



Evaluación de los ecosistemas clave para la provisión de servicios ecosistémicos a la ciudad de Durazno, Uruguay

Autor: IHCantabria
30 de agosto de 2024

LISTADO DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS

BGIN	Infraestructura verde y azul por sus siglas en inglés
DINACC	Dirección Nacional de Cambio Climático
FVC	Fondo Verde para el Clima
IDEUy	Infraestructura de datos espaciales de Uruguay
IDD	Intendencia Departamental de Durazno
INE	Instituto Nacional de Estadísticas
INUMET	Instituto Uruguayo de Meteorología
IPCC	Panel Intergubernamental Cambio Climático en sus siglas en inglés
LULC	Usos y ocupación del suelo
MGAP	Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca
MIRA	Monitor Integral de Riesgos y Afectaciones
N4C	Nature4Cities
NAP	Planes Nacionales de Adaptación en sus siglas en inglés
OAN	Observatorio Ambiental Nacional
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP en su sigla en inglés)
SbN	Soluciones basadas en la Naturaleza
SE	Servicios ecosistémicos
SINAE	Sistema Nacional de Emergencias
SNRCC	Sistema nacional de Respuesta al Cambio Climático
SSP	Trayectorias socioeconómicas compartidas en sus siglas en inglés



ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	6
2. OBJETIVO	7
3. ÁREA DE ESTUDIO	8
4. DATOS DE PARTIDA	10
4.1. Modelo digital del terreno	10
4.2. Cobertura y usos del suelo	11
4.3. Información climática y escenarios de cambio climático	12
4.3.1. Clima actual	12
4.3.2. Proyecciones climáticas	13
5. EVALUACIÓN DE LOS ECOSISTEMAS CLAVE PARA LA PROVISIÓN DE SERVICIOS A LA CIUDAD.....	16
5.1. Selección de los servicios ecosistémicos y de los ecosistemas que los proporcionan	17
5.1.1. Regulación hidrológica frente inundaciones	18
5.1.2. Regulación hidrológica frente sequía	18
5.2. Evaluación de los ecosistemas seleccionados.....	18
5.2.1. Localización espacial de los ecosistemas definidos	18
5.2.2. Evaluación de los ecosistemas	21
5.3. Identificación de áreas clave con alto potencial para la implementación de SbN.....	36
5.3.1. Conceptualización y caracterización de la relación SE – SbN	36
5.3.2. Modelado e identificación de áreas proveedoras de SE.....	37
5.3.3. Resultados.....	54
6. CONCLUSIONES	55
7. RECOMENDACIONES	56
8. BIBLIOGRAFÍA	57

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Localización del área de estudio, la ciudad de Durazno. A la izquierda se puede apreciar su localización dentro de la Cuenca del río Yí. A la derecha, el área de estudio cuyos límites son los del Ámbito de aplicación del Plan Local en el que se circunscribe el análisis realizado.....	8
Figura 2. Información referente a eventos del Monitor Integral de Riesgos y Afectaciones (MIRA) para el departamento de Durazno. Fuente: SINAIE (2024).....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 3. Modelo digital de elevaciones hidrológicamente consistente (MDTHC) para la cuenca drenante de Durazno. Fuente: IDEUy, 2019.....	10
Figura 4. Mapa de usos y coberturas del suelo para la cuenca drenante de Durazno. Fuente: MGAP y OAN, 2021.....	11
Figura 5. Precipitación diaria en la estación Durazno-Aeropuerto (1994-2024). Fuente: INUMET, 2024.	12
Figura 6. Temperatura media, máxima y mínima diaria en la estación Durazno-Aeropuerto en el 2023. Fuente: INUMET, 2024.	13
Figura 7. Cambios proyectados en las precipitaciones para el horizonte cercano bajo escenario SSP245. Promedio de los 10 modelos corregidos. Fuente: (Barreiro, et al., 2020).....	14
Figura 8. Cambios proyectados en la temperatura para el horizonte cercano bajo escenario SSP585. Promedio de los 10 modelos corregidos. Fuente: (Barreiro, et al., 2020).	15

Figura 9. Mapa de usos y coberturas del suelo (campo natural y bosque nativo) para la cuenca drenante de Durazno. Fuente: MGAP y OAN, 2021.....	19
Figura 10. Mapa de unidades funcionales (laderas de drenaje y llanuras de inundación) para la cuenca drenante de Durazno. Fuente: IHCantabria, 2024.....	20
Figura 11: Esquema resumen de algoritmo RF y proceso <i>bagging</i> . Fuente: Aplicación de algoritmos Random Forest (Espinosa-Zuñiga, 2020).....	22
Figura 12. Mapa de idoneidad del campo natural para la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.	24
Figura 13. Mapa de idoneidad del campo natural para el escenario futuro SSP245. Fuente: IHCantabria, 2024.	25
Figura 14. Mapa de idoneidad del campo natural para el escenario futuro SSP585 Fuente: IHCantabria, 2024.	26
Figura 15. Mapa de idoneidad del bosque nativo para la situación actual Fuente: IHCantabria, 2024.	27
Figura 16. Mapa de idoneidad del bosque nativo para el escenario futuro SSP245 Fuente: IHCantabria, 2024.	28
Figura 17. Mapa de idoneidad del bosque nativo para el escenario futo SSP585. Fuente: IHCantabria, 2024.	29
Figura 18. NDVI promedio en el año 2006. Fuente: IHCantabria, 2024.....	30
Figura 19. NDVI promedio en el año 2017. Fuente: IHCantabria, 2024.....	31
Figura 20. Árbol de decisiones para clasificación de las coberturas vegetales en: i) conservación pasiva (C1); ii) conservación activa (C2); iii) restauración activa (R1) y restauración intensiva (R2): IHCantabria, 2024.....	32
Figura 21. Áreas de conservación (pasiva y activa) y restauración (activa e intensiva) para la cobertura de campo natural en el escenario futuro SSP245. Fuente: IHCantabria, 2024.....	33
Figura 22. Áreas de conservación (pasiva y activa) y restauración (activa e intensiva) para la cobertura de campo natural en el escenario futuro SSP585. Fuente: IHCantabria, 2024.....	34
Figura 23. Áreas de conservación (pasiva y activa) y restauración (activa e intensiva) para la cobertura bosque nativo en el escenario futuro SSP245. Fuente: IHCantabria, 2024.	35
Figura 24. Áreas de conservación (pasiva y activa) y restauración (activa e intensiva) para la cobertura bosque nativo en el escenario futuro SSP585. Fuente: IHCantabria, 2024.	36
Figura 25. Mapa de llanuras de inundación para la cuenca drenante de Durazno. Fuente: IHCantabria, 2024.	38
Figura 26. Mapa de detalle de SbN propuestas con bosque nativo para el SE de regulación hidrológica en llanuras de inundación para la cuenca drenante de Durazno en el escenario futuro SSP245. Fuente: IHCantabria, 2024.	39
Figura 27. Mapa de detalle de SbN propuestas con bosque nativo para el SE de regulación hidrológica en llanuras de inundación para la cuenca drenante de Durazno en el escenario futuro SSP585. Fuente: IHCantabria, 2024.	40
Figura 28. Laderas de drenaje con potencial de generar escorrentía según factores topográficos y de permeabilidad para la cuenca drenante de Durazno. Fuente: IHCantabria, 2024.	41
Figura 29. Mapa de SbN propuestas con campo natural para el SE de regulación hidrológica en laderas de drenaje para el control de escorrentía en la cuenca drenante de Durazno en el escenario futuro SSP245. Fuente: IHCantabria, 2024.	42
Figura 30. Mapa de SbN propuestas con campo natural para el SE de regulación hidrológica en laderas de drenaje para el control de escorrentía en la cuenca drenante de Durazno en el escenario futuro SSP5. Fuente: IHCantabria, 2024.	43
Figura 31. Detalle de mapa de SbN propuestas con campo natural para el SE de regulación hidrológica en laderas de drenaje para el control de escorrentía en la cuenca drenante de Durazno en el escenario futuro SSP245. Fuente: IHCantabria, 2024.	44
Figura 32. Detalle de mapa de SbN propuestas con campo natural para el SE de regulación hidrológica en laderas de drenaje para el control de escorrentía en la cuenca drenante de Durazno en el escenario futuro SSP5. Fuente: IHCantabria, 2024.	45
Figura 33. Mapa de llanuras de inundación para la cuenca drenante de Durazno. Fuente: IHCantabria, 2024.	46
Figura 34. Mapa de detalle de SbN propuestas con bosque nativo para el SE de regulación hidrológica frente sequía en llanuras de inundación para la cuenca drenante de Durazno en el escenario futuro SS245. Fuente: IHCantabria, 2024.....	47



Figura 35. Mapa de detalle de SbN propuestas con bosque nativo para el SE de regulación hidrológica frente sequía en llanuras de inundación para la cuenca drenante de Durazno en el escenario futuro SS585. Fuente: IHCantabria, 2024. 48

Figura 36. Laderas de drenaje con potencial de generar infiltración según factores topográficos, de permeabilidad y de uso para la cuenca drenante de Durazno. Fuente: IHCantabria, 2024. 49

Figura 37: Mapa de SbN propuestas con campo natural para el SE de regulación hidrológica en laderas de drenaje para el aumento de la infiltración en la cuenca drenante de Durazno en el escenario futuro SSP245. Fuente: IHCantabria, 2024. 50

Figura 38. Mapa de SbN propuestas con campo natural para el SE de regulación hidrológica en laderas de drenaje para el aumento de la infiltración en la cuenca drenante de Durazno en el escenario futuro SSP585. Fuente: IHCantabria, 2024 51

Figura 39. Detalle de mapa de SbN propuestas con campo natural para el SE de regulación hidrológica en laderas de drenaje para el control de escorrentía en la cuenca drenante de Durazno en el escenario futuro SSP245. Fuente: IHCantabria, 2024. 52

Figura 40. Detalle de mapa de SbN propuestas con campo natural para el SE de regulación hidrológica en laderas de drenaje para el control de escorrentía en la cuenca drenante de Durazno en el escenario futuro SSP5. Fuente: IHCantabria, 2024. 53

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Características de las subcuencas consideradas. Fuente: IHCantabria, 2024. 12

Tabla 2. Cambios en la precipitación y temperatura para el horizonte 2030. Fuente: IHCantabria, 2024, con información de (Barreiro, et al., 2020). 13

Tabla 3. Conceptualización de las medidas de adaptación basadas en Naturaleza para los servicios ecosistémicos considerados para la ciudad de Durazno. Fuente: IHCantabria, 2024 37

Tabla 4. SbN obtenidas por cobertura vegetal analizada para cada SE modelado en el escenario futuro SSP245 en la cuenca drenante de Durazno. Fuente: IHCantabria, 2024 54

Tabla 5. SbN obtenidas por cobertura vegetal analizada para cada SE modelado en el escenario futuro SSP585 en la cuenca drenante de Durazno. Fuente: IHCantabria, 2024 54

1. INTRODUCCIÓN

Este documento se realiza en el marco del proyecto Nature4Cities (N4C), implementado por el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), financiado por el Fondo Verde para el Clima (FVC) y cofinanciado por el programa de la Unión Europea Euroclima+. Este proyecto regional, implementado en Durazno y en otras 12 ciudades de la región, tiene por objetivo reducir la vulnerabilidad y el riesgo al cambio climático de las áreas urbanas a través de Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN). En particular en Uruguay las ciudades donde se implementa el programa fueron identificadas a partir de condiciones de vulnerabilidad climática con base en los estudios realizados en el Plan Nacional de Adaptación a la variabilidad y el Cambio Climático en ciudades e Infraestructuras (NAP Ciudades). Para este proyecto la Dirección Nacional de Cambio Climático (DINACC) del Ministerio de Ambiente (MA) es la autoridad nacional designada (NDA) y el Grupo de adaptación en ciudades del Sistema nacional de Respuesta al Cambio Climático (SNRCC) es el ámbito nacional de coordinación.

El principal objetivo que se busca con esta evaluación es el de disponer de información útil para la exploración e identificación de las SbN, el conocimiento de las escalas y niveles de decisión implicados y como insumo para el intercambio y validación de la definición, implementación e integración de SbN en el contexto de la ciudad. No se trata de realizar nuevos diagnósticos, sino más bien poner a disposición de todas las personas e instituciones involucradas la información existente y aquella que es necesaria para la integración de la vulnerabilidad y los riesgos climáticos en el ordenamiento territorial y la toma de decisiones.

Esta evaluación está dirigida principalmente a personal técnico, asesores y consultores de los gobiernos nacionales y subnacionales y otros actores clave a nivel de la ciudad tanto del sector público, la sociedad civil y el sector privado. Al mismo tiempo, los métodos y hallazgos de la evaluación tratan de integrar y asegurar sinergias con otras iniciativas existentes en las ciudades. Además, a nivel local y nacional, los gobiernos e instituciones, se pueden beneficiar para mejorar y crear capacidad e integrar las metodologías y hallazgos para su replicación y escalamiento a otras ciudades.



2. OBJETIVO

Tomando como referencia los enfoques planteados por el Proyecto Nature4Cities, así como los lineamientos de la gestión de cambio climático en Uruguay, y las necesidades y capacidades locales, se plantean los siguientes objetivos generales para la evaluación de los ecosistemas clave para la provisión de servicios a la ciudad:

- Seleccionar y evaluar los ecosistemas y determinar el servicio ecosistémico que ayuda a la adaptación al cambio climático.
- Identificar áreas proveedoras de los servicios ecosistémicos clave con alto potencial para la implementación de SbN.

3. ÁREA DE ESTUDIO

Durazno es la ciudad capital del Departamento homónimo, ubicado en el centro de Uruguay. Se localiza en la cuenca media de la cuenca del río Yí (13,720 km²), más concretamente en la subcuenca 56 de nivel 2.



Figura 1. Localización del área de estudio, la ciudad de Durazno. A la izquierda se puede apreciar su localización dentro de la Cuenca del río Yí. A la derecha, el área de estudio cuyos límites son los del Ámbito de aplicación del Plan Local en el que se circunscribe el análisis realizado.

El área de estudio, que se corresponde con el ámbito del Plan Local de la Ciudad de Durazno, que incluye la localidad de Santa Bernardina, es eminentemente urbana, sin embargo, se vincula fuertemente con un territorio rural agro productivo por lo que se la considera como centro regional de ganadería y agricultura. Según el Censo Nacional, en 2011 tenía una población de 36,691 habitantes.

La ciudad de Durazno presenta una temperatura media anual que oscila entre los 17 y los 17.5 °C creciendo de S a N, mientras que la pluviosidad crece en dirección SO-NE, desde unos 1200 mm a 1300 mm. La velocidad media del viento oscila entre 4 y 4.5 m/s y la insolación acumulada media esta entre 2400 y 2500 horas. La ciudad de Durazno presenta una temperatura media anual de 17 °C y una precipitación media de 1200mm.

La cuenca vertiente a la ciudad de Durazno, la cuenca del río Yí se caracteriza por albergar, entre otros, ecosistemas naturales de campo natural (pastizales) y el bosque nativo ribereño, esenciales para la regulación hidrológica de la región. De forma general, los pastizales son fundamentales para la gestión del agua, ya que su capacidad de infiltración es notablemente superior a la de otros tipos de vegetación. Este aumento en la infiltración contribuye a su vez a la disminución de las pérdidas de retención de agua, lo que ayuda a mitigar tanto las sequías como las inundaciones. Además, las zonas de paisajes con pendientes suaves y suelos permeables favorecen la recarga de acuíferos, lo que es vital para mantener el suministro de agua en la región. Por otro lado, el bosque de ribera también desempeña un papel crucial en la atenuación de inundaciones.

En cuanto a los riesgos presentes en el área de estudio, el Monitor Integral de Riesgos y Afectaciones (MIRA), sistema central de información creado por el Sistema Nacional de Emergencias (SINAE) cuyo principal objetivo es apoyar la toma de decisiones en la gestión integral de riesgos, permitiendo



registrar información referente a eventos, desde 2005 registra los siguientes datos para el Departamento de Durazno, en cuanto a eventos registrado, estos son: **ola de calor y de frío, viento, tormentas, inundaciones, lluvias intensas, granizadas, incendios y sequías.**

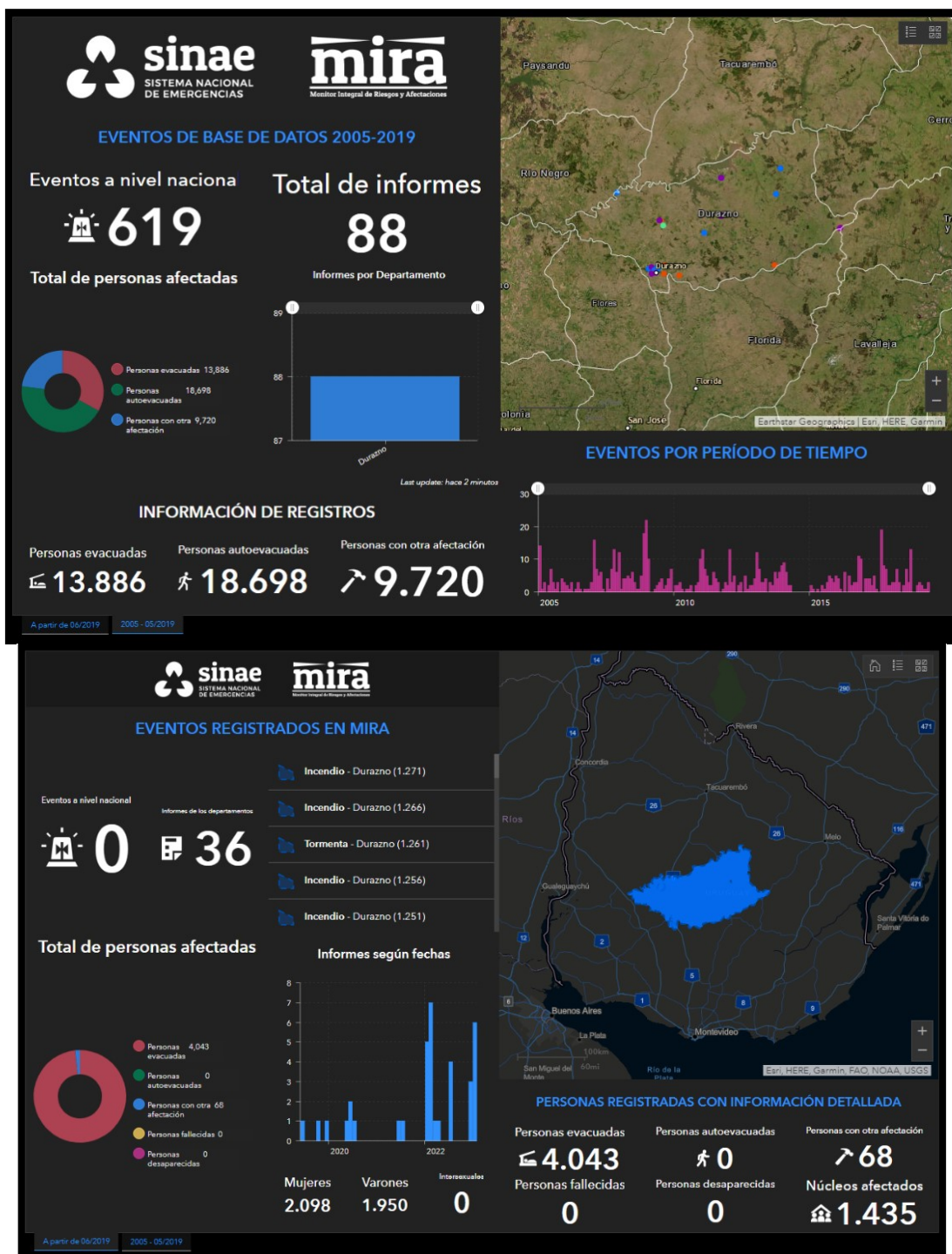


Figura 2. Información referente a eventos del Monitor Integral de Riesgos y Afetaciones (MIRA) para el departamento de Durazno. Fuente: SINAIE (2024).

En el marco del proyecto Nature4Cities, se evalúan los riesgos consensuados en las fases iniciales del proyecto con PNUMA y la DINACC del Ministerio de Ambiente, como la autoridad nacional designada, en el área de estudio, y que se corresponden con: escasez de recursos hídricos, inundación, y olas de calor y frío.

4. DATOS DE PARTIDA

4.1. Modelo digital del terreno

En el presente estudio, se cuenta con el “modelo digital de terreno hidrológicamente consistente” (MDTHC) del grupo de Infraestructuras de Datos Espaciales del Uruguay (IDEUy). Se trata de un producto generado a partir de la Cobertura Aérea Nacional y la aerotriangulación de las imágenes en el software Match-T de Inpho. Utilizando algoritmos de correlación de píxeles, se genera un modelo digital de superficie (MDS) que, tras un proceso de edición manual mediante líneas de corte en un ambiente estereoscópico 3D, se convierte en MDT. Durante este proceso se supervisó la captura de elementos naturales y artificiales, corrigiendo aquellos generados sobre vegetación y edificaciones, siendo crucial la corrección de la malla de puntos y la restitución de elementos hidrográficos para obtener un MDTHC que represente con precisión el relieve de la región y permita un correcto modelado de procesos hidrológicos. Finalmente, el MDTHC se corta en una grilla derivada del PCN25.000 y se presenta con un tamaño de píxel de 2.5 metros, con una precisión vertical de 1.5 metros y horizontal de 1.0 metros al 95% de IC (Figura 3).

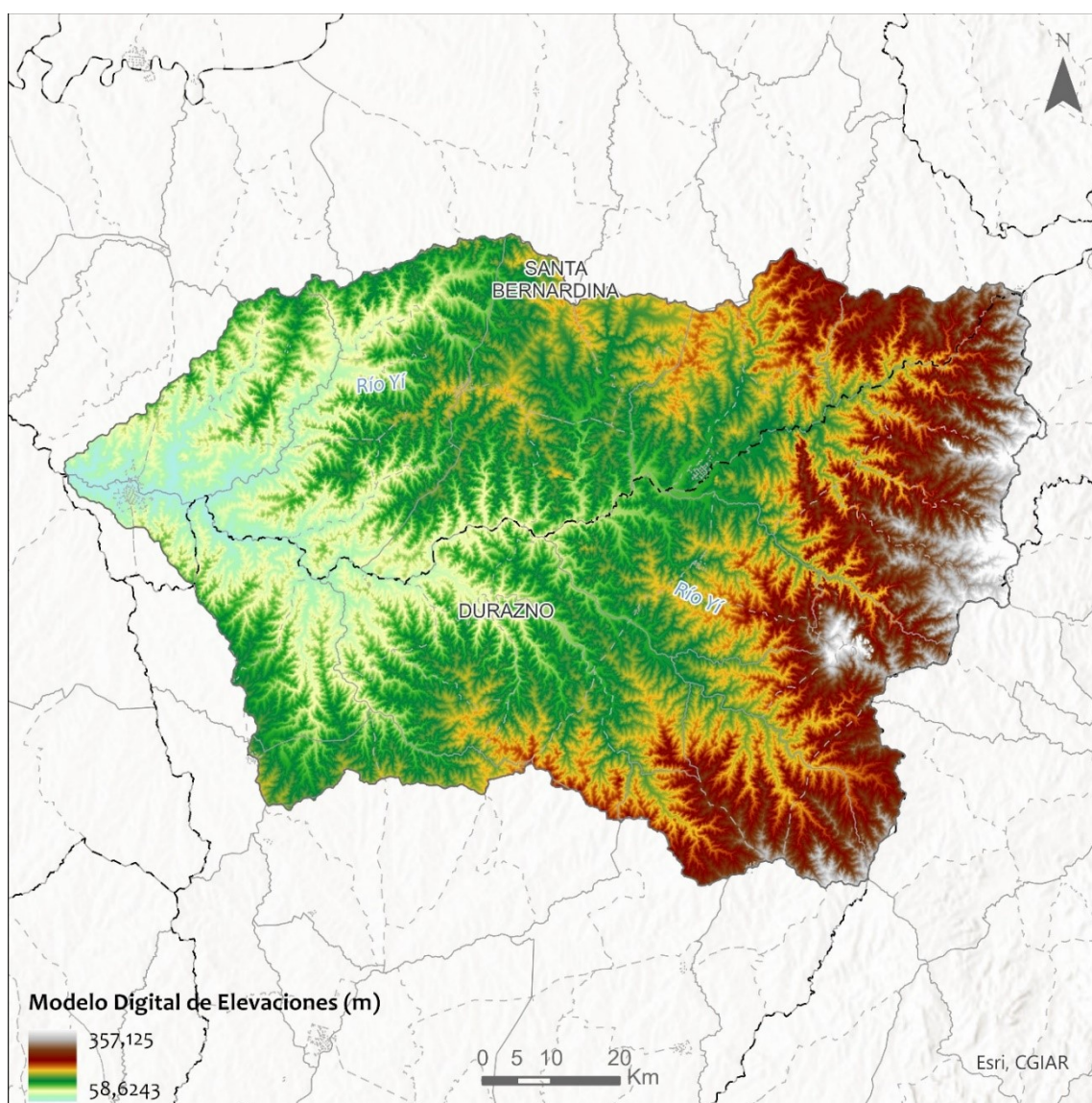


Figura 3. Modelo digital de elevaciones hidrológicamente consistente (MDTHC) para la cuenca drenante de Durazno. Fuente: IDEUy, 2019

4.2. Cobertura y usos del suelo

Como capas de cobertura y usos del suelo se utilizó la información procedente del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP) del año 2021 para la cobertura de “bosque nativo” y del Observatorio Ambiental Nacional (OAN) del año 2021 referentes al resto de las coberturas.

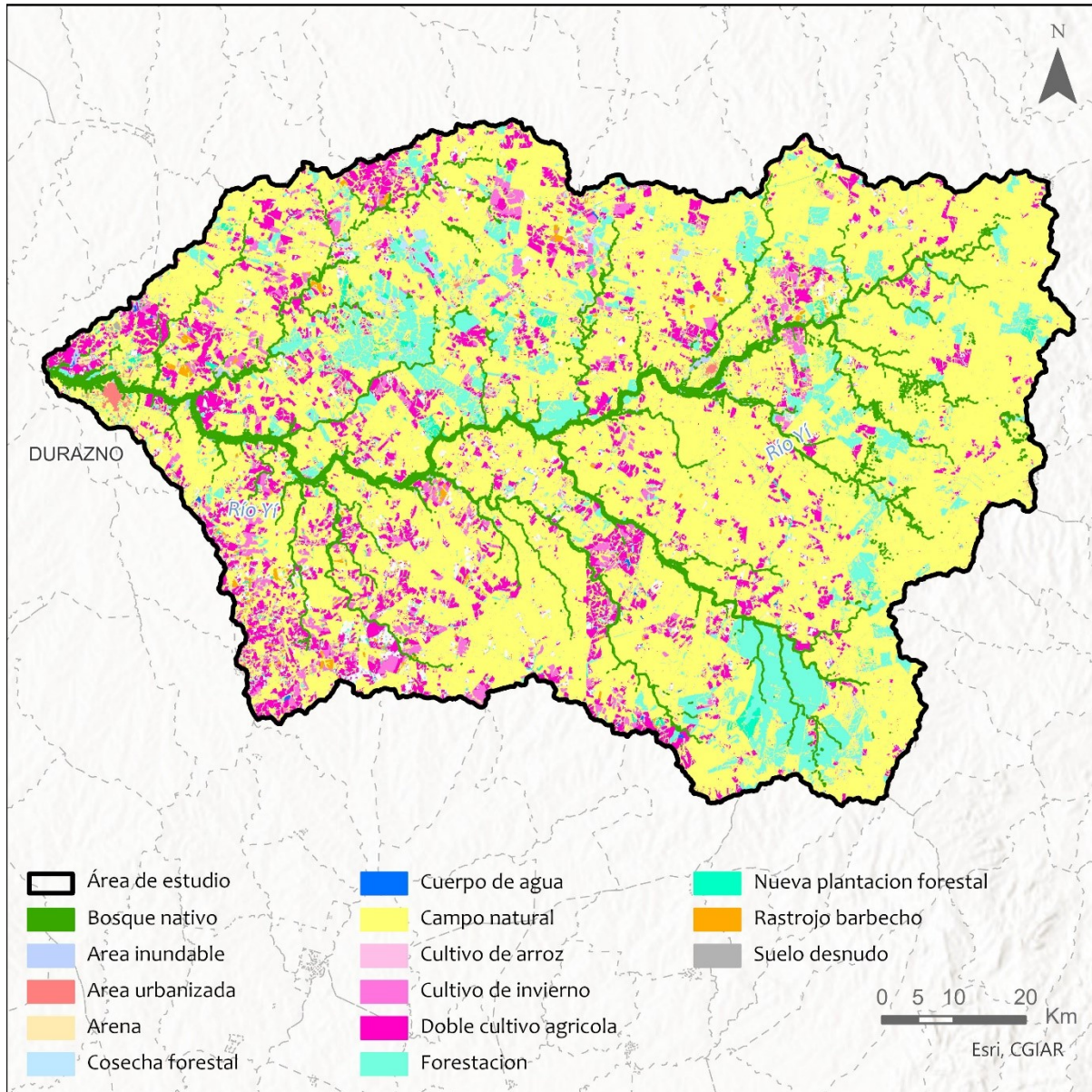


Figura 4. Mapa de usos y coberturas del suelo para la cuenca drenante de Durazno. Fuente: MGAP y OAN, 2021.

4.3. Información climática y escenarios de cambio climático

4.3.1. Clima actual

Para análisis planteado se cuenta con información diaria de precipitación en 15 estaciones pluviométricas en la cuenca del río Yí (Tabla 1), y de temperatura media, máxima y mínima, proporcionada por INUMET, en la estación meteorológica de Durazno (EM Durazno) en el periodo comprendido entre 1994 y 2024 (Figura 5 y Figura 6).

Estación	Latitud	Longitud
Capilla del Sauce	33° 27' 35.57333520" S	055° 37' 48.10401480" W
Cerro Chato	33° 05' 57.93828000" S	055° 08' 33.14474160" W
Chamanga	33° 42' 44.06970240" S	056° 40' 36.95993760" W
Durazno-Aeropuerto	33° 21' 01.54823760" S	056° 29' 50.33330520" W
Goñi	33° 31' 12.55900800" S	056° 24' 40.83474960" W
La Aviación	33° 28' 48.24233400" S	056° 53' 24.16789680" W
Los Tapes	33° 11' 09.25484280" S	056° 48' 32.33507760" W
Mansavillagra	33° 37' 04.49614200" S	055° 28' 16.18001400" W
Nico Perez	33° 28' 50.81289960" S	055° 09' 12.30048720" W
Polanco del Yí	33° 28' 48.07726680" S	056° 09' 21.58776720" W
Rosell y Rius	33° 11' 04.46778600" S	055° 41' 49.42329000" W
Sarandí del Yí	33° 19' 59.54382480" S	055° 37' 16.84918200" W
Sarandí Grande	33° 43' 20.82734760" S	056° 19' 40.04054040" W
Santa Bernardina	33° 21' 32.41591920" S	056° 30' 50.36344920" W
Trinidad	33° 29' 10.78324080" S	056° 53' 24.97610040" W

Tabla 1. Características de las subcuencas consideradas. Fuente: IHCantabria, 2024.

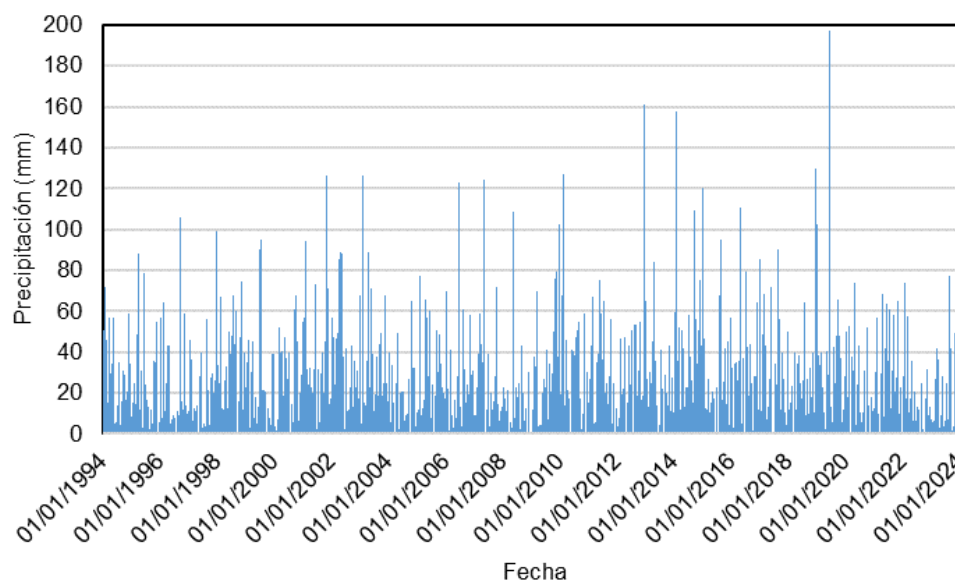


Figura 5. Precipitación diaria en la estación Durazno-Aeropuerto (1994-2024). Fuente: INUMET, 2024.

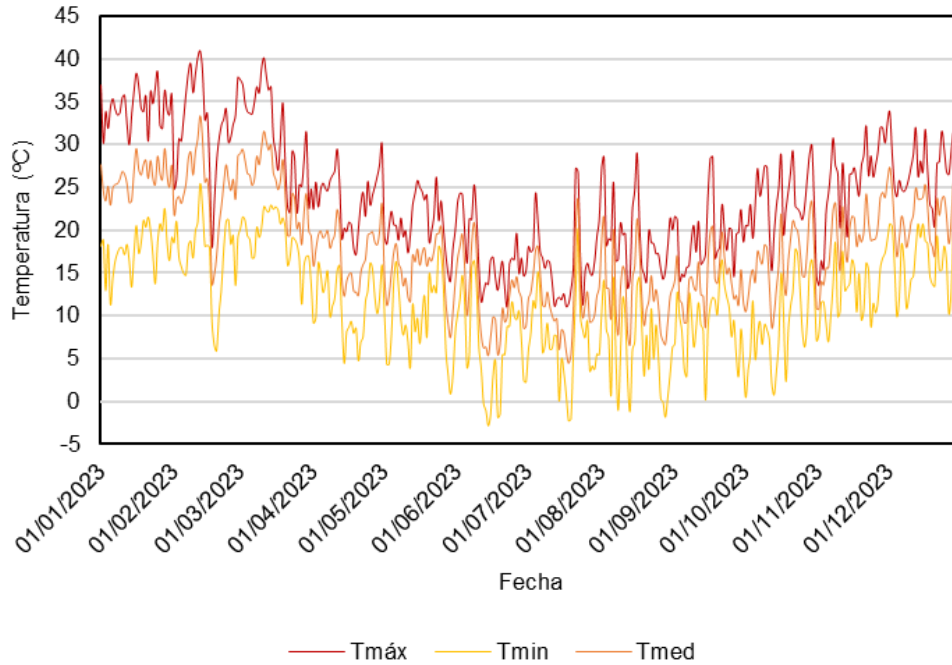


Figura 6. Temperatura media, máxima y mínima diaria en la estación Durazno-Aeropuerto en el 2023. Fuente: INUMET, 2024.

4.3.2. Proyecciones climáticas

En el presente estudio se analizan, además del clima actual, dos escenarios climáticos futuros en el horizonte 2030, en el que se considera la influencia del cambio climático en dos trayectorias socioeconómicas y de emisiones distintas: SSP2-4.5 y SSP5-8.5.

La obtención de las variaciones en la precipitación y temperaturas en los escenarios con cambio climático se realiza con base en los resultados recogidos en el informe Proyecciones climáticas con reducción de escala sobre Uruguay (Barreiro, et al., 2020) del Plan Nacional de Adaptación Costera de Uruguay (NAP Costas) facilitado por la Dirección Nacional de Cambio Climático (DINACC). A partir de este informe se ha generado la siguiente tabla (Tabla 2) que presenta los cambios en la precipitación y temperatura medias para cada estación (DEF, MAM, JJA y SON) en el entorno de la ciudad de Durazno.

Variable	Estación	Horizonte	Variación	
			SSP2-4.5	SSP5-8.5
Precipitación (mm)	DEF	2030 (2020-2044)	+10	0
	MAM		+40	+30
	JJA		0	+10
	SON		+10	0
	Anual		+60	+40
Temperatura (°C)	DEF	2030 (2020-2044)	+0.8	+1.1
	MAM		+1.0	+1.2
	JJA		+0.7	+1.0
	SON		+0.9	+1.1
	Anual		+0.9	+1.1

Tabla 2. Cambios en la precipitación y temperatura para el horizonte 2030. Fuente: IHCantabria, 2024, con información de (Barreiro, et al., 2020).

Al no disponer de las series temporales de las variables climáticas proyectadas generadas para el estudio, los cambios en la precipitación y temperaturas medias se han obtenido de las figuras del informe del NAP Costas (p. ej. Figura 7 y Figura 8), tomando el valor en el que se ubican aproximadamente la cuenca vertientes al área de estudio.

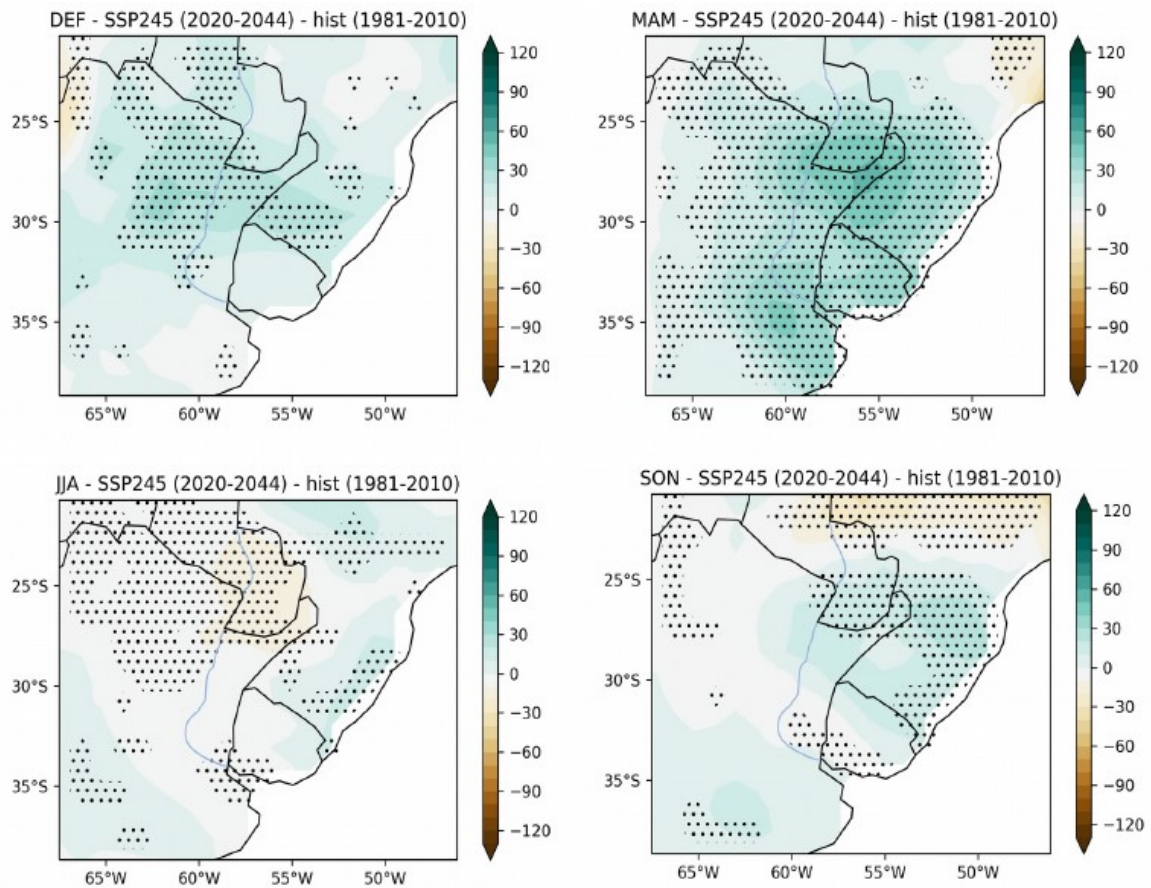


Figura 7. Cambios proyectados en las precipitaciones para el horizonte cercano bajo escenario SSP245. Promedio de los 10 modelos corregidos. Fuente: (Barreiro, et al., 2020).

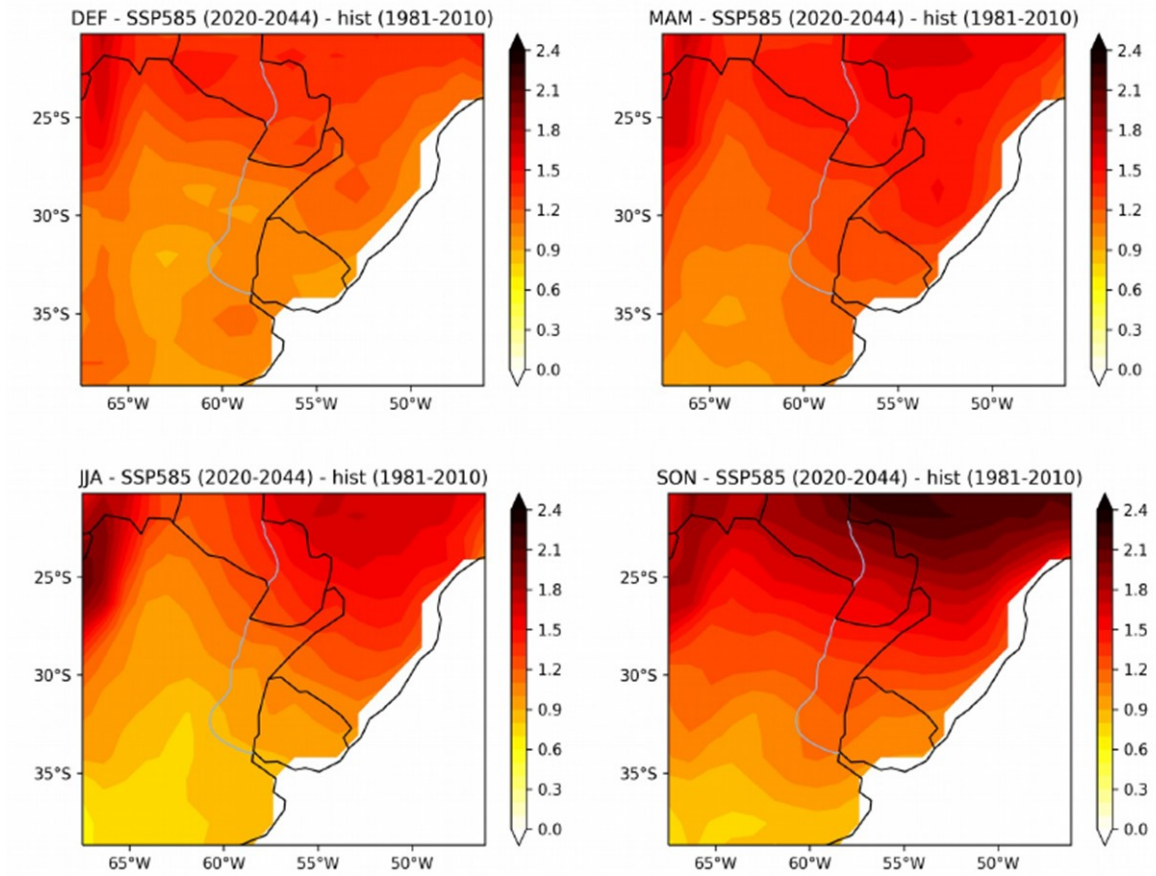


Figura 8. Cambios proyectados en la temperatura para el horizonte cercano bajo escenario SSP585. Promedio de los 10 modelos corregidos. Fuente: (Barreiro, et al., 2020).

5. EVALUACIÓN DE LOS ECOSISTEMAS CLAVE PARA LA PROVISIÓN DE SERVICIOS A LA CIUDAD

Los servicios ecosistémicos (SE) son descritos como las ventajas o beneficios que recibe la sociedad de forma directa o indirecta de la naturaleza y de sus ecosistemas (Hein, et al., 2006). Además de ser esenciales para la vida en la Tierra (Daily, et al., 1997), son un indicador preciso de la salud de los ecosistemas, por lo que entender su respuesta ante las alteraciones del medio es necesario para evaluar y equilibrar las necesidades cortoplacistas con los objetivos de sostenibilidad a largo plazo (Sekercioglu, 2014). Ecosistemas tales como las tierras agrícolas, los bosques, los pastizales y los entornos acuáticos, son responsables del suministro de diversos SE, que se han clasificados en los siguientes tipos (De Groot, et al., 2002):

- Los servicios de regulación, que son aquellos que derivan de las funciones clave de los ecosistemas y que ayudan a reducir riesgos ambientales de muy diversa naturaleza (por ejemplo, la regulación del clima y del ciclo del agua, el control de la erosión del suelo, la polinización, etc.).
- Los servicios de aprovisionamiento son aquellos referidos a la cantidad de bienes o materias primas ofrecidas por un ecosistema (como la madera, agua, pasto para ganado, etc.) y otros productos tangibles obtenidos de la naturaleza
- Los servicios de soporte son los procesos necesarios para la producción de todos los otros servicios del ecosistema y sin ellos la provisión no sería posible. Algunos son la formación y evolución de los suelos, la actividad fotosintética, y la producción primaria neta.
- Los servicios culturales están relacionados con el tiempo libre, el ocio o aspectos más generales de la cultura o el valor intangible de los ecosistemas y sus componentes. Estos servicios incluyen actividades recreativas, turismo, espiritualidad y expresiones artísticas inspiradas por la naturaleza.

De forma general, la necesidad de cuantificar y exponer el valor del medio ambiente a la sociedad ha llevado a la práctica de cotejar los datos de la cubierta terrestre con los SE, haciendo que la representación sea un simple recurso mapa con un valor determinado por unidad de área. Sin embargo, este enfoque pasa por alto la complejidad de los SE y la visión del conjunto como un sistema socio-ecológico que resulta de la interacción dinámica de múltiples componentes ambientales y humanos (por ejemplo, un bosque y un río o un agricultor y una población). Bajo esta perspectiva, las dinámicas espaciotemporales de los SE son el resultado del intercambio de valores dentro de una red de agentes ecológicos y antropogénicos, y cualquier ejercicio de valoración debe tener en cuenta que el rendimiento depende de la demanda y de la existencia de grupos sociales en el extremo receptor, los que denominamos beneficiarios.

Para garantizar la continuidad y provisión de estos servicios, es fundamental incorporar conceptos de infraestructura verde y azul (BGIN por sus siglas en inglés) en la planificación urbana y territorial. Estas redes, basadas en espacios verdes y naturales interconectados con cuerpos de agua como ríos y lagos, juegan un papel fundamental en la conservación de la biodiversidad e incrementan la resiliencia de las ciudades ante el cambio climático (Ghofrani, et al., 2017). La integración efectiva de ambas estrategias contribuye a promover sociedades más sostenibles y resilientes, donde la naturaleza y la infraestructura humana coexisten de manera armoniosa para el beneficio de las generaciones



presentes y futuras. Una BGIN puede entenderse como un instrumento de planificación del paisaje cuyo objetivo es optimizar la disposición espacial de diferentes componentes de los ecosistemas y prácticas de gestión/explotaciones relacionadas en un territorio determinado para mejorar la conservación de la naturaleza y la biodiversidad y maximizar simultáneamente la provisión de SE. La implementación de las BGINs estará supeditada a las necesidades y potencialidades de cada territorio y su diseño dependerá de las condiciones iniciales y futuras relacionadas con el estado de la biodiversidad, los SE objetivo y las demandas de los diferentes grupos de interés (Pérez-Silos, et al., 2021)

Los componentes de una BGIN están fundamentados en las propiedades de los ecosistemas existentes en el territorio para responder a una gama variable de demandas sociales relacionadas con los bienes y servicios proporcionados por esos ecosistemas. Para ello, las BGINs se basan en la aplicación de intervenciones de diferente tipología (conservación y restauración), a diferentes escalas espaciales, sobre una gran variedad de elementos naturales del paisaje (bosques, pastizales, humedales, llanuras de inundación, etc.). Cada una de estas intervenciones sobre las que empleamos las propiedades de los ecosistemas para generar o conservar ciertos servicios son las Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN) (Chausson, et al., 2020).

De esta forma, las medidas de SbN pueden ser tanto entidades físicas del territorio (diferentes tipos de hábitats y formaciones vegetales como bosques maduros de ladera, bosques de ribera, llanuras de inundación, etc.), como componentes relacionados con la manera en la que se gestiona y maneja estas entidades y otros elementos de la cubierta terrestre mediante prácticas y estrategias de manejo (por ejemplo, buenas prácticas de gestión agrícola ganadera, delimitación de áreas para la renaturalización, gestión de zonas con combustible de vegetación de alto riesgo de incendio, etc.). Además, con independencia de su naturaleza, las SbN pueden estar vinculadas a:

- Elementos en buen estado de conservación que responden a funciones importantes dentro del territorio y sobre los que los esfuerzos deben dirigirse a seguir conservándolos de un modo adecuado (SbN de conservación).
- Elementos que actualmente no funcionan de manera óptima por la degradación de su estado pero que presentan un potencial importante para la generación de SE de interés en el territorio. En estos ecosistemas se aplicarían SbN destinadas a la recuperación de su funcionalidad, bien mediante la restauración o creación de hábitat, bien mediante la aplicación de ciertos criterios de manejo que permitan compatibilizar un uso actual más intensivo con la capacidad de generación de los SE requeridos (SbN de restauración).

5.1. Selección de los servicios ecosistémicos y de los ecosistemas que los proporcionan

En este contexto, los SE de regulación conforman el eje principal de análisis espacial sobre el que se vertebra la propuesta de BGIN para las cuencas vertientes a la ciudad de Durazno. La degradación en la provisión de estos SE conduce a perjuicios significativos en el bienestar humano, motivo por el que el análisis de las dinámicas espaciotemporales de estos SE toma gran importancia para apoyar la toma de decisiones en cuanto al desarrollo e implementación de políticas ambientales. Teniendo en cuenta estas indicaciones, el funcionamiento del ecosistema en la cuenca objeto de estudio, así como la información disponible, se han definido los siguientes SE para construir los componentes de la BGIN:

5.1.1. Regulación hidrológica frente inundaciones

El SE de regulación hidrológica se refiere a la capacidad de los ecosistemas terrestres de regular la proporción de las precipitaciones que pueden ser interceptadas e infiltradas en capas superficiales y subterráneas de las cubiertas naturales, reduciendo el flujo de agua que se generaría como escorrentía superficial en ausencia de tales coberturas. En este sentido, la capacidad de almacenamiento y atenuación de las llanuras de inundación y las coberturas vegetales naturales presentes en la cuenca hidrográfica son factores determinantes en la regulación frente inundaciones. Por un lado, el desbordamiento del río contribuye a disipar aguas abajo parte de la energía del caudal de avenida, moderando los caudales máximos y retardando el pico de caudal, y el bosque nativo presente en las llanuras desempeña un papel determinante en este fenómeno. Por su parte, la cobertura vegetal de campo natural, con un elevado número de estratos verticales, con horizontes superficiales más desarrollados y con una mayor capacidad de infiltración por raíces y la acción de macroinvertebrados, actúan como elementos de tapón del agua de lluvia, reduciendo la escorrentía.

5.1.2. Regulación hidrológica frente sequía

El SE de regulación de sequías está relacionado con la respuesta hidrológica de la cuenca, vinculado al potencial de almacenar agua y contribuir a su disponibilidad a lo largo del tiempo. En este sentido, cobra especial importancia la capacidad de almacenamiento de las llanuras de inundación y las coberturas vegetales presentes en la cuenca hidrográfica. Por un lado, el bosque nativo presente en las áreas inundables aumenta la capacidad de almacenamiento de agua en las llanuras de inundación a través de sus raíces y la capa de materia orgánica que generan, lo que disminuye la velocidad de escorrentía superficial y permite que el agua se infiltre lentamente en el suelo, recargando los acuíferos subterráneos. Por su parte, la cobertura vegetal de campo natural cobra especial importancia en las zonas altas de la cuenca con relación al potencial de almacenamiento de agua subterránea, que se asocia con áreas del paisaje propensas a la infiltración con base a los factores abióticos relacionados principalmente con esta funcionalidad, es decir, la topografía, el tipo de suelo y la cubierta vegetal.

5.2. Evaluación de los ecosistemas seleccionados

5.2.1. Localización espacial de los ecosistemas definidos

Mapas de usos y ocupación del suelo (LULC)

Para el presente proyecto, se parte de la información oficial de LULC provista por el Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP) que incluye la categoría de “Bosque nativo”, donde se recogen todas las asociaciones vegetales en las que predomina el componente arbóreo y que mantienen sus características naturales y del Observatorio Ambiental Nacional (OAN) del año 2021 referente al “Campo natural” que hace referencia a la vegetación natural herbácea, considerando tanto pastizales como pastizales inundables (Figura 9). Se prioriza la información proveniente del MGAP de bosque nativo ya que es más completa, identificando parches de bosque no presentes en la información proveniente del OAN.

La elección de estas coberturas se debe a su importancia ecosistémica, siendo los vitales para la conservación de la biodiversidad, regulación hídrica y protección del suelo. En concreto, los campos naturales son fundamentales en la reducción de escorrentía superficial y en los procesos de infiltración de agua al subsuelo. Ambos ecosistemas desempeñan un papel crucial en el mantenimiento del equilibrio ecológico y la sostenibilidad ambiental en la cuenca drenante de la ciudad de Durazno.

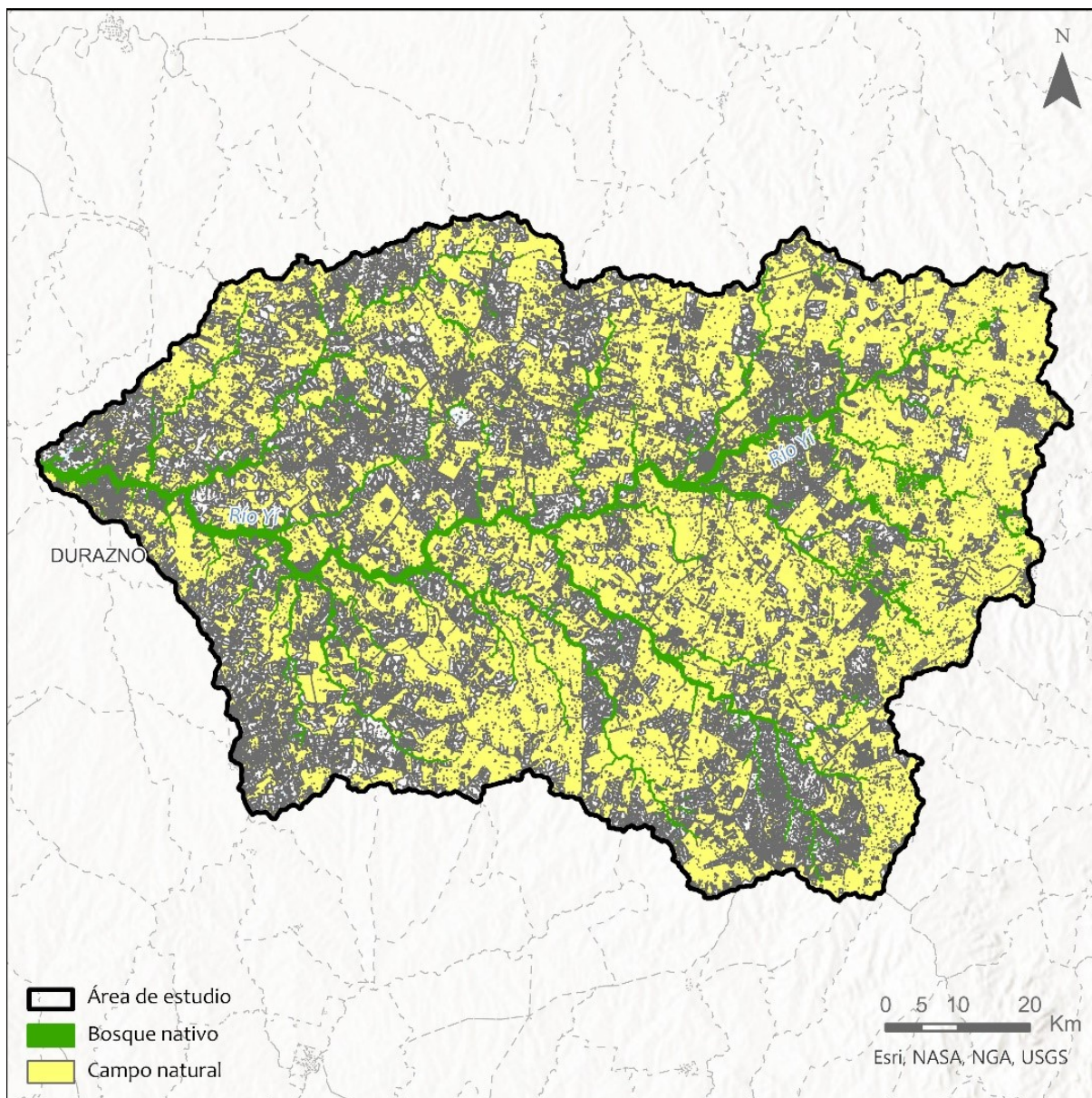


Figura 9. Mapa de usos y coberturas del suelo (campo natural y bosque nativo) para la cuenca drenante de Durazno. Fuente: MGAP y OAN, 2021.

Unidades funcionales

Desde un punto de vista metodológico, los SE suelen prestarse dentro de unidades de paisaje relacionadas con los procesos del ecosistema, como las cuencas hidrográficas, los hábitats específicos, o unidades funcionales (UF). El marco propuesto se considera cómo UF aquellos elementos morfoestructurales que dividen el medio físico de forma homogénea a nivel funcional. Las UF son dependientes del proceso que se esté analizando y deben cumplir una doble tarea: (i) relacionar el proceso funcional de análisis con unidades homogéneas en el territorio para una determinada función o proceso y (ii) permitir una identificación priorizada de las SbN a través de acciones de conservación o restauración. Según el marco propuesto, se definen las laderas de drenaje y las llanuras de inundación. Ambas constituyen formas de clasificar el territorio con capacidad para incorporar las interacciones biótico-abióticas a la escala funcional requerida, así como la conectividad necesaria entre los diferentes ecosistemas. Desde un enfoque conceptual, esta división espacial facilita la identificación del flujo de SE desde la función biológica, mientras que, en términos de modelización,

las UF posibilitan la simulación de las interrelaciones entre los diversos elementos biológicos y/o morfológicos del paisaje, permitiendo la incorporación de los procesos modelados a nivel de píxel en una unidad espacial con significado funcional completo.

- Laderas de drenaje: su cálculo se basa en la acumulación de flujo y se compone de todos los píxeles situados aguas arriba de cada segmento de canal definido. Se establecen con una superficie mínima de 5 hectáreas. De esta manera se establecen un total de 235 laderas de drenaje para toda el área de estudio.
- Llanura de inundación: las celdas del DEM se clasifican según la elevación sobre el segmento del canal más cercano. La diferencia de elevación entre cada celda del fondo del valle y la ubicación del canal asociado se normaliza por la profundidad de la orilla o por la elevación absoluta sobre el canal. Este procedimiento se repite para cada segmento de canal.

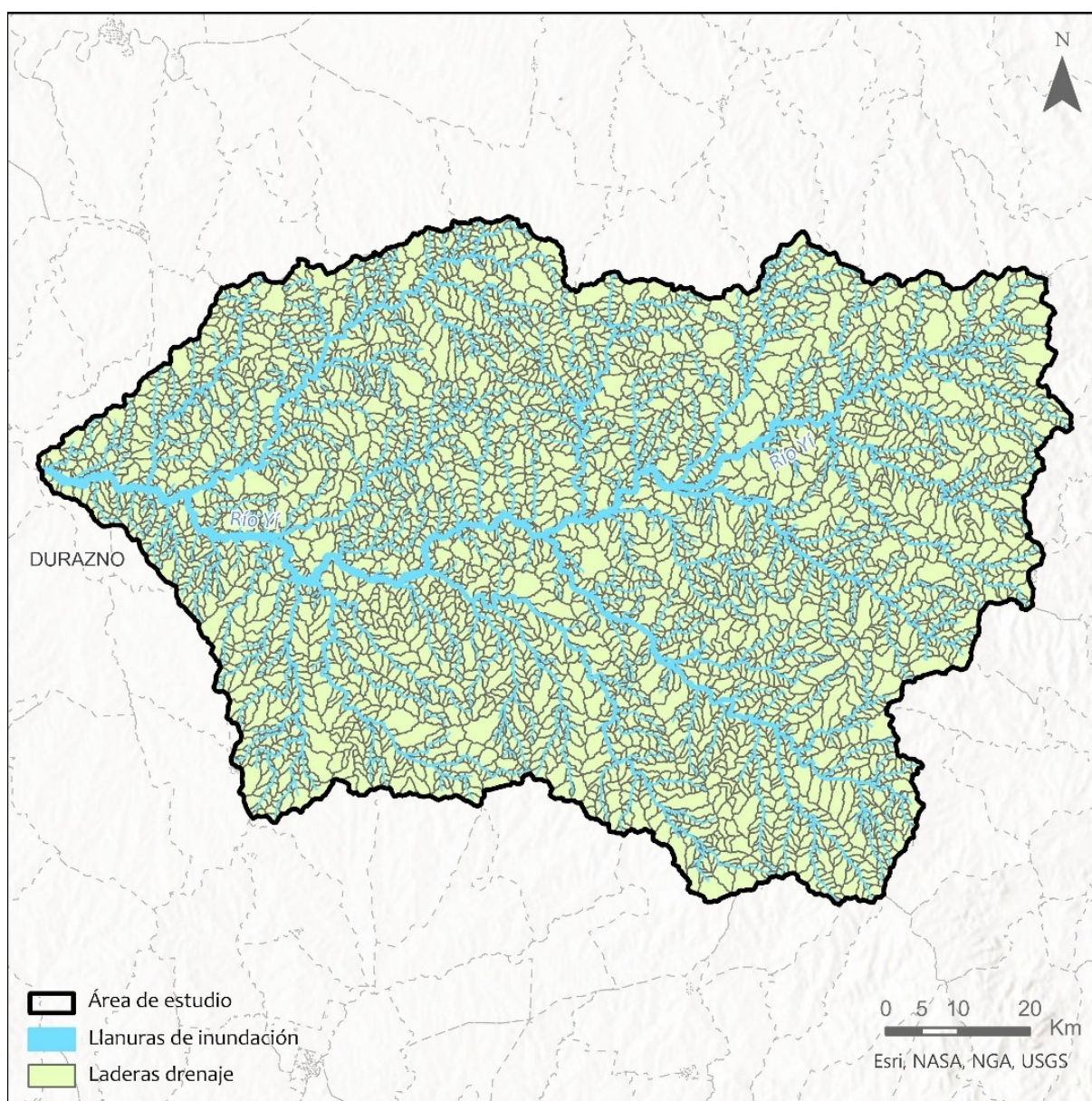


Figura 10. Mapa de unidades funcionales (laderas de drenaje y llanuras de inundación) para la cuenca drenante de Durazno. Fuente: IHCantabria, 2024.



5.2.2. Evaluación de los ecosistemas

Aptitud hidroclimática de los ecosistemas (variables hidroclimáticas y geomorfológicas)

El cálculo de la aptitud del bosque nativo y el campo natural se hará mediante los dos procesos que se definen a continuación. La elección de estos sistemas para el análisis ecológico y territorial se fundamenta en su importancia ecosistémica, ya que ambos desempeñan un papel vital en la conservación de la biodiversidad, la regulación hídrica y la protección del suelo. Específicamente, los campos naturales tienen un papel fundamental en la reducción de la escorrentía superficial y en los procesos de infiltración de agua al subsuelo debido a sus características naturales y su influencia en los ciclos hidrológicos. Por otro lado, los bosques nativos contribuyen significativamente a la conservación de la biodiversidad, actuando como reservorios de especies vegetales y animales autóctonas, y desempeñan un papel crucial en la regulación hídrica y la protección del suelo. Ambos son esenciales para el mantenimiento del equilibrio ecológico y la sostenibilidad ambiental en la cuenca drenante de la ciudad de Durazno, ya que influyen en la calidad y cantidad de los recursos hídricos, en la prevención de la erosión del suelo, y en la preservación de la diversidad biológica en la región. Por tanto, su relevancia para la conservación del medio ambiente y en su influencia en los procesos naturales que impactan directamente en la cuenca y en el entorno urbano de la ciudad de Durazno justifican su elección.

- Técnicas de Aprendizaje Automático para el modelado de la distribución de especies: algoritmo de bosque aleatorio.

Las técnicas de Aprendizaje Automático (ML por sus siglas en inglés) se incluyen en una rama del campo de la Inteligencia Artificial (AI por sus siglas en inglés) que a través de diferentes algoritmos permite a las máquinas realizar tareas específicas de forma autónoma, es decir, sin necesidad de programarlos para identificar patrones de datos masivos y elaborar predicciones (Cutler, et al., 2007). Existen tres categorías principales de algoritmos de ML: de aprendizaje supervisado, no supervisado y de refuerzo (Espinosa-Zuñiga, 2020).

Los algoritmos de Bosque Aleatorio (RF por sus siglas en inglés), son unas técnicas de ML del tipo supervisadas de uso generalizado debido a su método de partición recursivo, que permiten aumentar el rendimiento del modelo final con una mínima pérdida de interpretabilidad (Sinha, et al., 2019). Se trata de un conjunto o ensamble de Árboles de Decisión combinados mediante técnicas de bagging (Figura 11) en las que cada árbol se entrena con diferentes muestras de datos para la misma consulta, logrando así que ningún árbol de decisión vea todos los datos de entrenamiento, sino que cada uno ve una porción. Por último, las predicciones de cada árbol se combinan para obtener una predicción en conjunto, al combinar los resultados y promediarlo, unos errores compensan otro y se obtiene una predicción que generaliza con un rendimiento mejor (Guisan & Thuilleer, 2005).

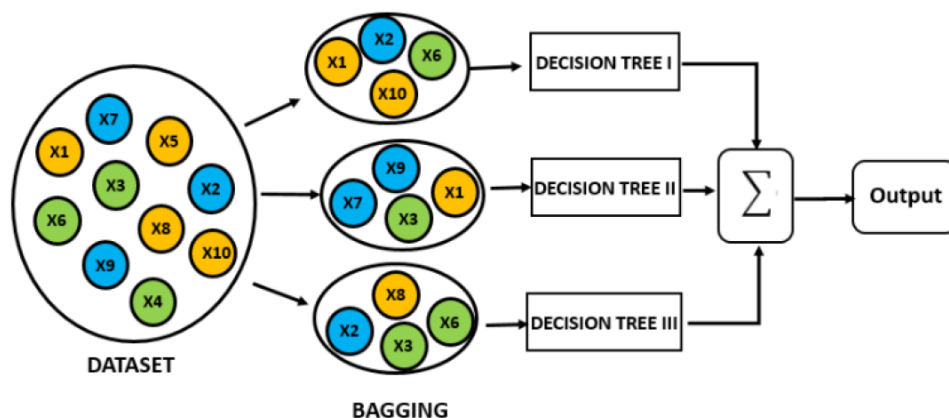


Figura 11: Esquema resumen de algoritmo RF y proceso *bagging*. Fuente: Aplicación de algoritmos Random Forest (Espinosa-Zuñiga, 2020).

Esta técnica es especialmente útil en el modelado de distribución de especies, donde se busca predecir la distribución geográfica en función de variables ambientales, principalmente abióticas, pero con notable relevancia también de las variables bióticas. De forma general, este modelo tiene las siguientes fases de desarrollo: i) recopilación de datos relevantes sobre el hábitat y los puntos de presencia de la especie a modelar, los cuales se preprocesarán para estar en un formato estándar y ser geográficamente coherentes, resolviendo problemas de multicolinealidad y autocorrelación espacial; ii) construcción del modelo, que puede incluir dos algoritmos diferentes (Árbol de Clasificación y Árbol de Regresión) dependiendo de la naturaleza de la predicción requerida; iii) prueba y validación del modelo utilizando parámetros de evaluación estandarizados con el fin de asegurar su fiabilidad y precisión; iv) creación de mapas predictivos que pueden utilizarse para estimar y comprender la distribución de las especies, lo que resulta de gran utilidad en la planificación de la conservación y el manejo de los ecosistemas.

- Ejecución del modelo

Para el presente proyecto, se plantea la ejecución de un modelo RF que utiliza como variables independientes la presencia / ausencia del ecosistema según la cobertura de usos de suelo actual y como variables dependientes las climáticas y geomorfológicas relevantes según bibliografía especializada (para más información consultar (Ward, et al., 2016), (Cavalli, et al., 2013), (Beleño, et al., 2022)). El algoritmo utilizado se compone de 300 árboles de decisión, con tantos nodos como determine el algoritmo de forma automática que son necesarios y que proporcionan 1 hoja de decisión (capa en formato ráster) para cada modelización (en situación actual y en escenarios futuros SSP245 y SSP585).

El clima es uno de los factores más influyentes en los patrones biogeográficos de las especies en el ambiente. En la actualidad, el cambio climático representa una de las principales tensiones ambientales que podrían impactar a las especies naturales, de manera directa mediante efectos en la productividad o estrés hídrico, o de forma indirecta a través de interacciones con distintas perturbaciones como incendios o plagas (Arenas-Castro, et al., 2018). Siguiendo los estudios de (Ward, et al., 2016) y la información disponible, se han incluido en el modelado las variables de temperatura, precipitación y evapotranspiración potencial medias mensuales para la situación actual y los diferentes escenarios definidos. La información climática debe complementarse con datos relevantes de las características de los hábitats que determinarán la presencia y/o abundancia de las especies a modelizar. Así, la información topográfica aporta una serie de atributos fundamentales para las especies forestales ya



que, como está bien documentado, la biomasa o la productividad (así como otras características y propiedades de las especies naturales) se ven fuertemente afectadas por la orientación del terreno, la radiación incidente, la pendiente o la elevación. En este punto, se incluye el Modelo Digital de Elevaciones (MDT) descargado del IDEUy y el ráster de pendientes derivada del mismo.

Los modelos de distribución de especies requieren datos reales de ocurrencia de las especies (por ejemplo, coordenadas geográficas), bien para identificar y calibrar su relación con variables ambientales (modelos correlacionales) o validar los resultados de dichos modelos. Para obtener los puntos de presencia de los ecosistemas objeto de estudio se ha desarrollado un muestreo estratificado mediante el uso de software GIS partiendo de la información de LULC proporcionado por MGAP. En primer lugar, se establece un buffer de exclusión de 200 metros de distancia alrededor de cada cobertura para evitar tener puntos en zonas de transición entre coberturas de suelo y se cubre toda el área con un mallado cuadrangular de 1000 metros, asignando un punto de forma aleatoria en cada centroide. De esta forma, y matizándolos con el apoyo de ortografía aérea de máxima actualidad, se logra que sean puntos representativos de áreas bien identificadas, homogéneas y representativas de cada cobertura definida en la leyenda, evitando el ruido de escena. Se pone especial énfasis a su selección con la mayor variabilidad posible de ubicación, pendiente y orientación, y que eviten el efecto tipo frontera, siendo lo más puras posible y evitando la mezcla con otras categorías (Zhong, et al., 2019), evitando así el efecto de autocorrelación espacial y pseudoreplicación en imágenes de media resolución sobre espacios heterogéneos (Álvarez-Martínez, et al., 2018). De esta manera, se obtiene un total de 5,784 puntos de presencia para la categoría de campo natural y 1,859 de presencia para la de bosque nativo. Una vez definidos los puntos de presencia para cada categoría se proceden a la ejecución del modelo RF en la que se permite que sea el propio algoritmo quien defina las ausencias de forma automática. En primer lugar, se lanzará el 60% de los puntos contra las variables predictoras ya definidas en la situación actual, obteniendo así las zonas de idoneidad para la presencia de cada cobertura según las variables actuales (Figura 12 y Figura 15). A continuación, se repite el modelo, pero incluyendo las variables en los escenarios futuro SSP 245 y SSP585, así, se obtienen las zonas de idoneidad según las variables futuras (Figura 13 y Figura 14 para campo natural y Figura 16 y Figura 17 para bosque nativo). Estos resultados se proporcionan en formato ráster con valores normalizados de 0 a 1, siendo 0 las zonas de menor idoneidad y 1 las de mayor valor.

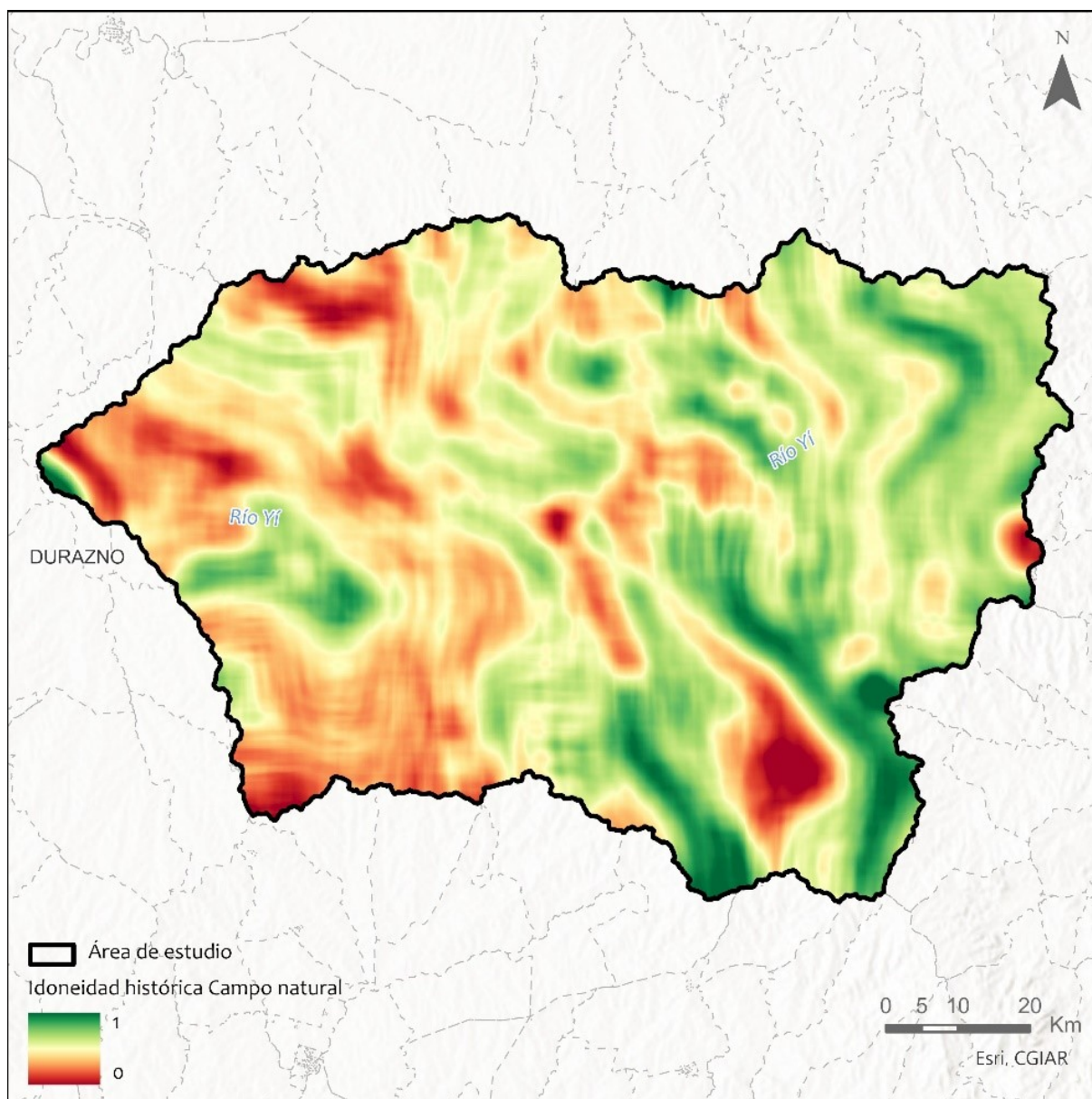


Figura 12. Mapa de idoneidad del campo natural para la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.

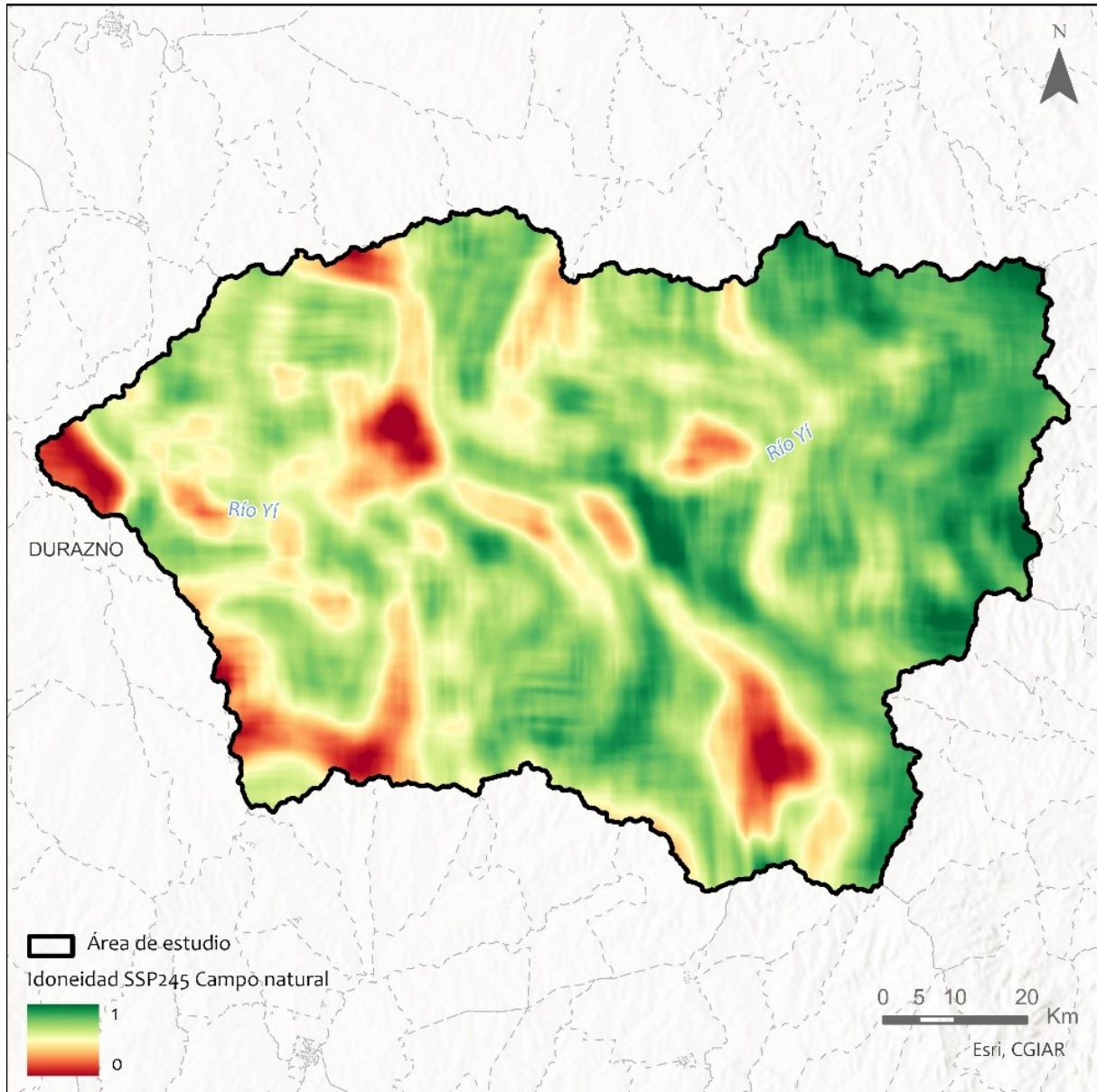


Figura 13. Mapa de idoneidad del campo natural para el escenario futuro SSP245. Fuente: IHCantabria, 2024.

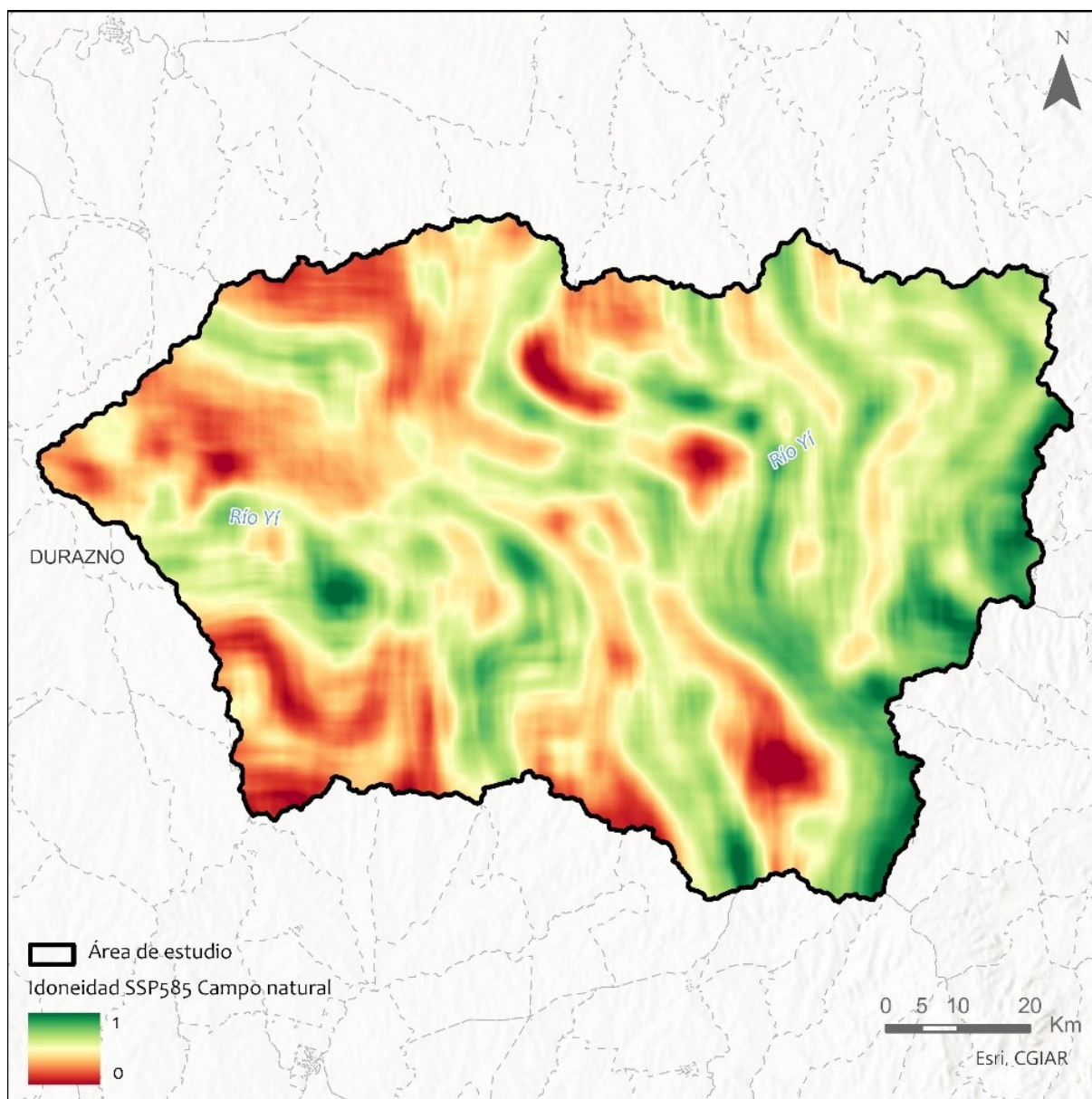


Figura 14. Mapa de idoneidad del campo natural para el escenario futuro SSP585 Fuente: IHCantabria, 2024.

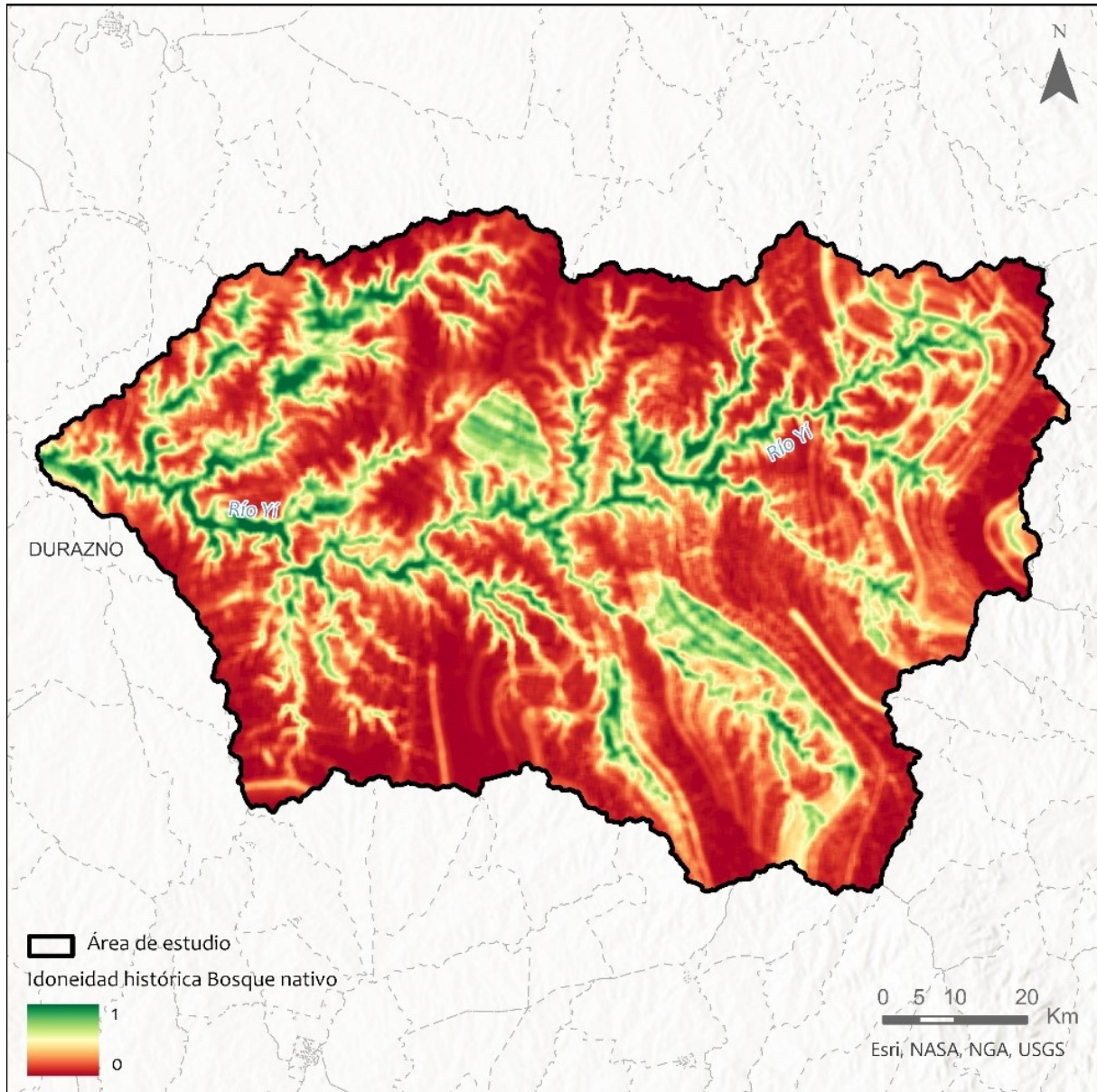


Figura 15. Mapa de idoneidad del bosque nativo para la situación actual Fuente: IHCantabria, 2024.

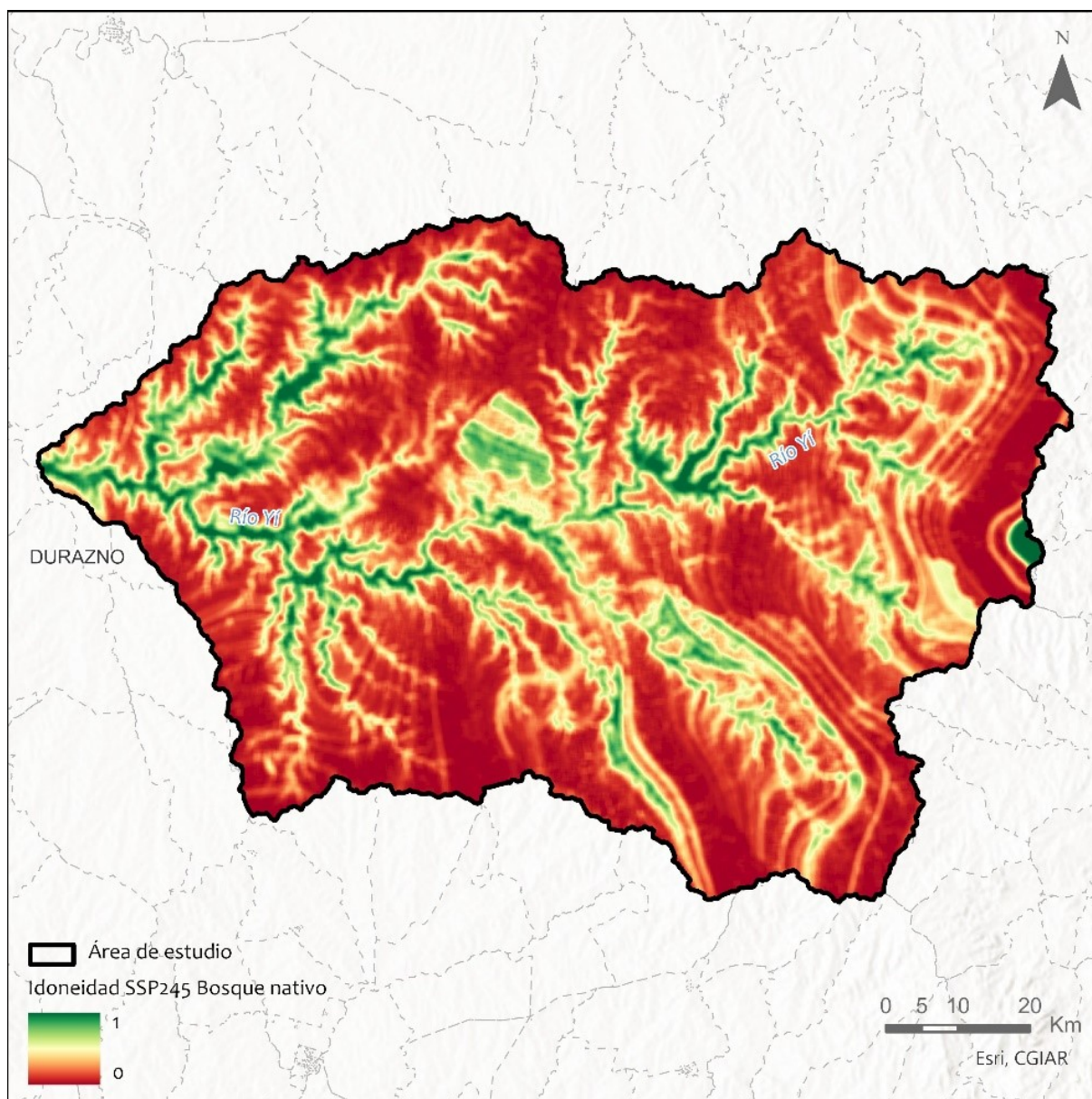


Figura 16. Mapa de idoneidad del bosque nativo para el escenario futuro SSP245 Fuente: IHCantabria, 2024.

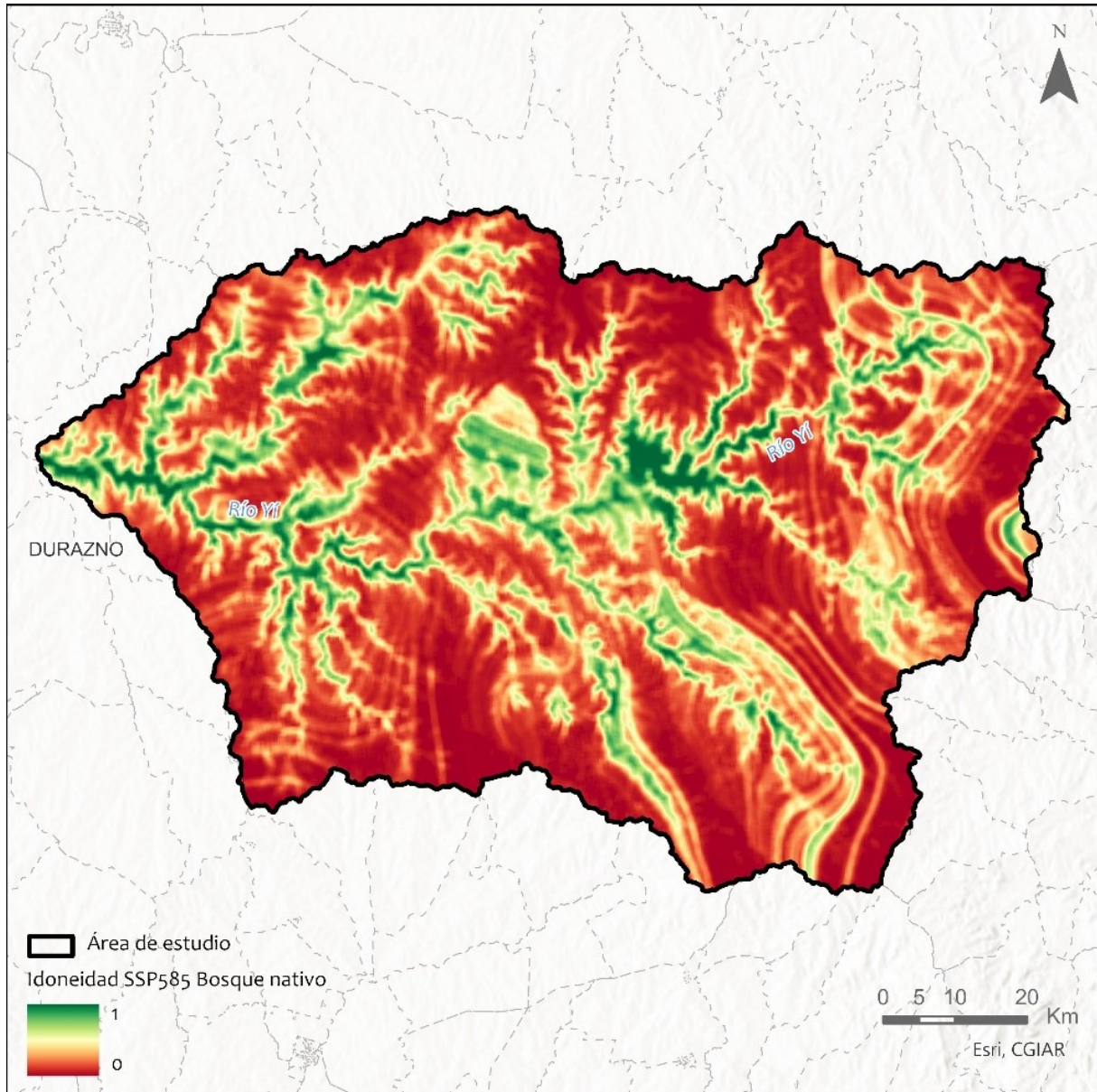


Figura 17. Mapa de idoneidad del bosque nativo para el escenario futo SSP585. Fuente: IHCantabria, 2024.

- Datos bióticos y evaluación de tendencia.

El siguiente proceso de la metodología consiste en la obtención de una serie temporal de datos espectrales desde 1994 (coincidente con los datos climáticos disponibles) hasta la actualidad mediante el índice de diferencia normalizada de vegetación (NDVI por sus siglas en inglés) medio anual que nos permitirá evaluar la tendencia a futuro de los ecosistemas definidos en el marco de la información biótica (Guo, et al., 2020). Este índice es el resultado de la combinación de las bandas rojas e infrarrojas y es un indicador lineal de la radiación fotosintética activa absorbida, proporcionando así una buena estimación de la fotosíntesis integrada a nivel de píxel (Parruelo, et al., 1997).. Este tipo de análisis es fundamental para evaluar el estado de los ecosistemas ya que se trata de un índice sensible y confiable de la salud de la vegetación, ya que mide la cantidad y la calidad de la vegetación verde (Figura 18 y Figura 19). En pastizales y bosques, el NDVI puede ayudar a identificar áreas con vegetación vigorosa y saludable, así como áreas con estrés hídrico o daños ambientales (Hernández-Romero, et al., 2022), además, permiten detectar cambios en la cobertura vegetal a lo largo del tiempo (Gaitan, et al., 2021)

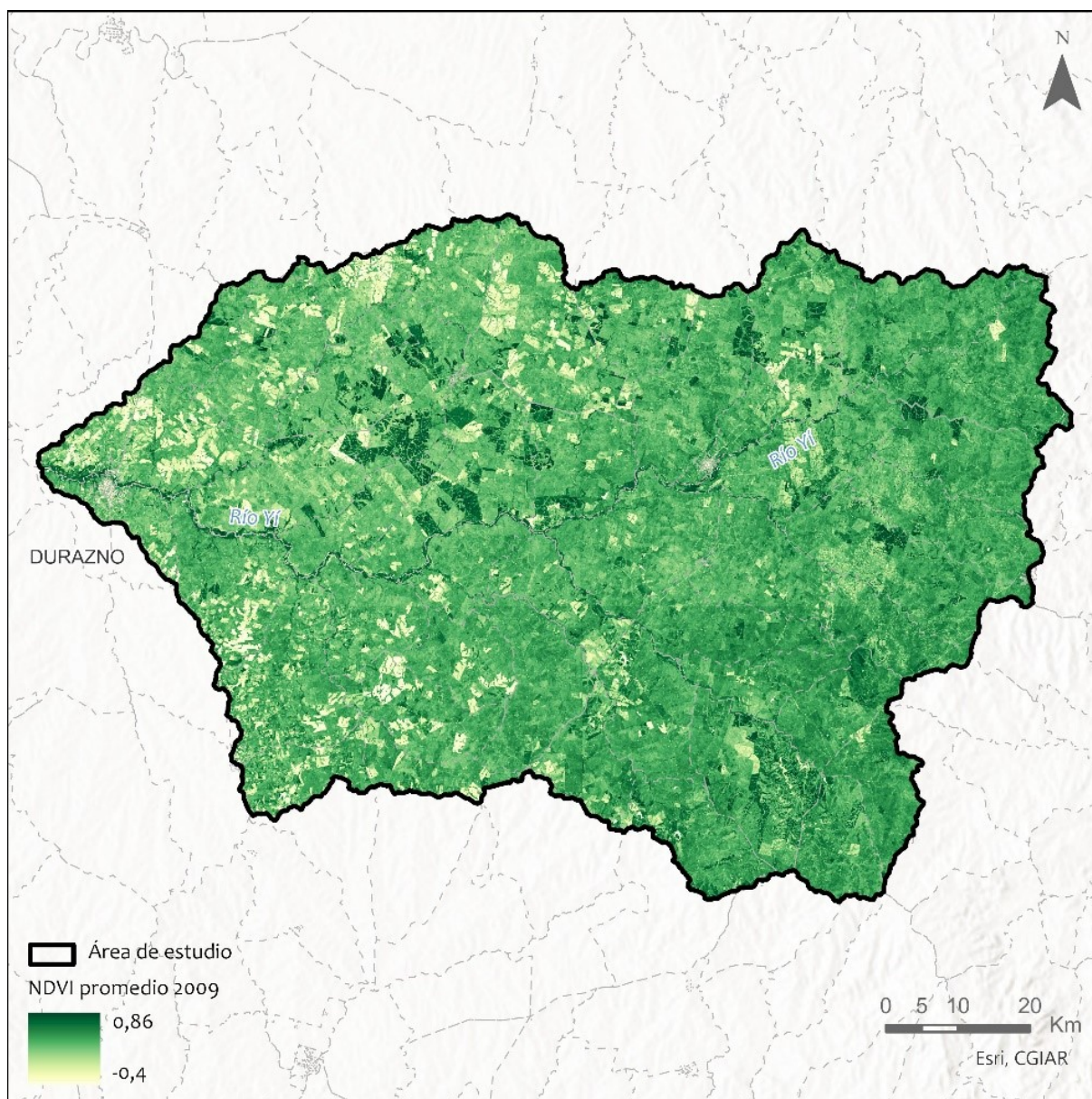


Figura 18. NDVI promedio en el año 2006. Fuente: IHCantabria, 2024.

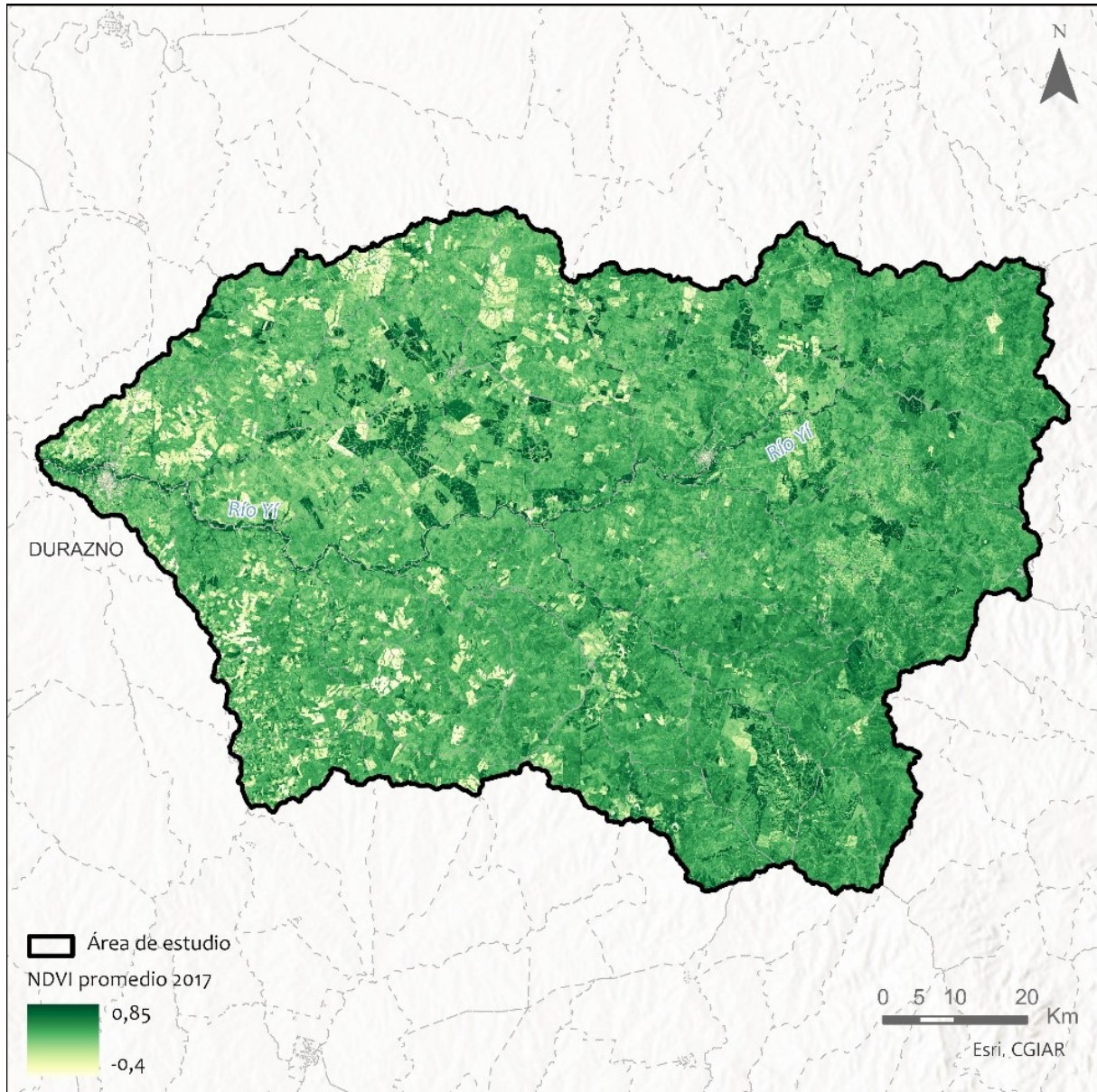


Figura 19. NDVI promedio en el año 2017. Fuente: IHCantabria, 2024.

- Árbol de decisiones. Áreas potenciales de conservación y de restauración.

Con toda la información anteriormente expuesta, se realiza el siguiente árbol de decisiones (Figura 20) que permite clasificar la vegetación presente en cada una de las UF según su aptitud potencial sea de conservación o de restauración (Figura 21, Figura 22, Figura 23 y Figura 24) . De esta manera se definen las siguientes categorías:

- Áreas potenciales de conservación son aquellas con una idoneidad actual del ecosistema buena. En este punto se diferencia en función de si la idoneidad en escenario futuro es buena o mala entre áreas de conservación pasiva (C1) y áreas de conservación activas (C2) respectivamente. La conservación activa (C2) implica acciones directas para proteger y gestionar ecosistemas, como la restauración de hábitats o el control de especies invasoras y la conservación pasiva (C1) consiste en proteger ecosistemas minimizando la intervención humana, dejando que los procesos naturales sigan su curso.

- Áreas potenciales de restauración son aquellas zonas de presencia del ecosistema con idoneidad actual del ecosistema mala pero buena a escenario futuro y además con tendencia del factor biótico de crecimiento, clasificándolas como de restauración activa (R1), lo que involucra la intervención directa para recuperar ecosistemas degradados, como reforestar o reintroducir especies nativas. También se incluyen como zonas de restauración intensiva (R2) aquellas áreas de campo natural donde actualmente no existe el ecosistema, pero su aptitud hidroclimática a futuro es buena y el factor biótico es de crecimiento. La restauración intensiva de ecosistemas es una restauración más especializada y controlada, con técnicas intensivas para recuperar rápidamente ecosistemas muy dañados. La selección de este ecosistema se basa en que estos ecosistemas presentan condiciones favorables para su regeneración en el área de estudio, lo que los hace más viables en comparación con los bosques nativos, que enfrentan retos mayores.

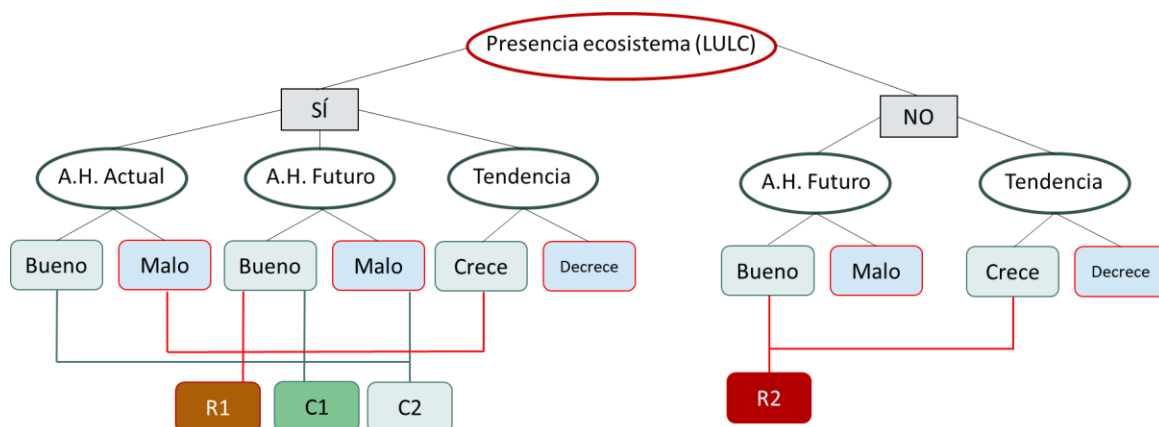


Figura 20. Árbol de decisiones para clasificación de las coberturas vegetales en: i) conservación pasiva (C1); ii) conservación activa (C2); iii) restauración activa (R1) y restauración intensiva (R2): IHCantabria, 2024.

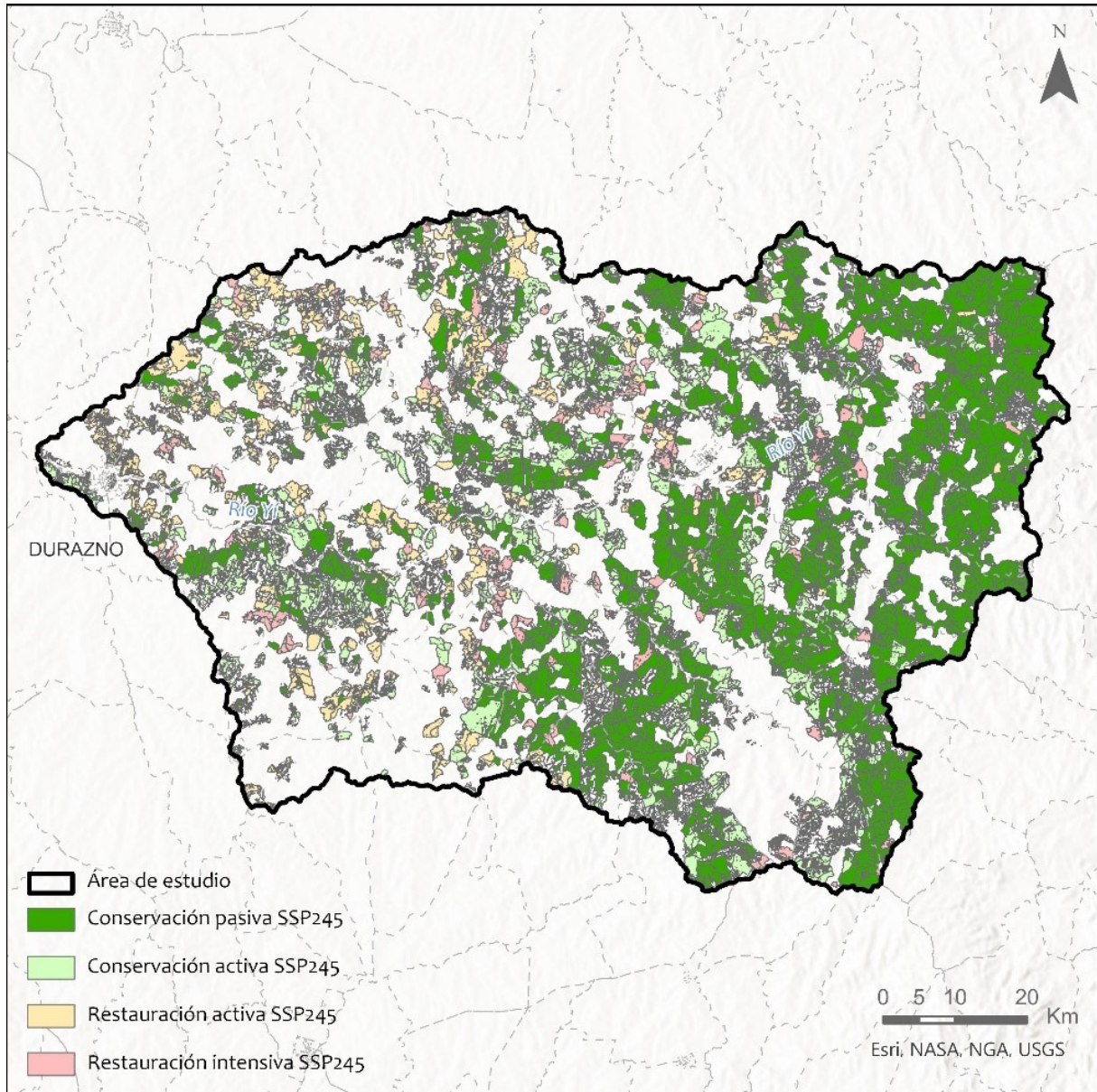


Figura 21. Áreas de conservación (pasiva y activa) y restauración (activa e intensiva) para la cobertura de campo natural en el escenario futuro SSP245. Fuente: IHCantabria, 2024.

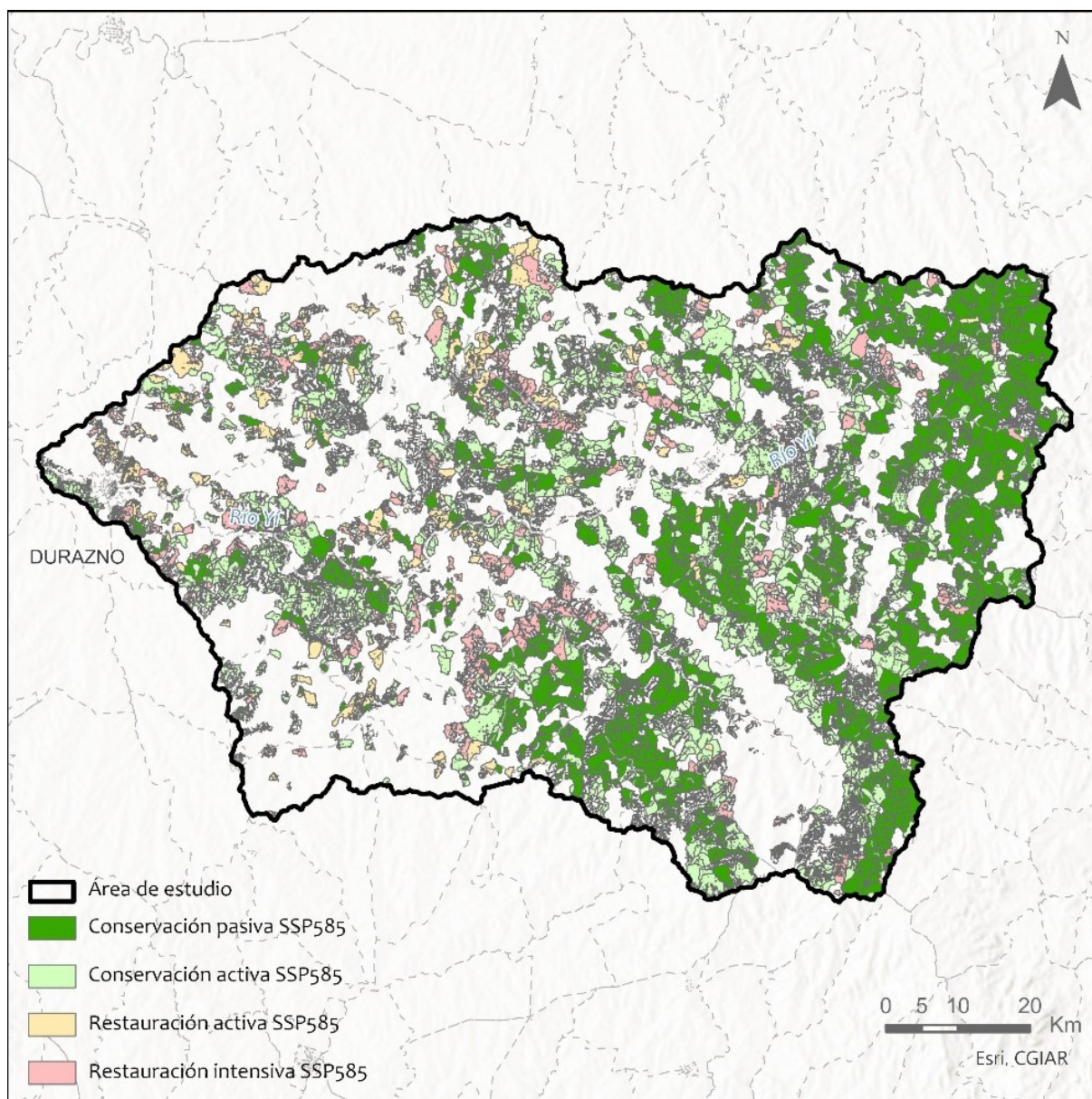


Figura 22. Áreas de conservación (pasiva y activa) y restauración (activa e intensiva) para la cobertura de campo natural en el escenario futuro SSP585. Fuente: IHCantabria, 2024.

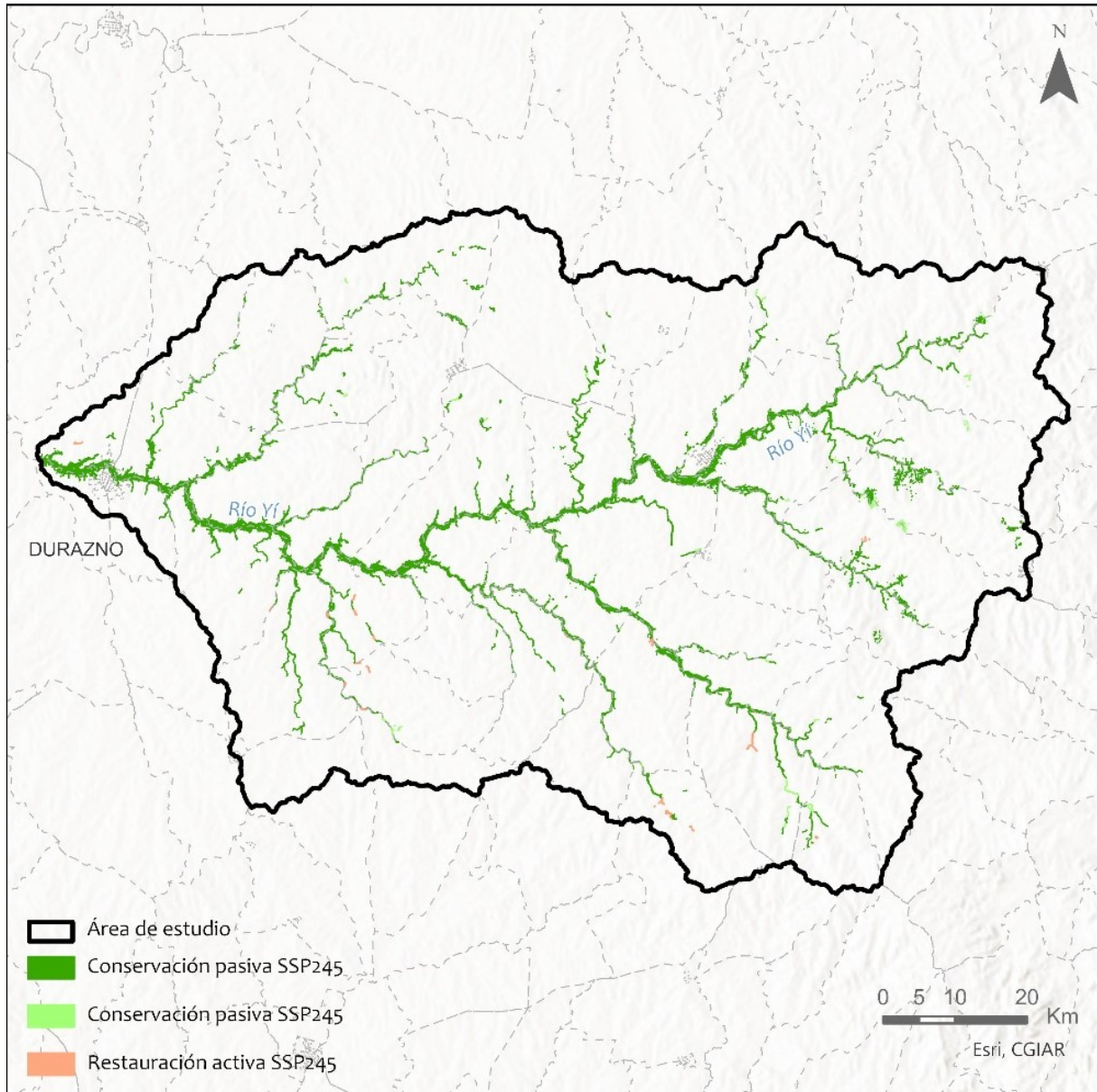


Figura 23. Áreas de conservación (pasiva y activa) y restauración (activa e intensiva) para la cobertura bosque nativo en el escenario futuro SSP245. Fuente: IHCantabria, 2024.

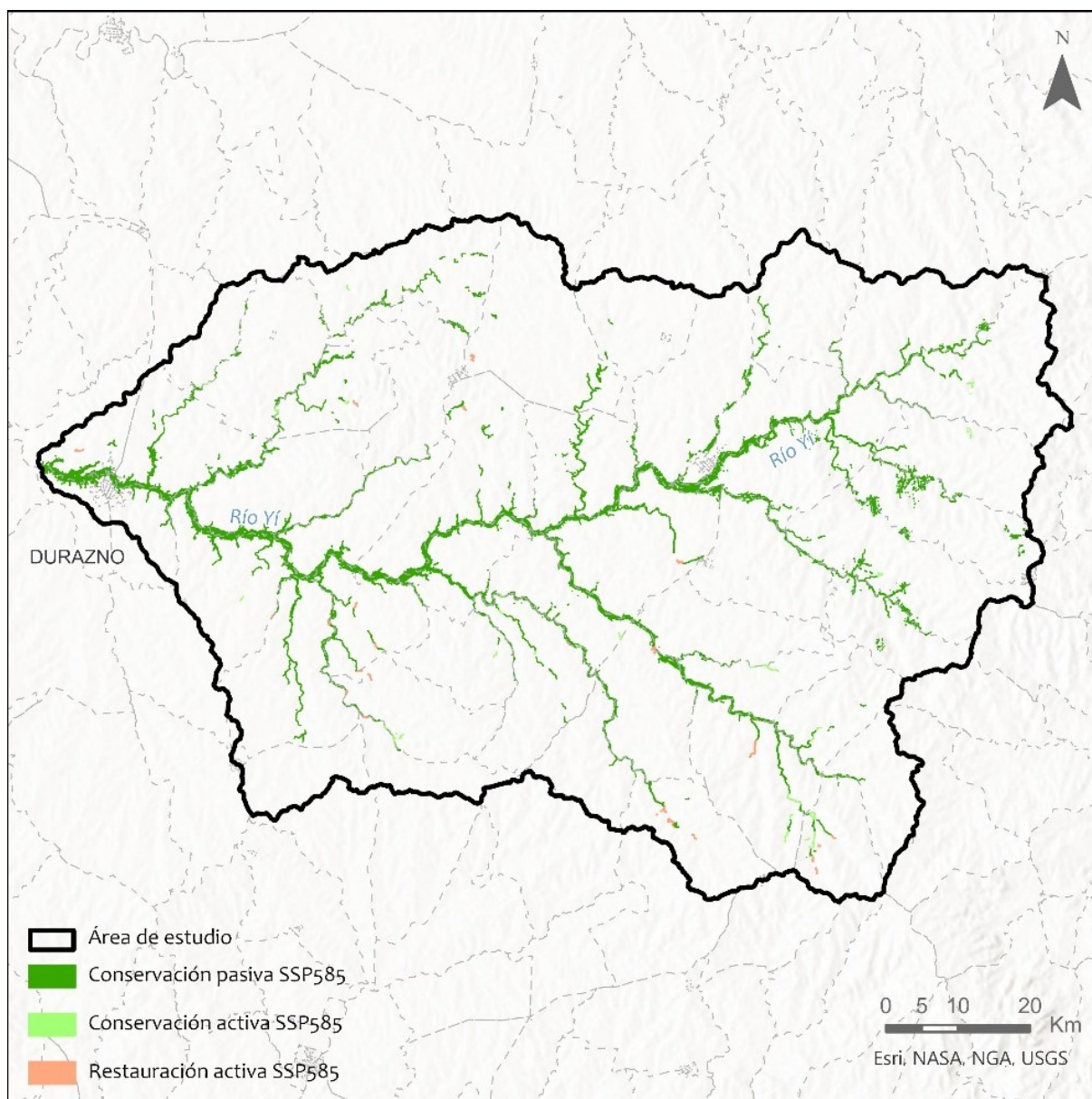


Figura 24. Áreas de conservación (pasiva y activa) y restauración (activa e intensiva) para la cobertura bosque nativo en el escenario futuro SSP585. Fuente: IHCantabria, 2024.

5.3. Identificación de áreas clave con alto potencial para la implementación de SbN

5.3.1. Conceptualización y caracterización de la relación SE – SbN

Como paso previo al modelado y cartografiado de SE, es necesario determinar la relación que existe entre los SE y las SbN que potencialmente pueden utilizarse para optimizar su provisión. Los SE considerados están fundamentalmente controlados por la interacción, a diversas escalas, de la vegetación terrestre con los factores físicos y procesos abióticos a escala de cuenca. Con el objetivo de identificar las SbN más adecuada para cada servicio, se identificó en primer lugar el proceso o componente biofísico que más pudiera beneficiarse de la aplicación de este tipo de solución a través de interacciones ampliamente contrastadas por la evidencia científica actual (Tabla 3). De la misma manera, se estableció la escala espacial de ecosistema / LULC a la que debería aplicarse la interacción para optimizar la provisión del SE.



Esta conceptualización permite establecer los métodos e información necesaria para conocer de forma espacialmente explícita cuales son las SbN (tanto de conservación como de restauración) de aplicación en el continuo territorial. Estas áreas, dada la naturaleza de los patrones y procesos del medio natural dominantes en la zona de estudio, con abundantes precipitaciones, topografía plana y un legado de ocupación del suelo dominado por procesos de usos agroganaderos, se encuentran principalmente relacionadas con la conservación y restauración de las masas forestales y los pastizales (campo natural).

Amenaza	Servicio ecosistémico (SE)	Proceso / Comp. biofísico	Ecosistema/LULC (SbN)	Efecto
Inundación	Regulación hidrológica (frente inundaciones)	Conectividad lateral río - llanura de inundación	Llanura inundación y bosque de ribera	Restauraciones de llanuras de inundación para aumentar el almacenamiento y la atenuación de inundaciones (Jacobsen et al., 2015). Moderación de caudales máximos al permitir el desbordamiento, ralentizando la ola de crecidas (Vis et al., 2001). La vegetación de ribera retarda ente 30-140 minutos el pico de caudal (Thomas y Nisbet, 2011).
		Generación de escorrentía	Pastizales	Disminución de las pérdidas de retención de agua en terrenos vegetados (el Kateb et al., 2013). La capacidad de infiltración en cuencas dominadas por pastizales es un 48% mayor que en dominadas por coníferas y un 57% mayor que en dominadas por suelos desnudos (Fabregas-Reigosa, 2015)
Sequía	Regulación hidrológica (frente sequía)	Conectividad lateral río - llanura de inundación	Llanura inundación y bosque de ribera	La vegetación de ribera aumenta entre un 15-71% la capacidad de almacenamiento de las llanuras (Thomas y Nisbet, 2011).
		Captura y almacén de agua	Pastizales	Zonas del paisaje con bajas pendientes, suelos permeables y formaciones vegetales desarrolladas en superficie contribuyen a una mejor recarga de las aguas subterráneas (De Groot <i>et al.</i> , 2002).

Tabla 3. Conceptualización de las medidas de adaptación basadas en Naturaleza para los servicios ecosistémicos considerados para la ciudad de Durazno. Fuente: IHCantabria, 2024

5.3.2. Modelado e identificación de áreas proveedoras de SE

En los subapartados siguientes se describe la modelización realizada a nivel de provisión potencial de SE para cuantificar el efecto de las SbN. Como se ha señalado anteriormente, la modelización de SE está basada en la identificación de áreas prioritarias en las que está ocurriendo la provisión y demanda de estos. Los SE vienen determinados fundamentalmente por la interacción de la vegetación terrestre con factores topográficos, geomorfológicos y climáticos. Por ello, la selección e identificación de SbN en la matriz del paisaje se realizó en base a la identificación de áreas en las que se está produciendo una provisión deficiente del SE considerado debido a un estado de degradación de la vegetación, así como las áreas en las que la presencia de vegetal natural en un estado adecuado asegura la correcta provisión del SE. En el primer caso, deberán aplicarse soluciones de restauración mientras que en el segundo se aplicarán soluciones relacionadas con la conservación de la vegetación existente. En este contexto, la propuesta de SbN a integrar en la BGIN se basó en el establecimiento de umbrales estadísticos que prioricen aquellas áreas más interesantes por la intensidad y variedad (multifuncionalidad) de los SE potencialmente generados.

Regulación hidrológica frente inundaciones

- Volumen de almacenamiento de las llanuras de inundación

Una vez definidas las llanuras de inundación (ver apartado 5.2; Figura 25), la SbN la constituiría el propio paisaje fluvial asumiendo su capacidad de almacenamiento de agua. Se identificaron aquellas llanuras de inundación con aptitud potencial del bosque de ribera como SbN de conservación y aquellas con aptitud potencial de restauración del bosque como área de restauración (Figura 26 y Figura 27).

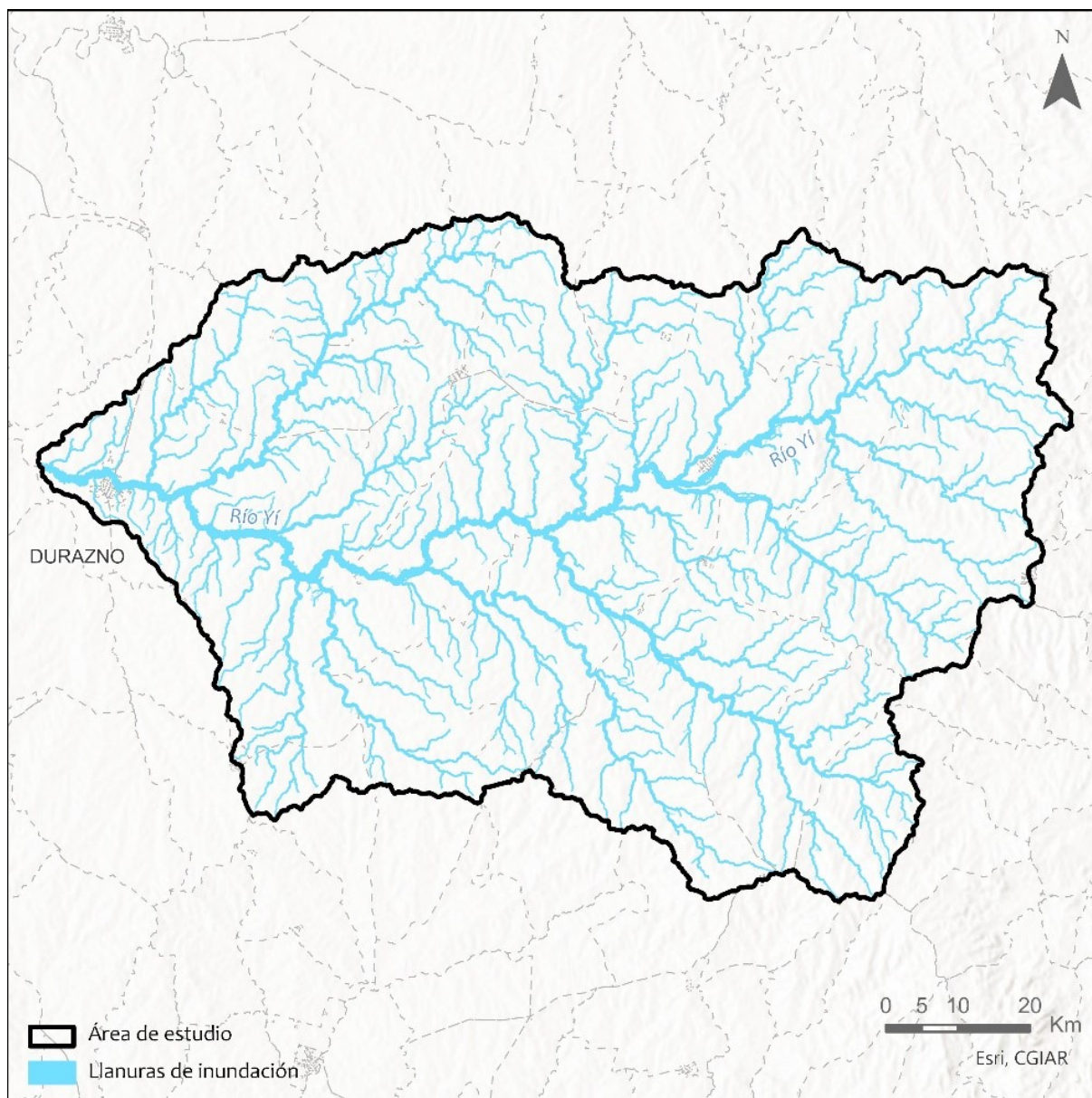


Figura 25. Mapa de llanuras de inundación para la cuenca drenante de Durazno. Fuente: IHCantabria, 2024.

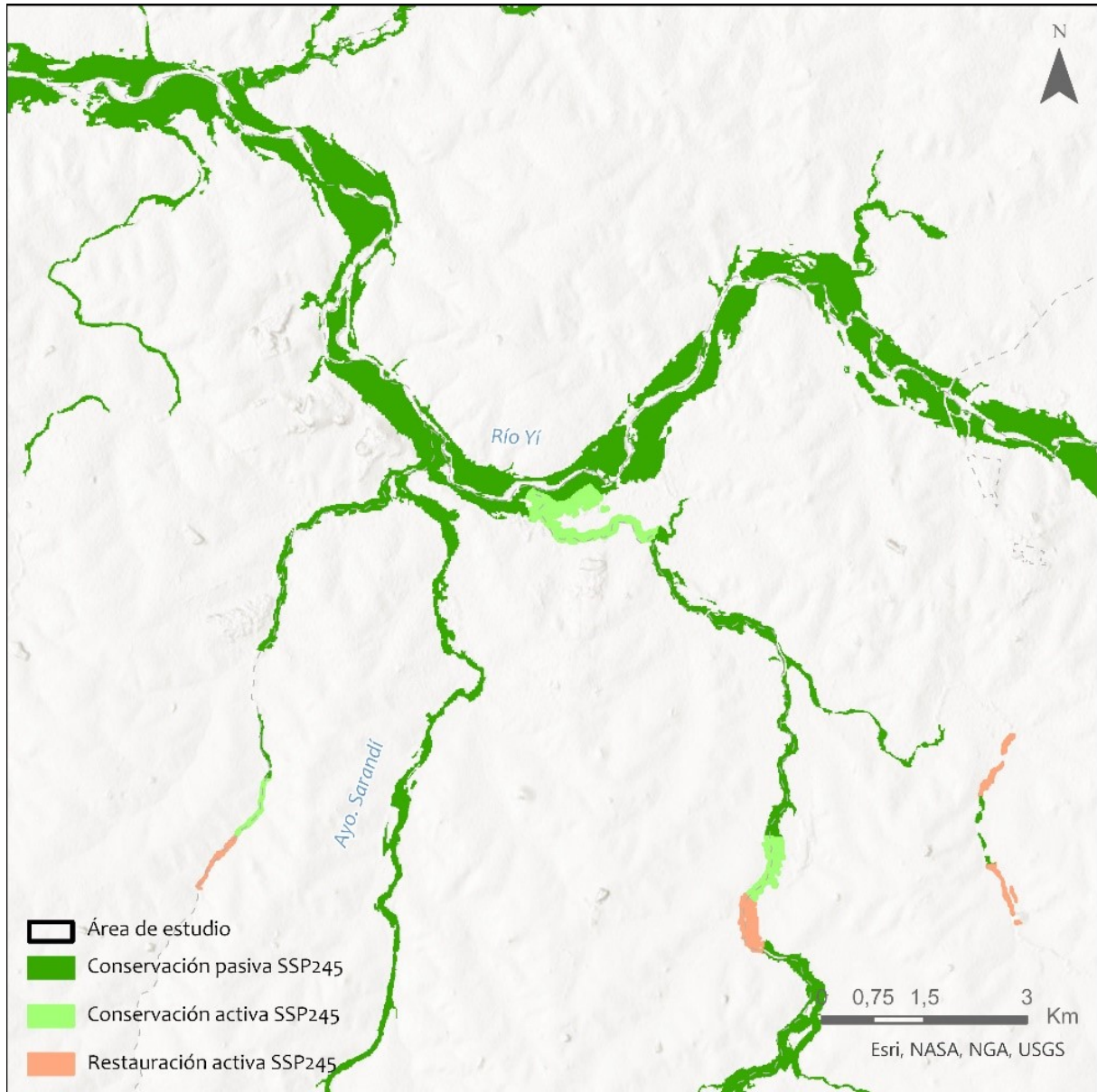


Figura 26. Mapa de detalle de SbN propuestas con bosque nativo para el SE de regulación hidrológica en llanuras de inundación para la cuenca drenante de Durazno en el escenario futuro SSP245. Fuente: IHCantabria, 2024.

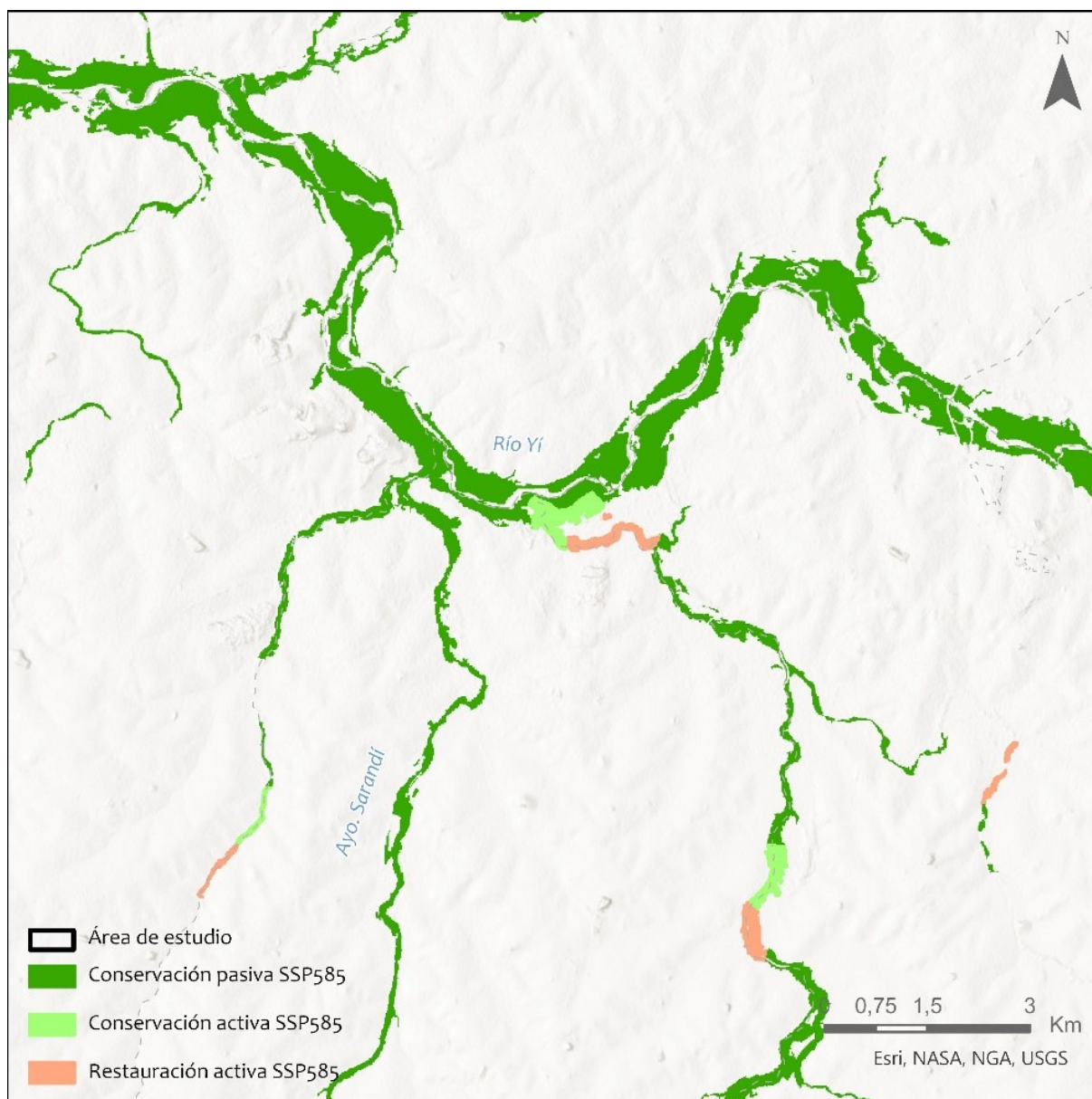


Figura 27. Mapa de detalle de SbN propuestas con bosque nativo para el SE de regulación hidrológica en llanuras de inundación para la cuenca drenante de Durazno en el escenario futuro SSP585. Fuente: IHCantabria, 2024.

- Control de escorrentía en las laderas

El potencial de una ladera para generar escorrentía (Figura 28) se consideró mediante los factores abióticos que controlan fundamentalmente la infiltración a escala de ladera (Dunne, et al., 1991), (Hopp & McDonnell, 2009): la pendiente y la permeabilidad del suelo. Además, según (Maetens, et al., 2012) las zonas con altas precipitaciones anuales suelen tener una distribución más uniforme de las precipitaciones a lo largo del año, lo que provoca una saturación estacional del suelo y una formación más rápida de escorrentía (Ponce & Hawkins, 1996) en las condiciones óptimas de permeabilidad y topografía. En este marco metodológico, se utiliza la pendiente y la permeabilidad del suelo para localizar aquellas laderas más susceptibles de generar escorrentía en cada cuenca considerando la precipitación como un indicador de magnitud de origen de la escorrentía. La permeabilidad del suelo se obtuvo de la información de unidades geológicas a escala de país de la Dirección Nacional de Minería y Geología (DINAMIGE), clasificando el área de estudio en zonas de permeabilidad baja, media

y muy alta con base a bibliografía especializada y criterio de experto. Por su parte, la pendiente se derivó del MDT disponible y se promedió a escala de ladera de drenaje. Así, aquellas con una pendiente media de 5° a 45° que se encuentren en una zona de permeabilidad baja se consideran en el análisis como las laderas más importantes para la generación de escorrentía.

En este caso, se consideró el campo natural presente en las laderas como el elemento biótico que debería ser incluido como SbN. Aquellas laderas con riesgo alto de generación de escorrentía y con una potencialidad del campo natural de conservación se clasifican como SbN de conservación, en cambio, aquellas laderas también susceptibles de generar una alta escorrentía, pero con potencialidad de restauración de los pastizales son determinadas como SbN de restauración (Figura 29 y Figura 30).

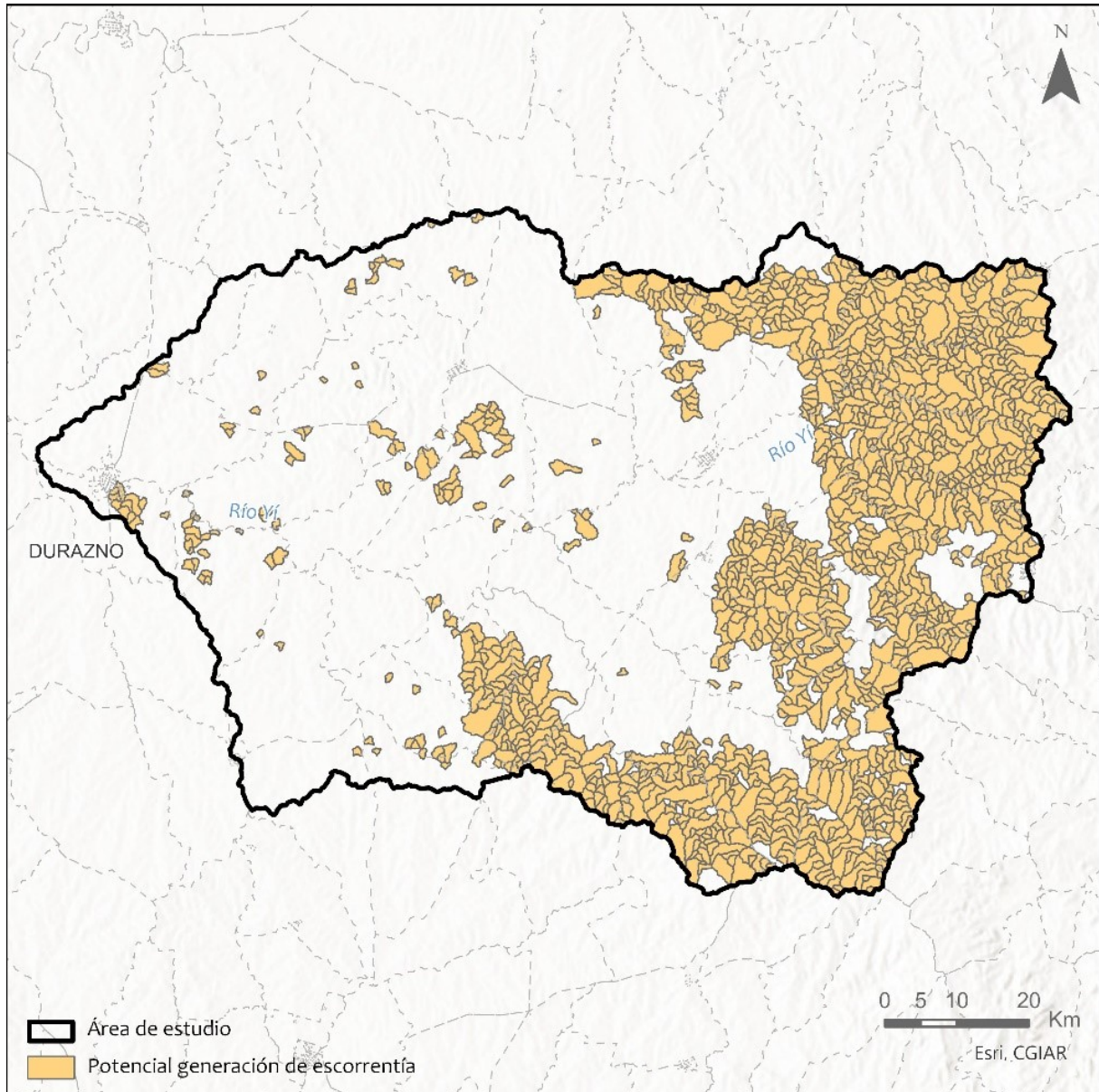


Figura 28. Laderas de drenaje con potencial de generar escorrentía según factores topográficos y de permeabilidad para la cuenca drenante de Durazno. Fuente: IHCantabria, 2024.

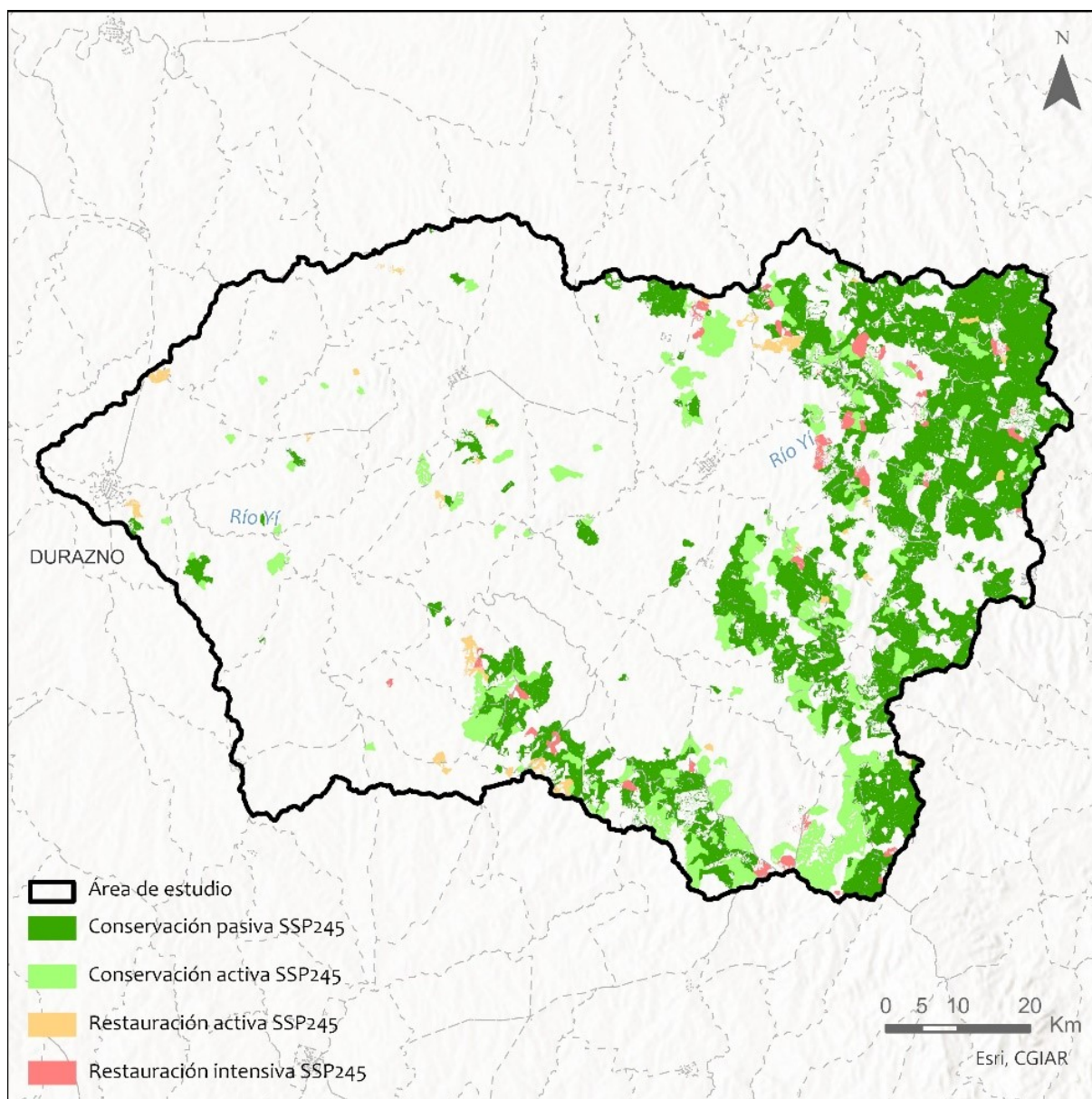


Figura 29. Mapa de SbN propuestas con campo natural para el SE de regulación hidrológica en laderas de drenaje para el control de escorrentía en la cuenca drenante de Durazno en el escenario futuro SSP245. Fuente: IHCantabria, 2024.

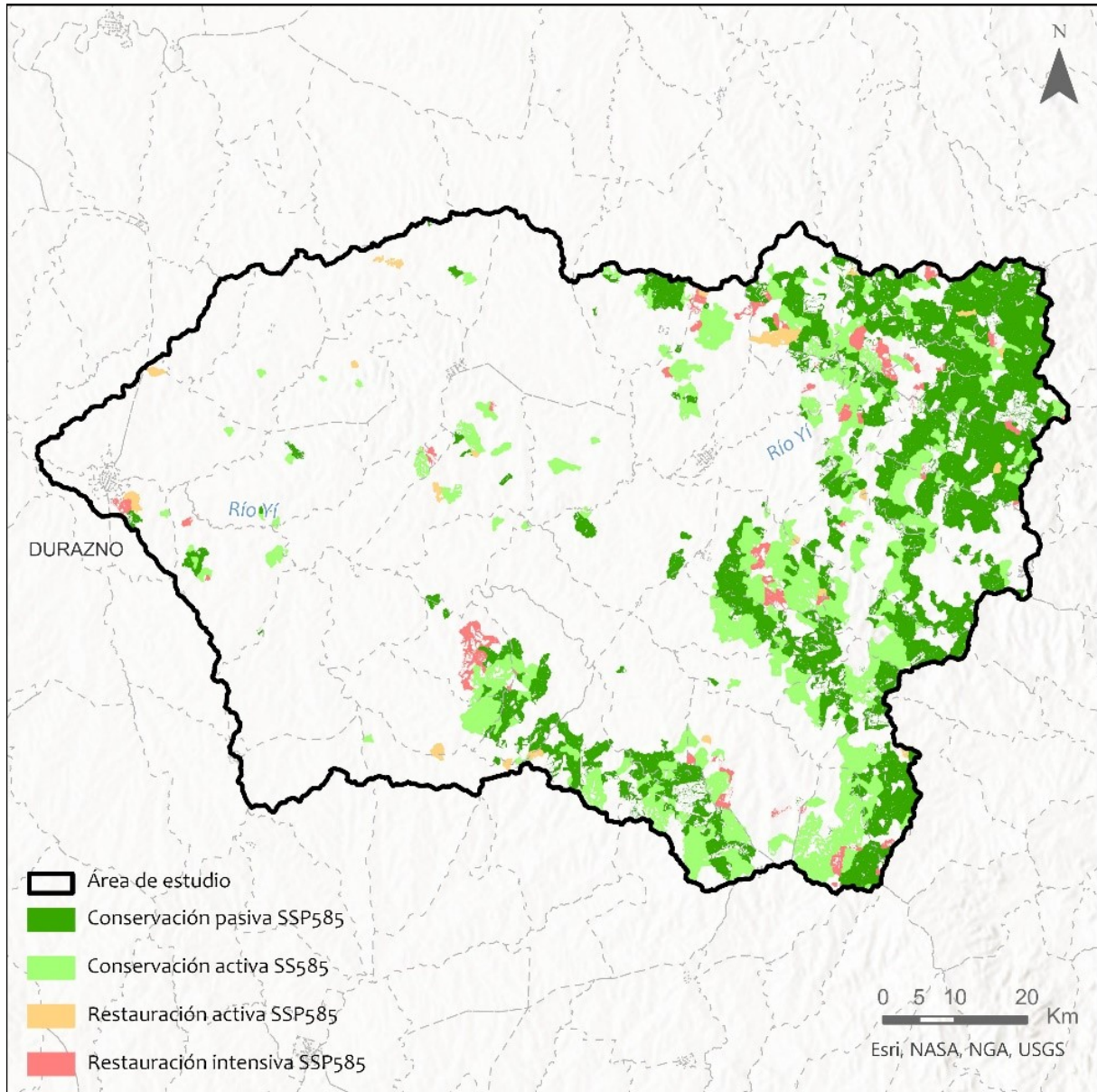


Figura 30. Mapa de SbN propuestas con campo natural para el SE de regulación hidrológica en laderas de drenaje para el control de escorrentía en la cuenca drenante de Durazno en el escenario futuro SSP5. Fuente: IHCantabria, 2024.

Para una mejor apreciación, se presenta en detalle para el área de cabecera del Río Yí (Figura 31 y Figura 32)

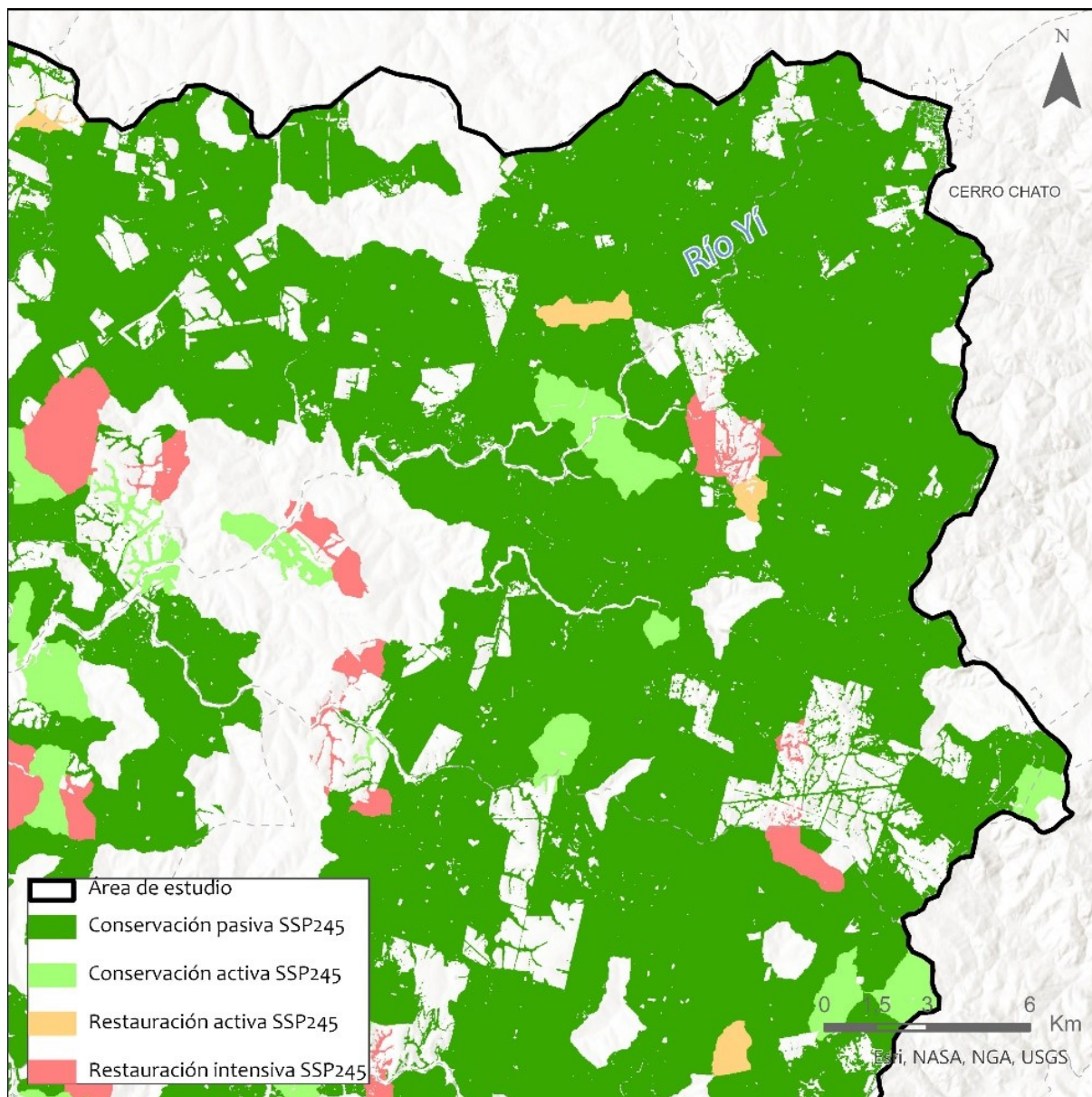


Figura 31. Detalle de mapa de SbN propuestas con campo natural para el SE de regulación hidrológica en laderas de drenaje para el control de escorrentía en la cuenca drenante de Durazno en el escenario futuro SSP245. Fuente: IHCantabria, 2024.

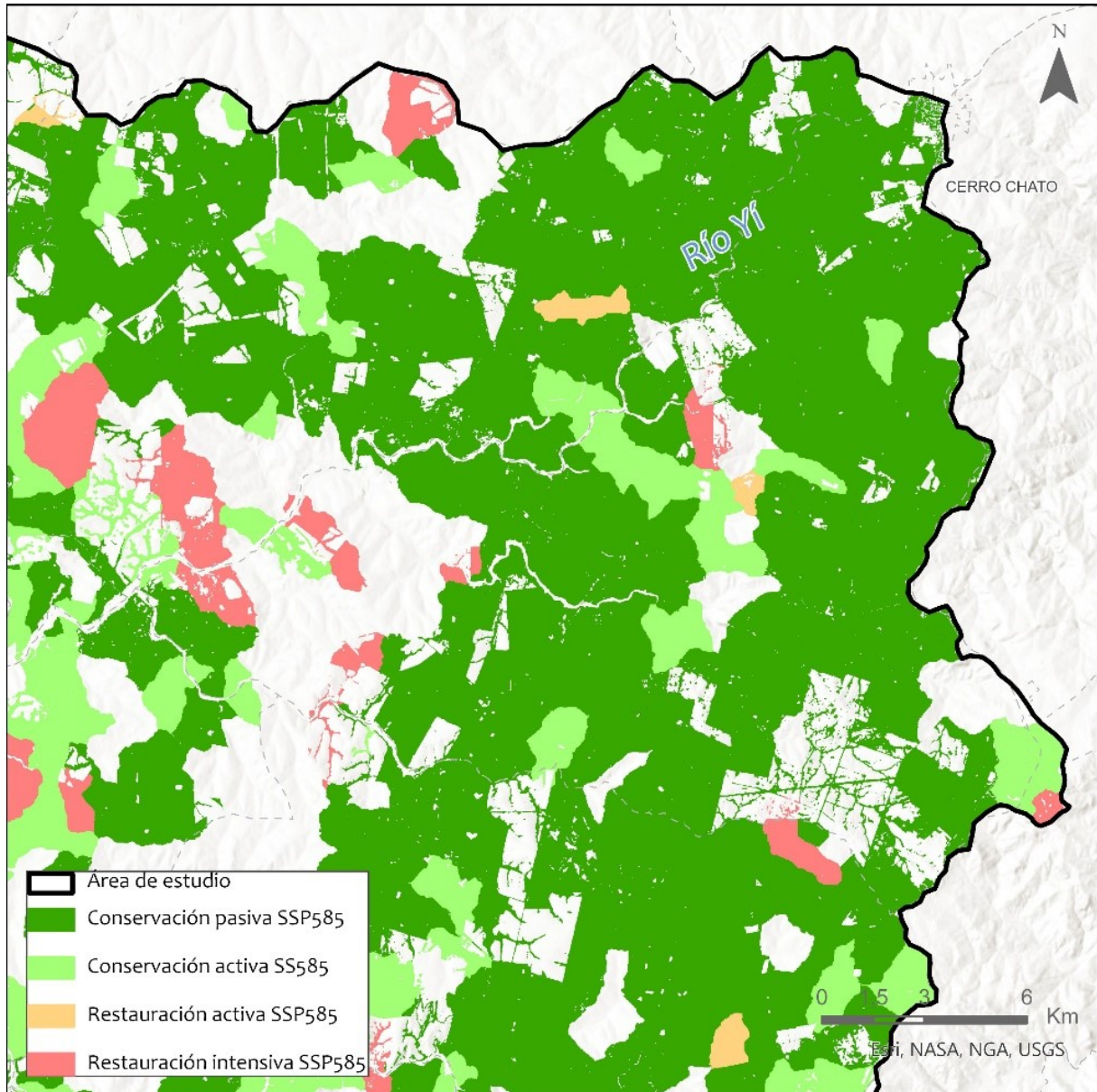


Figura 32. Detalle de mapa de SbN propuestas con campo natural para el SE de regulación hidrológica en laderas de drenaje para el control de escorrentía en la cuenca drenante de Durazno en el escenario futuro SSP5. Fuente: IHCantabria, 2024.

Regulación hidrológica frente sequía

- Volumen de almacenamiento de las llanuras de inundación

De forma análoga al anterior apartado, una vez definidas las llanuras de inundación (ver apartado 5.2 y Figura 33), la SbN lo constituiría el propio paisaje fluvial asumiendo su capacidad de almacenamiento de agua. Se identificaron aquellas llanuras de inundación con aptitud potencial del bosque de ribera como SbN de conservación y aquellas con aptitud potencial de restauración del bosque como SbN de restauración (Figura 34 y Figura 35).

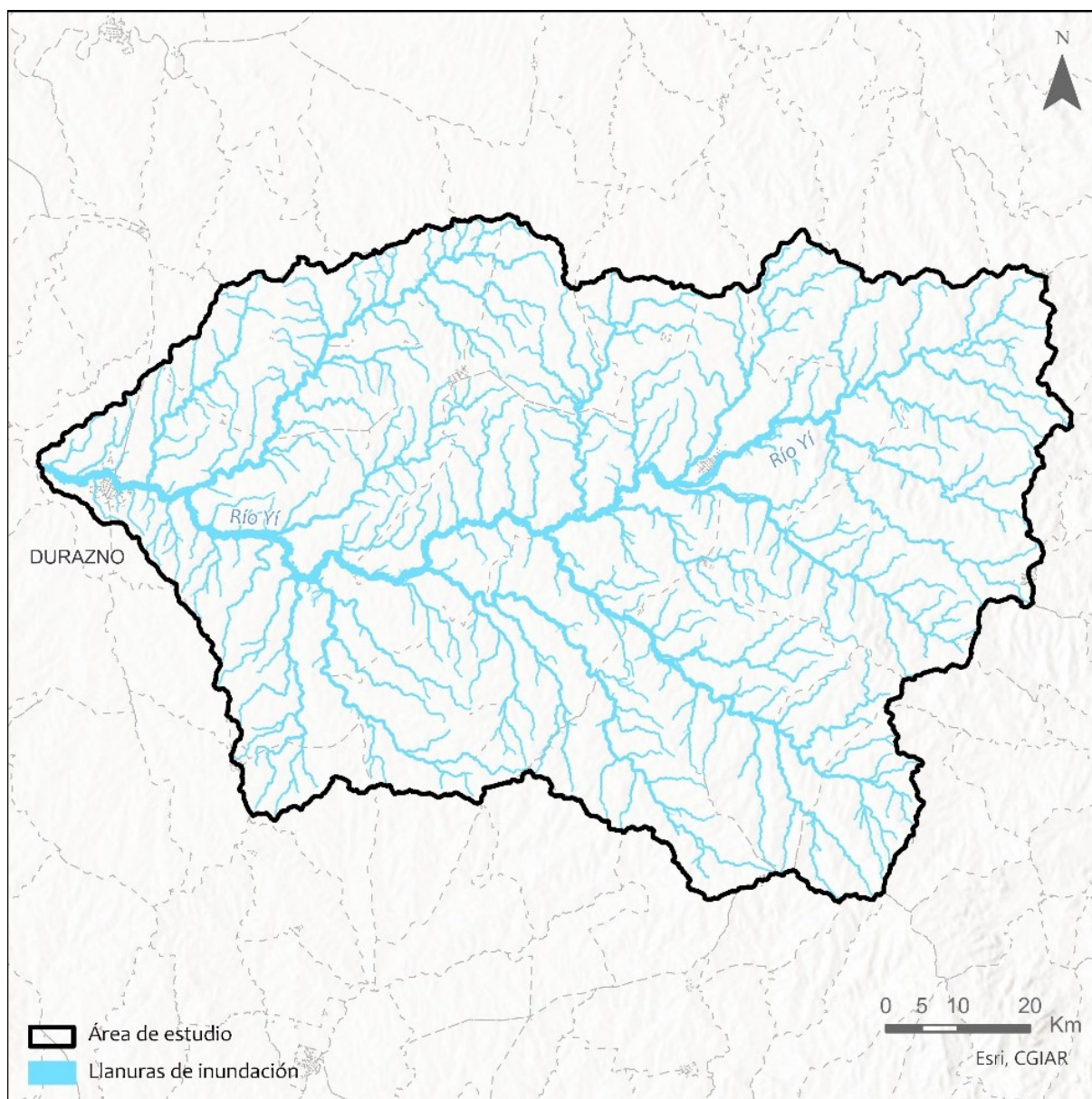


Figura 33. Mapa de llanuras de inundación para la cuenca drenante de Durazno. Fuente: IHCantabria, 2024.

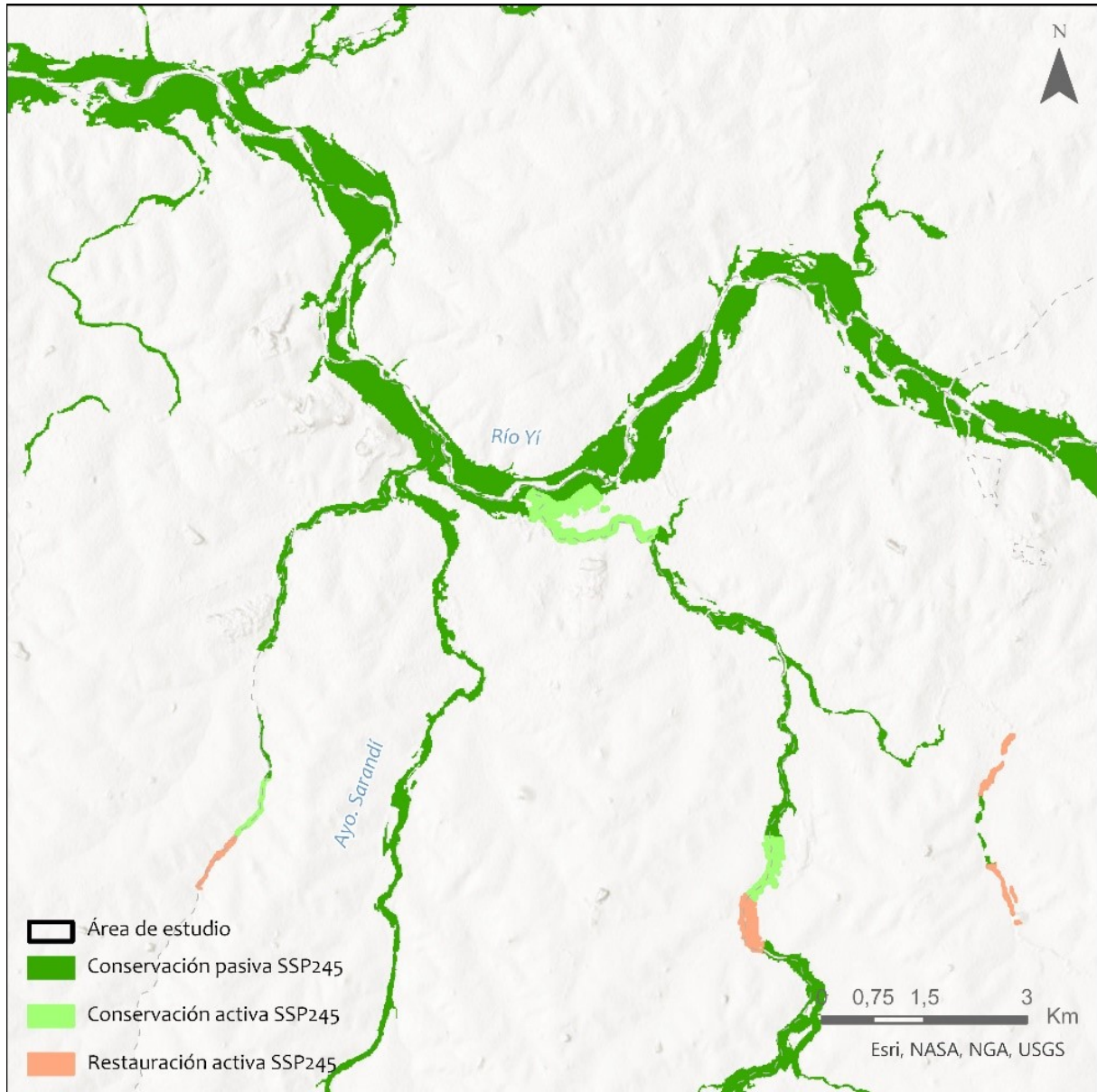


Figura 34. Mapa de detalle de SbN propuestas con bosque nativo para el SE de regulación hidrológica frente sequía en llanuras de inundación para la cuenca drenante de Durazno en el escenario futuro SS245. Fuente: IHCantabria, 2024.

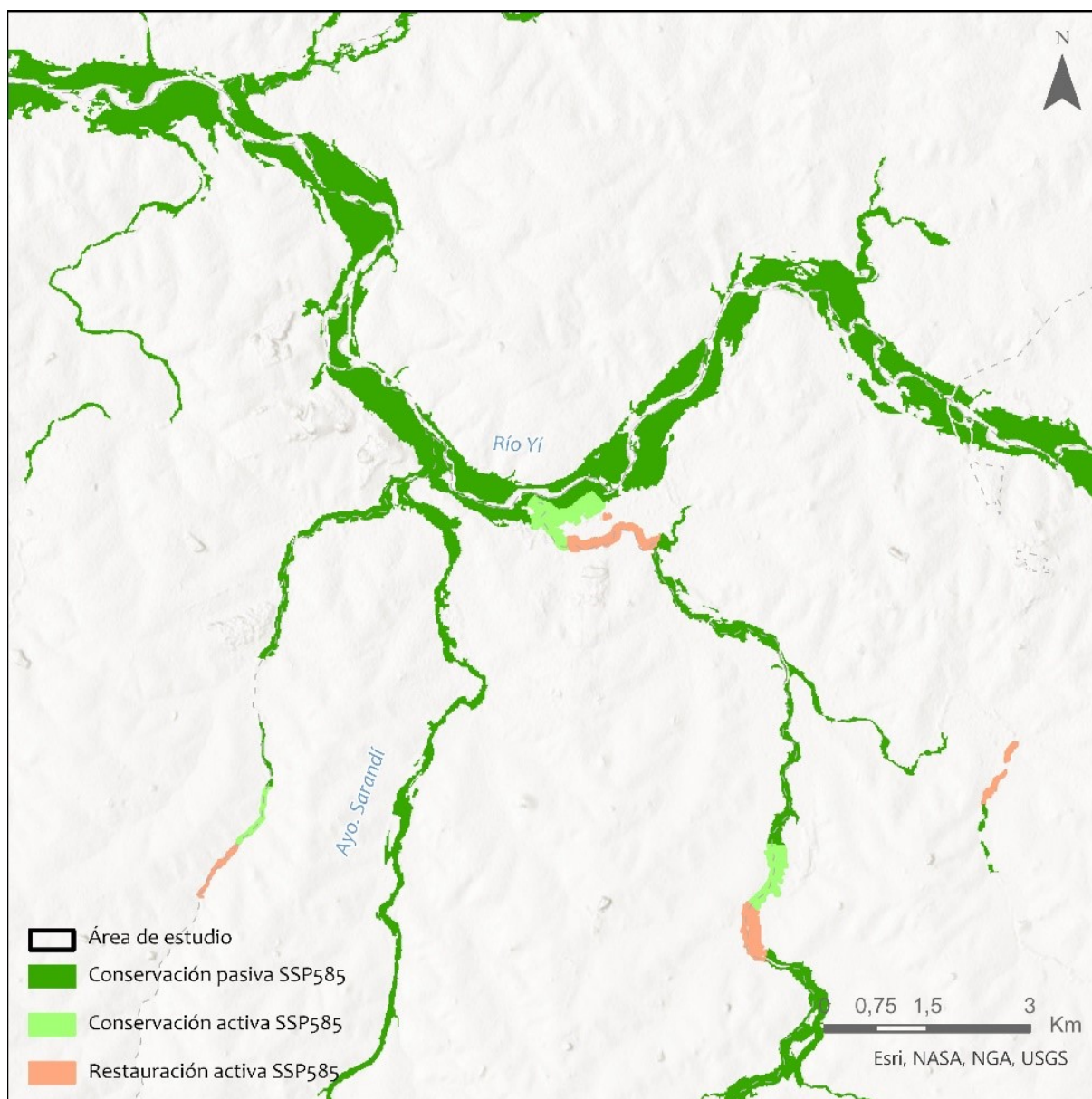


Figura 35. Mapa de detalle de SbN propuestas con bosque nativo para el SE de regulación hidrológica frente sequía en llanuras de inundación para la cuenca drenante de Durazno en el escenario futuro SS585. Fuente: IHCantabria, 2024.

- Captura y almacenamiento de agua

El potencial de una ladera para generar infiltración (Figura 36) se consideró mediante los factores abióticos que controlan fundamentalmente este fenómeno a escala de ladera (Dunne, et al., 1991), (Hopp & McDonnell, 2009): la pendiente y la permeabilidad del suelo. Además, según (Maetens, et al., 2012) las zonas con altas precipitaciones anuales y con una distribución uniforme de las precipitaciones a lo largo del año provoca una mayor capacidad de infiltración en condiciones óptimas de permeabilidad y topografía. En este marco metodológico, se utiliza la pendiente y la permeabilidad del suelo para localizar aquellas laderas más susceptibles de generar infiltración en la cuenca considerando la precipitación como un indicador de magnitud. La permeabilidad del suelo se obtuvo de la información de unidades geológicas a escala de país de la Dirección Nacional de Minería y Geología (DINAMIGE), clasificando el área de estudio en zonas de permeabilidad baja, media y muy alta con base a bibliografía especializada y criterio de experto. Por su parte, la pendiente se derivó del

MDT disponible y se promedió a escala de ladera de drenaje. Así, aquellas con una pendiente media menor al 5° y que se encuentren en una zona de permeabilidad alta se consideran en el análisis como las laderas más importantes para la generación de infiltración de agua.

En este caso, se consideró el campo natural presente en las laderas como el elemento biótico que debería ser incluido como SbN. Aquellas laderas con una capacidad alta de infiltración y con una potencialidad del campo natural de conservación se clasifican como SbN de conservación, en cambio, aquellas laderas también con alta capacidad de infiltración, pero con potencialidad de restauración de los pastizales son determinadas como SbN de restauración (Figura 37 y Figura 38).

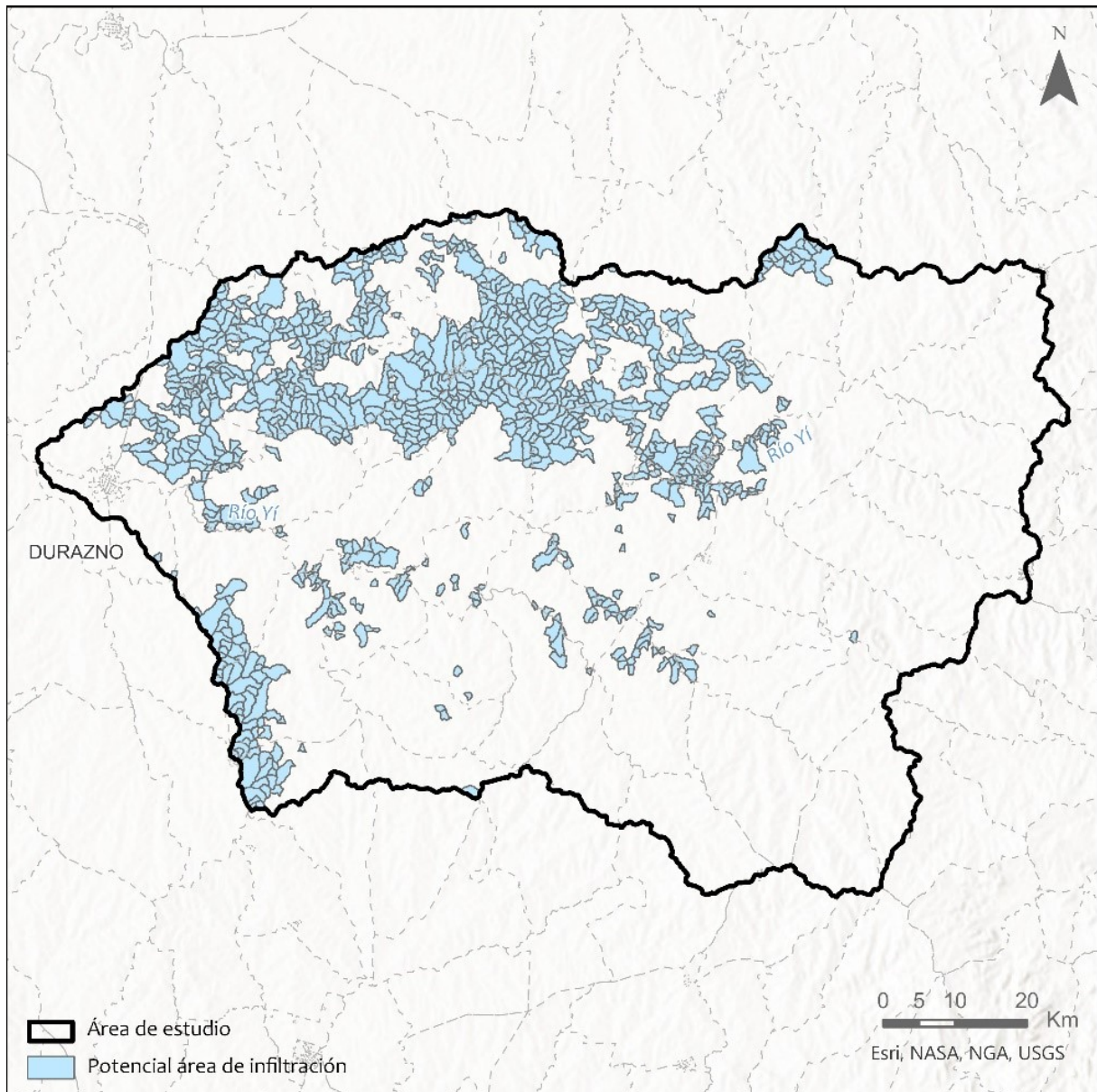


Figura 36. Laderas de drenaje con potencial de generar infiltración según factores topográficos, de permeabilidad y de uso para la cuenca drenante de Durazno. Fuente: IHCantabria, 2024.

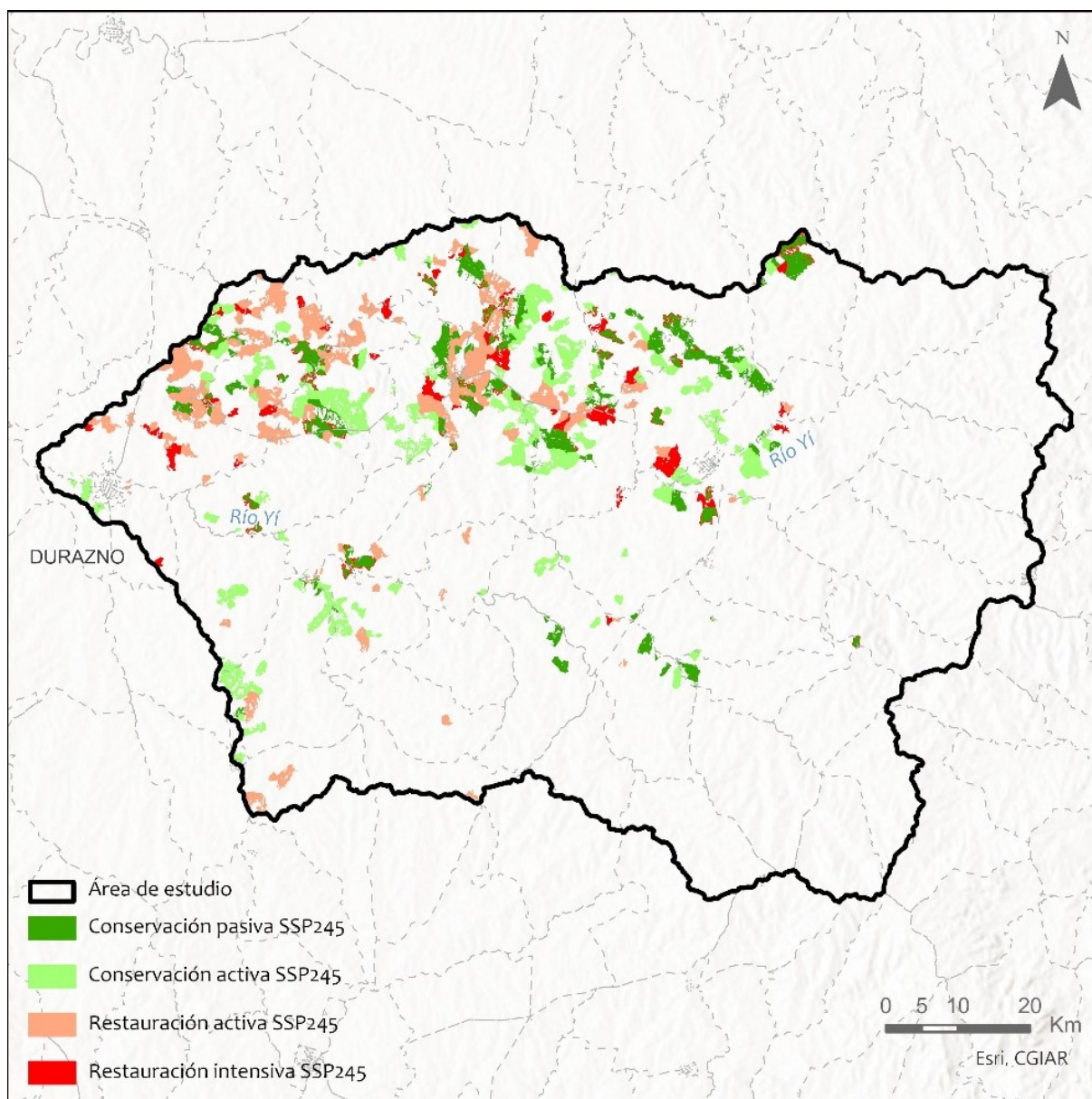


Figura 37: Mapa de SbN propuestas con campo natural para el SE de regulación hidrológica en laderas de drenaje para el aumento de la infiltración en la cuenca drenante de Durazno en el escenario futuro SSP245. Fuente: IHCantabria, 2024.

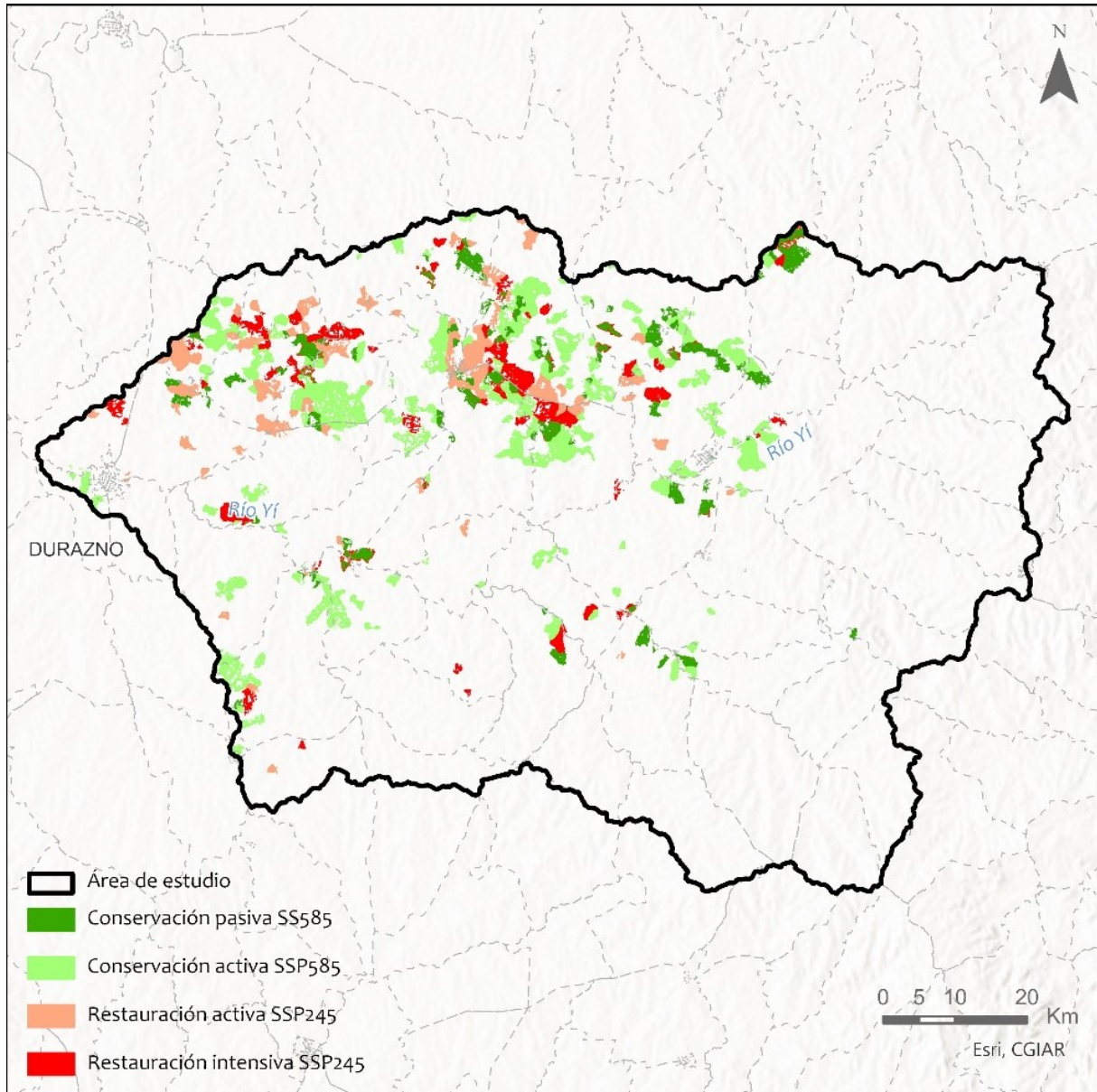


Figura 38. Mapa de SbN propuestas con campo natural para el SE de regulación hidrológica en laderas de drenaje para el aumento de la infiltración en la cuenca drenante de Durazno en el escenario futuro SSP585. Fuente: IHCantabria, 2024

Para una mejor apreciación, se presenta en detalle para el área de cabecera del Río Yí (Figura 31 y Figura 32)

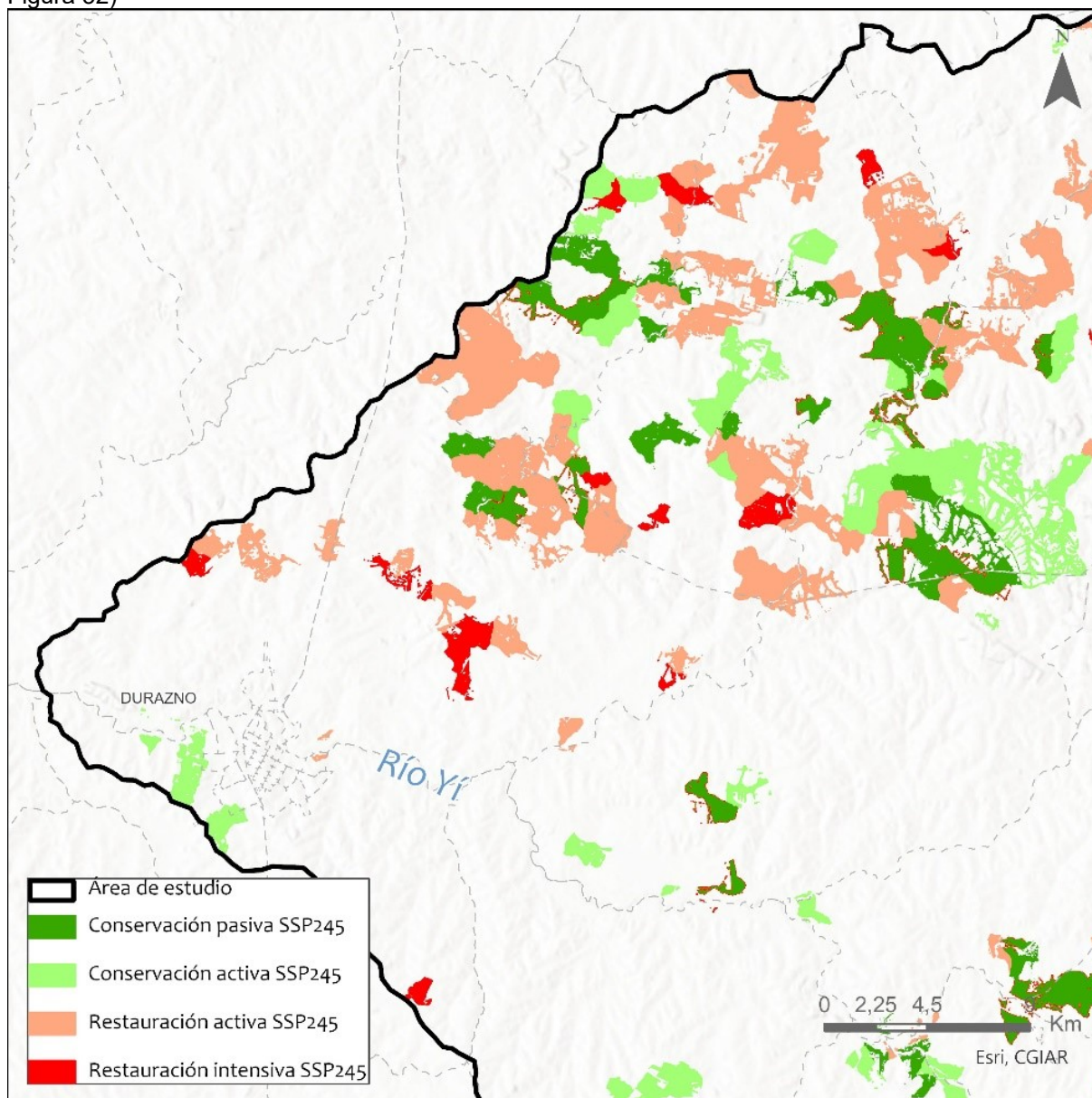


Figura 39. Detalle de mapa de SbN propuestas con campo natural para el SE de regulación hidrológica en laderas de drenaje para el control de escorrentía en la cuenca drenante de Durazno en el escenario futuro SSP245. Fuente: IHCantabria, 2024.

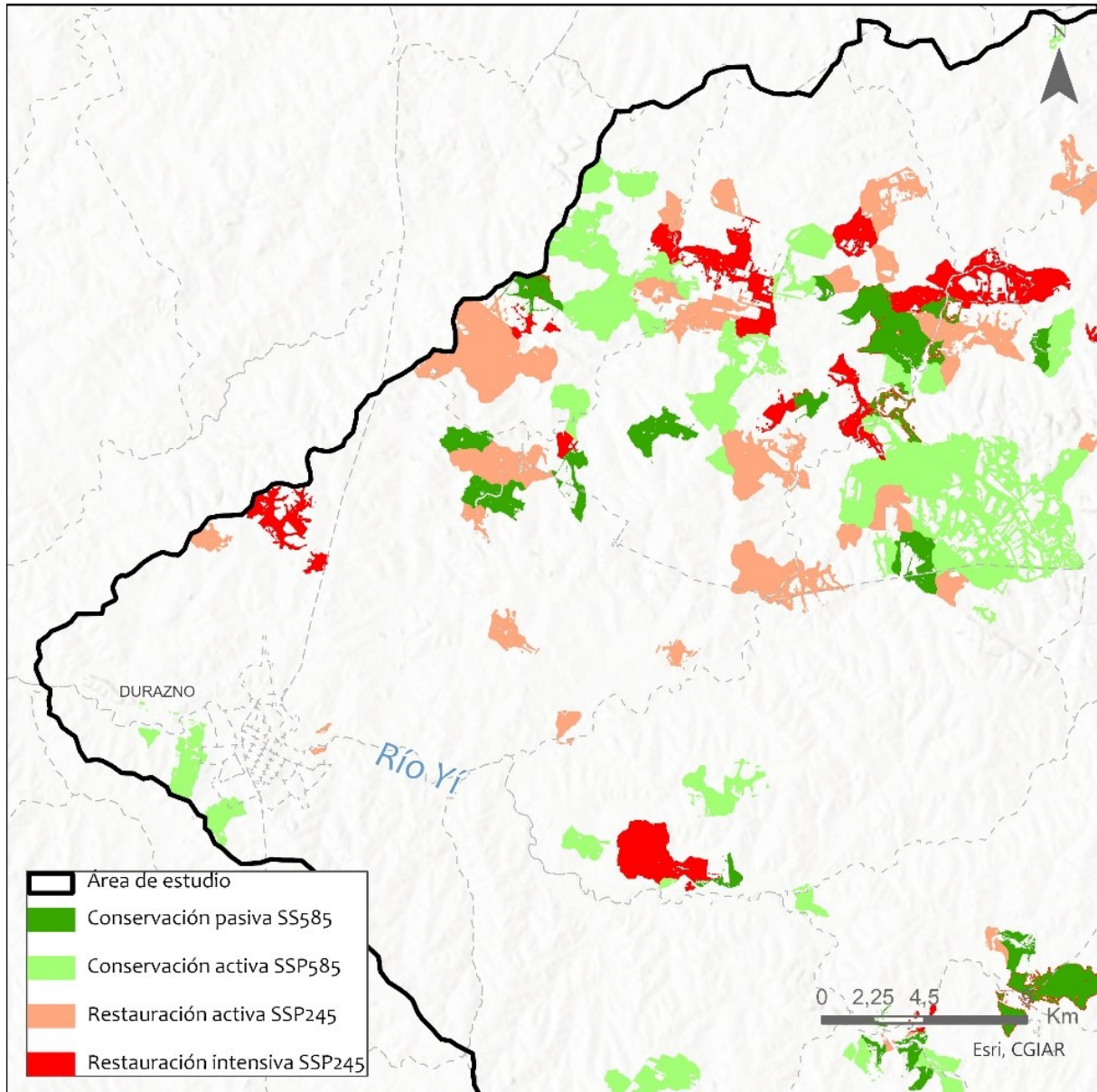


Figura 40. Detalle de mapa de SbN propuestas con campo natural para el SE de regulación hidrológica en laderas de drenaje para el control de escorrentía en la cuenca drenante de Durazno en el escenario futuro SSP5. Fuente: IHCantabria, 2024.

5.3.3. Resultados

En las siguientes tablas (ver Tabla 4 y Tabla 5) se exponen para cada escenario futuro los resultados de superficie (en ha) de cada una de las coberturas y categorías evaluadas para los SE modelados

SE	Campo natural				Bosque nativo		
	Conservación		Restauración		Conservación		Restauración
	C1	C2	R1	R2	C1	C2	R1
Regulación inundaciones	144,023.2	34,595.4	5,253.1	54.711,1	19,810.1	408.6	293.5
Regulación sequía	22,584.7	19,434.5	19,367.9	1,309.5			
Total	166,607.9	54,029.9	24,621	56.020,6			

Tabla 4. Sbn obtenidas por cobertura vegetal analizada para cada SE modelado en el escenario futuro SSP245 en la cuenca drenante de Durazno. Fuente: IHCantabria, 2024

SE	Campo natural				Bosque nativo		
	Conservación		Restauración		Conservación		Restauración
	C1	C2	R1	R2	C1	C2	R1
Regulación inundaciones	119,345.5	76,757.1	3,196.4	50.309,5	18,850.0	419.7	251.2
Regulación sequía	15,425.6	26,593.7	11,520.8	1,105.8			
Total	134,771.1	103,347.8	14,717.2	51.415,3			

Tabla 5. Sbn obtenidas por cobertura vegetal analizada para cada SE modelado en el escenario futuro SSP585 en la cuenca drenante de Durazno. Fuente: IHCantabria, 2024

En la comparación de ambas tablas, se identifica que en el escenario futuro SSP585, hay una menor superficie de ecosistemas de campo natural categorizados como conservación pasiva (C1) que para el escenario SSP245. También se observa la reducción de la superficie de estos ecosistemas con categoría de restauración activa e intensiva (R1 y R2). Por el contrario, para la categoría de conservación activa (C2) hay una mayor superficie de ecosistemas de campo natural para el escenario SSP585 que para el escenario SSP245. En cuanto al ecosistema de bosque nativo se refiere, los resultados son similares: se observa una menor superficie de ecosistema con categoría de conservación activa¹.

¹ Conservación pasiva (C1): consiste en proteger ecosistemas minimizando la intervención humana, dejando que los procesos naturales sigan su curso.

Conservación activa (C2): implica acciones directas para proteger y gestionar ecosistemas, como la restauración de hábitats o el control de especies invasoras.

Restauración activa de ecosistemas (R1): involucra la intervención directa para recuperar ecosistemas degradados, como reforestar o reintroducir especies nativas.

Restauración intensiva de ecosistemas (R2): es una restauración más especializada y controlada, con técnicas intensivas para recuperar rápidamente ecosistemas muy dañados.



6. CONCLUSIONES

Los resultados del análisis de las SbN definidas para el área de Durazno sugieren una reducción generalizada en la capacidad de los ecosistemas para proporcionar los servicios evaluados en el escenario de cambio climático más severo (SSP585). La superficie de las áreas de campo categorizadas como conservación pasiva (C1) se reducen cerca de un 20% en el escenario SSP585 respecto al SSP245, mientras que las categorizadas como de restauración activa (R1) e intensiva (R2) se reducen en un 40% y un 25% respectivamente. Respecto a la categoría de conservación activa (C2) el área de SbN modelada para el escenario SSP585 es entorno al 80% mayor que para el escenario SSP245, lo cual se justifica porque esta categoría implica que la aptitud hidroclimática actual del ecosistema analizado sea buena, pero que a futuro será mala, y dado que el escenario SSP585 representa un escenario más desfavorable en comparación con el escenario SSP245, es coherente observar que hay más zonas con este potencial dicho escenario.

Esta disminución en la superficie de ecosistemas capaces de proporcionar servicios ecosistémicos en escenario futuro más severo subraya la importancia de implementar medidas de mitigación y adaptación para conservar y restaurar los ecosistemas naturales. Esto resalta la necesidad de acciones de conservación y restauración efectivas para contrarrestar los efectos negativos del cambio climático en la capacidad de los ecosistemas para proporcionar servicios esenciales. Estos resultados subrayan la importancia de abordar el deterioro proyectado de los servicios ecosistémicos en un escenario futuro más severo y la necesidad de estrategias de adaptación y conservación que aborden eficazmente estos desafíos.

7. RECOMENDACIONES

El proceso llevado a cabo para la evaluación de ecosistemas en el ámbito del Plan de la Ciudad de Durazno ha dado lugar a la identificación de una serie de carencias en la información disponible y recomendaciones para futuros estudios de la misma naturaleza.

Respecto al análisis de la provisión de Servicios Ecosistémicos clave a la ciudad por parte de los ecosistemas del entorno y de la cuenca drenante, es conveniente disponer de la información más detallada posible de usos y ocupación del suelo. Concretamente, para la categoría de campo natural es recomendable poder diferenciar entre los pastizales secos y los pastizales húmedos. Respecto a la categoría de bosque nativo, es aconsejable para futuros análisis poder discriminar entre los diferentes tipos de bosque (de galería, serranos, palmares, pasmófilos, etc.).



8. BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez-Martínez, J. y otros, 2018. Modelling the area of occupancy of habitat types with remote sensing.. *Methods in Ecology and Evolution*, 9(3), pp. 580-593.
- Arenas-Castro, S., Regos, A. & González-Moreno, P., 2018. Modelos de distribución de especies en ecosistemas. En: *Geomática, Teledetección y Modelos Espaciales Aplicados a la Gestión de Sistemas Forestales*. s.l.:GEOFOREST, p. Capítulo 18.
- Barreiro, M., Arizmendi, F. & Trinchín, R., 2020. *Proyecciones climáticas con reducción de escala sobre Uruguay*, s.l.: s.n.
- Beleño, E., Bolívar, G. & Jiménez-Pitre, I., 2022. Riesgos relacionados con el cambio climático de la flora y fauna asociada a bosques de manglar en el Caribe colombiano. *Intropica*, pp. 290-300.
- Cavalli, M., Trevisani, S., Comiti, F. & Marchi, L., 2013. Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments.. *Geomorphology*, Volumen 188, pp. 31-41.
- Chausson, A. y otros, 2020. Mapping the effectiveness of nature-based solutions for climate change adaptation. *Global Change Biology*, 26(11), pp. 6134-6155.
- Cutler, D. y otros, 2007. Random forests for classification in ecology.. *Ecology*, 11(88), pp. 2783 - 2792.
- Daily, G. y otros, 1997. Ecosystem Services: Benefits Supplied to Human Societies by Natural Ecosystems. *Issues in Ecology - Spring*, 1(2), pp. 1-18.
- De Groot, R., Wilson, M. & Boumans, R., 2002. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological economics*, 41(3), pp. 393-408.
- Dunne, T., Zhang, W. & Abury, B., 1991. Effects of Rainfall, Vegetation, and Microtopography on Infiltration and Runoff. *Water resources research*, 27(9), pp. 2271-2285.
- Espinosa-Zuñiga, J., 2020. Aplicación de algoritmos Random Forest y XGBoost en una base de solicitudes de tarjetas de crédito. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 21(3).
- Gaitan, J. y otros, 2021. La variación temporal del índice NDVI predice los cambios temporales de la cobertura vegetal en las tierras secas de la Patagonia argentina. *Ecosistemas*, 30(3).
- Ghofrani, Z., Sposito, V. & Faggian, R., 2017. A comprehensive review of blue-green infrastructure concepts. *International Journal of Environment and Sustainability*, 6(1).
- Guisan, A. & Thuilleer, W., 2005. Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology Letters*, 8(9), pp. 993-1009.
- Guo, L. y otros, 2020. Revealing the fingerprint of climate change in interannual NDVI variability among biomes. *Remote Sensing*, 12(8).
- Hein, L., Van Koppen, K., de Groot, R. & van Earland, E., 2006. Spatianscales, stakeholders and thevaluation of ecosystemservices. *Ecological Economics*, 57(2), pp. 209-228.
- Hernández-Romero, G. y otros, 2022. From forest dynamics to wetland siltation in mountainous landscapes: A RS-based framework for enhancing erosion control. *Remote Sensing*, 14(8).
- Hopp, L. & Mcdonnell, J., 2009. Connectivity at the hillslope scale : Identifying interactions between storm size , bedrock permeability , slope angle and soil depth. *Journal of Hydrology*, Volumen 376, pp. 378-391.
- Maetens, W. y otros, 2012. Effects of land use on annual runoff and soil loss in Europe and the Mediterranean: A meta-analysis of plot data.. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 36(5).
- Parruelo, J., Epstein, H., Lauenroth, W. & Burke, I., 1997. ANPP estimates from NDVI for the central grassland region of the United States. *Ecology*, 78(3), pp. 953-958.
- Pérez-Silos, I., Álvarez-Martínez, J. & Barquín, J., 2021. Large-scale afforestation for ecosystem service provisioning: learning from the past to improve the future. *Landscape Ecology*, Volumen 36, pp. 3329-3343.

Ponce, B. & Hawkins, R., 1996. Runoff curve number: Has it reached maturity?. *Hydrological Engineering*, Volumen 1.

Sekercioglu, C., 2014. Ecosystem functions and services. En: N. Sodhi & P. Ehrlich, edits. *Conservation Biology for all*. Oxford: Oxford University Press, pp. 45-72.

Sinha, P. y otros, 2019. Assessing the spatial sensitivity of a random forest model: Application in gridded population modeling.. *Computers, Environment and Urban Systems*, Volumen 75, pp. 132-145.

Ward, R., Friess, D., Day, R. & McKenzie, R., 2016. Impacts of climate change on mangrove ecosystems: a region by region overview. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2(4).

Zhong, Z., Li, J., Clausi, D. & Wong, A., 2019. Generative adversarial networks and conditional random fields for hyperspectral image classification.. *IEEE transactions on cybernetics*, 50(7), pp. 3318-3329.