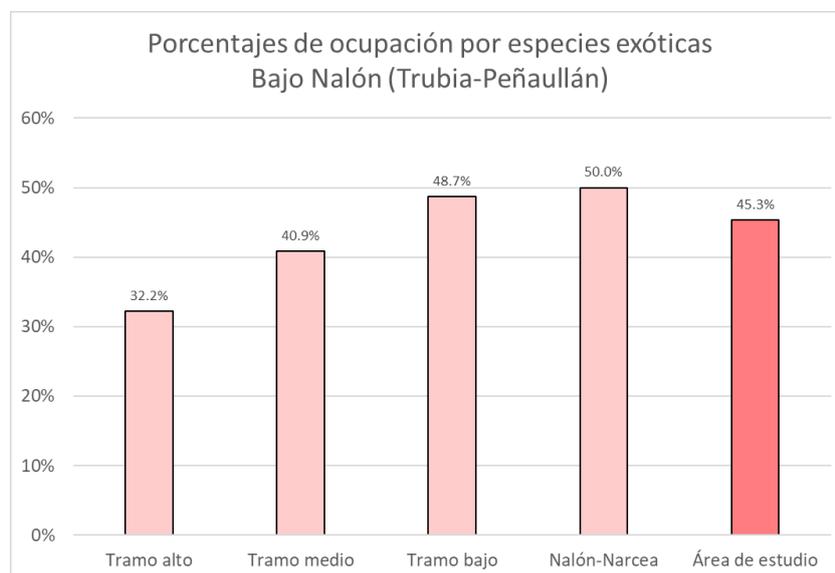


Figura 33. Porcentaje de superficie ocupada por especies exóticas.

Respecto a la fragmentación del bosque autóctono se han calculado varios indicadores que pueden ayudar a entender cuál es el estado actual de la conectividad del bosque autóctono del tramo bajo del Nalón (PLAN: Sup. bosque autóctono / Sup. bosque potencial; Tamaño promedio de Parches del Bosque y Nº de Parches por hectárea).

Los resultados indican que el tramo que se encuentra más fragmentado es el Nalón-Narcea que merecería un especial tratamiento visto que es la zona de transición entre

el corredor fluvial del Nalón, el corredor ecológico de la costa y el corredor ecológico marino. Mejorar su conectividad repercutiría en una mejora de la calidad ecológica del corredor fluvial, no solo en ese tramo, si no en todos los que conecta.

3.1.4. Especies Exóticas e Invasoras (EEI) vegetales

Durante los trabajos de campo realizados en el año 2021 se han detectado 30 especies alóctonas e invasoras en las márgenes erosivas de los 31 tramos analizados en el área de estudio. Estas especies vegetales introducidas están generando la alteración de la composición, estructura y funcionamiento del ecosistema ribereño en su conjunto y mermando la calidad, el estado de conservación y la recuperación del hábitat de interés comunitario 91E0* Bosques aluviales de *Fraxinus excelsior* y *Alnus glutinosa*.



Figura 34. Ejemplos de algunas especies alóctonas e invasoras localizadas en las márgenes erosivas del tramo Bajo del río Nalón: 1- *Populus x canadensis*, 2- *Phytolacca americana*, 3- *Vinca major*, 4- *Robinia pseudoacacia*.

A partir del trabajo de campo, se ha elaborado la cartografía detallada de las especies alóctonas e invasoras y su distribución en las márgenes erosivas consideradas.

Al año siguiente, durante la primavera y el verano 2022, se realizaron salidas de campo para completar la información existente sobre EEI recopilada durante el año 2021 en las márgenes erosivos. En estos trabajos se geolocalizaron las EEI vegetales mediante GPS. A partir de los datos recolectados se elaboraron mapas de todo el tramo de estudio (Figura 35) con esta cartografía.

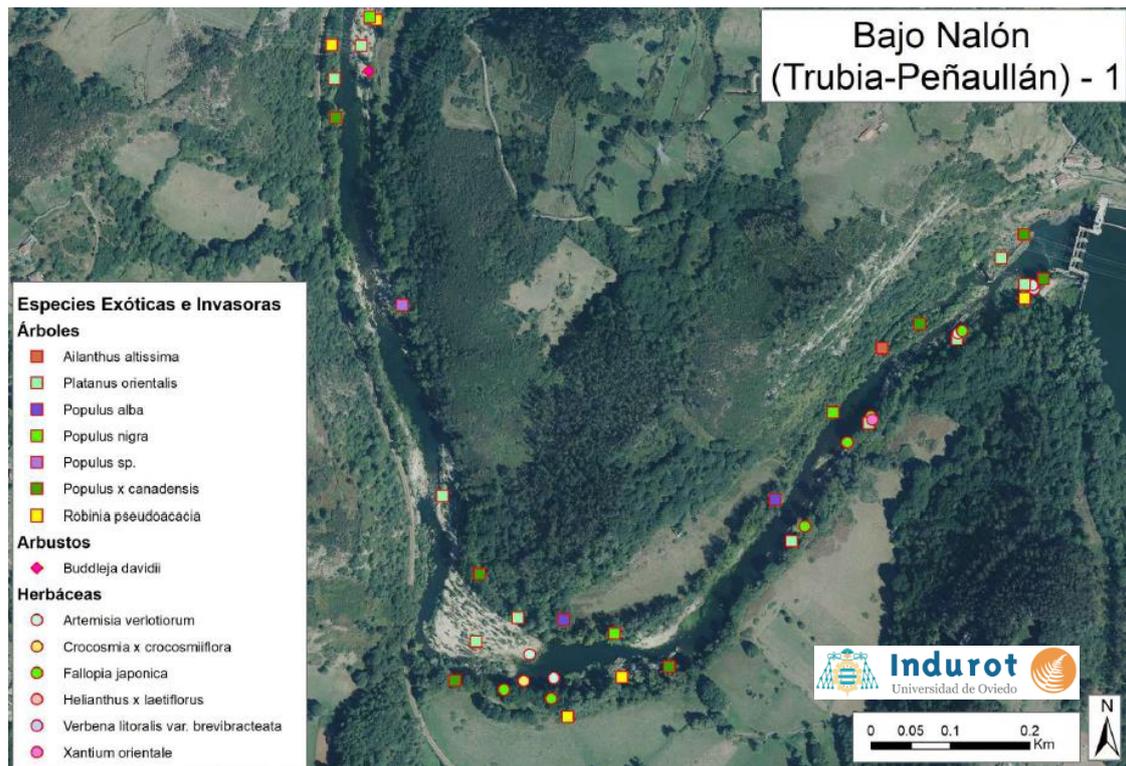


Figura 35. Ejemplo de mapa detallado de las EEI geolocalizadas.

Se han geolocalizado un total de 46 especies exóticas vegetales, de las cuales 35 están incluidas al menos en uno de los catálogos de especies invasoras a nivel global, nacional o regional.

Entre ellas, destaca la presencia de 5 especies incluidas en el Catálogo español de especies exóticas invasoras (Real Decreto 630/2013), incluyendo a la especie *Arundo donax*, presente en el catálogo, pero sólo para el territorio canario. Tres de las EEI encontradas están incluidas entre las 100 especies exóticas más dañinas del mundo: *Arundo donax*, *Fallopia japonica* y *Pinus pinaster*. Esta última no está muy presente en el Nalón ya que la mayoría de las plantaciones de coníferas son de Pino de Monterrey (*Pinus radiata*) mientras que *Arundo donax* se ha encontrado solo en un punto. *Fallopia Japonica* está presente en todos los tramos estudiados, invadiendo mayoritariamente barras fluviales, taludes y riberas jóvenes.

Entre las especies encontradas, hay algunas que todavía no han invadido grandes superficies pero que se conocen por su potencial invasor en hábitats ribereños. Este grupo de plantas es de gran interés porque se podría actuar sobre ellas sin emplear grandes recursos y de esta forma se podría evitar una invasión a mayor escala. Las especies que entran en este grupo son:

Ailanthus altissima, *Arundo donax*, *Bupleurum fruticosum*, *Crocsmia x crocosmiiflora*, *Hydrangea macrophylla* e *Impatiens balfourii*.

Finalmente, cabe mencionar que durante los trabajos de campo se identificó una planta del genero *Verbena* de una altura de 2-2,5 m y que según las claves dicotómicas no coincidía con las dos especies citadas en Asturias y el río Nalón. La planta en cuestión es *Verbena litoralis* Kunth var. *brevibracteata* (Kuntze) N. O'Leary, planta de origen sudamericano que ya se encuentra naturalizada en la Península Ibérica y en Italia (Sanna y Díaz González, 2023). Esta planta es parecida a *Verbena bonariensis* L. ya detectada en Asturias y con la que se ha confundido en algunos pliegos de herbario del 1997 y del 2003. *V. litoralis* var. *brevibracteata* se diferencia de *V. bonariensis* sobre todo por tener un mayor porte y unas inflorescencias más abiertas (Figura 36).



Figura 36. Detalle de la inflorescencia (arriba) y porte (abajo) de *Verbena bonariensis* (izquierda) y *Verbena litoralis* var. *brevibracteata* (derecha).

La vía de introducción más probable parece estar relacionada con las embarcaciones que transportaban el carbón a lo largo del río Nalón y que salían y entraban desde el puerto carbonero de San Esteban de Pravia hacia el País Vasco, Huelva y Barcelona, todos puertos en los que está presente esta especie. Es una planta que hay tener bajo observación para evaluar su capacidad de invasión ya que parece que se ha adaptado muy bien a las condiciones ecológicas del bajo Nalón.

3.2. Análisis y caracterización faunística

Se han planteado 20 tramos para obtener una caracterización de la fauna que, aunque debe completarse con estudios posteriores de detalle en caso de actuaciones en el cauce, persigue ofrecer una primera imagen de aspectos faunísticos de relevancia. En estos tramos se han combinado distintas metodologías de muestreo para obtener, en su conjunto, una caracterización de las comunidades faunísticas del área de estudio distintas de la ictiofauna.

Las comunidades de macroinvertebrados bentónicos del río Nalón se han muestreado en una primera fase, durante la primavera de 2021 (mayo/junio), y analizado siguiendo los protocolos oficiales publicados por el Ministerio con competencias en Medio Ambiente (Figura 37).

Las comunidades de macroinvertebrados observadas en un primer muestreo eran más o menos equivalentes a las esperables en un río no afectado de sus características, o bien un poco afectado, pero en todo caso en buen estado. Aunque en algunos muestreos los datos son más bajos, es posible que coincidiera con sueltas de agua de las presas y, por tanto, con muestreos realizados en zona que había estado seca o sometida a cambios bruscos de sin agua/agua.



Figura 37. Muestreos de macroinvertebrados bentónicos: a) empleo de la red D en el cauce, b) observación preliminar de lo capturado en la red, c) bandeja de observación en el campo, d) algunos invertebrados capturados e identificados de visu en la bandeja.

Posteriormente, en una segunda fase durante el mes de junio de 2023 se realizó un muestreo en el río Cubia, afluente del río Nalón, seleccionado para llevar a cabo diferentes trabajos para la monitorización de sedimento en el marco del presente proyecto. El muestreo se realizó siguiendo la misma metodología que en el muestreo anterior. Tras los análisis realizados, la muestra recogida en este punto señala unos valores buenos con un valor del IBMWP de 148 y del METI de 4,45.

A la hora de abordar los muestreos para el caso de los vertebrados (Figura 38), se han dividido en aves y resto de vertebrados, atendiendo a las distintas metodologías y a la importancia de las poblaciones de especies catalogadas con posible presencia y dependencia del río.

En el caso de las aves, las prospecciones se han centrado en las especies de interés comunitario más vinculadas con el río y el bosque de ribera. En especial, se ha realizado

una búsqueda pormenorizada en el área de estudio de colonias de nidificación de avión zapador (*Riparia riparia*). Se han procurado limitar posibles molestias a las colonias, por lo que el personal encargado de los muestreos no se ha aproximado a los nidos con presencia de la especie en los taludes.

Así, en el caso de los reptiles y anfibios, se han realizado transeptos en las orillas de cada uno de los tramos muestreados, buscando tanto en el interior (con la ayuda de mirafondos) como en el exterior del agua, y prestando especial atención tanto a su presencia como a las zonas empleadas en su reproducción. En el caso de los anfibios, también se ha realizado la revisión de las muestras de macroinvertebrados bentónicos, directamente *in situ* y en la bandeja con la muestra, con el fin de localizar y liberar los ejemplares detectados, de ser el caso.

En el caso de los mamíferos, se han realizado transeptos en cada tramo, en la orilla y paralelos a ella, recorriendo todo el tramo en busca de huellas, excrementos y otros restos de alimentación. Igualmente se han identificado los individuos localizados durante la realización de dichos muestreos.

En especial, se han seleccionado las siguientes especies para una prospección más detallada, dada su relación con el río: Nutria (*Lutra lutra*), Turón (*Mustela putorius*), Rana común (*Phelophylax perezi*), Salamandra rabilarga (*Chioglossa lusitanica*), Tritón ibérico (*Triturus boscai*), Sapo partero (*Alytes obstetricans*), Sapo común (*Bufo spinosus*).

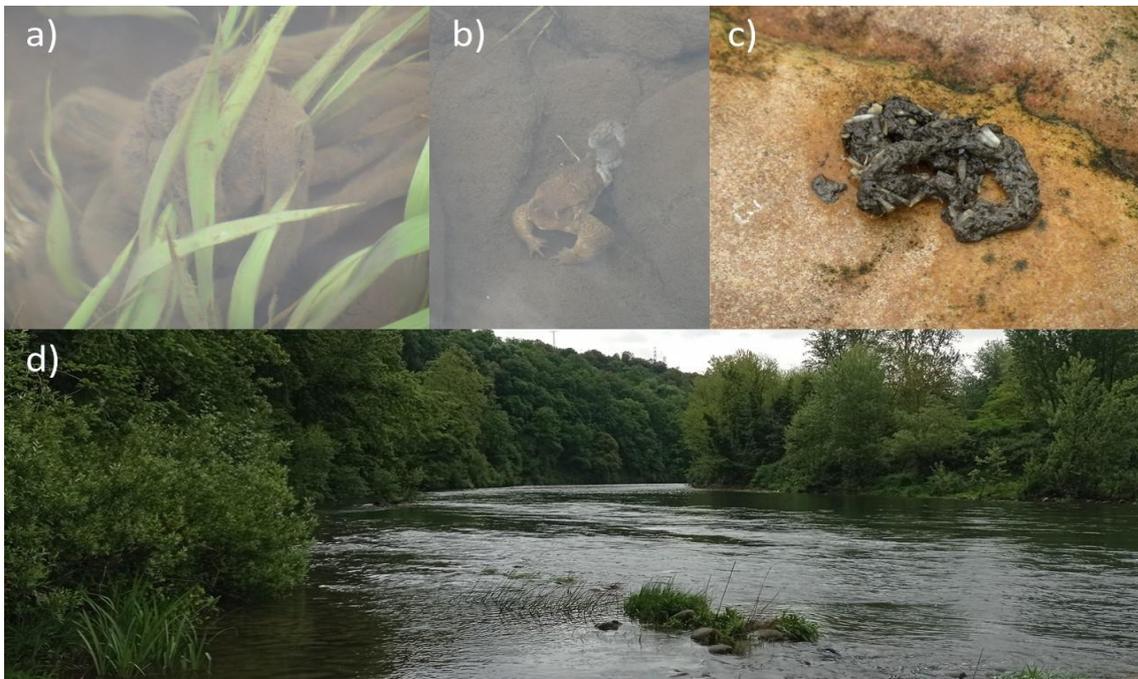


Figura 38. Muestreos de fauna realizados en el tramo cercano a la estación de bombeo en el río Nalón en Tahones: a) cordones de huevos de la puesta del sapo común *Bufo spinosus*; b) ejemplar depredado de sapo común *Bufo spinosus*; c) excremento de nutria *Lutra lutra*; d) aspecto del tramo desde su parte superior, estando en primer plano la zona de reproducción de los sapos.

De acuerdo con los muestreos de fauna realizados, se han detectado 32 especies de vertebrados durante el desarrollo de los transeptos. De ellas, 17 especies (Tabla 4) están recogidas en el Listado de Especies Silvestres en Régimen de Protección Especial de España, cinco en el Catálogo Regional de Especies Amenazadas de Asturias, dos de ellas tienen un plan de manejo aprobado en Asturias, el avión zapador (Decreto 60/93, de 1 de julio) y la nutria (Decreto 73/93, de 29 de julio) y una un plan de conservación, la rana verde ibérica o rana común (Decreto 102/2002, de 25 de julio).

Nivel de protección /plan	Especies detectadas
CNEA	Náyade <i>Margaritifera margaritifera</i>
LESRPS	<i>Actitis hypoleucos</i> (Andarríos chico), <i>Alcedo atthis</i> (Martín pescador), <i>Ardea cinerea</i> (Garza real), <i>Buteo buteo</i> (Ratonero común), <i>Cinclus cinclus</i> (Mirlo acuático), <i>Dendrocopos major</i> (Pico picapinos) <i>Milvus migrans</i> (Milano negro), <i>Motacilla alba</i> (Lavandera blanca), <i>Motacilla cinerea</i> (Lavandera cascadeña), <i>Oriolus oriolus</i> (Oropéndola), <i>Picus viridis</i> (Pito real), <i>Podarcis muralis</i> (Lagartija roquera), <i>Pyrrhula pyrrhula</i> (Camachuelo común), <i>Riparia riparia</i> (Avión zapador), <i>Sylvia atricapilla</i> (Curruca capirozada), <i>Troglodytes troglodytes</i> (Chochín), <i>Lutra lutra</i> (Nutria)
CREA	<i>Actitis hypoleucos</i> (Andarríos chico), <i>Lutra lutra</i> (Nutria), <i>Pelophylax perezi</i> (Rana verde ibérica), <i>Petromyzon marinus</i> (Lamprea), <i>Riparia riparia</i> (Avión zapador)
Plan de manejo Asturias	<i>Riparia riparia</i> (Avión zapador), <i>Lutra lutra</i> (Nutria)
Plan de conservación Asturias	<i>Pelophylax perezi</i> (Rana verde ibérica)

Tabla 4. Especies de fauna detectadas durante los muestreos que están incluidas en el Catálogo Nacional de Especies Amenazadas (CNEA), el Listado de Especies Silvestres en Régimen de Protección Especial (LESRPE), el Catálogo Regional de Especies Amenazadas de Asturias (CREA) y que disponen de plan de manejo o conservación en Asturias.

4. Problemática y medidas de actuación

El estudio geomorfológico realizado en los 35 km del río Nalón ha constatado la presencia de unos 8,5 km de orillas erosivas distribuidas en más de 30 emplazamientos, valores máximos registrados desde el año 1945 (Figura 17 y Figura 18).

El análisis de la cubierta vegetal, de la biodiversidad vegetal y la caracterización del bosque señalan que la vegetación de ribera que se desarrolla en el tramo medio y bajo del río Nalón corresponde mayoritariamente a dos tipos de bosques: las alisedas

atlánticas y las saucedas blancas, formaciones vegetales incluidas en el hábitat de interés comunitario prioritario 91E0*.

Dicho hábitat se encuentra fragmentado por diversas causas, especialmente la asociada a la migración lateral de orillas, generando riberas de altura significativa con taludes verticales dominados por material fino no cohesivo, que son especialmente vulnerables a la erosión provocada por los flujos de agua y sedimentos y por la propia erosión gravitacional.

Dicha situación ha implicado que en numerosos tramos las franjas de bosque de ribera sean demasiado estrechas para ser funcionales, e incluso inexistentes, abundando especies alóctonas e invasoras. Además, se reconocen márgenes con cultivos forestales (chopos, eucaliptos y robinias), terrenos destinados a la actividad ganadera y cultivos intensivos en contacto directo con el canal.

Estas erosiones forman parte de los reajustes esperables en el río Nalón y, siempre que sea posible, es recomendable que el cauce alcance la configuración de equilibrio mediante su dinámica y evolución natural. No obstante, y siempre que los estudios ambientales previos a determinadas acciones así lo recomienden, podrían aplicarse **acciones dirigidas al refuerzo y mejora del corredor ecológico**.

Algunas de estas acciones pueden aplicarse en emplazamientos puntuales con problemática erosiva especial. Para realizar una primera valoración, en gran parte de estos emplazamientos erosivos se ha realizado una valoración hidromorfológica para analizar la posible tendencia morfodinámica de la orilla a corto y medio plazo. Aunque dicha valoración es compleja de constatar en cualquier río y, en especial en el tramo de estudio dadas las particularidades identificadas en el estudio evolutivo, es fundamental abordar su análisis. Hay que tener en cuenta que algunas de las actuaciones, como el **fortalecimiento del bosque de ribera** (recuperación de la cubierta vegetal, bioingeniería, etc.), son muy vulnerables frente a las avenidas, especialmente en las fases iniciales de ejecución, dado el tiempo que requiere el asentamiento de, por ejemplo, las revegetaciones.

Para tratar de garantizar cierta continuidad y minimizar los riesgos, se identificaron aquellos emplazamientos con erosiones importantes, pero con señales en su histórica evolutiva que apuntan a que la erosión puede ser efímera y susceptible de frenarse a corto plazo. Esta situación puede darse bien porque la erosión responde a una anomalía local o bien porque la morfodinámica del cauce se encuentra en una fase avanzada dentro del modelo evolutivo del canal y, por tanto, previsiblemente más cercana a la forma de equilibrio. Algunas zonas presentan orillas erosivas externas al cauce más amplio registrado históricamente que encajarían en alguna de estas fases. No obstante,

en otras se reconoce un desplazamiento lateral muy afianzado, donde estas actuaciones de refuerzo blandas pueden representar medidas poco recomendables.

En ocasiones también pueden darse situaciones especialmente complejas o ambientalmente particulares que pueden motivar la aplicación de medidas. Hay que tener en cuenta que puede ser de especial interés actuar sobre algunas especies alóctonas, o aquellas de conocido carácter invasor, que todavía no han llegado a invadir grandes superficies. Se trata de medidas de gran interés dada la rentabilidad de limitar la progresión de este tipo de especies sin invertir grandes recursos. Son medidas que requieren de acciones posteriores para evitar rebrotes y reforzar el asentamiento de especies autóctonas.

También se reconocen emplazamientos con una especial problemática, por la extensión significativa de las erosiones de orilla, superiores incluso al kilómetro de longitud, que están generando canales con escasez o ausencia de zonas de sombra, que pueden requerir de acciones de bioingeniería. Esta situación se da por ejemplo en el curso bajo del río Nalón en la zona de Pravia, un tramo clave para el tránsito de salmónidos, y cuya población muestra señales de declive importante en los últimos años.

Aunque este tipo de medidas blandas pueden no tener vocación de definitivas dado el desequilibrio que impera en el Nalón, al aumento de la frecuencia de avenidas o incluso al carácter piloto o experimental en ríos de esta envergadura, son acciones que aplicadas de forma local pueden tener un elevado potencial de refuerzo del corredor fluvial. Su ejecución debe ir acompañada de acciones de monitorización y seguimiento, formando parte de un proceso continuo de aprendizaje e investigación.

Adicionalmente a estas medidas locales sobre emplazamientos concretos, también se plantea analizar acciones dirigidas a tratar el origen del problema, ligado al déficit de sedimentos. Concretamente, se plantea la realización de un ensayo de **baipás sedimentario** o reubicación de áridos desde aguas arriba de las barreras transversales del cauce, que están reteniendo el material sólido que caracterizaba al río, hacia aguas abajo de las mismas, con el objetivo de estudiar sus potenciales efectos en el medio fluvial a corto y medio plazo.

Por último, y dado que las medidas planteadas tienen su origen en las alteraciones de los flujos de sedimento grueso, de los que no se dispone de información, se planea la investigación de técnicas de monitorización de sedimento y la **implantación de un observatorio de sedimento**, para comenzar adquirir información sobre cuándo y cuánto sedimento transporta el río Nalón.

5. Monitorización del sedimento

5.1. Caracterización del sedimento

De forma general, se puede afirmar que en una corriente fluvial los granos inferiores a tamaños de 1/8 mm (0,125 mm, umbral entre arena muy fina y fina) viajan en suspensión, mientras que por encima de 8 mm (límite entre grava fina y media) lo hacen como carga de fondo. El campo intermedio puede viajar mediante ambos mecanismos, dependiendo de la fuerza del flujo (Wilcock et al., 2009).

El transporte en suspensión puede suponer el 90% del transporte sólido de una corriente. Respecto al sedimento transportado como carga de fondo, que normalmente no supone más del 10% del transporte fluvial, representa la fracción que mayor influencia tiene en la morfología de los ríos y por tanto tiene especial interés para la gestión del medio fluvial. No obstante, la información disponible sobre el peso o volumen transportado por los ríos en España o en el Cantábrico es muy escasa. Algunas estimaciones de transporte anual de carga de fondo en ríos de montaña han sido obtenidas en el Cantábrico, como las tasas de transporte de 900 m³/año para el río Coto (Vázquez-Tarrío et al., 2022) o de 7630 m³/año para el río Pigüena (Vázquez-Tarrío et al., 2013), afluentes del río Narcea con superficies de cuenca de entre 120 y 405 km².

Para profundizar en este transporte de sedimento como carga de fondo, se plantean dos análisis en función de la granulometría: a) transporte de material arenoso, que llamaremos material fino, comprendido en la franja de tamaños que pueden viajar tanto en tracción como en suspensión y que suele aparecer en los intersticios de los clastos más gruesos, y b) transporte de material grueso, con tamaños superiores a la arena gruesa, transportado exclusivamente como carga de fondo y que forma el soporte estructural del lecho.

5.1.1. Granulometrías del material grueso

Para realizar la caracterización granulométrica del tramo del Nalón se han realizado 32 muestreos granulométricos repartidos en 11 emplazamientos (Figura 39 y Figura 40). En cada uno de ellos se ha analizado la distribución de la granulometría superficial, subsuperficial y la del canal utilizando el método de contaje de Wolman (1954). Para clasificar el sedimento en función del tamaño de grano se ha empleado la clasificación de Wentworth (1922).



Figura 39. Imágenes del trabajo de campo para la realización de granulometrías. Arriba izquierda granulometría superficial y a la derecha subperifical.

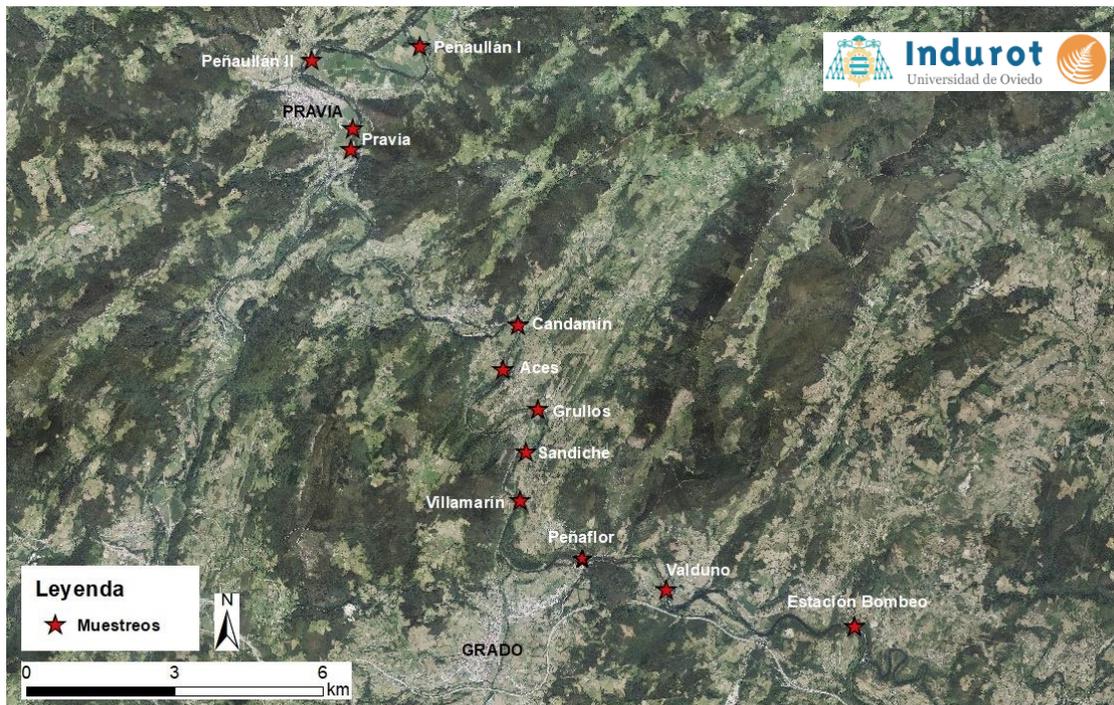


Figura 40. Ortofotografía PNOA 2020 con los emplazamientos en los que se han realizado granulometrías.

Los datos obtenidos de las granulometrías señalan que el tamaño de grano medio superficial para el río Nalón es tamaño canto, con un valor $D_{50} = 76,9$ mm.

Como es esperable, en líneas generales el tamaño de grano disminuye hacia aguas abajo (Figura 41), salvo en el emplazamiento de Peñaflor, donde los valores son especialmente mayores a los restantes analizados. Se trata de una zona ubicada aguas abajo de un

importante estrechamiento rocoso y donde abundan los afloramientos del sustrato en el lecho del canal, que se estima deben de estar contribuyendo en este engrosamiento detectado en el sedimento.

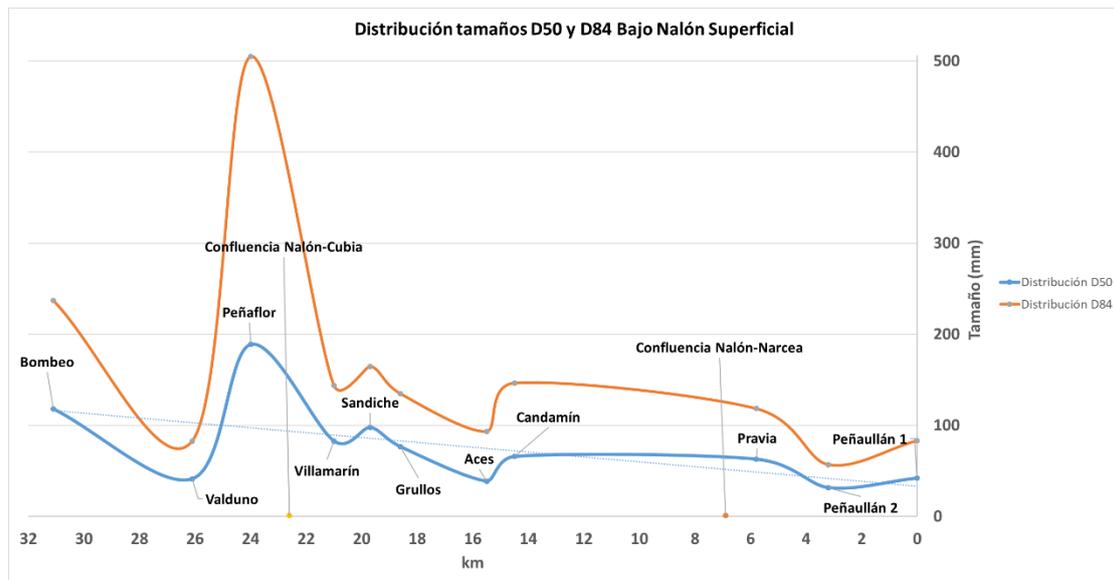


Figura 41. Distribución de tamaños D50 y D84 obtenidos mediante las granulometrías superficiales, ordenados de aguas arriba a aguas abajo.

5.1.2. Grado de acorazamiento del lecho

El grado de acorazamiento de la superficie generalmente se ha cuantificado en geomorfología fluvial a través de la *Tasa de acorazamiento Di* (Bunte y Abt, 2001). Teniendo en cuenta el trabajo de Vázquez-Tarrio et al. (2020), se considera un acorazamiento alto para valores de $D_{84} > 3$, acorazamiento moderado entre 2-3 y un acorazamiento bajo para valores de $D_{84} < 2$. Los resultados del grado de acorazamiento se muestran en la Figura 42.

La presencia de acorazamiento es habitualmente atribuida a un desequilibrio entre el suministro de sedimentos aguas arriba y la capacidad del flujo para movilizar la carga de fondo, y aunque determinados condicionantes pueden producir alteraciones, es esperable un aumento del armazón con una disminución en la llegada de sedimento de fondo (Dietrich et al., 1989).

En este sentido, los valores obtenidos muestran que el grado de acorazamiento es alto en los tramos aguas arriba de la confluencia con el Narcea, siendo especialmente importante en el tramo Valduno-Sandiche, situación que podría estar relacionado con un especial déficit de sedimento. Además, destaca el salto aguas abajo y aguas arriba de

la confluencia del Narcea que parece sugerir que, en estado natural, el río Narcea puede estar aportando sedimento al Nalón.

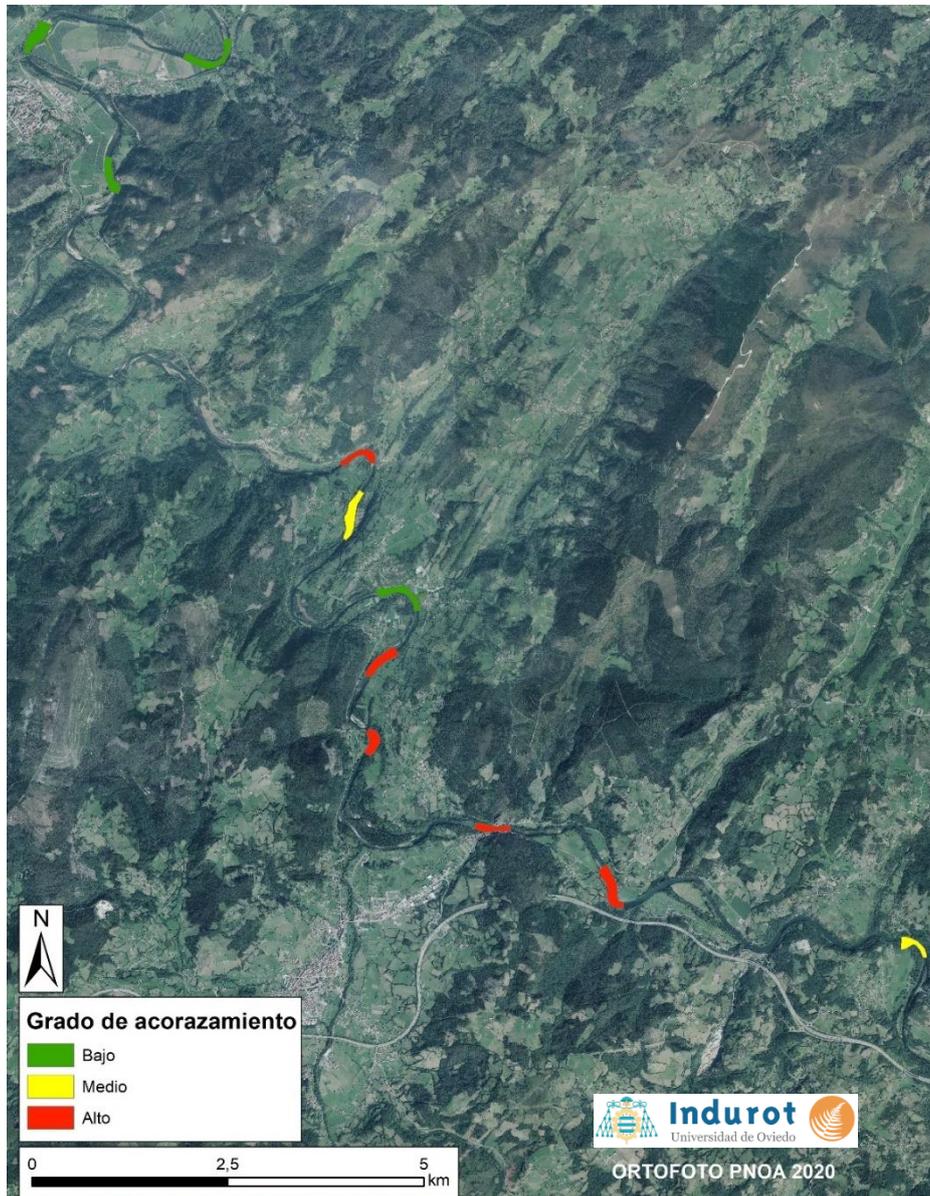


Figura 42. Resultados obtenidos para cada una de las zonas de muestreo clasificadas en función del grado de acorazamiento.

5.1.3. Análisis geoquímico del sedimento fino

En varios emplazamientos a lo largo del río se ha realizado un muestreo del sedimento fino autóctono, tamaño arena e inferior, dirigido a caracterizar la composición química del sedimento del río Nalón (Figura 43).



Figura 43. Recogida de muestras de sedimento fino en Villamarín (izquierda) y Candamín (derecha).

Siempre que la disponibilidad del sedimento lo ha permitido, se han seleccionado puntos de muestreo coincidentes con la localización de otros análisis en el marco del proyecto, como la caracterización del sedimento grueso o el reconocimiento de fauna. En total se han recogido 19 muestras de sedimento para su estudio.

La caracterización geoquímica del sedimento, a modo de prospección inicial para tener una primera aproximación a la composición general de los sedimentos finos, se ha realizado mediante la técnica de fluorescencia de rayos X (FRX). La finalidad principal de esta técnica de análisis es la determinación de los elementos mayoritarios, concretamente: Al_2O_3 , P_2O_5 , K_2O , CaO , SiO_2 , TiO_2 , MnO_2 , Fe_2O_3 , MgO , Na_2O .

Los resultados indican que, como era de esperar, el sedimento es predominantemente silíceo (siempre por encima del 64% de SiO_2). Cuenta con una proporción notable de minerales sílico-aluminosos (Al_2O_3 alrededor del 10%) además de cuarzo, y proporciones algo más variables de minerales con hierro (óxidos de hierro entre un 3 y un 6% aproximadamente) y de carbonatos (entre 1 y 5% aproximadamente).

5.2. Monitorización del sedimento grueso

La medida de las tasas de transporte de sedimento en campo constituye una tarea de enorme complejidad, ya que representa un proceso no uniforme, con una importante variabilidad en tiempo y espacio que se produce durante episodios de crecida. El objetivo de esta fase del proyecto es diseñar un sistema que permita obtener diversa información sobre el transporte de sedimento como carga de fondo. Se trata de un fenómeno del que existe muy poca información, y los pocos estudios existentes suelen ser muy locales, en ríos de pequeño tamaño y abarcando periodos de tiempo limitado

(Vázquez Tarrío, 2013; Riverchanges 2016-2019), que no permiten una adquisición de datos prolongada en el tiempo.

Algunos de los métodos de medida de transporte de sedimento más habituales contemplan algunas técnicas clásicas, como son el uso de trazadores o clastos marcados, las trampas de sedimento, los muestreadores tipo cesta o la realización de Modelos Digitales de Elevaciones (MDE) diacrónicos. Entre las técnicas más modernas se encuentran los métodos geofísicos de tipo activo, que pueden instalarse en el lecho del cauce, o bien de tipo pasivo, es decir, se localizan en las proximidades del canal, pero fuera del lecho.

En el presente proyecto, a excepción de las trampas de sedimento que requieren de obras de cierta entidad y suelen aplicarse en cauces más pequeños que las del tramo de estudio, se persigue aplicar el resto de las técnicas descritas. Son métodos que, aunque de forma individual presentan limitaciones, la aplicación simultánea de varias de ellas aumenta su rentabilidad para adquirir conocimiento científico de los procesos de transporte de sedimento. Concretamente se han implementado las siguientes técnicas:

- a) Clastos trazadores
- b) Geofísica activa: placas de impacto
- c) Geofísica pasiva: sismógrafo

5.2.1. Clastos trazadores

Esta técnica consiste en diseminar por el lecho del cauce cantos marcados de algún modo, para realizar un seguimiento de sus desplazamientos tras los eventos de transporte durante las avenidas. El objetivo es monitorear el inicio del movimiento de partículas de sedimento de tamaño grueso, distancias recorridas e influencia de variables morfodinámicas e hidráulicas.

Para el presente proyecto se utilizan RFID (*Radio Frequency Identification*) mediante *tags* o etiquetas, pequeños dispositivos que pueden ser insertados en los clastos. Al pasar una antena RFID por el clasto, ésta detecta el *tag* y emite una señal al lector que transmite la información de la etiqueta, en este caso será un código identificativo del clasto. Además, varios clastos serán pintados para facilitar su visualización en campo.

Tras la realización de trabajos de campo y análisis en gabinete se seleccionaron 4 emplazamientos, tres en el río Nalón y uno en el río Cubia a su paso por Grado (Figura 44).

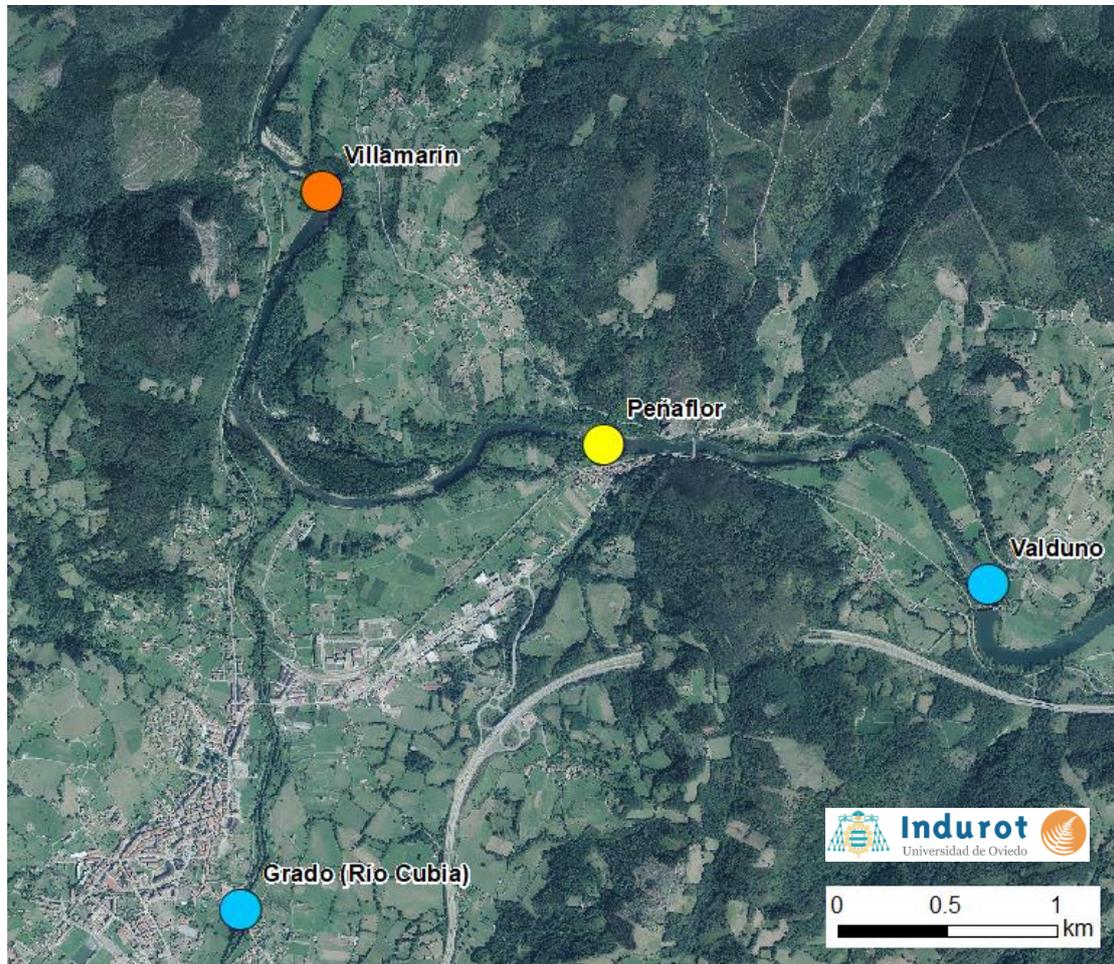


Figura 44. Emplazamientos seleccionados para el marcaje de sedimento. El color del círculo es el que se ha utilizado para pintar los trazadores.

Teniendo en cuenta los análisis realizados, para el marcaje de cantos en el presente proyecto, se han seguido varios pasos metodológicos necesarios para la puesta a punto de la técnica de los trazadores (Vázquez-Tarrío, 2013):

1. Preparación de los trazadores, definiendo la técnica, la granulometría y el tamaño de la muestra a emplear.
2. En una segunda fase, los trazadores se sembraron o depositaron sobre la superficie de la ribera y del lecho. Se requiere establecer las posibles zonas de siembra y cómo se van a colocar en el cauce.

La preparación de los clastos trazadores se realizó de forma combinada en gabinete y en campo (Figura 45), y requiere de una selección de clastos según su tamaño, inserción de sensores, etiquetado, caracterización del clasto y pintado (Figura 46).



Figura 45. Recogida de clastos en campo para su posterior tratamiento en laboratorio (izquierda), clasificación por tamaños (centro) y trabajos de campo para la preparación de los trazadores en Peñaflor.



Figura 46. Distintas fases de la preparación de los clastos marcados.

El depósito de trazadores se realizó en las parcelas de monitorización durante el año 2022 y la primera mitad de 2023 (Figura 44). Concretamente se sembraron un total de 946 clastos repartidos en 4 emplazamientos: Peñaflor (312 trazadores), aguas abajo de

la presa de Valduno II (233 trazadores), Villamarín (311 trazadores) y Grado en el río Cubia (90 trazadores).

Además, se han colocado 150 trazadores que únicamente están pintados (no llevan *tag* insertado) con tamaños de eje b iguales o inferiores a 45 mm repartidos en los 4 emplazamientos. Concretamente 70 en Peñaflores, 15 en Valduno, 45 en Villamarín y 20 en Grado (río Cubia).

Los trazadores se depositaron en transeptos perpendiculares al canal, incluyendo diferentes zonas: el cuerpo de la barra, el contacto barra-canal y otros en el canal con el objetivo de ver si la posición de partida del clasto puede influir en los desplazamientos (Figura 47). Una vez colocados los clastos trazadores en su ubicación definitiva se procedió a su geolocalización mediante dispositivo GPS de precisión. Las zonas de marcaje de los cantos se señalaron con carteles para evitar posibles daños por vandalismo (Figura 47).



Figura 47. Se muestra la línea de trazadores en Valduno (izquierda), en Grado (centro) y carteles de señalización de la zona de marcaje.

5.2.2. Métodos geofísicos: placas de impacto con geófono

Las placas de “impacto” consisten en unas piezas de acero inoxidable que llevan adheridas un geófono. Estas se instalan en el lecho del cauce, con el objeto de registrar los impactos de los clastos contra la pieza de acero generados durante un episodio de transporte en un intervalo de tiempo prefijado. Se trata de cuantificar la cantidad de sedimento que se desplaza por el fondo del cauce en el punto en que se ha instalado.

Existen escasos proveedores de geófonos que suelen elaborar este tipo de dispositivos. En el presente proyecto se están utilizando modelos comerciales tipo Benson (Downs et al., 2016), y también se está trabajando en un modelo de esta tipología diseñado en el

INDUROT (González-Rodríguez et al., 2023) (Figura 48). En ambos modelos deben abordarse test de funcionamiento y ajuste de sensibilidades para comprobar su operatividad y las características de los datos que aportan. También debe establecerse un periodo de almacenamiento de conteos ya que, por sus características de fabricación, la capacidad de almacenamiento puede verse limitada en el tiempo (registro minutal, duración 45 días).

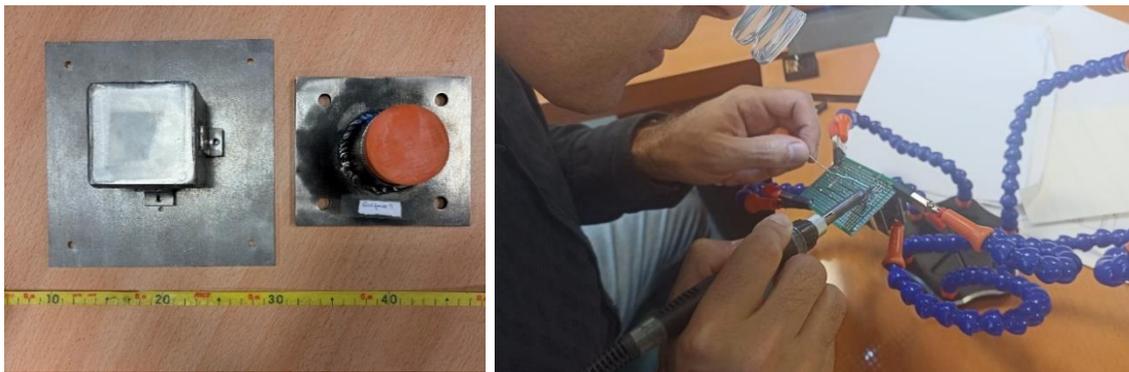


Figura 48. En la imagen de la izquierda, estructuras exteriores del geófono de fabricación propia (izquierda) y el comercial (derecha). A la derecha proceso de construcción de la parte electrónica.

El anclaje de las placas de impacto se ha realizado de dos formas, o bien directamente en el lecho rocoso del río o bien en lecho sedimentario mediante losas de anclaje (Figura 49).

Durante el desarrollo del proyecto se ha llevado a cabo la instalación de 12 placas de impacto, 5 de tipo comercial y 7 de fabricación propia, en distintos emplazamientos a lo largo del área de estudio.

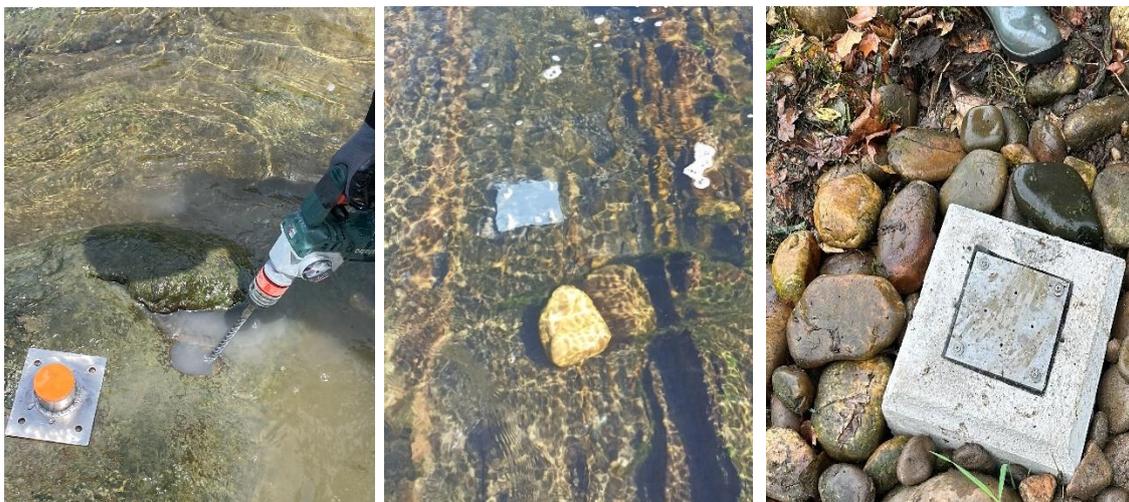


Figura 49. Instalación de geófonos sobre lecho rocoso en la imagen izquierda y central, y a la derecha sobre lecho sedimentario.

5.2.3. Sísmica pasiva: sismógrafo

El monitoreo con datos sísmicos se fundamenta en que las partículas de sedimentos pueden generar ondas elásticas cuando golpean el lecho del río durante su transporte (Roth et al., 2014). La idea por tanto es estudiar las relaciones de la señal sísmica con los caudales líquidos, a partir de la comparación con los datos de nivel de las estaciones de aforo de la Confederación Hidrográfica del Cantábrico (CHC) y, por otro lado, con los datos de transporte de sedimento obtenido con el resto de técnicas. La idea es analizar la señal sísmica de varios eventos de crecida, generar un modelo que permita aislar la señal del sismógrafo que refleja el flujo del agua, y posteriormente profundizar en la señal de transporte de sedimentos de carga de fondo.

En colaboración con *el Grupo de geofísica y tectónica GEOTEC, del Departamento de Geología de la Universidad de Oviedo*, el día 2 de marzo de 2022 se instaló la estación sísmica en el entorno del río Nalón (Figura 50), en el marco del Proyecto CANALAB: *Observatorio multiescala de procesos litosféricos y Superficiales en un sistema poli-orogénico y sus impactos sociales: el laboratorio natural Cantábrico (2021-2023)*, financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación a través del Plan Estatal i+D+i (Referencia: PID2020-118228RB-C21).



Figura 50. Proceso de instalación del sismógrafo. Fuente: <https://youtu.be/O4gXMDbB6o8>

Al día siguiente de la puesta en marcha del sismógrafo, concretamente el 4 de marzo, tras unos episodios de fuertes lluvias, tuvo lugar una pequeña crecida del río Nalón, en la que se alcanzó un nivel de la lámina de agua máximo de 3,19 m en la estación de aforos 1368 del río Nalón en Grullas de la Confederación Hidrográfica del Cantábrico (Figura 51). Teniendo en cuenta la curva de gastos de dicha estación, se estima un pico de caudal máximo de 320 m³/s.



Figura 51. Caudales obtenidos según el registro de niveles de la estación de aforo 1368 en el río Nalón y su curva de gasto entre el 01/03/2022 y el 10/03/2022.

Esta crecida ha permitido estudiar la señal sísmica para valorar la potencial efectividad de la ubicación seleccionada para el sismógrafo. Tras integrar los datos de viento y de lluvia de la estación meteorológica del aeropuerto de Ranón, se observa una buena correlación entre la crecida con la señal sísmica (Figura 52).

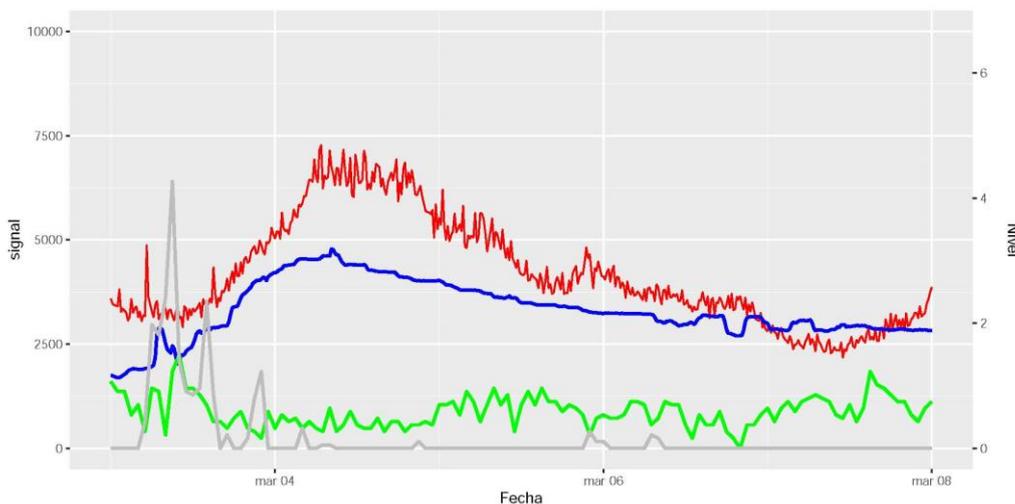


Figura 52. Gráfica con los registros analizados. La línea roja se corresponde con el del sismógrafo, la azul con el nivel del río Nalón, la gris con los datos de lluvia y la verde con la velocidad del viento.

Actualmente se está tratando de discriminar posibles interferencias y variables a tener en cuenta en el registro sísmico, como son el ruido sistémico día/noche, que representa sobre todo la actividad antrópica característica de la acción humana en la zona, así como el potencial reflejo de variables climáticas como el viento o la lluvia.

5.3. Monitorización de sedimento arenoso

De las técnicas con trazadores para la monitorización de sedimento fino en sistemas fluviales (marcadores radiactivos, fluoresceína, etc.), se han seleccionado los trazadores de tipo magnético, concretamente de magnetita (Milan y Large, 2014). El objeto es evaluar su movimiento y posterior acumulación mediante medidas de susceptibilidad magnética.

El mineral seleccionado presenta un tamaño de partícula entre 0,3 y 2,4 mm, valores equivalentes a la distribución granulométrica que se ha medido sobre los sedimentos del río. Presenta no obstante una densidad de 5,1 t/m³, valor superior a la esperada en los sedimentos del río Nalón, compuestos mayoritariamente por sílice y otros minerales de densidades similares. Por tanto, los resultados que puedan obtenerse deben tomarse como un referente de movimiento y transporte mínimos a tener en cuenta.

Tras el análisis de varios emplazamientos, se seleccionó un tramo del río Cubia en el entorno de la localidad de Grado. En dicho curso fluvial se han evaluado diferentes zonas de baja energía susceptibles de presentar concentraciones relevantes de sedimento fino (Figura 53). En la Figura 54 se muestra la zona seleccionada para realizar el depósito de la magnetita, denominada como área de reinyección, y dos barras fluviales aguas abajo a una distancia de 65 (Barra 1) y 500 m (Barra 2) respectivamente.

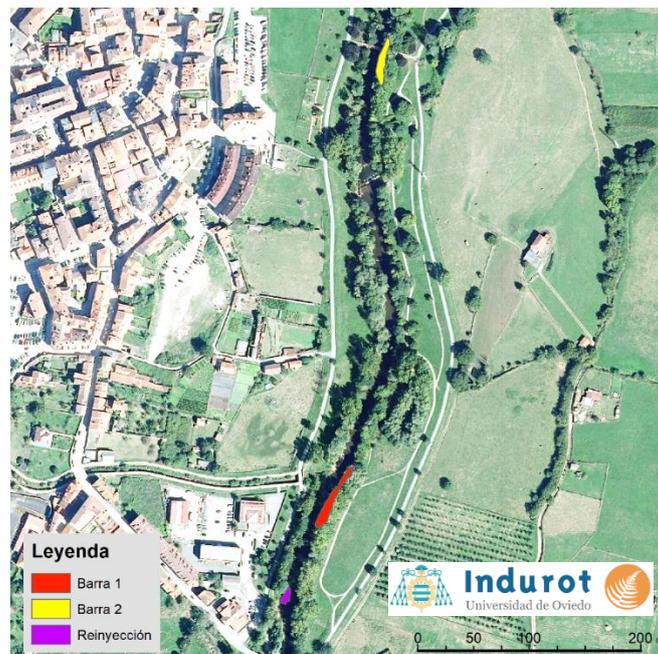


Figura 53. Localización del área de reinyección de sedimento fino y barras fluviales que se utilizarán como zonas de monitorización.



Figura 54. Aspecto del área de reinyección con imagen tomada desde un dron.

5.3.1. Muestreo de susceptibilidad magnética base o natural

Sobre las barras fluviales seleccionadas, se ha realizado un muestreo inicial con el objeto de obtener una muestra representativa del sedimento fino para su posterior análisis. Una vez determinada la superficie de las barras fluviales, se estableció una densidad de muestreo de 1 muestra/60 m². Esta densidad de muestreo es habitual en la caracterización de suelos para superficies pequeñas y es la que se recomienda en la *Guía para la Investigación del Estado Final del Suelo del País Vasco (2020)*. De esta forma, inicialmente se han recogido en campo 42 incrementos muestrales representativos, 24 correspondientes a las áreas de la Barra 1 y 18 en la Barra 2.

Las muestras fueron trasladadas a gabinete para su pretratamiento y análisis, realizando medidas de susceptibilidad magnética en distintas condiciones de humedad. Para todas las muestras se han realizado varias medidas de susceptibilidad magnética, para determinar el valor medio.

Las mediciones realizadas en ambas barras previas al vertido de la magnetita, se han utilizado como prueba y calibración de la metodología de medida, así como para el estudio de la influencia de las distintas variables que tienen repercusión en la calidad de las medidas.



Figura 55. Determinación del grado de humedad de las muestras mediante termobalanza.

Tras el análisis detallado de las diferentes zonas definidas en cada barra, se ha calculado un valor promedio. Estos valores corresponden a la susceptibilidad magnética medida sobre muestra seca al aire en cada uno de los puntos. Posteriormente se ha realizado una interpolación para la estimación de la distribución espacial de la susceptibilidad magnética en las Barras 1 y 2, obtenido como resultado las isólinas de susceptibilidad magnética que se presentan en la Figura 56 y en la Figura 57.

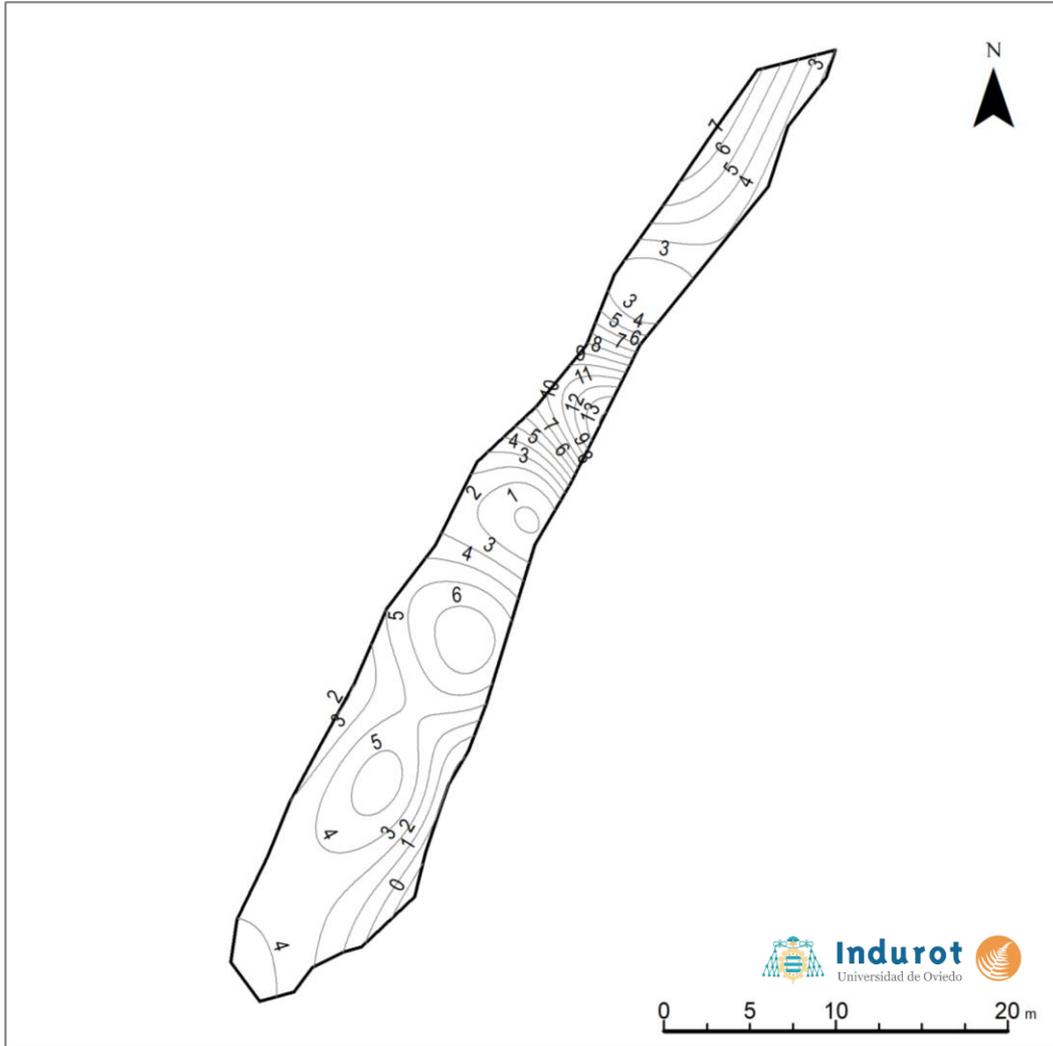


Figura 56. Nivel base de susceptibilidad magnética natural ($\times 10^{-7}$) en la Barra 1 del río Cuvia.

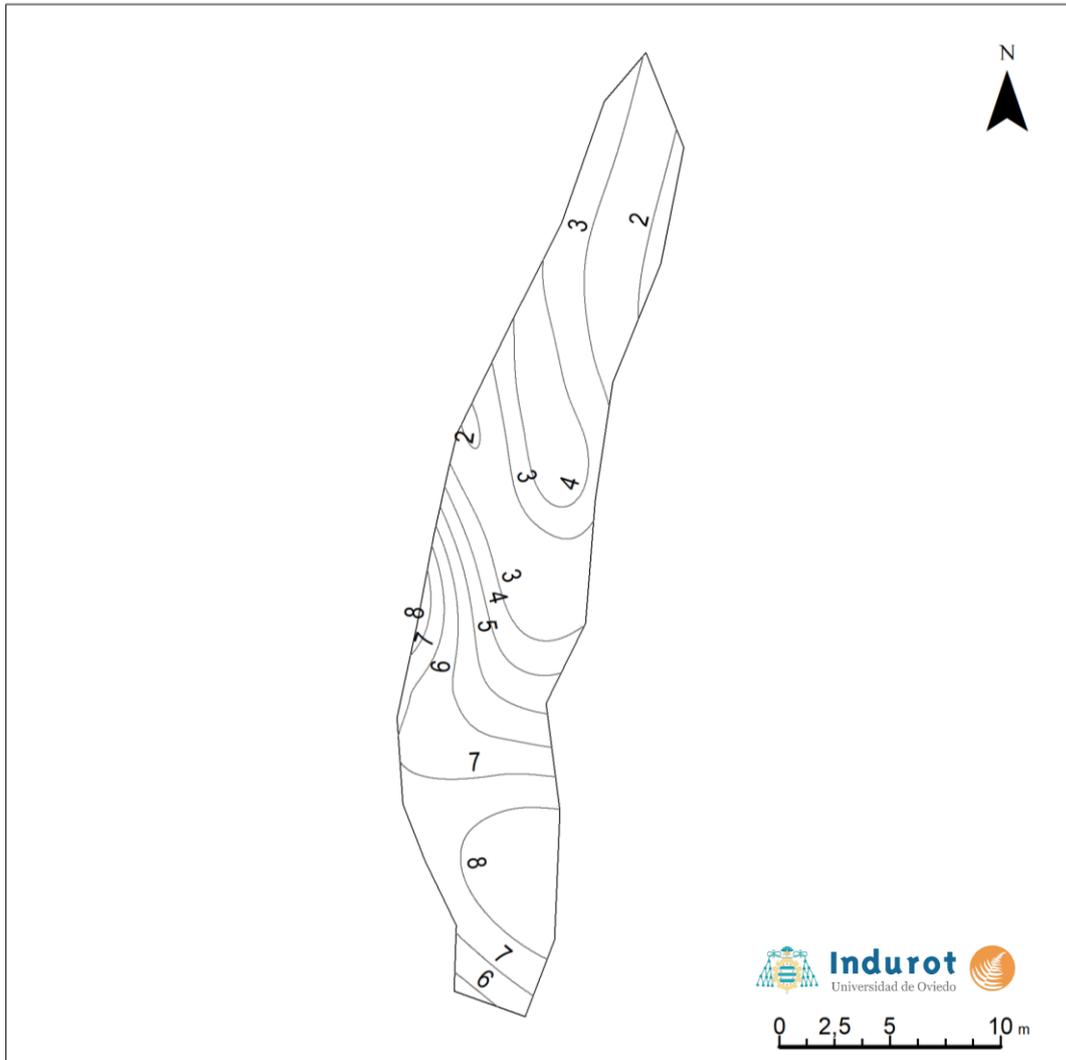


Figura 57. Nivel base de susceptibilidad magnética natural ($\times 10^{-7}$) en la Barra 2 del río Cubia.

5.3.2. Depósito de la magnetita y redistribución tras una pequeña crecida

A principios del mes de octubre de 2022 se llevó a cabo, con la colaboración del personal de TRAGSA, el depósito de 5 toneladas de magnetita repartidas a lo largo de unos 27 m² sobre barra fluvial (Figura 58), con presencia de zonas de sedimento fino.



Figura 58. Depósito de la magnetita en la zona de reinyección.

A finales del mes de enero de 2023 tuvo lugar una pequeña crecida en el río Cubia que movilizó de forma significativa el volumen de magnetita vertido (Figura 59).



Figura 59. Zona donde se vertió la magnetita. Izquierda previa a la crecida, derecha durante la crecida (la flecha amarilla señala el flujo hacia donde se desplazó la magnetita).

Tras la crecida se procedió al muestreo de las áreas sobre las que se había realizado inicialmente la determinación del nivel de fondo o nivel base de susceptibilidad magnética natural. El proceso se realiza de forma análoga al realizado para medir el magnetismo natural. EL mismo procedimiento se aplicó en una muestra recogida en la zona de deposición (DA) y en otras dos zonas donde se detectó de visu la presencia de magnetita.

Los resultados mostraron que una de las zonas de la barra 1 y en las dos muestras de visu se pudo distinguir una clara deposición del trazador; sin embargo, en el resto no se identificaron valores cuya la susceptibilidad magnética señale la posible llegada de magnetita.

Utilizando los valores de susceptibilidad magnética en cada uno de los puntos muestreados, y realizando una interpolación para la distribución espacial de la susceptibilidad magnética en la Barra 1, en la Figura 60 se muestran las isólinas resultantes del análisis.



Figura 60. Distribución espacial de la susceptibilidad magnética ($\times 10^{-7}$) en la Barra 1 del río Cubia tras la crecida de enero de 2023.

5.3.3. Interpretación de los resultados

Se ha comprobado que es posible detectar cambios en la composición del sedimento arenoso mediante el empleo de la medida de susceptibilidad magnética. Estos cambios en la composición debidos al material magnético, podrían usarse como método indirecto para el seguimiento y monitorización del sedimento arenoso en ambiente fluvial. No obstante, se han encontrado varias interferencias que se deben tener en cuenta en futuros ensayos.

En las experiencias de campo, la movilización del material ha permitido localizar *de visu* partículas de mineral de magnetita en una zona inmediatamente aguas abajo (en torno a 30 – 40 m) de la zona de inyección. Las medidas realizadas sobre estas muestras reflejan un aumento significativo en los valores de susceptibilidad magnética, en comparación con las mediciones del fondo natural. Comparativamente, las modificaciones en la susceptibilidad magnética que se han producido en los puntos de muestreo de la Barra 1 y Barra 2 respecto a los puntos citados anteriormente, es muy superior en estos últimos. En consecuencia, es probable que, para poder obtener unos resultados representativos en zonas más extensas, el volumen de material a inyectar deba incrementarse de forma significativa.

En síntesis, parece claro que mediante la metodología descrita es posible cuantificar la variación de la susceptibilidad magnética inducida por un material magnético. Cuestión distinta es que, con las condiciones del ensayo realizado, no se ha detectado suficiente cantidad del trazador que permita relacionar la cantidad de material en origen con la detectada en los puntos de muestreo.

6. Baipás sedimentario

El objetivo de esta fase es llevar a cabo una reubicación de sedimento grueso procedente de zonas aguas arriba de las barreras artificiales al flujo de sedimento, donde las condiciones sean favorables a la extracción, hacia el tramo de estudio, donde los trabajos señalan un déficit sedimentario. Se requiere por tanto la identificación de emplazamientos potenciales de extracción y recepción del sedimento, la realización de un análisis de compatibilidad sedimentaria entre ambos y la definición de un volumen de sedimento a mover.

6.1.1. Estudio de emplazamientos y compatibilidad sedimentaria

Se estudiaron varios emplazamientos como zonas potenciales para la extracción de sedimento, caracterizados por cumplir los siguientes aspectos:

- Se ubican aguas arriba de las principales presas que afectan al área de estudio.
- Se encuentran próximos a la zona de estudio, siendo esperable una mayor probabilidad en la compatibilidad sedimentaria.
- Representan zonas con una importante acumulación de acarreos.
- Representan zonas con acceso para la maquinaria.

De los emplazamientos analizados, el emplazamiento seleccionado para la extracción de sedimento es el localizado en Argame.

Respecto a las zonas donde realizar la reubicación de sedimento, se seleccionaron los ubicados aguas abajo de la presa de Valduno II en la margen derecha del río Nalón y la barra ubicada en la margen izquierda en el entorno de la localidad de Villamarín. Dichas zonas presentan las siguientes características:

- En ambas se ha constatado movilidad de sedimento y posterior incorporación al cauce, especialmente tras la avenida de noviembre de 2021.
- Presentan accesos disponibles para la maquinaria, minimizando afecciones ambientales derivadas.
- Se localizan en los tramos superiores del área de estudio, donde las evidencias de déficit de sedimento son más notables, como el aumento de afloramientos rocosos y los valores mayores de acorazamiento.
- Los emplazamientos abarcan ámbitos morfodinámicos diferentes que permiten estudiar los mecanismos de incorporación del sedimento al cauce: a) desde zona de orilla en Valduno, b) desde barra de meandro en Villamarín.

Tras analizar la similitud de los análisis físico-químicos del sedimento entre zonas fuente y destino, se realizaron análisis granulométricos de carga de fondo más detallados. A priori, y teniendo en cuenta las granulometrías realizadas, las diferencias en las distribuciones de tamaños entre los emplazamientos analizados no son significativas.

Tras la realización de varios análisis geoquímicos, la estimación de la capacidad de transporte, así como el estudio de las diferencias entre modelos digitales del terreno antes y después de avenidas, se concretaron los trabajos de reubicación de sedimento.

6.1.2. Ejecución del baipás de sedimento

Entre los meses de febrero y abril de 2023, TRAGSA llevó a cabo las obras de reubicación de sedimento grueso. Según las estimaciones realizadas, unos 2500 m³ se reubicaron en

Villamarín y unos 800 m³ aguas abajo de la presa de Vaduno II (Figura 61). Aunque son valores por debajo de los volúmenes de sedimento que el río Nalón transporta anualmente, se consideran suficientes para conformar la base de una experiencia piloto de baiopás sedimentario.



Figura 61. Trabajos de reubicación de sedimento en el emplazamiento de Valduno.

La reubicación de sedimento en las inmediaciones de la presa de Valduno II se ha realizado sobre la margen derecha, en un tramo de unos 25 m de ancho y unos 200 m de longitud. Dicha zona había erosionada en varios puntos por la avenida de noviembre de 2021.

En Villamarín la reubicación de sedimento se ha realizado sobre la margen izquierda del río Nalón, concretamente sobre un depósito de barra activa de meandro (Figura 62). Se trata de un depósito fluvial que experimenta transformaciones durante avenidas, tal y como se comprobó durante los eventos de noviembre de 2021 y enero de 2023.



Figura 62. Fotografías tomadas durante la reubicación de sedimento en el emplazamiento de Villamarín. Las tres primeras están tomadas desde la barra y la última desde un dron.

7. Conclusiones

En el presente documento se sintetizan los principales trabajos realizados en el tramo bajo del río Nalón, aguas abajo de la presa de *El Furacón* en Trubia, que abarca unos 35 km de longitud y forma parte de la Zona de Especial Conservación *ZEC Río Nalón* (ES1200029).

Estos estudios evidencian que el curso bajo del río Nalón está experimentando importantes reajustes en el cauce desde hace décadas, y que se han acelerado en los últimos años. Concretamente, se han observado signos de erosión y desplome de orillas distribuidos en más de 30 emplazamientos, que abarcan unos 8 km de longitud y que están provocando importantes fragmentaciones en el corredor fluvial.

Para analizar las causas y valorar la viabilidad de posibles medidas de mitigación, se han desarrollado diferentes estudios desde el año 2021, centrados en las características

ambientales del corredor fluvial y en el funcionamiento erosivo y sedimentario de este tramo.

Desde el punto de vista geomorfológico, se ha estudiado la evolución del curso bajo del río Nalón a lo largo de 13 fechas desde el año 1945, primer año del que se dispone de fotografías aéreas, hasta la actualidad, analizando tanto dinámicas cambiantes como las causas naturales y artificiales que pueden estar interviniendo en ellas. Este estudio refleja que el río Nalón no había presentado una inestabilidad de orillas tan importante y persistente en el tiempo como la observada actualmente.

Adicionalmente, los trabajos de campo mostraron excavaciones en la cimentación de puentes e infraestructuras viarias, así como una notable presencia en las orillas de raíces arbóreas expuestas. Estas incisiones y encajamientos del lecho señalan que los reajustes morfológicos del cauce también se están produciendo en el eje vertical del río. Estas observaciones indican no sólo que se está produciendo un reajuste generalizado en la morfodinámica del río Nalón, con potencial repercusión en el corredor ecológico que conforma esta Zona de Especial Conservación del *río Nalón*, sino que es previsible que continúe a corto y medio plazo.

Si bien existen factores climáticos, como el aumento de avenidas extremas detectado en el Nalón, que pueden estar repercutiendo en los reajustes descritos, la reducción en los aportes de sedimento desde los años 50 a lo largo de diversas barreras transversales al río, representa un factor a tener especialmente en cuenta en las transformaciones observadas. Más concretamente, la retención del sedimento denominado carga de fondo, representado por material con tamaño de grano de tipo arena y superior, que es el que controla la morfología del río.

Esta disminución en los aportes de sedimento se ha reflejado en el cauce mediante una concatenación de varias fases evolutivas. Una primera etapa, con un encajamiento del lecho de al menos 2 metros y un estrechamiento del canal de unos 16 m, seguido en la actualidad de una fase de ensanchamiento con erosión de márgenes, en diferente grado de desarrollo según el sector.

Los procesos de incisión han impuesto transformaciones en el lecho del río desde al menos la década de los años 70, observándose a lo largo de una superficie de unas 5 hectáreas una sustitución de un sustrato sedimentario y móvil, por otro de naturaleza rocosa y estática, proceso más acentuado en los tramos superiores. El déficit de áridos también se ha manifestado en los tramos aluviales, mediante el desarrollo de lechos más acorazados y con menor movilidad. Si bien en el tramo destacan algunos aspectos positivos relativos a la fauna, como los índices de macroinvertebrados o la importante presencia de colonias de avión zapador, las transformaciones descritas, unidas al

descenso en los niveles freáticos en las llanuras aluviales, han interferido transformando los hábitats fluviales de estas zonas.

Concretamente, los estudios de vegetación realizados a lo largo de unas 500 ha reflejan algunos problemas. Aunque en el tramo fluvial se reconocen formaciones vegetales incluidas en el hábitat de interés comunitario prioritario 91E0* (alisedas atlánticas, saucedas blancas y en menor medida arcedas fresnedas), el bosque ribereño autóctono se encuentra fragmentado en toda el área de estudio, especialmente en el tramo del río Nalón después de la confluencia con el Narcea. Esta situación, junto a la presencia de un alto número de especies alóctonas, han disminuido la funcionalidad del corredor fluvial.

Para profundizar en la mitigación de problemas derivados de un déficit de sedimento en el sistema fluvial, se plantearon 3 grupos de medidas piloto de diferente escala y naturaleza. Por un lado, se han contemplado acciones de refuerzo y fortalecimiento del bosque fluvial en emplazamientos muy concretos y vulnerables, pero cubriendo una variada problemática relativa a la fragmentación de la ribera. Son acciones de carácter local basadas en técnicas de revegetación y bioingeniería que, además de cumplir con determinados condicionantes morfodinámicos, van en consonancia con los objetivos de conservación del hábitat ribereño.

Otro grupo de medidas planteadas ha estado dirigido a actuar sobre el origen del problema, que es el déficit de áridos, mediante dos actuaciones piloto de reubicación o baipás de sedimentos procedentes de aguas arriba de las barreras transversales. En estas actuaciones se movieron en torno a 3500 m³ de sedimento, que se depositaron sobre emplazamientos que habían experimentado erosiones en las últimas avenidas. Aunque representan volúmenes de poca envergadura para el río Nalón, se trata de una experiencia piloto cuyo objetivo principal es investigar en los procesos de redistribución del sedimento en el cauce, implantándose en cada uno de estas zonas varias técnicas de monitorización y seguimiento.

Finalmente, el proyecto persigue establecer las bases experimentales y metodológicas para contribuir a desarrollar un programa u observatorio de sedimento de carga de fondo a más largo plazo, dirigido a profundizar en la comprensión cuantitativa del fenómeno de transporte de carga de fondo y sus efectos en el sistema fluvial.

En esta dirección, se han implantado diferentes herramientas de medición de los flujos de sedimento para la adquisición de los primeros datos de transporte de material grueso. Concretamente, se han insertado geolocalizadores en unos 1000 clastos, se ha instalado un sismógrafo para la investigación de la señal sedimentaria en el registro sísmico, además de varias placas de impacto con geófonos contadores de transporte (comerciales y de fabricación propia). Además, se han realizado varios ensayos utilizando trazadores de tipo magnético dirigidos al estudio del transporte de arenas. Se

trata de un observatorio de sedimento pionero en España, tanto por el carácter multi-método como por la innovación de varias de las técnicas geofísicas desarrolladas. Los resultados preliminares ya están señalando que las metodologías utilizadas tienen potencial para la obtención de datos de transporte de sedimento de carga de fondo.

Estas actuaciones no tienen vocación de definitivas dado el desequilibrio que impera en el tramo del río Nalón incluido en el área de estudio, el aumento de la frecuencia de las avenidas y el carácter piloto de muchas de ellas, pero formarán parte de un proceso continuo de investigación y seguimiento. Representan acciones que persiguen la obtención de información clave, morfodinámica y ambiental, para la configuración de un Plan de gestión sedimento en el río Nalón a más largo plazo.

Los trabajos han sido financiados por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, dentro de su programa de Restauración y Adaptación al Cambio Climático (PIMA Adapta agua), bajo la dirección de la Confederación Hidrográfica del Cantábrico, y fueron desarrollados por la empresa pública TRAGSA con la colaboración del Instituto de Recursos Naturales y Ordenación del Territorio (INDUROT) de la Universidad de Oviedo.

8. Bibliografía

- Álvarez García et al. (Dir. 2006). Análisis del impacto ambiental de las canalizaciones en 6 zonas piloto en Asturias. Confederación Hidrográfica del Cantábrico. Ministerio de Medio Ambiente. CN-05-162.
- Ashmore, P. y Church, M. (1998). Sediment transport and river morphology: paradigm for study. En: *Gravel-bed rivers in the environment*. Klingeman, P. C.; Beschta, R. L.; Komar, P. D. y Bradley, J. (eds). Water Resource Publications, LLC, Highlands Ranch, Colorado, 115–148.
- Beguería, S., López-moreno, J. I., Gómez-villar, A., Rubio, V., Lana-renault, N. y García-Ruiz, J. M. (2006). Fluvial adjustments to soil erosion and plant cover changes in the Central Spanish Pyrenees. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 88(3), 177-186.
- Benito, G.; Thorndycraft, V.R. (Eds.) (2004). *Systematic, palaeoflood and historical data for the improvement of flood risk estimation*. CSIC y Comisión Europea, Madrid, 378 pp.

- Brandt, S. A. (2000). Classification of geomorphological effects downstream of dams. *Catena*, 40(4), 375-401. [https://doi.org/10.1016/s0341-8162\(00\)00093-x](https://doi.org/10.1016/s0341-8162(00)00093-x)
- Braun-Blanquet, J., y Lalucat Jo, J. (1979). Fitosociología: bases para el estudio de las comunidades vegetales/Pflanzensoziologie. Vol 820. Madrid: Blume.
- Brookes, A. (1987). River Channel adjustments downstream from channelization works in England and Wales. *Earth Surface Processes and Landforms*, 12: 337-351.
- Bunte, K. y Abt, S. R. (2001). Sampling frame for improving pebble count accuracy in coarse gravel-bed streams. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 37(4), 1001-1014.
- CEDEX (2009). Mapa de caudales máximos de avenida para la red fluvial de la España peninsular. Informe Técnico para la Dirección General del Agua del MARM. Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX, Madrid, Spain.
- Chien, N. (1985). Changes in river regime after the construction of upstream reservoirs. *Earth Surface Processes and Landforms*, 10(2), 143-159. <https://doi.org/10.1002/esp.3290100207>
- Church, M. (2006). Bed material transport and the morphology of alluvial river channels. *Annual reviews of Earth and Planetary Sciences*, 34, 325-354.
- Dethier, E. N., Renshaw, C. E., & Magilligan, F. J. (2022). Rapid changes to global river suspended sediment flux by humans. *Science*, 376 (6600), 1447-1452.
- Dietrich, W. E., Kirchner, J. W., Ikeda, H., & Iseya, F. (1989). Sediment supply and the development of the coarse surface layer in gravel-bedded rivers. *Nature*, 340(6230), 215-217.
- Downs, P. W., Soar, P. J., & Taylor, A. (2016). The anatomy of effective discharge: The dynamics of coarse sediment transport revealed using continuous bedload monitoring in a gravel-bed river during a very wet year. *Earth Surface Processes and Landforms*, 41(2), 147-161.
- Efron, B. y Tibshirani, R. J. (1994). *An introduction to the bootstrap*. CRC press.
- Fernández-Iglesias, E., Tirador Egocheaga, P. y Marquínez, J. (2006). Impacto de las canalizaciones en el río Narcea. En: Actas de la IX Reunión Nacional de Geomorfología, Santiago de Compostela, 509-519.
- Fernández-Iglesias, E. y Anadón, S. (2010). Análisis del encajamiento de los ríos Nalón (Asturias) y Carrión (Palencia) en las últimas décadas y repercusión en la inundabilidad. *Avances de la Geomorfología en España (2008-2010)*. Solsona.
- Fernández-Iglesias, E., González-Rodríguez, G. y Marquínez-García, J. (2019a). Statistical approaches of the extreme rainfall events variability using hourly data, NW

- Spain. 11th International Conference on Computational and Methodological Statistics. University of Pisa, p. 95.
- Fernández-Iglesias, E. González-Rodríguez, G. y Marquínez-García, J. (2019b). Assessing an increase of extreme rainfall by a bootstrap isotonic test. Final CRoNoS meetings and Workshop on Multivariate Data Analysis. Limassol, Cyprus, p. 30.
- Fernández-Iglesias, E., González-Rodríguez, G. y Moro, V. (2021). Flood frequency trends based on Bootstrap method in Nalon River (Asturias, NW Spain). 14th International Conference of the ERCIM WG on Computational and Methodological Statistics. King's College London, p. 116.
- García, P., Sanna, M., Fernández García, M., González Rodríguez G. y Cires E. (2023). Monitoring invasive alien plants dynamics: application in restored areas. *Biología* 78, 1375–1380. <https://doi.org/10.1007/s11756-023-01375-w>
- González-Rodríguez, G., Vázquez-Tarrío, D., Fernández-Iglesias, E., Fernández-García, M., Menéndez-Duarte, R., Álvarez Pulgar, F.J., González-Cortina, J.M., Pedreira Rodríguez, D. (2023). Técnicas geofísicas para el estudio del transporte de sedimento como carga de fondo: resultados preliminares en los ríos Esva y Nalón (Asturias). IV Congreso Ibérico de Restauración Fluvial (RestauraRíos). 21-23 junio. Toledo.
- Jiménez, A., Marcuello, C., García, C., Incio, L., Cuesta, S. (2011). Estudios hidrológicos. En: Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (Ed.), *Guía Metodológica para el desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables* (pp 35-108).
- Kumar, M.T. y Chatterjee, C. (2009). Uncertainty assessment and ensemble flood forecasting using bootstrap based artificial neural networks (BANNs). *Journal of Hydrology*, 382 (1-4), 20-33.
- Kumar, R., y Chatterjee, C. (2010). Development of regional flood frequency relationships for gauged and ungauged catchments using L-moments. In *In Extremis: Disruptive Events and Trends in Climate and Hydrology* (pp. 104-127). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Lane, E. W. (1955). Importance of fluvial morphology in hydraulic engineering. *Proceedings (American Society of Civil Engineers)*; v. 81, paper no. 745.
- Leopold, L.B. y Wolman, M.G. (1957). *River channel patterns: Braided, Meandering and Straight*. US Geological Survey Professional Paper 282B, 85 pp.
- Magliulo, P., Bozzi, F., Leone, G., Fiorillo, F., Leone, N., Russo, F. y Valente, A. (2021). Channel adjustments over 140 years in response to extreme floods and land-use change, Tammaro River, southern Italy. *Geomorphology*, 383, 107715.

- MAGRAMA (2011). Guía Metodológica para el desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Madrid. 282 pp.
- MAGRAMA (2013). Protocolo de cálculo del índice IBMWP código: IBMWP-2013. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Madrid.
- MAGRAMA (2016). Protocolo de cálculo del índice Multimétrico Específico del Tipo de Invertebrados bentónicos en ríos código: METI-2015. Versión 1. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Madrid.
- Marquínez García, J., Colina Vuelta, A., Fernández-Iglesias, E., Fernández García, M., González Rodríguez, G., Salgado Fernández, L. y Fuego Gómez B. (2018). Influencia de los cambios en los usos del suelo durante los últimos 60 años en la morfología fluvial del río Saja (cordillera Cantábrica). En: López, M.J., Carmona, P., Salom, J. y Albertos, J.M. (Eds.). *Tecnologías de la Información Geográfica, perspectivas multidisciplinares en la sociedad del conocimiento*. Universidad de Valencia, 287-296.
- Milan, D. J., & Large, A. R. (2014). Magnetic tracing of fine-sediment over pool-riffle morphology. *Catena*, 115, 134-149.
- Mosley, M.P. (1981). Scour depths in branch channel confluences, Ohau River, Rep. WS395, 14 pp., Water and Soil Sci. Centre, Min. of Works and Dev., Christchurch, New Zealand.
- Munné, A., Sola, C., y Prat, N. (1998). QBR: An index to evaluate the quality of riparian ecosystems; QBR: Un índice rápido para la evaluación de la calidad de los ecosistemas de ribera. *Tecnología del Agua*, 175.
- Munné, A., Prat N., Solà C., Bonada N. y Rieradevall M. (2003). A simple field method for assessing the ecological quality of riparian habitat in rivers and streams: QBR index. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 13: 147–163.
- Qi, Y. (2008). Bootstrap and empirical likelihood methods in extremes. *Extremes*, 11, 81–97.
- RIVERCHANGES (2016-2019). Cambios recientes en los sistemas fluviales cantábricos: análisis, causalidad y evaluación prospectiva. Marquínez, J. (I.P) CGL2015-68824-R, I+D+i Retos 2015, MINECO-FEDER.
- Roth, D. L., N. J. Finnegan, E. E. Brodsky, K. L. Cook, C. P. Stark, and H. W. Wang (2014). Migration of a coarse fluvial sediment pulse detected by hysteresis in bedload generated seismic waves. *Earth and Planetary Science Letters*, 404, 144–153.

- Sanna M. y Díaz González T.E. (2023) Sobre la presencia de *Verbena litoralis* var. *brevibracteata* en el Principado de Asturias. Boletín Ciencia y Tecnología R.I.D.E.A., 57.
- Schmidt, J. C. y Wilcock, P. R. (2008). Metrics for assessing the downstream effects of dams. *Water Resources Research*, 44(4).
- Schumm, S.A., Harvey, M.D. y Watson, C.C. (1984). *Incised Channel: morphology, dynamics and control*. Water Resources, Littleton, Colorado, 200 pp.
- Simon, A. (1989). A model of channels response in disturbed alluvial channels. *Earth Surface Processes and Landforms*, 14: 11-26.
- Simon, A. y Rinaldi, M. (2000). Channel instability in the loess area of the Midwestern United States. *Journal of American Water Resources Association*, 36 (1): 133-150.
- Surian, N. y Rinaldi, M. (2003). Morphological response to river engineering and management in alluvial channels in Italy. *Geomorphology*, 50: 307-326.
- Thompson, C.J., Croke, J., Fryirs, K. y Grove, J.R. (2016). A channel evolution model for subtropical macrochannel systems. *Catena*, 139: 199-213.
- Vázquez-Tarrío, D. (2013). Transporte de sedimento como carga de fondo en la cuenca del río Narcea (vertiente norte de la Cordillera Cantábrica). Tesis doctoral, Universidad de Oviedo, 418 pp.
- Vázquez-Tarrío, D., Tal, M., Camenen, B. y Piégay, H. (2019a). Effects of continuous embankments and successive run-of-the-river dams on bedload transport capacities along the Rhône River, France. *Science of The Total Environment*, 658, 1375-1389.
- Vázquez-Tarrío, D., Fernández-Iglesias, E., Fernández García, M. y Marquínez, J. (2019b). Quantifying the Variability in Flow Competence and Streambed Mobility with Water Discharge in a Gravel-Bed Channel: River Esva, NW Spain. *Water*, 11(12), 2662.
- Vázquez-Tarrío, D., Menéndez-Duarte, R. y Martínez, R. (2022). Estimating bedload in a poorly-gauged mountain river: Coto River (Cantabrian Mountains, NW Iberian Peninsula). 10th International Conference on Geomorphology, Coimbra, Portugal, 12–16 Sep 2022, ICG2022-74, <https://doi.org/10.5194/icg2022-74>, 2022.
- Wentworth, C. K. (1922). A scale of grade and class terms for clastic sediments. *The journal of geology*, 30(5), 377-392.

- Wilcock, P. R., Pitlick, J. y Cui, Y. (2009). *Sediment transport primer: estimating bed-material transport in gravel-bed rivers, USDA Forest Service Rocky Mountain Research Station*. General Technical Report RMRS-GTR-226, 1-84.
- Williams, G.P. y Wolman, M.G. (1984). Downstream effects of dams on alluvial rivers. *U.S. Geological Survey Professional Paper*, 1286, 83 pp.
- Wolman, M.G. (1954). A method of sampling coarse river-bed material. *Transactions of the American Geophysical Union*, 35 (6): 951-956.
- Zhang, S., Liu, Y. y Wang, T. (2014). How land use change contributes to reducing soil erosion in the Jialing River Basin, China. *Agricultural water management*, 133, 65-73.