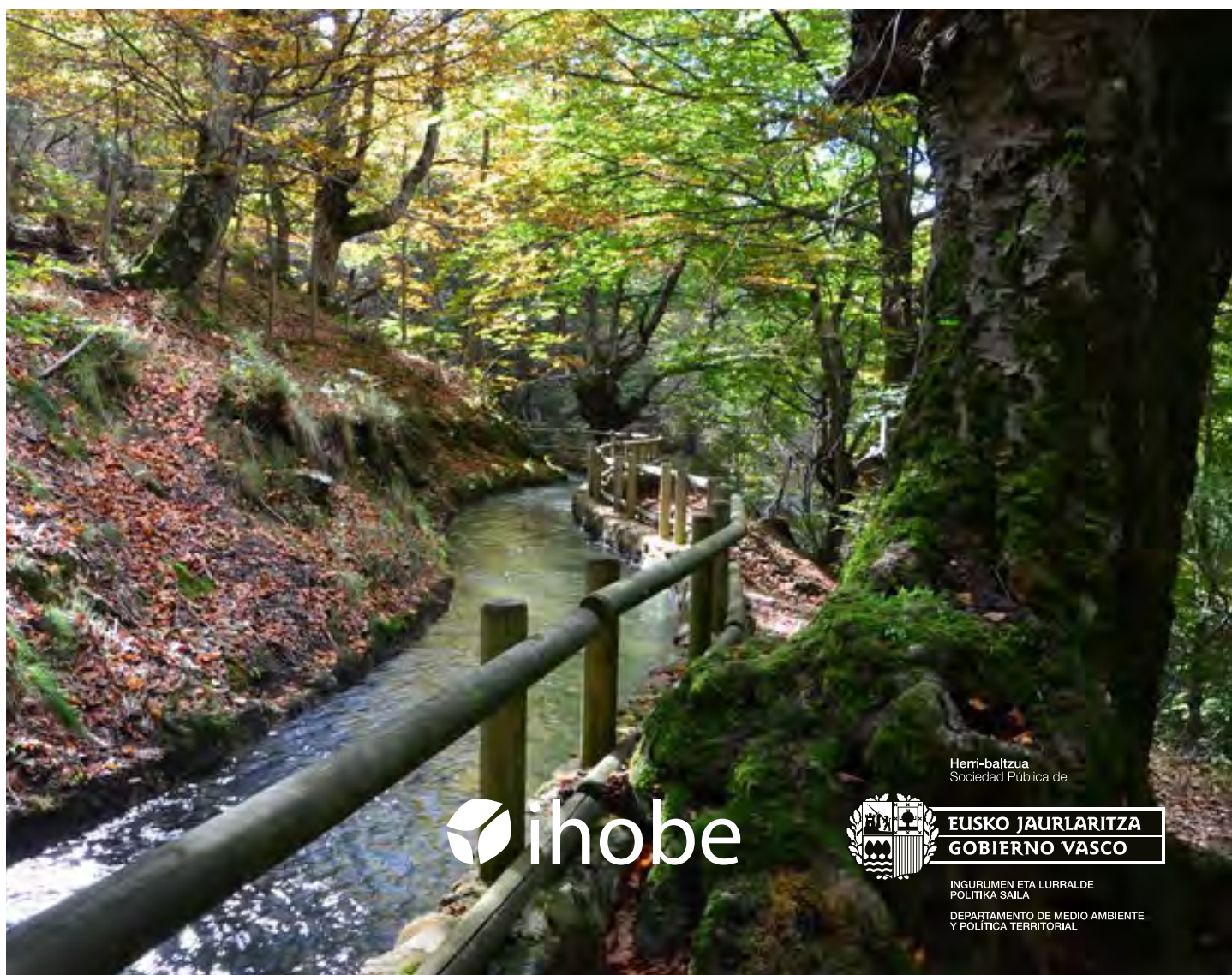


Vulnerabilidad hídrica: de las tendencias del pasado reciente a las del futuro

Adaptación a nuevos escenarios hidrológicos



Vulnerabilidad hídrica: de las tendencias del pasado reciente a las del futuro

Adaptación a nuevos escenarios hidrológicos



Ihobe, Ingurumen Jarduketarako Sozietate Publikoa
Ihobe, Sociedad Pública de Gestión Ambiental

EDITA:

Ihobe, Sociedad Pública de Gestión Ambiental
Departamento de Medio Ambiente, Planificación Territorial y Vivienda
Gobierno Vasco

Alda. de Urquijo n.º 36-6.^a (Plaza Bizkaia)
48011 Bilbao

info@ihobe.eus | www.ihobe.eus
www.ingurumena.eus

EDICIÓN:

Abril 2017

CONTENIDO:

Este documento ha sido elaborado por el Grupo de Investigación de la Universidad del País Vasco-Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU) «Procesos Hidro-Ambientales» (Iñaki Antigüedad (coordinador), Ane Zabaleta, Maite Meaurio, Tomas Morales, Ane Epelde y Jesus Uriarte), gracias a la financiación recibida en el marco de la convocatoria 2016 de Ayudas Klimatek I+B+G para la realización de proyectos I+D, Innovación y demostración en adaptación al cambio climático.



Los contenidos de este documento, en la presente edición, se publican bajo la licencia:
Reconocimiento – No comercial – Sin obras derivadas 3.0 Unported de Creative Commons
(más información http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/deed.es_ES)

INDICE

GLOSARIO	3
1 INTRODUCCIÓN.....	4
2 OBJETIVOS.....	8
3 TENDENCIAS PASADAS.....	9
3.1 Área de estudio	9
3.2 Datos disponibles	9
3.3 Metodología	12
3.3.1 Análisis de lagunas	12
3.3.2 Análisis de cambios bruscos	12
3.3.3 Selección de periodos de estudio.....	13
3.3.4 Parámetros a calcular	13
3.3.5 Análisis de tendencias	14
3.3.6 Presentación de los resultados de los análisis de tendencias	15
3.4 Resultados.....	18
3.4.1 Procesamiento de las series de caudal medio diario	18
3.4.2 Tendencias en las series de caudal.....	24
3.5 Conclusiones: Integración de resultados	38
4 TENDENCIAS FUTURAS	42
4.1 Área de estudio	42
4.2 Metodología	43
4.2.1 Introducción al modelo hidrológico	43
4.2.2 Caracterización física del medio	44
4.2.3 Datos de entrada del modelo: precipitación y temperatura.....	46
4.2.4 Calibración, validación y evaluación de la modelización hidrológica	48
4.2.5 Evaluación de la influencia del uso del suelo en los recursos hídricos.....	50
4.2.6 Selección de los escenarios climáticos	52
4.2.7 Evaluación del impacto de las proyecciones climáticas en los recursos hídricos.....	55
4.3 Resultados.....	55
4.3.1 Calibración validación e incertidumbre de la modelización hidrológica	55
4.3.2 Impacto hidrológico de las proyecciones climáticas futuras: escala anual y estacional (2011-2100).57	
4.3.3 Impacto hidrológico de los escenarios climáticos futuros: tendencias de caudales medios (Qm) y bajos (Q20, duración y severidad)	62
4.3.4 Influencia del uso del suelo en los recursos hídricos	64
4.4 Conclusiones	69
5 CONCLUSIONES.....	72
6 BIBLIOGRAFÍA	77

ANEXO 1. Mapas de tendencias pasadas

ANEXO 2. Gráficos de calibración/validación de los sub-modelos de Audikana y Otxandio

ANEXO 3. Diferencias (%) de las proyecciones hidrologicas respecto a su baseline

GLOSARIO

Año hidrológico: Se considera que el año hidrológico comienza con las primeras lluvias tras el estiaje y termina con el final del siguiente estiaje. En la CAPV el año hidrológico oficial comienza el 1 de octubre de un año y termina el 30 de septiembre del siguiente año natural. En este documento los datos han sido tratados por años hidrológicos.

Estaciones del año: En este documento las estaciones del año comprenden periodos de tres meses completos, así el Otoño se refiere a los meses de octubre, noviembre y diciembre, el Invierno, a los de enero, febrero y marzo, la Primavera, a los meses de abril, mayo y junio y el Verano, a los de julio, agosto y septiembre.

Downscaling o reducción de escala: se trata de la aplicación de técnicas de regionalización de los MGC para obtener resultados a menor escala espacial, necesarios para el análisis de los posibles impactos. Las técnicas de regionalización se agrupan en dos grandes grupos: estadísticas y dinámicas.

Downscaling estadístico o método de reducción de escala estadístico: se basa en modelos que relacionan de forma empírica las variables de circulación a gran escala (predictores), dadas por los modelos generales de circulación (MGC), con las variables locales observadas en superficie (predictandos; típicamente temperatura y precipitación).

Modelos Generales de Circulación (MGC) o General Circulation Models (GCMs): son modelos numéricos que representan los procesos físicos de la atmósfera, hidrosfera, criosfera, biosfera y litosfera. Se basan en la resolución de ecuaciones de cada componente del sistema y los intercambios de masa que se producen entre ellos. Estos modelos proporcionan datos climáticos (precipitación y temperatura, entre otros) para diferentes horizontes temporales.

Resiliencia hidrológica: capacidad, de una población o un territorio, para hacer frente a situaciones adversas respecto a la disponibilidad futura de recursos hídricos.

Trayectorias de concentración representativa o Representative Concentration Pathways (RCPs): definen el forzamiento radiativo estimado hasta el año 2100 en relación a 1750. Este parámetro indica el cambio de flujo neto de energía radiativa hacia la superficie de la Tierra que ocurre por cambios en la composición de la atmósfera, o cambios en el aporte de energía solar. En este informe se trabaja con el escenario de *mitigación (RCP 4.5)* y el escenario de *altas emisiones (RCP 8.5)*.

1 INTRODUCCIÓN

Como primer punto de este informe, resulta necesario contextualizar el enfoque del mismo, ya que, este enfoque puede en sí mismo ser considerado como innovador a la hora de entender el reto al que nos enfrentamos en el Cambio Climático, al menos cuando lo hacemos desde la visión AGUA, visión, además, imprescindible.

En el documento “Estrategia de Cambio Climático 2050 del País Vasco, KLIMA 2050”, presentado por el Gobierno Vasco en noviembre de 2015 en el Kursaal (Donostia/San Sebastián) se estructura la actuación frente al cambio climático en dos vertientes: Mitigación (Ekiditzea), contribuir a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera, y Adaptación (Egokitzea), tendente a adaptarse a los efectos esperables del cambio. La figura 1.1, del citado documento, refleja la integración de ambas políticas. Se ha encuadrado el ámbito de la convocatoria KLIMATEK: “Innovación y demostración en Adaptación al Cambio Climático”.

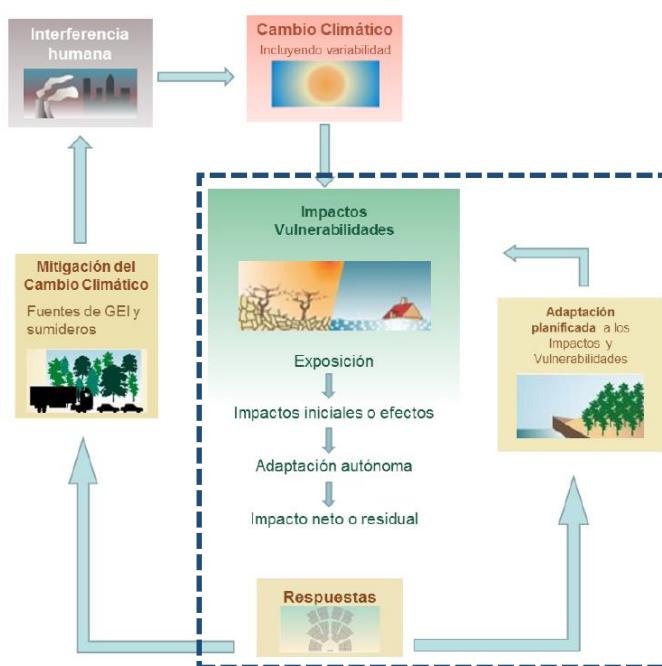


Figura 1.1: Integración de políticas de mitigación y adaptación al Cambio Climático (Estrategia de Cambio Climático 2050 del País Vasco, 2015).

Es importante resaltar que la Adaptación, y la planificación de sus medidas, se basan en el conocimiento de los “impactos” y “vulnerabilidades” esperables en un territorio en los posibles escenarios futuros. La “vulnerabilidad” se puede definir como la susceptibilidad de los sistemas (naturales, sociales) ante “impactos” (efectos) por causas naturales (variabilidad climática) o inducidos por el hombre (cambio climático), que provocan un cambio en el “estado” de los sistemas, que a su vez origina consecuencias dentro de una cascada de efectos. En la continua necesidad que tenemos de ir aclarando la terminología al uso en materia de Cambio Climático, parece oportuno diferenciar también conceptos que con frecuencia se mezclan. Así Riesgo es el producto de la Probabilidad de ocurrencia de un fenómeno adverso por los Daños de todo tipo que se originarían si el fenómeno llega a ocurrir.

Esta introducción tiene un objetivo claro, más práctico que académico. Actuar en términos de Adaptación supone, previamente, conocer de forma adecuada la dinámica del sistema (Territorio) al que nos debemos adaptar (ahí entra vulnerabilidad, impacto); y esta dinámica es evolutiva en el tiempo, y

sometida a una enorme dosis de *incertidumbre* (aquí entra la probabilidad de ocurrencia), como lo atestiguan los propios criterios estadísticos usuales en los informes de evaluación del IPCC.

Es más, si los futuros escenarios climáticos, para distintos horizontes temporales a lo largo del siglo XXI, que se derivan de los Modelos de Circulación General al uso, aceptados por las Agencias correspondientes, son bastante variables de un modelo a otro (incluyendo el tipo de downscaling utilizado), es mucho mayor la variabilidad cuando nos referimos a lo que podríamos llamar “escenarios hidrológicos”, en referencia a los regímenes hídricos esperables en los ríos de nuestro Territorio en esos horizontes (considerando no sólo caudales medios, de interés en la gestión de recursos -embalses, por ejemplo-, sino también bajos -condicionantes básicos del buen estado ecológico de las masas de agua- y altos -ligados a riesgo de avenidas-), ya que a la propia *incertidumbre* de los modelos climáticos hay que añadirle la derivada de los propios modelos hidrológicos utilizados en la simulación/predicción (figura 1.2).

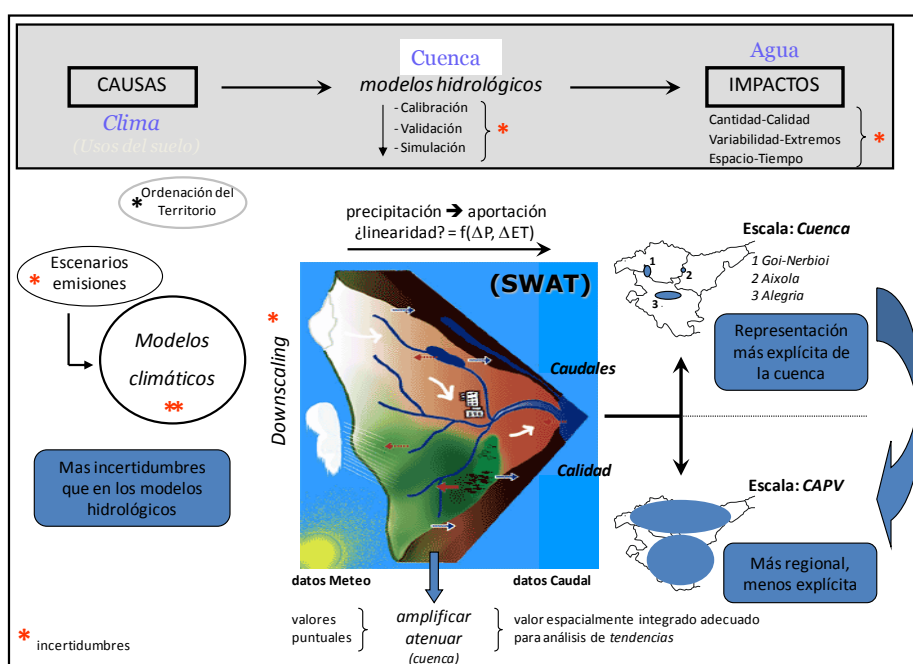


Figura 1.2: *Ámbito conceptual de las relaciones causa-impacto, con especial énfasis en las incertidumbres (traducido del euskera, en Zabaleta y Antigüedad, 2012).*

Desde el ámbito de la investigación del Grupo de “Procesos Hidro-Ambientales” de la UPV/EHU (Grupo Consolidado Gobierno Vasco IT1029/16) sobre las consecuencias que el cambio climático, y la propia variabilidad climática, pueden traer en la dinámica de nuestros ríos y cuencas, incluyendo la ya producida, parece fundamental profundizar, no sólo en la “aplicación del conocimiento” sino también en la propia generación del mismo, con nuevas “metodologías”. De hecho, en lo que se refiere a la investigación sobre las consecuencias hidrológicas del Cambio Climático es muy poco lo que en el País Vasco se ha realizado, aunque otros ámbitos del Cambio estén más avanzados por una u otra razón. Es este un aspecto clave del presente informe.

Es más, en la propia estrategia vasca KLIMA 2050 en los “principales impactos esperados del cambio climático en Euskadi” (página 25), se habla de pronósticos de reducción del coeficiente de aportaciones (caudales) en las cuencas, basado en “trabajos desarrollados a nivel estatal”, limitando los “estudios locales” a los efectos del Cambio en el riesgo de inundación. Se habla, además, de las afecciones que el cambio puede tener en los sectores agrícola y forestal, pero en términos de consecuencias a sufrir por el cambio, y no en términos de causas, en el sentido de que la gestión de esos sectores puede generar

efectos hidrológicos añadidos en las cuencas, en una secuencia de retroalimentaciones (cascada de efectos).

Aun reconociendo, por obvio, el interés inmediato por la predicción en términos de avenidas (caudales punta), por lo que supone de “riesgo” severo a la seguridad de la población, se echa en falta la investigación, en términos de modelización, hidrológica más allá de la hidráulica al uso; es decir, una visión CUENCA del río, más allá de su visión CAUCE. En la visión CUENCA juega un papel esencial el uso dado a los suelos (ocupación del territorio). Como se dice en trabajos previos (Zabaleta y Antigüedad, 2012) el régimen futuro de caudales en los ríos no sólo será consecuencia del cambio climático (precipitaciones -cantidad, distribución, intensidad- y temperaturas) en el territorio concernido, sino que lo será también del cambio en los usos del suelo, tanto los derivados de la propia adaptación de la vegetación a cambios en el clima como los derivados de las decisiones hoy tomadas en la ordenación del territorio. Por eso es que frecuentemente se hable de Cambio Global, tratando de integrar el Cambio Climático y el Cambio en los usos del Suelo.

De hecho, como se puso de manifiesto en un documento (“Implicaciones hidrológicas de la cubierta vegetal”) generado por el Grupo de Investigación de Procesos Hidro-Ambientales en el marco del proyecto K-Egokitzen (Convocatoria ETORTEK, Gobierno Vasco), el territorio cumple una función hidrológica que hay que, primero, conocer, y luego tener en cuenta en las medidas de Adaptación (desde el territorio) y en las de mejora de la resiliencia del territorio. Lamentablemente, esa función no suele ser considerada en la práctica, por ejemplo, en las decisiones de política forestal o de ordenación del territorio. A este hándicap de partida hay que añadir el de la ausencia de una Estrategia Vasca del Suelo, que considere todos los suelos del Territorio y su función hidrológica; estos aspectos fueron objeto de debate en un Curso de Verano de la UPV/EHU (Retos para una Estrategia Vasca del Suelo) dirigido por Iñaki Antigüedad en el año 2014. Recientemente, finales del 2016, IHOBE ha iniciado un proceso para, entre otros aspectos, caminar hacia una estrategia propia del Suelo, algo que resulta esencial en la lucha contra el Cambio Climático.

La importancia de la función hidrológica del Territorio en la modelización hidrológica, en estudios de impacto climático, ha sido evidenciada en muchos estudios. Como referencia, el de Fohrer et al (2005): “At present land use change is still not modeled as a dynamic process and it is assumed to have no effect on soil properties or microclimate. This simplification can lead to significant effects on the modeling results”. Por tanto, resulta necesario distinguir entre “caudales climáticos”, los derivados de la modelización hidrológica que solo considera los efectos previsibles del cambio climático, y “caudales naturales”, derivados de una modelización en la que además del cambio climático se consideran también los efectos de cambios en los usos del suelo (Zabaleta y Antigüedad, 2012). Es este un aspecto importante del presente trabajo, el de la consideración del efecto hidrológico de los usos del suelo en el ámbito de las cuencas objeto de estudio (forestal y agrícola), y que entronca directamente con metas recogidas en la Estrategia KLIMA 2050: aumentar la resiliencia del territorio, tanto del medio natural como del sector primario.

Otro documento reciente a considerar en este encuadre es el Documento Base para la revisión de las Directrices de Ordenación Territorial de la CAPV (Eusko Jaurlaritza, 2015). Entre las cuestiones transversales que se le reconocen a la ordenación territorial está la del Cambio Climático. Se trataría de “asegurar la resiliencia del territorio vasco” a ese cambio, objetivo que “debe reflejarse en la revisión del modelo territorial”. Es aquí donde se incluyen las metas arriba citadas. Ahora bien, hay dos aspectos que no están suficientemente considerados en el planteamiento realizado, en referencia a la Adaptación, y que son claves en el enfoque del presente informe. Por un lado, se considera el territorio como receptor de efectos derivados del cambio climático, pero no tanto como causante añadido de efectos; es decir, desde la visión hidrológica (Agua como recurso vital) es fundamental tener en cuenta que los regímenes hidrológicos futuros no sólo van a depender de aspectos climáticos sino también de aspectos terrenales

(visión CUENCA; efectos hidrológicos de la ordenación del territorio, afectando fundamentalmente a la evapotranspiración y a la capacidad reguladora de las diferentes partes del Territorio). Y, por otro lado, en relación directa con lo anterior, el planteamiento se centra en exceso en el rol de las ciudades, lo cual es obvio en la Mitigación, pero de todo punto insuficiente en la Adaptación, en relación con la disponibilidad de recursos hídricos (vulnerabilidad, impactos...), que necesita la consideración integral del Territorio.

Entre las “orientaciones territoriales” propuestas en ese Documento Base, y en referencia directa a la Estrategia de Cambio Climático, “se propone realizar un proyecto de demostración a escala supramunicipal que incorpore un estudio de vulnerabilidad al cambio climático y mecanismos para la inclusión de medidas de adaptación”. Resulta esencial la realización de tales proyectos, también como aprendizaje de todos los actores del territorio, pero sería fundamental que la escala espacial considerada para ello fuese la Cuenca Hidrológica, por ser la unidad básica natural de ordenación territorial, más aún en el ámbito de los paradigmas de la Sostenibilidad (reto mayor que el del propio Cambio Climático, por afectar a sus causas). Y, también fundamental, la consideración de vulnerabilidad e impactos esperables en el dominio hídrico, que condicionan en gran manera la estrategia de Adaptación.

Desde la perspectiva de investigadores involucrados en temas de cambio climático, resulta obvio que las medidas de Adaptación deben dirigirse, principalmente, al ámbito del Agua, de la misma forma que las de Mitigación se dirigen ya al del Carbono. Así, este informe pretende aportar conocimiento básico para una aproximación a la *resiliencia*, entendida, en sentido general, como la capacidad, de una población o un territorio, para hacer frente a situaciones adversas, y sobre todo a la *resiliencia hidrológica*, término ya recogido en varios documentos del Plan Hidrológico Internacional de la UNESCO. Y a dos niveles: la resiliencia del territorio y la de la población allí asentada, respecto a la disponibilidad futura de recursos hídricos.

En la primera, se trata de aumentar la capacidad reguladora de la cuenca, con medidas de incidencia territorial orientadas a ordenar usos del suelo con visión hidrológica (sobre todo en el sector primario, incluyendo los espacios naturales, por su superioridad territorial). En la segunda, se trata de establecer criterios para los cambios a realizar en la gestión de los servicios del agua como adaptación a escenarios venideros, centrándose en criterios para la gestión de embalses, ya que, en función de esos escenarios, es posible que deban de cumplir otros fines, añadidos a aquéllos para los que fueron previstos; por ejemplo, la posibilidad de tener que suministrar caudales a los ríos en situaciones de déficit de caudal, situación ésta que puede hacerse más frecuente, alargándose desde el Verano hacia el Otoño, como reflejan los estudios hasta ahora realizados (Zabaleta y Antigüedad, 2012).

Como observación final, es necesario tener en cuenta que la profundización en el conocimiento en el ámbito planteado en este informe (la doble resiliencia hidrológica) lleva consigo, inherentemente, una carga de incertidumbre, hasta cierto punto cuantificable con las metodologías adecuadas, que se incorpora a los propios resultados, lo que significa que más que “tangibles” los resultados van a ofrecer una variedad de escenarios “previsibles”, con un muy especial énfasis en el establecimiento de las TENDENCIAS temporales derivadas del análisis de las series de caudales (históricas y simuladas). Son las tendencias las que nos deben importar a la hora de tomar medidas, en un marco de decisión dinámico, a la vez que se continúa con la investigación tendente a reducir cada vez más el ámbito de las incertidumbres. Comprender este hecho por parte de la administración pública es clave.

2 OBJETIVOS

El objetivo principal es dar respuesta, con todas las incertidumbres inherentes, a dos preguntas de enfoque temporal: ¿de dónde venimos?, ¿hacia dónde parece que vamos?, ambas claves para el conocimiento en el que deben sustentarse las medidas de Adaptación. Se ha pretendido aportar conocimiento innovador sobre los escenarios hidrológicos pasados, hasta el presente, y sobre los previsibles escenarios futuros, en este caso limitado a cuencas de la CAPV que se han considerado de referencia por la larga longitud de sus series de caudales.

Respecto a la primera pregunta, si bien en un principio se planteaba el objetivo de cubrir, al menos, el conjunto de la CAPV, con un mínimo de 42 estaciones, la recopilación realmente realizada ha llegado a 164 estaciones, distribuidas en un amplio territorio en el entorno de la CAPV, de las que finalmente han sido analizadas 117. En todas estas series se han identificado las tendencias temporales, a diferentes escalas, y se ha puesto especial énfasis en las tendencias espaciales, agrupando las estaciones por zonas al objeto de analizar posibles tendencias regionales subyacentes.

Respecto a la segunda, se ha utilizado la modelización hidrológica, con el modelo SWAT, para la calibración, validación y simulación de escenarios hidrológicos futuros en dos sub-cuencas de la cuenca del Zadorra (cuencas piloto). La modelización realizada permite la consideración del efecto sobre el régimen de caudales no sólo del cambio climático sino también de cambios en usos del suelo. Se ha tratado de hacer un ejercicio de modelización para poner de manifiesto la importancia hidrológica de la ocupación del suelo, en la línea de lo comentado en la Introducción. Obviamente, esta segunda pregunta está sometida a muchas más incertidumbres que la primera, debido a la incertidumbre propia derivada de los modelos climáticos, en continua evolución.

3 TENDENCIAS PASADAS

3.1 Área de estudio

Aunque en un principio el objetivo de esta parte del estudio planteaba el análisis de las series de caudal de estaciones de la CAPV, con la pretensión de obtener una visión regional más amplia y de poder incluir series de caudales más largas que las existentes en la CAPV, se ha ampliado el área de estudio abarcando, en la costa, gran parte de las cuencas que desembocan en el Golfo de Bizkaia (desde Saja-Besaya en el Oeste hasta Arcachon al Nordeste) y, en el interior, las cuencas del Adour (también vertientes al Golfo) y de la cabecera y parte media del Ebro (figura 3.1). En esta área se han seleccionado un total de 164 estaciones de aforo que podrían tener un mínimo de 20 años de datos hasta el 30 de septiembre de 2015.

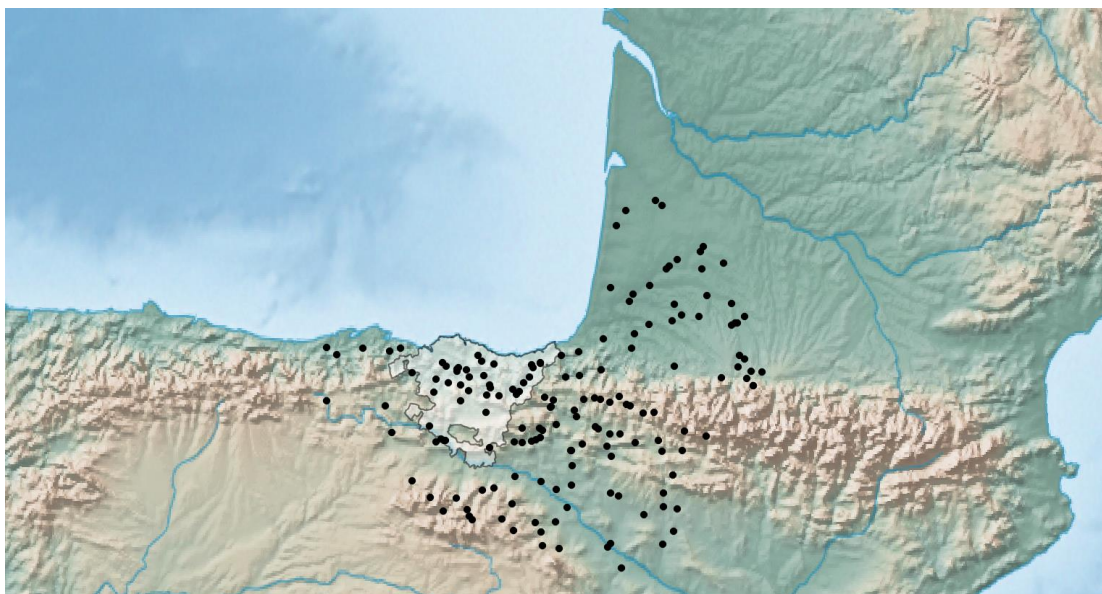


Figura 3.1: Localización de las estaciones de aforo con series de caudal disponibles inicialmente consideradas en el estudio.

3.2 Datos disponibles

Sólo el adecuado estudio matemático de las series de datos, considerando la información disponible de caudales, podrá evidenciar la existencia de tendencias temporales y el signo de las mismas. Las series que se analizan son de caudales diarios de estaciones de aforos controladas por la Diputación Foral de Gipuzkoa (GFA), la de Bizkaia (BFA), la Confederación Hidrográfica del Cantábrico (CHC), la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE), el Gobierno de Navarra (GN), Iberdrola, el Consorcio de Aguas Bilbao-Bizkaia (CAB) y Eau France (DREAL Aquitaine). En la tabla 3.1 se recoge un resumen de las estaciones consideradas (164) en este trabajo, su localización y el organismo que las gestiona.

Tabla 3.1: Resumen de las estaciones de aforo consideradas, su localización y organismo que las gestiona. Se añade su código oficial y la longitud de las series analizadas. Coordenadas en el sistema ETRS89 zona UTM 30N.

Codigo Kodea	Estación (Río) Estazioa (Ibaia)	Superficie cuenca Arroaren azalera	Coord X Coord X	Coord Y Coord Y	provincia probintzia	organismo erakundea	series (años) serieak (urte)
A1Z1	San Prudentzio (Deba)	121.78	544970	4769996	Gipuzkoa	GFA	20
A1Z2	Oñati (Oñati)	105.78	545771	4767675	Gipuzkoa	GFA	-
A1Z3	Urkulu (Urkulu)	9	542977	4762252	Gipuzkoa	GFA	-
A2Z1	Aixola (Aixola)	5.03	540536	4777916	Gipuzkoa	GFA	20
A3Z1	Altzola (Deba)	464.25	548874	4787304	Gipuzkoa	GFA	20
B1T1	Barrendiola (Urola)	3.8	552904	4761311	Gipuzkoa	GFA	20
C1Z2	Estanda (Estanda)	55.02	563595	4766708	Gipuzkoa	GFA	20
C2Z1	Agautza (Agautza)	69.64	567033	4762906	Gipuzkoa	GFA	20
C3Z1	Amundarain (Amundarain)	28.82	569269	4764882	Gipuzkoa	GFA	20
C5Z1	Alegia (Oria)	333.34	572833	4772292	Gipuzkoa	GFA	-
C7Z1	Berastegi (Belauntza)	33.34	577447	4776898	Gipuzkoa	GFA	20
C8Z1	Leitzarain (Leitzarain)	110.01	579978	4784421	Gipuzkoa	GFA	20
D2W1	Ereñozu (Urumea)	218.42	586123	4788021	Gipuzkoa	GFA	20
AR01	Iruzubieta (Artibai)	24	538580	4789618	Bizkaia	BFA	20
IB11	Mañaria (Mañaria)	19	528840	4776829	Bizkaia	BFA	-
IB21	Oromino (Oromino)	22	526365	4782396	Bizkaia	BFA	-
IB32	Urkizu (Arratia)	129.48	518620	4781370	Bizkaia	BFA	20
KD01	Balmaseda (Kadagua)	195	482310	4780490	Bizkaia	BFA	20
LE01	Aulestia (Lea)	39	535907	4794274	Bizkaia	BFA	-
NB01	Saratxo (Nerbioi)	88	499783	4764591	Bizkaia	BFA	20
NB02	Gardea (Nerbioi)	189	501699	4774940	Bizkaia	BFA	20
NB04	Zaratamo (Nerbioi)	509	509916	4785232	Bizkaia	BFA	20
NB05	Abusu (Nerbioi)	1002	507114	4788288	Bizkaia	BFA	20
NB12	Gaiartu (Legorburu)	10	511939	4771995	Bizkaia	BFA	-
UNDC	Undurraga Cabecera	19.4	521423	4770110	Bizkaia	CAB	-
AN 313	Antzin (Ega)	473.37	564751	4723797	Nafarroa	GN	20
AN 314	Murieta (Ega)	559	571594	4723185	Nafarroa	GN	20
AN 322	Barindano (Urederra)	180	571676	4735440	Nafarroa	GN	20
AN 331	Grocín (Iranzu)	64.57	582558	4725565	Nafarroa	GN	20
AN 433	Etxarren (Arakil)	397	594247	4752008	Nafarroa	GN	20
AN 434	Iribas (Larraun)	66.04	589621	4760454	Nafarroa	GN	20
AN 439	Irurtzun (Larraun)	252.6	595050	4752651	Nafarroa	GN	20
AN 520	Otxagabia (Zatoya)	73.3	655829	4754357	Nafarroa	GN	20
AN 530	Murillo de Berroya (Areta)	94	642483	4730568	Nafarroa	GN	20
AN 532	Sorogain (Erro)	24	630085	4759749	Nafarroa	GN	20
AN 533	Espinal (Urrobi)	46.7	634327	4758762	Nafarroa	GN	20
AN 540	Olite (Cidacos)	258.32	611825	4704528	Nafarroa	GN	-
AN 543	Iriberrí (Cemborain)	15.13	620020	4722118	Nafarroa	GN	20
AN 941	Oharriz (Baztan)	139	617359	4777684	Nafarroa	GN	-
AN 942	Elorriaga (Ezkurra)	75.27	606471	4776631	Nafarroa	GN	20
AN 4311	Udabe (Basaburua)	78	596595	4757975	Nafarroa	GN	20
1080	Andoain (Oria)	765	579070	4786632	Gipuzkoa	CHC	20
1105	Ereñozu (Urumea)	215	585932	4788406	Gipuzkoa	CHC	20, 40
1106	Enderlatza (Bidasoá)	681	603040	4794358	Gipuzkoa	CHC	20
1163	Lemona (Ibaizabal)	251	519908	4784351	Bizkaia	CHC	20
1164	Lemona (Arratia)	136	518568	4783179	Bizkaia	CHC	-
1186	Guriezo (Agüera)	112	473297	4800239	Cantabria	CHC	-
1196	Coterillo (Asón)	485	464639	4797560	Cantabria	CHC	20, 40
1207	La Cavada (Miera)	166	442709	4800222	Cantabria	CHC	-
1215	Pente Viesgo (Pas)	357	421551	4794737	Cantabria	CHC	-
1297	Torrelavega (Besaya)	463	413776	4800532	Cantabria	CHC	-
9002	Castejon (Ebro)	25194	607794	4670595	Nafarroa	CHE	20, 40, 60
9003	Andosilla (Ega)	1445	586537	4691836	Nafarroa	CHE	-
9004	Funes (Arga)	2759	598794	4685419	Nafarroa	CHE	-
9005	Caparroso (Aragón)	5469	611114	4688811	Nafarroa	CHE	20
9006	Marañón (Ega)	87	545158	4719632	Nafarroa	CHE	-
9012	Ardisa (Gállego)	2040	685617	4671615	Huesca	CHE	-
9018	Jaca (Aragón)	238	700710	4716908	Huesca	CHE	20, 40, 60
9026	Arroyo (Ebro)	469	413674	4757216	Nafarroa	CHE	20, 40
9034	Mansilla (Nejerrilla)	242	507714	4667722	La Rioja	CHE	20, 40, 60
9035	Villoslada de Cameros (Iregua)	285	528657	4663808	La Rioja	CHE	20, 40, 60

Codigo Kodea	Estación (Río) Estazioa (Ibaia)	Superficie cuenca Arroaren azalera	Coord X Coord X	Coord Y Coord Y	provincia probintzia	organismo erakundea	series (años) serieak (urte)
9036	Islallana (Iregua)	573	539078	4685153	La Rioja	CHE	20, 40, 60
9039	Ortigosa (Albercos)	45	527130	4669027	La Rioja	CHE	20, 40
9043	San Pedro Manrique (Linares)	105	564330	4652227	Soria	CHE	-
9044	Yanguas (Cidacos)	223	555212	4661621	Soria	CHE	-
9048	Anguiano (Najerilla)	541	518304	4678244	La Rioja	CHE	-
9049	Débanos (Añamaza)	150	587724	4639707	Soria	CHE	-
9059	Sta. Eulalia de Gállego (Gállego)	1901	685467	4682264	Zaragoza	CHE	20
9060	Gallur (Arba de Luesia)	2249	640579	4638484	Zaragoza	CHE	-
9061	Javierregay (Subordán)	348	684303	4716256	Huesca	CHE	20
9062	Biniés (Verál)	161	681461	4724956	Huesca	CHE	20
9063	Sigües (Esca)	506	662955	4723305	Nafarroa	CHE	20
9064	Aspurz (Salazar)	396	650647	4730723	Nafarroa	CHE	20, 40
9065	Liedena (Irati)	1546	639828	4720436	Nafarroa	CHE	-
9066	Arive (Irati)	236	642301	4756298	Nafarroa	CHE	-
9067	Olave (Ulzama)	240	613772	4749604	Nafarroa	CHE	-
9069	Echauri (Arga)	1756	598966	4738295	Nafarroa	CHE	20
9071	Estella (Ega I)	943	578998	4724753	Nafarroa	CHE	-
9073	Sangüesa (Onsella)	275	643237	4712534	Nafarroa	CHE	20
9074	Artze (Zadorra)	1357	508458	4724993	Burgos	CHE	20, 40, 60
9075	Berantevilla (Ayuda)	307	509497	4725369	Araba	CHE	20
9076	Orbaizeta (Irati)	127	649706	4760737	Nafarroa	CHE	20
9078	Garinoain (Cemborain)	47	611312	4716804	Nafarroa	CHE	20, 40, 60
9079	Urroz (Erro)	180	630354	4736555	Nafarroa	CHE	20, 40, 60
9080	Zuriza (Verál)	47	678062	4747864	Huesca	CHE	20
9084	Alloz (Salado)	132	586214	4727366	Nafarroa	CHE	20
9085	Riezu (Ubagua edo Inaroz)	14	585541	4735265	Nafarroa	CHE	20
9086	Barasoain (Zidacos)	76	610723	4717280	Nafarroa	CHE	20, 40, 60
9087	Grisén (Jalón)	9694	651716	4621730	Zaragoza	CHE	-
9093	Oña (Oca)	1051	466115	4731506	Burgos	CHE	20, 40
9120	Mendavia (Ebro)	12010	565371	4696240	Nafarroa	CHE	20, 40, 60
9123	Anzánigo (Gállego)	1391	693266	4697324	Huesca	CHE	20, 40
9139	Igea (Linares)	326	581787	4658524	La Rioja	CHE	-
9142	Lumbreras (Lumbreras)	113	531248	4660966	La Rioja	CHE	20, 40, 60
9150	Estenoz (Salado)	28	587899	4733313	Nafarroa	CHE	20
9152	Eugi (Arga)	69	621120	4758574	Nafarroa	CHE	20, 40
9155	Biota (Arba de Luesia)	144	649139	4680293	Zaragoza	CHE	20, 40
9157	Azarrulla (Glera edo Oja)	74	497236	4678931	La Rioja	CHE	20
9158	San Miguel de Pedroso (Tirón)	192	482449	4692695	Burgos	CHE	20
9159	Huarte (Arga)	178	615285	4744247	Nafarroa	CHE	-
9165	Miranda de Ebro (Bayas)	318	505895	4726284	Burgos	CHE	20
9174	Los Fayos (Queiles)	194	601094	4637225	Zaragoza	CHE	-
9185	Citruénigo (Alhama)	1120	598270	4659333	Nafarroa	CHE	20
9186	Sádaba (Arba de Riguel)	570	642556	4682339	Zaragoza	CHE	20
9187	Erla (Arba de Biel)	336	669792	4664725	Zaragoza	CHE	20
9188	Bergenda (Omeçillo)	350	496344	4736791	Araba	CHE	20
9189	Oron (Oroncillo edo Grillera)	217	501686	4724242	Burgos	CHE	20
9197	Leza de Río Leza (Leza)	283	548792	4686624	La Rioja	CHE	20
9221	Larrinoa (Subialde edo Zaya)	22	521862	4757556	Araba	CHE	20
9229	Zuera (Barranco La Violada)	3251	684678	4641135	Zaragoza	CHE	-
9230	La Pardina (Barranco La Violada)	202	693819	4651798	Huesca	CHE	20
9250	Búbal (Gállego)	298	719906	4728769	Huesca	CHE	20
9251	Cervera del Río Alhama (Alhama)	299	586835	4651098	La Rioja	CHE	-
9253	Arnedillo (Cidacos)	405	563268	4673820	La Rioja	CHE	-
9254	Medina de Pomar (Trueba9)	465	460805	4753177	Burgos	CHE	20
9255	Ortilla (Sotón)	200	696355	4669523	Huesca	CHE	20
9259	Izalzu (Anduña)	49	658739	4753066	Nafarroa	CHE	-
9260	Tauste (Arba de Luesia)	2193	642635	4641543	Zaragoza	CHE	-
9264	Aos (Irati)	739	632718	4734408	Nafarroa	CHE	-
9268	Isaba (Esca)	188	669316	4747262	Nafarroa	CHE	20
9271	Canfranc Antiguo (Aragón)	101	702638	4732667	Huesca	CHE	20
H152	Audikana (Audikana)	80	542140	4748300	Araba	Iberdrola	20, 40
H153	Otxandio (Otxandio)	33	527925	4765525	Bizkaia	Iberdrola	20
Q0100010	Pont d'Asté (L'Adour)	272	757736	4769822	Hautes-Pyrénées	DREAL Aquitaine	20, 40, 60, 95
Q0100025	Pont d'Asté (L'Adour (Adour+canal	272	757780	4769736	Hautes-Pyrénées	DREAL Aquitaine	20, 40, 60
Q0115710	Trébons (L'Oussouet)	32	752557	4775494	Hautes-Pyrénées	DREAL Aquitaine	20
Q0120060	Tarbes (L'Adour)	402	750815	4791206	Hautes-Pyrénées	DREAL Aquitaine	20
Q0214010	Louey (L'Échez)	89.6	745634	4784741	Hautes-Pyrénées	DREAL Aquitaine	20, 40

Codigo Kodea	Estación (Río) Estazioa (Ibaia)	Superficie cuenca Arroaren azalera	Coord X Coord X	Coord Y Coord Y	provincia probintzia	organismo erakundea	series (años) serieak (urte)
Q0224020	Bordères-sur-l'Échez (L'Échez)	168	747136	4794086	Hautes-Pyrénées	DREAL Aquitaine	20, 40
Q0280030	Estirac (L'Adour)	906	744873	4820608	Hautes-Pyrénées	DREAL Aquitaine	20
Q0414010	Sombrun (Le Louet)	84.3	740709	4818570	Hautes-Pyrénées	DREAL Aquitaine	20, 40
Q0435010	Villefranque (La Laysa)	0	743544	4820615	Hautes-Pyrénées	DREAL Aquitaine	20
Q0450010	Cahuzac-sur-Adour (L'Adour)	1290	740405	4836302	Gers	DREAL Aquitaine	20
Q0522520	Gourgue (L'Arros)	173	765097	4780579	Hautes-Pyrénées	DREAL Aquitaine	-
Q0522530	Tournay (L'Arros)	0	776609	4587060	Hautes-Pyrénées	DREAL Aquitaine	-
Q0554010	Vielle-Adour (L'Arret-Darre)	11.6	756391	4781245	Hautes-Pyrénées	DREAL Aquitaine	20, 40
Q0612510	Juillac (L'Arros)	590	751127	4826009	Gers	DREAL Aquitaine	20, 40
Q0740020	Riscle (L'Adour)	2350	715599	5137971	Gers	DREAL Aquitaine	-
Q1100010	Aire-sur-l'Adour (L'Adour)	2930	720604	4842637	Landes	DREAL Aquitaine	20, 40
Q1324010	Poursiugues-Boucoue (Le Gabas)	142	713905	4825806	Pyrénées-Atlantiques	DREAL Aquitaine	20, 40
Q1420010	Audon (L'Adour)	4100	674111	4850812	Landes	DREAL Aquitaine	-
Q2152510	Villeneuve-de-Marsan (La Midour)	600	716496	4864530	Landes	DREAL Aquitaine	-
Q2242910	Cazaubon (La Douze)	217	734269	4868966	Gerz	DREAL Aquitaine	-
Q2292910	Roquefort (La Douze)	450	715583	4878655	Landes	DREAL Aquitaine	-
Q2364010	Arue (L'Estampon)	378	717552	4882737	Landes	DREAL Aquitaine	-
Q2544310	Cère (L'Estrigon)	210	696589	4872192	Landes	DREAL Aquitaine	20
Q2584610	Saint-Martin-d'Oney (Le Geloux)	130	690449	4867060	Landes	DREAL Aquitaine	-
Q2593310	Campagne (La Midouze)	2500	687961	4864264	Landes	DREAL Aquitaine	20, 40
Q3054010	Hagetmau (Le Louts)	89	694175	4835801	Landes	DREAL Aquitaine	20
Q3120010	Saint-Vincent-de-Paul (L'Adour)	7830	661072	4844229	Landes	DREAL Aquitaine	20, 40
Q3224010	Monget (Le Luy de France)	186	700356	4827290	Landes	DREAL Aquitaine	20, 40
Q3354010	Béarn à Saint-Médard (Le Luy)	257	692436	4822399	Pyrénées-Atlantiques	DREAL Aquitaine	20, 40
Q3464010	Saint-Pandelon (Le Luy)	1150	657815	4837827	Landes	DREAL Aquitaine	20, 40
Q4801010	Saint-Pé-de-Bigorre/Pont de Rieulf	1120	732502	4776174	Hautes-Pyrénées	DREAL Aquitaine	20, 40, 60
Q5501010	Bérenx/Pont de Bérenx (Le Gave d	2575	673530	4819551	Pyrénées-Atlantiques	DREAL Aquitaine	20, 40, 60
Q7002910	Oloron-Sainte-Marie/Oloron-SNCF	1085	694340	4785676	Pyrénées-Atlantiques	DREAL Aquitaine	20, 40, 60, 95
Q7412910	Escos (Le Gave d'Oloron)	2456	662288	4811577	Pyrénées-Atlantiques	DREAL Aquitaine	20, 40
Q8032510	à Aïcirits-Camou-Suhast/Saint-Palé	246	659854	4799839	Pyrénées-Atlantiques	DREAL Aquitaine	20, 40, 60
Q8345910	Hasparren (Le Mendialçu)	17.9	636914	4807785	Pyrénées-Atlantiques	DREAL Aquitaine	-
Q9164610	Saint-Étienne-de-Baigorry (La Nive	156	635162	4782632	Pyrénées-Atlantiques	DREAL Aquitaine	20, 40, 60, 95
S2134010	Belhade (La Petite Leyre)	403	684276	4916086	Landes	DREAL Aquitaine	20
S2224610	Moustey/Biganon (Le Grand Arriou	108	678967	4919953	Landes	DREAL Aquitaine	20, 40
S3124310	Parentis-en-Born/Les Espalanques	95.1	654876	4912105	Landes	DREAL Aquitaine	-
S3214010	Saint-Paul-en-Born/Talucat (Le Car	155	647619	4899494	Landes	DREAL Aquitaine	20
S4214010	Magescq (Le Magescq)	60	642818	4849102	Landes	DREAL Aquitaine	20, 40
S5144010	Saint-Pée-sur-Nivelle (La Nivelle)	138	617103	4797192	Pyrénées-Atlantiques	DREAL Aquitaine	20

3.3 Metodología

Con el fin de determinar la existencia o no de tendencias, y su correspondiente signo, en las series históricas de caudal, se ha seguido la siguiente metodología:

3.3.1 Análisis de lagunas

El primer paso ha sido realizar un análisis de la validez de los datos para el objetivo perseguido. Para ello se han contabilizado los datos válidos existentes en cada uno de los años correspondientes a las series de caudal medio diario de cada estación de aforos (tabla 3.1), de manera que los años con importantes lagunas o errores, y los años anteriores a los mismos, han sido eliminados, y como consecuencia las series que se han visto reducidas a un periodo inferior a 20 años se han desechado para el análisis posterior. Este paso se ha realizado con la ayuda del paquete hydroTSM versión 0.4-2-1 (Zambrano-Bigiarini, 2014) del Software libre R (R Studio, versión 0.98.1087).

3.3.2 Análisis de cambios bruscos

El segundo paso ha sido realizar un análisis de las series válidas definidas para detectar posibles momentos de cambios bruscos en las series, ya que éstos podrían tener una influencia importante en las

tendencias derivadas de las series. La existencia de un posible momento de cambio, en la media de las series, se ha testado mediante el método CUSUM de sumas acumuladas de los cuadrados. En dicho test estadístico no se incluye ninguna asunción sobre la distribución de la serie lo que aporta mayor robustez a los resultados. Para la realización del test de cambio se ha utilizado el paquete changepoint versión 1.1.5 (Killick et al., 2015) del Software libre R (R Studio, versión 0.98.1087).

3.3.3 Selección de periodos de estudio

Una vez eliminadas las series no válidas para el análisis de tendencias, se ha procedido al tercer paso, la selección de periodos temporales para los que se realizarán los análisis de tendencias. La longitud de las series de las estaciones tomadas como válidas es muy diversa, por ello, y conscientes de la influencia del periodo temporal seleccionado en los resultados de los análisis, es necesario que el periodo seleccionado sea homogéneo en todas las series. Sin embargo, la elección de un sólo periodo común llevaría a descartar gran número de estaciones (para periodos largos) o gran número de datos históricos (para un gran número de estaciones). Por ello, se ha optado por analizar los datos para diferentes periodos intentando integrar en los mismos el mayor número de estaciones.

3.3.4 Parámetros a calcular

El siguiente paso ha sido la generación de series a diferentes escalas temporales para cada una de las longitudes temporales previamente seleccionadas. Teniendo en cuenta la importancia ya mencionada de los caudales bajos, se han extraído de las series de datos de caudal, además de los valores medios (Q_m), los siguientes parámetros para su posterior análisis (figura 3.2):

- Duración (D): **período de tiempo (días) con valores de caudal por debajo de Q20.**
- Severidad (S): **déficit de caudal, volumen por debajo de Q20 en el periodo de tiempo.**

donde, Q20 (percentil 0.2) se ha considerado como el caudal medio diario que es excedido en el 80 % de los días en la serie de datos. Q20 es un valor único para cada una de las series consideradas.

Así, se han calculado los valores medios y valores de aguas bajas (duración y severidad de los caudales bajos) y se han generado las series a analizar a diferentes escalas temporales: primero a escala diaria (365 valores al año), mensual (12 valores al año), estacional (4 valores al año) y anual (un valor por año, el medio diario) y después, con el objetivo de detectar cuáles son las épocas del año más sensibles, en lo que respecta a las tendencias observadas, por estaciones (Invierno: enero-marzo, Primavera: abril-junio, Verano: julio-septiembre, Otoño: octubre-diciembre; para cada estación 1 dato por año), e incluso mes a mes (series constituidas por un valor (medio, D o S) para cada mes en cada año: serie de enero, de febrero...). Todas estas series se han calculado para todos los periodos de tiempo considerados en el paso anterior.

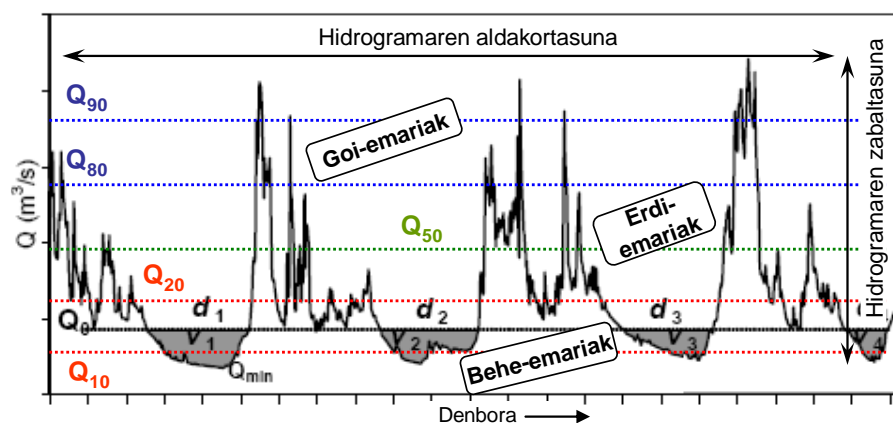


Figura 3.2: Tramos de caudal del hidrograma y percentiles asociados (Q). Se incluyen la duración de caudales bajos (D , días, d) y su severidad (S , déficit volumétrico, v), (Zabaleta y Antiguada, 2012). En este estudio, en lugar del Q_{50} (percentil 50 o mediana) se ha calculado el caudal medio (Q_m).

Estos mismos parámetros, Q_m , y duración y severidad del Q_{20} , han sido analizados para las proyecciones hidrológicas futuras, en el apartado 4.3.4 del presente informe.

3.3.5 Análisis de tendencias

Una vez generadas las series se ha procedido al análisis de las posibles tendencias en las mismas. El test utilizado para la detección de tendencias en las series generadas ha sido el ampliamente utilizado Mann-Kendall. La detección de tendencias depende en gran medida de la existencia o no de autocorrelación en las series estudiadas, es decir, del nivel de dependencia de un dato de los anteriores. En el caso del caudal, generalmente, el caudal de un momento en concreto depende en gran medida de los caudales y de su evolución en los días previos, por ello, las series de caudal suelen mostrar una fuerte autocorrelación. Para eliminar la posible influencia de esa autocorrelación en los resultados del análisis, antes de aplicar el test se elimina la posible autocorrelación que puede existir en las series, mediante el método propuesto por Yue et al. (2002).

En este método la pendiente de la tendencia se estima mediante la aproximación de Theil-Sen; si ésta es muy cercana a cero no es necesario realizar el análisis de tendencias (ya que se asume que no existe tendencia), si se separa de cero se asume que esa tendencia es lineal, se elimina la tendencia de la serie mediante la pendiente obtenida y se calcula la autocorrelación a paso de tiempo 1 de la serie sin tendencia. Este procedimiento se conoce como Trend Free Pre-whitening (TFPW). La serie residual, una vez eliminada la autocorrelación, debería ser una serie independiente. Para finalizar, se unen esta serie independiente y la tendencia estimada al comienzo del procedimiento, para aplicar el test de Mann-Kendall a esta nueva serie y evaluar la significancia estadística de la tendencia. El test de tendencias se ha realizado con la ayuda del paquete zyp versión 0.10-1 (Bronaugh y Werner, 2014) del Software libre R (R Studio, versión 0.98.1087). Una vez aplicado el test se han obtenido los siguientes resultados para cada análisis:

- lbound: el límite inferior de la banda de confianza de la tendencia
- trend: la pendiente de Sen (tendencia) por unidad de tiempo
- trendp: la pendiente de Sen (tendencia) para la totalidad del periodo estudiado
- ubound: el límite superior de la banda de confianza de la tendencia
- tau: el estadístico de Kendall obtenido para la serie final, nos da el signo de la tendencia.
- sig: el p-value de Kendall obtenido para la tendencia (significancia estadística de la tendencia)
- autocor: la autocorrelación de la serie una vez eliminada la tendencia

- valid_frac: **la fracción de los datos que es válida una vez eliminada la autocorrelación**
- linear: **el ajuste de mínimos cuadrados para los mismos datos**
- intercept: **intercepto de la pendiente de Sen (tendencia)**

La significancia informa del valor estadístico del test y ayuda a determinar si se acepta o no el hecho de que haya una tendencia. En estadística, generalmente, se admite que hay tendencia cuando este valor es igual o menor a 0.05, lo que significa que existe una probabilidad del 95 % de que esa tendencia detectada sea real. Sin embargo, con el fin de valorar la significancia de las tendencias obtenidas se utilizará el mismo criterio que sugiere el IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático) en su informe “Guidance Note for Lead Authors of the IPCC Fifth Assessment Report on Consistent Treatment of Uncertainties” (Mastrandrea et al., 2010), para considerar la probabilidad ((1-significancia)*100) de ocurrencia de una tendencia. En este documento la probabilidad se refiere a una valoración probabilística de algún resultado bien definido que haya ocurrido o vaya a ocurrir en el futuro. En dicho informe se definen las siguientes categorías:

<u>Terminología</u>	<u>Probabilidad de ocurrencia</u>
Virtualmente cierto	> 99% de probabilidad de ocurrencia (sig. <0.01)
Extremadamente probable	> 95% de probabilidad (sig. <0.05)
Muy probable	> 90% de probabilidad (sig. <0.1)
Probable	> 66% de probabilidad (sig. <0.33)
Tan probable como no	entre 33 y 66 % de probabilidad
Improbable	< 33% de probabilidad
Muy improbable	< 10% de probabilidad
Excepcionalmente improbable	< 1% de probabilidad

En este Informe se han considerado como tendencia aquéllas en las que en el análisis efectuado se ha obtenido una probabilidad mayor del 66%; por tanto, las tendencias con una significancia menor de 0.33. En consecuencia, no se han considerado significativos los valores de probabilidad por debajo del citado umbral. Este ha sido, por tanto, el resultado que se ha presentado, la probabilidad de ocurrencia de una tendencia positiva (ascendente) o negativa (descendente). Esta misma metodología de detección de tendencias ha sido la utilizada para las proyecciones hidrológicas futuras, en el apartado 4.3.4 del presente informe.

3.3.6 Presentación de los resultados de los análisis de tendencias

Una vez realizados todos los análisis de tendencias y obtenidas las tablas de resultados, los datos se han presentado de varias maneras con la intención de facilitar su interpretación y visualización. Las tablas de resultados brutas se han incluido en el Anexo digital Resultados de tendencias.

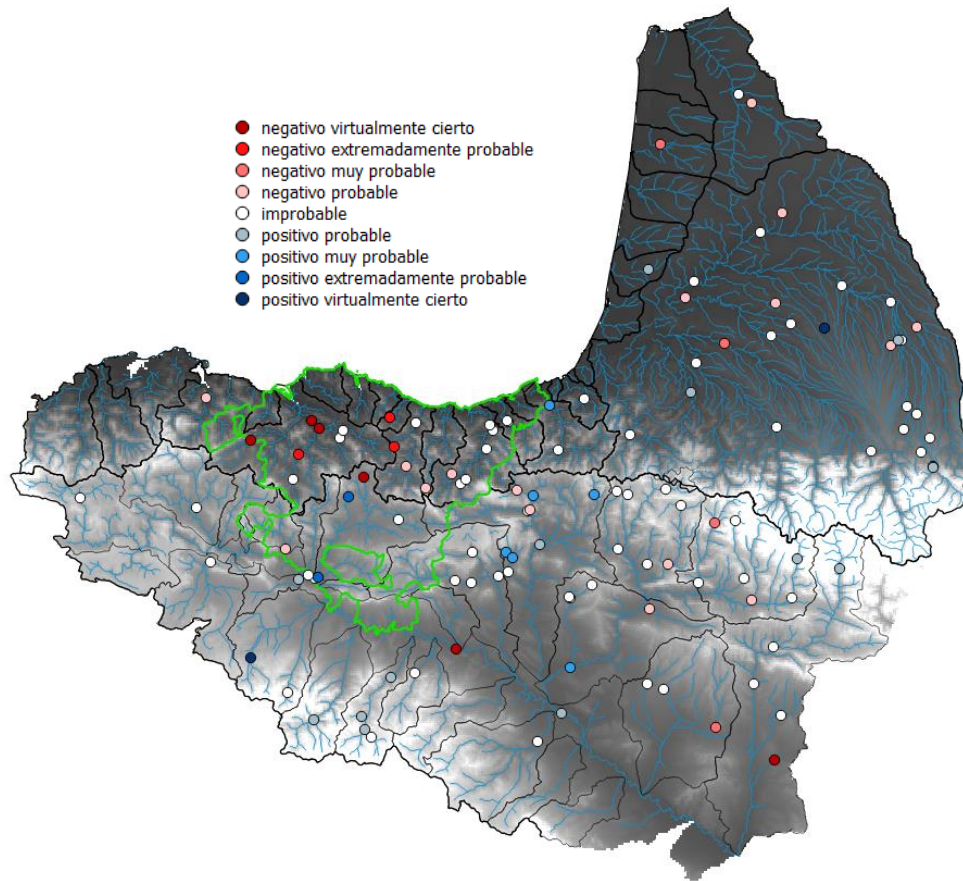


Figura 3.3: Ejemplo del tipo de mapas generados a partir del signo de las tendencias y del porcentaje de probabilidad de ocurrencia de las mismas siguiendo la categorización del IPCC (ver texto para su comprensión).

Además, dado el gran número de datos analizados, se ha realizado un especial esfuerzo en encontrar formatos gráficos que faciliten la lectura y visualización de los resultados y la obtención de perspectivas regionales de las tendencias derivadas. Para ello, se han generado, diversos tipos de figuras, en forma de mapas, gráficos y tablas resumen, para que ayuden al lector en dicha tarea. Por un lado, **mapas** para cada uno de los parámetros analizados para el conjunto de estaciones de aforo incluidas en cada uno de los periodos. En dichos mapas, los puntos donde se localizan las estaciones de aforo se han representado mediante círculos de diferentes colores dependiendo del signo de la tendencia apreciada y de la probabilidad de ocurrencia de la misma: se han utilizado rojos en el caso de las tendencias descendentes (negativas), azules en el caso de las ascendentes (positivas) y blanco cuando la tendencia resultante no es significativa estadísticamente. Además, y siguiendo las categorías propuestas por el IPCC, la intensidad de los colores aumenta con la probabilidad de ocurrencia de la tendencia siguiendo el esquema de la figura 3.3. La totalidad de los mapas generados se incluye en el Anexo 1, si bien algunos de ellos se consideran en el texto para su mejor comprensión.

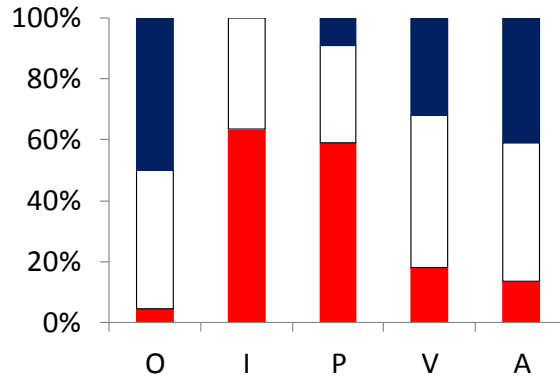


Figura 3.4: Ejemplo de gráfico de barras apiladas donde se representan el porcentaje de tendencias descendentes (en rojo), ascendentes (en azul) y poco probables (en blanco) para cada estación del año (O: Otoño, I: Invierno, P: Primavera, V: Verano) y a escala anual (A); en este ejemplo para la duración del periodo de aguas bajas (Q20_D) en las cuencas cantábricas, en los últimos 20 años.

Por otro lado, con el fin de visualizar mejor las tendencias para cada una de las estaciones del año y su distribución espacial, se han realizado **gráficos de barras apiladas** para el caudal medio (Qm) y la duración y la severidad del Q20 para diferentes zonas del área de estudio. En cada uno de esos gráficos (figura 3.4) se muestran el porcentaje de tendencias ascendentes (en azul), descendentes (en rojo) y no significativas (en blanco) para cada una de las estaciones del año y a escala anual.

Estas figuras de barras apiladas se han acompañado de **gráficos de barras** (figura 3.5). Mediante las barras se ha representado el valor promedio de las probabilidades de ocurrencia de las tendencias de Qm y Q20 calculadas para las estaciones de cada zona, teniendo en cuenta su signo, es decir, para tendencias descendentes la probabilidad se ha considerado negativa y para tendencias ascendentes positiva. Como en el caso anterior, los gráficos se han realizado para cada una de las estaciones del año y a escala anual, teniendo también en cuenta las diferentes zonas del área de estudio. Los promedios positivos se han representado en azul y los negativos en rojo. Se ha representado también el nivel de probabilidad de ocurrencia del 66.66%, en positivo y en negativo.

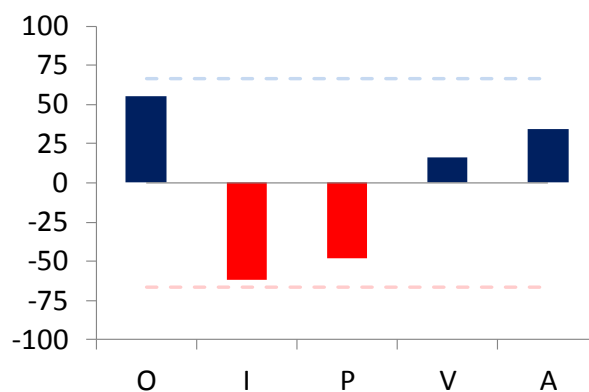


Figura 3.5: Ejemplo de gráfico de barras donde se representan el promedio de la probabilidad de ocurrencia de las tendencias incorporando el signo de las mismas. En azul las probabilidades cuando la tendencia media resultante es ascendente y en rojo cuando es descendente. El gráfico se ha realizado para cada estación del año (O: Otoño, I: Invierno, P: Primavera, V: Verano) y a escala anual (A); en este ejemplo para la duración del periodo de aguas bajas (Q20_D) en las cuencas cantábricas, en los últimos 20 años.

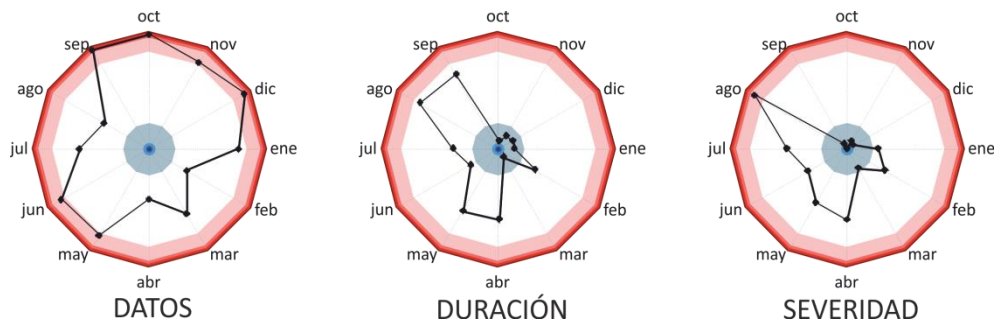


Figura 3.6: Gráficos radiales con la probabilidad de ocurrencia de las tendencias para cada uno de los meses. Se han representado en la zona central, en azul, las tendencias ascendentes con más de un 66% de probabilidad de ocurrencia, en la zona exterior, en rojo, las tendencias descendentes con más de un 66% de probabilidad de ocurrencia, y, en la zona central, en blanco, las tendencias con una probabilidad de ocurrencia menor al 66%. El punto negro representa la probabilidad de ocurrencia y el signo de una tendencia para cada uno de los meses.

Además, para las series de datos de 95 años de longitud, dado que se trata solamente de tres estaciones de aforo, se han realizado para cada una de ellas **gráficos radiales** (figura 3.6) en los que se ha representado la probabilidad de ocurrencia de las tendencias para cada uno de los meses. Se han representado en la zona central, en azul, las tendencias ascendentes con más de un 66% de probabilidad de ocurrencia, en la zona exterior, en rojo, las tendencias descendentes con más de un 66% de probabilidad de ocurrencia, y, en la zona central, en blanco, aquellas tendencias con una probabilidad de ocurrencia menor al 66%.

3.4 Resultados

3.4.1 Procesamiento de las series de caudal medio diario

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en cada uno de los pasos seguidos para obtener las series de caudales medios y duración y déficit de los bajos a las que se ha aplicado el test de tendencias.

Análisis de lagunas

El primer paso ha sido el de realizar un análisis de la validez para el objetivo perseguido de las 164 series de caudal obtenidas. Para ello se han contabilizado los datos válidos existentes en cada uno de los años de las series, de manera que, los años con importantes lagunas o errores han sido desechados. Así, en algunos casos las series utilizadas para el análisis posterior han sido más cortas que las originales (manteniendo siempre un mínimo de 20 años) y en otros ha sido necesario desecharlas por completo por quedar la serie resultante demasiado corta.

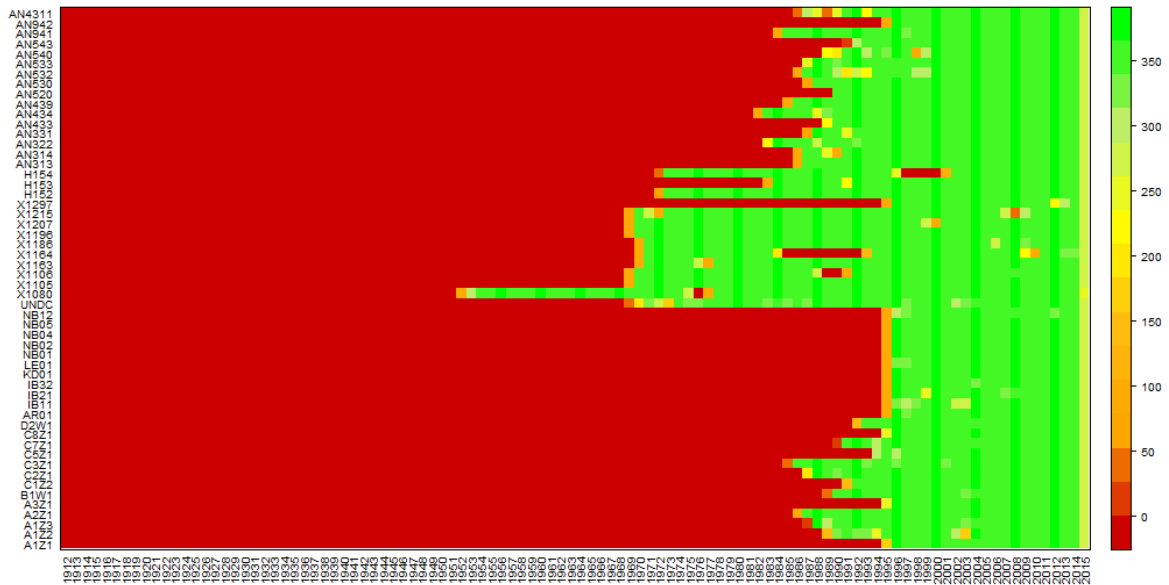


Figura 3.7: Número de días con datos válidos por año en las series de caudal de Gipuzkoa, Bizkaia, Araba y Navarra de las estaciones de aforo de la tabla 3.1 gestionadas por Diputación Foral de Gipuzkoa, Diputación Foral de Bizkaia, Consorcio de Aguas de Bilbao-Bizkaia, Confederación Hidrográfica del Cantábrico, Iberdrola y Gobierno de Navarra.



Figura 3.8: Número de días con datos válidos por año en las series de caudal de las estaciones de aforo de la tabla 3.1 gestionadas por la Confederación Hidrográfica del Ebro (Continúa en figura 3.9).

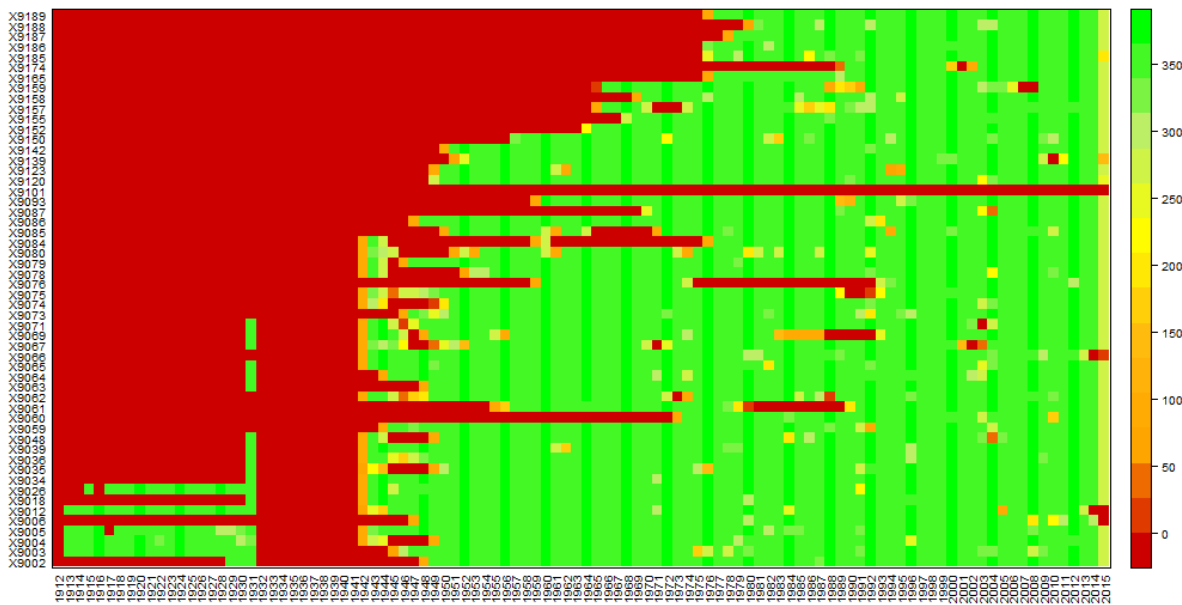


Figura 3.9: Número de días con datos válidos por año en las series de caudal de las estaciones de aforo de la tabla 3.1 gestionadas por la Confederación Hidrográfica del Ebro (continuación de figura 3.8).

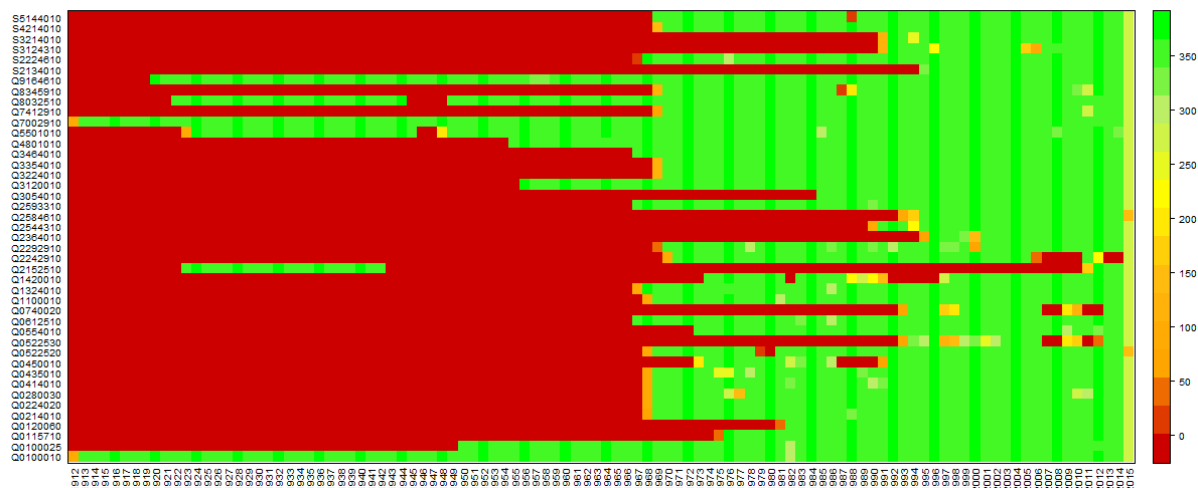


Figura 3.10: Número de días con datos válidos por año en las series de caudal de las estaciones de aforo de la tabla 3.1 gestionadas por EauFrance.

Antes de desechar los años que presentan un número de lagunas moderado (entre el 10 y el 20%) se ha realizado un análisis de la distribución de las mismas, ya que, en algunos casos las series pueden ser válidas para el análisis planteado. Así, en aquellos casos en los que las lagunas estuviesen aleatoriamente distribuidas a lo largo de un año, con escasa afección a los valores medios y a los bajos, ese año no se ha desechado. Las figuras 3.7 a 3.10 muestran el número de días con datos válidos por año disponible en las series de caudal de las estaciones de aforo enumeradas en la tabla 3. 1. En todo caso sólo se da peso a los resultados que muestran tendencias generales y no a los específicos de estaciones particulares, lo que minimiza el posible efecto de estas lagunas puntuales de información en las conclusiones del trabajo.

Una vez realizado este análisis se han desechado 47 series (por tener lagunas importantes, sobre todo en periodos de aguas bajas), por lo que 117 series se han considerado válidas para realizar el siguiente paso.

Análisis de cambios bruscos

Antes de realizar un análisis de las tendencias de las series de caudal se ha querido determinar la posible existencia de cambios bruscos en la media de las mismas. De los test realizados para detectar un posible cambio brusco en las medias de las 117 series de caudal se han obtenido valores nulos, es decir, no existe ningún cambio brusco en las medias en las series. Por lo tanto, no ha sido necesario realizar el análisis para detectar cambios múltiples. Así, todas las series validadas en el paso anterior han sido seleccionadas para realizar el análisis de tendencias. En el mapa de la figura 3.11 se muestran las estaciones seleccionadas y las no seleccionadas para dicho análisis.

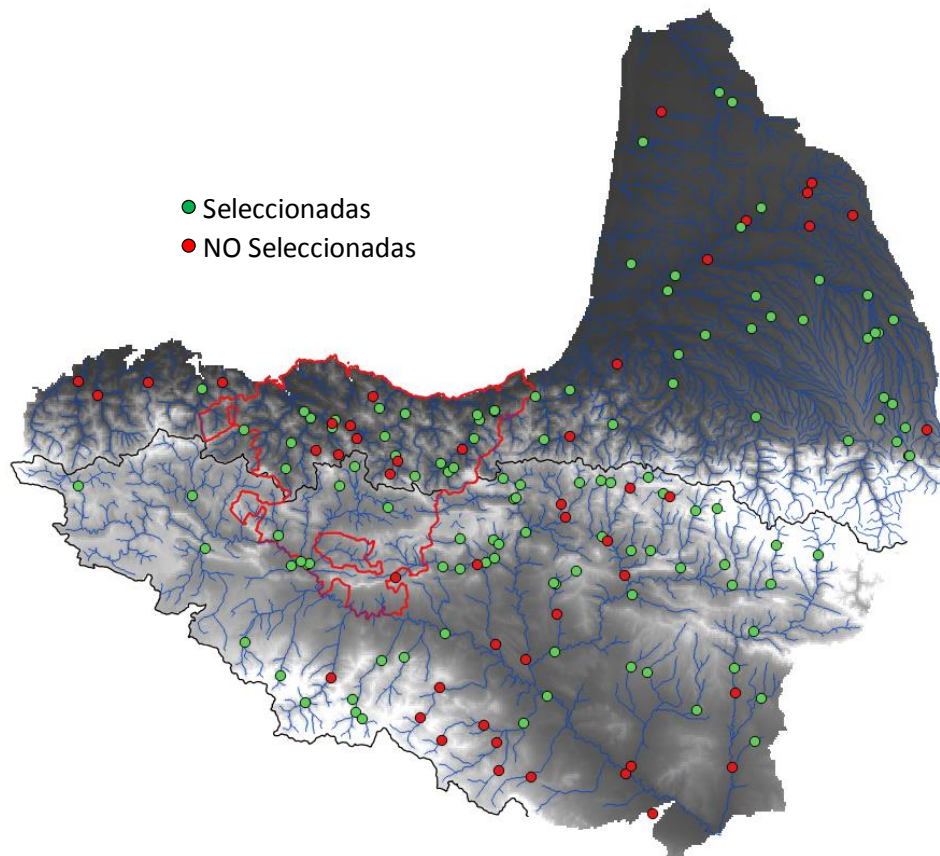


Figura 3.11: Estaciones seleccionadas y no seleccionadas tras los análisis de validez de las series.

Selección de periodos de estudio

Una vez realizada la selección de series válidas se ha procedido a seleccionar los periodos de tiempo para los que se realizarán los análisis de tendencias. Así, en la figura 3.12 se puede observar el número de años válidos para cada una de las 117 series de caudales diarios. Intentando obtener un periodo de tiempo común lo más largo posible, con el mayor número posible de estaciones de aforo, se han considerado cuatro longitudes temporales: 20 años (desde el año hidrológico 1995-1996 hasta el 2014-2015) con datos de 117 estaciones, 40 años (desde el 1975-1976 hasta el 2014-2015) con 43 estaciones, 60 años (desde 1955-1956 hasta 2014-2015) con 18 estaciones, y 95 años (entre 1920-1921 y 2014-2015) con 3 estaciones. En la figura 3.13 se observan las estaciones seleccionadas y las longitudes de series que se analizarán en cada una de ellas.

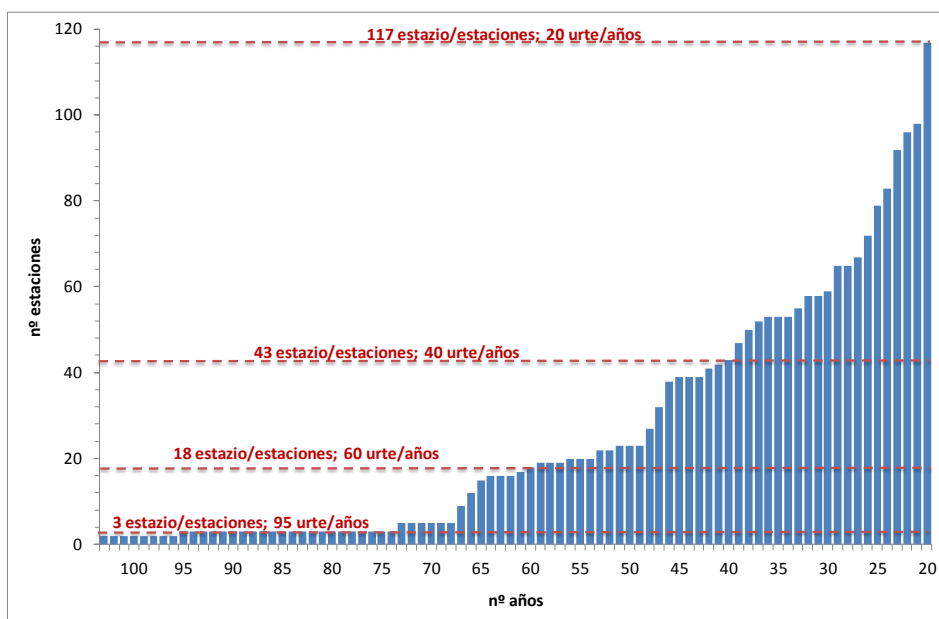


Figura 3.12: Número de estaciones para diferentes longitudes de las series de datos de caudal.

Distribución de las estaciones analizadas

Las tres estaciones con al menos 95 años de datos (1920-1921 a 2014-2015) se sitúan en la cuenca del Adour, en zonas de cabecera pirenaica. Las 18 que cuentan al menos con 60 años (1955-1956 a 2014-2015) se ubican en la cuenca del Ebro (11 estaciones), sobre todo en la parte central de la cuenca aquí considerada, y en la del Adour (7), todas ellas cercanas a los Pirineos. Con 40 años de datos (1975-1976 a 2014-2015) hay 43 estaciones, igualmente repartidas en la cuenca del Ebro (19) y en la del Adour (22), abarcando más territorio en esta última; hay que señalar la práctica ausencia de estaciones para este periodo en la CAPV (excepción hecha de 1 en Gipuzkoa y 1 en Araba) y en Navarra. Con un mínimo de 20 años de datos de caudal (1995-1996 a 2014-2015) se contabilizan 117 estaciones, de las cuales 32 se ubican en la cuenca del Adour y en la región de Landas, 22 en cuencas vertientes al Cantábrico (prácticamente todas ellas en Bizkaia y Gipuzkoa) y el resto distribuidas en la cuenca del Ebro aquí considerada (4 de ellas en Araba).

Series generadas

Una vez establecidas las series válidas y la longitud de los periodos a analizar se han generado las series de caudales medios (Qm) y de duración y severidad de los caudales bajos (Q20) para cada una de las escalas y cada uno de los periodos a analizar. Así, para cada una de las 117 series de caudales seleccionadas se han generado los 232 tipos de series que han sido resumidos en la tabla 3.2, un total de 27144 series a las que se ha aplicado el análisis de tendencias. Las series a las que se ha aplicado el análisis de tendencias se han incluido en la carpeta Anexo digital Variables.

Tabla 3.2: Resumen de los 232 tipos de series generados para el análisis de tendencias.

		20 años	40 años	60 años	95 años
		1995/1996-2014/2015	1975/1976-2014/2015	1955/1956-2014/2015	1920/1921-2014/2015
Diaria	Media	Media	Media	Media	Media
Mensual	Media	Media	Media	Media	Media
	Duración (Q20)	Duración (Q20)	Duración (Q20)	Duración (Q20)	Duración (Q20)
Estacional	Severidad (Q20)	Severidad (Q20)	Severidad (Q20)	Severidad (Q20)	Severidad (Q20)
	Media	Media	Media	Media	Media
Anual	Duración (Q20)	Duración (Q20)	Duración (Q20)	Duración (Q20)	Duración (Q20)
	Severidad (Q20)	Severidad (Q20)	Severidad (Q20)	Severidad (Q20)	Severidad (Q20)
Otoño	Media	Media	Media	Media	Media
	Duración (Q20)	Duración (Q20)	Duración (Q20)	Duración (Q20)	Duración (Q20)
Invierno	Severidad (Q20)	Severidad (Q20)	Severidad (Q20)	Severidad (Q20)	Severidad (Q20)
	Media	Media	Media	Media	Media
Primavera	Duración (Q20)	Duración (Q20)	Duración (Q20)	Duración (Q20)	Duración (Q20)
	Severidad (Q20)	Severidad (Q20)	Severidad (Q20)	Severidad (Q20)	Severidad (Q20)
Verano	Media	Media	Media	Media	Media
	Duración (Q20)	Duración (Q20)	Duración (Q20)	Duración (Q20)	Duración (Q20)
Octubre	Severidad (Q20)	Severidad (Q20)	Severidad (Q20)	Severidad (Q20)	Severidad (Q20)
	Media	Media	Media	Media	Media
Noviembre	Duración (Q20)	Duración (Q20)	Duración (Q20)	Duración (Q20)	Duración (Q20)
	Severidad (Q20)	Severidad (Q20)	Severidad (Q20)	Severidad (Q20)	Severidad (Q20)
Diciembre	Media	Media	Media	Media	Media
	Duración (Q20)	Duración (Q20)	Duración (Q20)	Duración (Q20)	Duración (Q20)
Enero	Severidad (Q20)	Severidad (Q20)	Severidad (Q20)	Severidad (Q20)	Severidad (Q20)
	Media	Media	Media	Media	Media
Febrero	Duración (Q20)	Duración (Q20)	Duración (Q20)	Duración (Q20)	Duración (Q20)
	Severidad (Q20)	Severidad (Q20)	Severidad (Q20)	Severidad (Q20)	Severidad (Q20)
Marzo	Media	Media	Media	Media	Media
	Duración (Q20)	Duración (Q20)	Duración (Q20)	Duración (Q20)	Duración (Q20)
Abril	Severidad (Q20)	Severidad (Q20)	Severidad (Q20)	Severidad (Q20)	Severidad (Q20)
	Media	Media	Media	Media	Media
Mayo	Duración (Q20)	Duración (Q20)	Duración (Q20)	Duración (Q20)	Duración (Q20)
	Severidad (Q20)	Severidad (Q20)	Severidad (Q20)	Severidad (Q20)	Severidad (Q20)
Junio	Media	Media	Media	Media	Media
	Duración (Q20)	Duración (Q20)	Duración (Q20)	Duración (Q20)	Duración (Q20)
Julio	Severidad (Q20)	Severidad (Q20)	Severidad (Q20)	Severidad (Q20)	Severidad (Q20)
	Media	Media	Media	Media	Media
Agosto	Duración (Q20)	Duración (Q20)	Duración (Q20)	Duración (Q20)	Duración (Q20)
	Severidad (Q20)	Severidad (Q20)	Severidad (Q20)	Severidad (Q20)	Severidad (Q20)
Septiembre	Media	Media	Media	Media	Media
	Duración (Q20)	Duración (Q20)	Duración (Q20)	Duración (Q20)	Duración (Q20)
	Severidad (Q20)	Severidad (Q20)	Severidad (Q20)	Severidad (Q20)	Severidad (Q20)

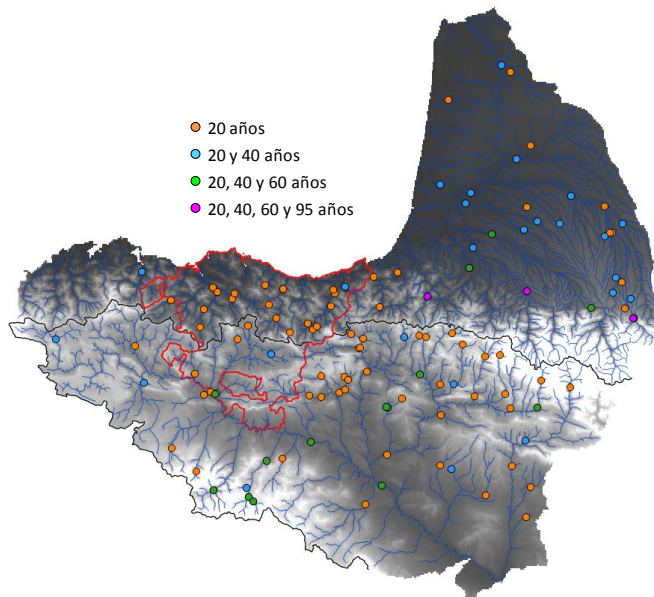


Figura 3.13: Ubicación de las series válidas para el análisis de tendencias y longitud de las series analizadas en cada estación.

3.4.2 Tendencias en las series de caudal

Para facilitar el análisis espacial de los resultados, se ha utilizado la zonación de la figura 3.14, basada en el reparto habitual de los organismos de cuenca. Sin embargo, y tras observar las diferentes agrupaciones espaciales de los resultados, se ha usado una zonación más general como referencia espacial para los comentarios que se hacen posteriormente. Así, se han considerado (figura 3.15) las cuencas Adour-Landas, Ebro y Cantábricas, con sus límites hidrográficos, a las que se ha añadido el corredor Cantábrico-Pirenaico (Eje Pirenaico, que incluye estaciones repartidas por las tres cuencas) por su interés para la CAPV y por la importancia hidrológica que presentan las cuencas de cabecera pirenaica.

Análisis de tendencias

Interesa mostrar las tendencias de carácter significativo observadas en las series de caudales (se resaltan en ***negrita y cursiva***), es decir, como se ha justificado anteriormente, aquéllas con una *probabilidad* de ocurrencia mayor del 66%. Para evitar usar de forma repetida las expresiones “virtualmente cierto”, “extremadamente probable”, “muy probable”, “probable” que corresponden a la categorización de las probabilidades por encima de ese umbral, en el texto que sigue se habla de tendencias *significativas*, o *claras*, para expresar que su probabilidad de ocurrencia es alta, por encima del 66%. Todos los mapas generados se presentan en el Anexo 1, con su leyenda explicativa (ver apartado 3.3.6 para la explicación). Sólo algunos de esos mapas, más representativos, han sido incluidos en el texto, como apoyo a las explicaciones en él recogidas.

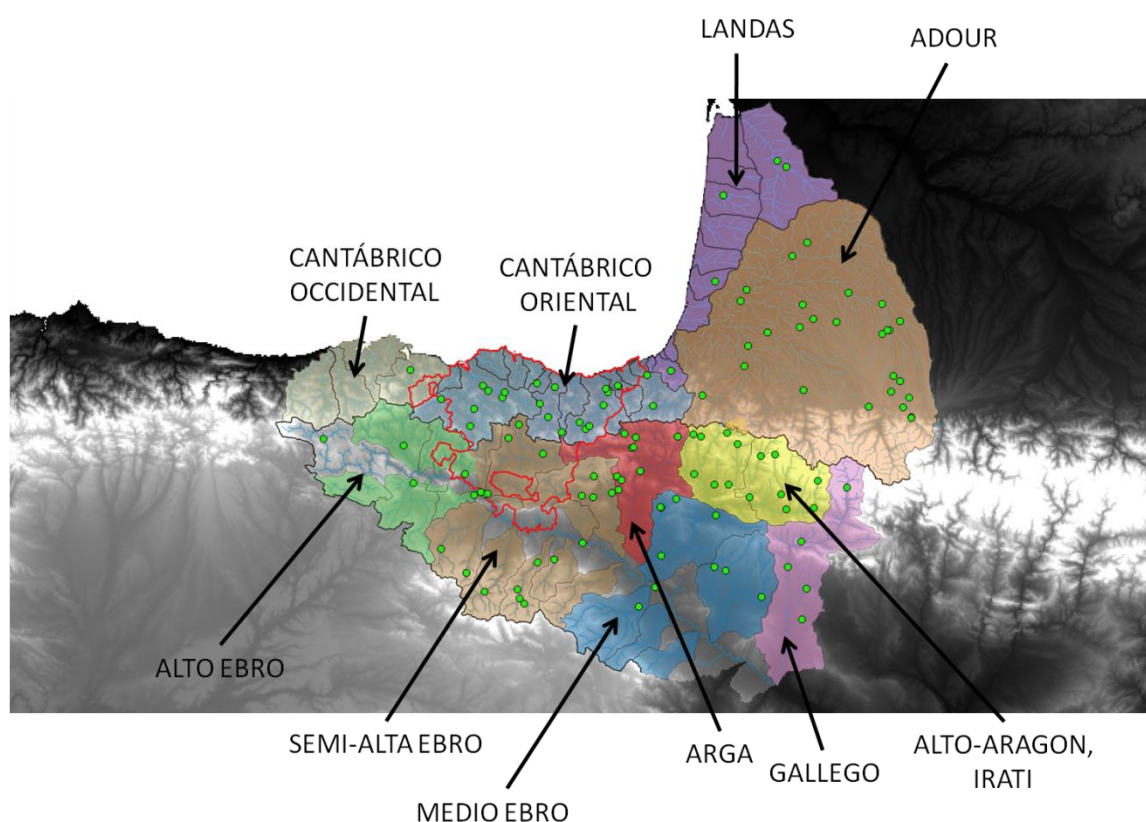


Figura 3.14: Zonación del área de estudio, basada en la información de los organismos de cuenca.

No es el objetivo de este análisis, en esta fase al menos, entrar en las causas que pueden explicar tendencias significativas de ámbito regional, o excepciones locales a las mismas (ello implicaría un análisis en paralelo de otras variables, tanto externas a las cuencas -precipitaciones, temperatura...- como internas – cambios de usos del suelo, gestión de embalses, evolución de captaciones... -). Se trata de evidenciar las consecuencias, es decir, las tendencias más claramente resultantes, en el espacio y en el tiempo, bajo la premisa de que las más recientes van a condicionar la evolución de los caudales en el corto plazo, al menos.

Dado el gran número de tipos de series generados (tabla 3.2), con sus mapas, y en nombre de la necesaria simplificación inicial que un análisis tan complejo requiere, en el dominio espacial y en el temporal, se ha optado por ir de las series más cortas pero con más estaciones (últimos 20 años) hacia atrás, a las series más largas pero con menor número de estaciones, y, por tanto, más desperdigadas por el territorio. En cada periodo de tiempo, se pone interés en las tendencias de las series de caudales medios y bajos (duración y severidad de los bajos) a diferentes escalas: desde diaria, mensual, estacional y anual, hasta por estaciones (Otoño, Invierno, Primavera, Verano) y meses, siguiendo los criterios antes establecidos. Al final de cada periodo de tiempo analizado se hace un resumen de las tendencias más significativas, y al final del apartado se integran los aspectos más evidentes en el marco espacio-temporal.

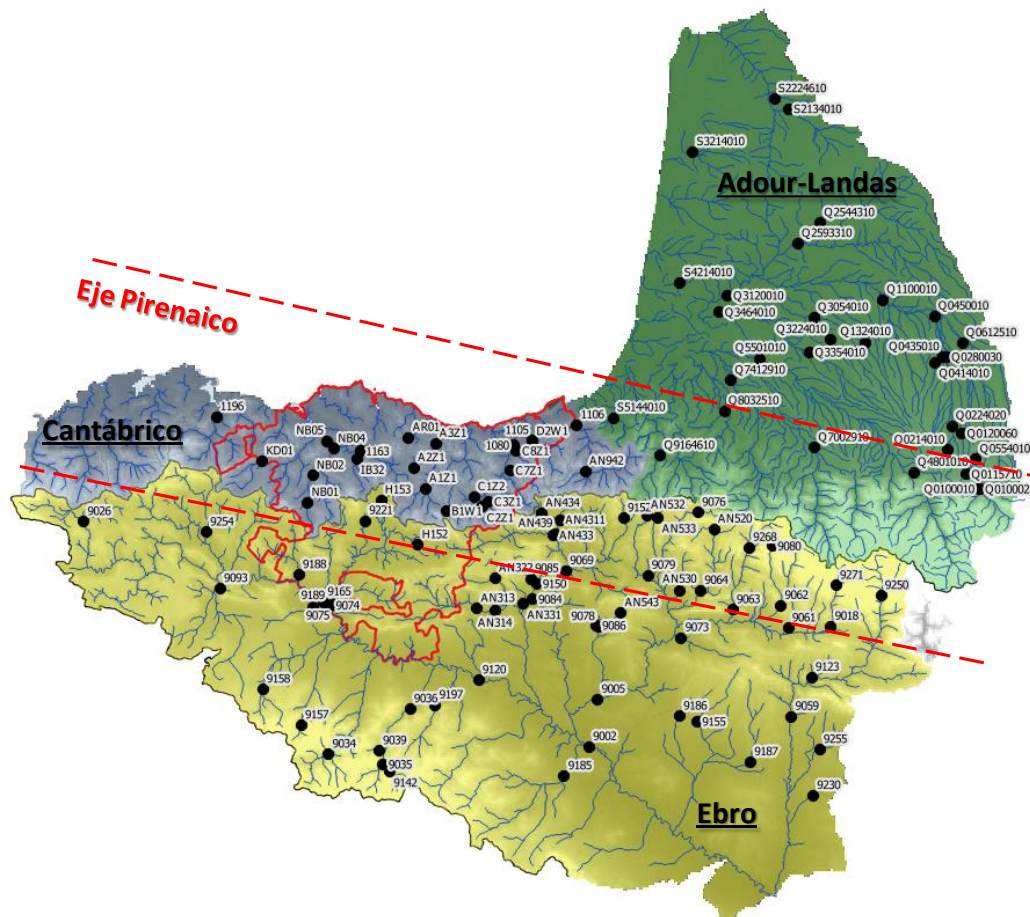


Figura 3.15: Ubicación y código de las estaciones analizadas (ver tabla 3.1). Zonación espacial general utilizada en este estudio: Cuencas hidrográficas de Adour-Landas, Cantábrico, y Ebro. Adicionalmente se ha considerado el Eje Pirenaico (zona cantábrica y Pirineos).

20 años (1995-1996 a 2014-2015)

La figura 3.16 recoge, en gráficos de barras, la distribución de las tendencias observadas en todos los puntos de control de caudal (estaciones), en términos porcentuales (arriba) y de significancia (abajo), tanto para los caudales medios (Qm) como para los bajos (Q20, duración y severidad). Estas gráficas han sido elaboradas como se ha explicado en el apartado 3.3.6. El color rojo representa tendencia negativa, descendente, el azul positiva, ascendente, y el blanco tendencia no significativa (inferior al del 66%). Se representan las tendencias por estaciones del año (O: Otoño, I: Invierno, P: Primavera, V: Verano) y a escala anual (A). La figura 3.17, por su parte, recoge la distribución por zonas, siguiendo la zonación de la figura 3.15.

Para este periodo (117 estaciones) **no se observan tendencias espaciales en las series de caudales medios (Qm)** a escala diaria (figura 3.18). Las tendencias en las estaciones son muy significativas, con una alta probabilidad de ocurrencia, pero de sentido contrario, sin que se observen tendencias espaciales. En todas las áreas consideradas se encuentran estaciones con tendencias opuestas, prácticamente al 50%: unas con tendencia al aumento de los caudales (colores azules) y las otras al descenso (rojos), entremezcladas. Hay que resaltar que apenas hay estaciones sin tendencia significativa (en blanco o con colores tenues). Quizás, pero con mucha precaución, se podría señalar la clara tendencia a la disminución de caudales que muestran casi todas las estaciones de Bizkaia.

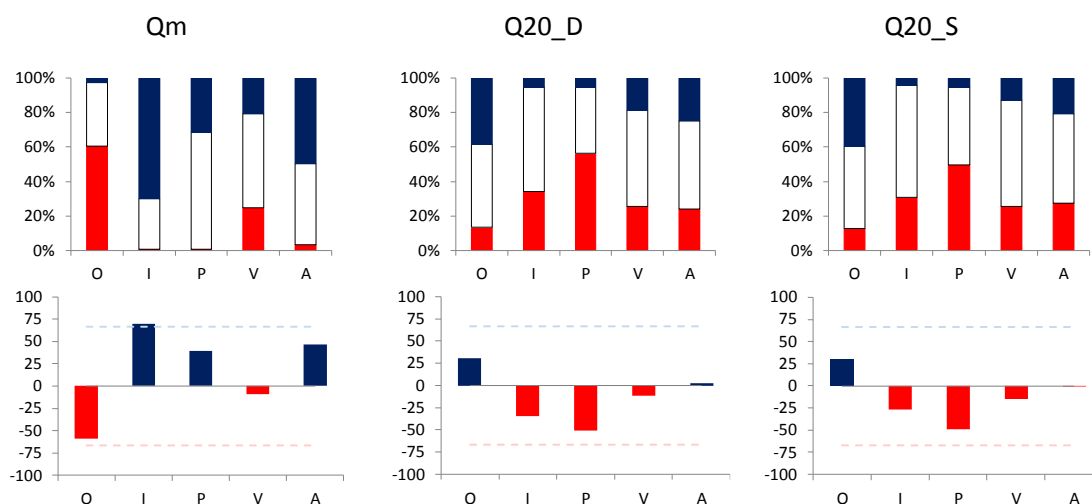


Figura 3.16: Distribución de tendencias (porcentual y por significancia) para las series de 20 años. Todos los datos (n=117). Azul, ascendente; blanco, no significativa; rojo, descendente.

Cuando se pasa a la escala mensual, estacional y anual los blancos y colores tenues proliferan por todo el territorio objeto de análisis, indicando la ausencia de tendencias claras en las estaciones, y menos aún espacialmente. Hay que tener en cuenta que este cambio de escala conlleva el paso de la consideración de 365 datos por año (escala diaria) a 1 por año (anual), lo que unido a la corta longitud de las series (20 años) hace que el número total de datos tratados sea reducido. Cuando se consideran los caudales bajos (duración y severidad, Q20), lo único reseñable, también aquí con mucha precaución, es la tendencia al alargamiento del periodo, y aumento del déficit, de aguas bajas en las cuencas de Bizkaia.

Cuando se pone el zoom en las estaciones (figura 3.16), se observa en **Otoño una tendencia generalizada** (en pocas estaciones altamente significativa), en un 60% de los puntos, **a la disminución de caudales (Qm)** en todas las zonas (figura 3.17) del territorio (prácticamente no hay tendencias en sentido contrario). Esta tendencia es **muy clara en Octubre (figura 3.19) en la zona más cantábrica del territorio (CAPV, zona norte de Navarra, y Adour)**, inexistente en Noviembre, y poco significativa (también de

disminución) en Diciembre. Respecto a duración y severidad (Q20) señalar la tendencia a su aumento en Otoño, sobre todo en la zona Cantábrica (figura 3.17, prácticamente un 50% de las estaciones analizadas). Este hecho estaría indicando un alargamiento del estiaje hidrológico en el Otoño.

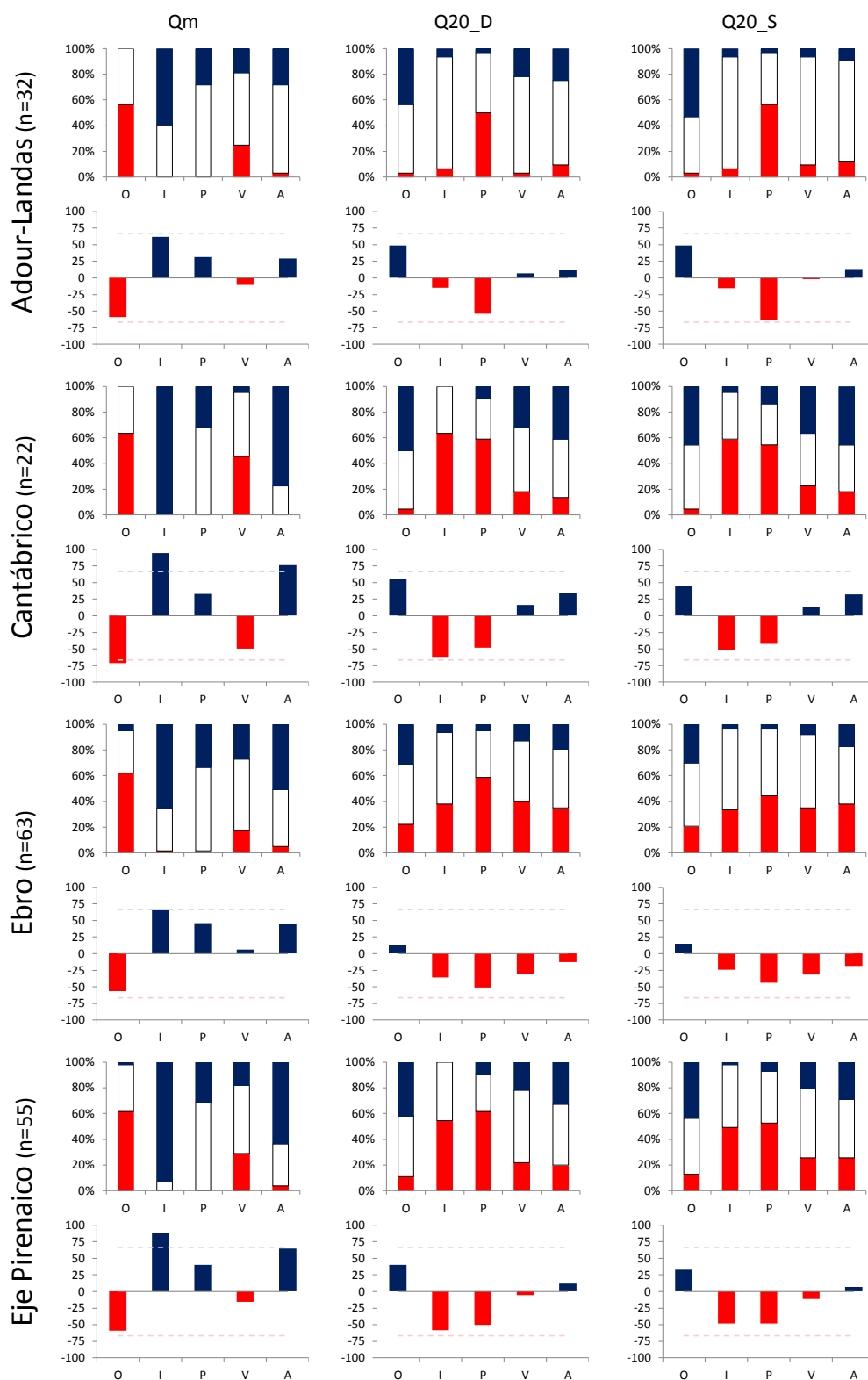


Figura 3.17: Distribución de tendencias (porcentual y por significancia) por zonas para las series de 20 años, con el número de estaciones consideradas. Azul, ascendente; blanco, no significativa; rojo, descendente.

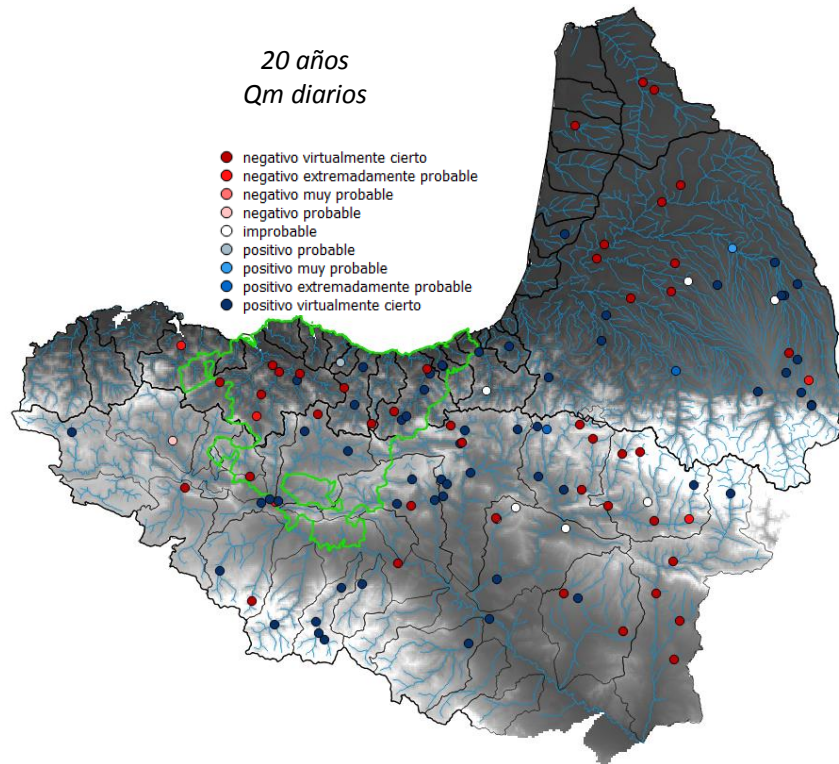


Figura 3.18: Tendencia de las series de caudales a escala diaria, para el periodo de 20 años.

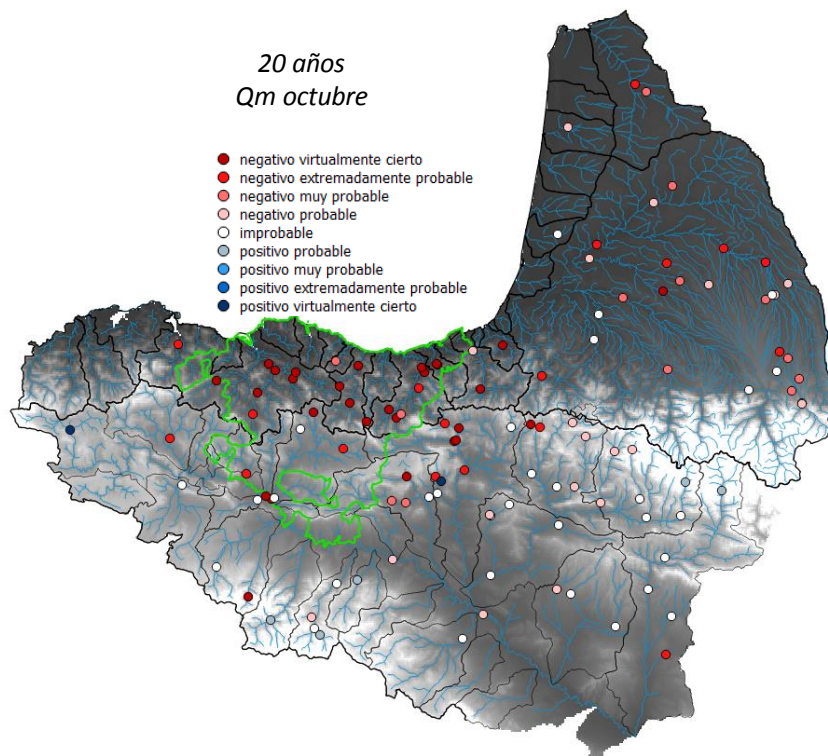


Figura 3.19: Tendencia de las series de caudales de Octubre, para el periodo de 20 años.

En Invierno la tendencia es claramente positiva, de aumento del caudal, en todo el territorio (figura 3.16) pero, sobre todo **en la zona cantábrica-pirenaica** (toda la CAPV y buena parte de Navarra), y alargándose, menos significativamente, por ambas estribaciones de los Pirineos (figuras 3.17 y 3.20). **Esta tendencia se debe a las observadas en Febrero y, más evidente aún, en Marzo**, llegando a ser espacialmente bastante generalizada este mes. Consecuentemente, la tendencia observada en los caudales bajos (Q20, duración y severidad) de estos dos meses, y de toda la estación invernal, es a la disminución del periodo y del déficit de aguas bajas, más claramente en la zona cantábrica (figuras 3.16 y 3.17). En la zona Adour-Landas, sin embargo, no hay evidencia significativa en los caudales bajos.

En Primavera no se observan tendencias significativas generalizadas en los caudales medios (Qm), si bien en todas las estaciones con tendencia ésta es positiva (figura 3.16), en todas las zonas (figura 3.17). Ninguno de los meses presenta tendencias espaciales claras. Más clara es la tendencia en duración y severidad de los caudales bajos (Q20), pero descendente (disminución de ambas). Esta tendencia negativa es evidente (figura 3.17) en todas las zonas consideradas, y similar a la de Invierno (algo más acusada ahora en el Ebro); pero en Adour-Landas es muy superior a la del resto de estaciones del año, siendo la Primavera la que marca claramente la diferencia en estos caudales.

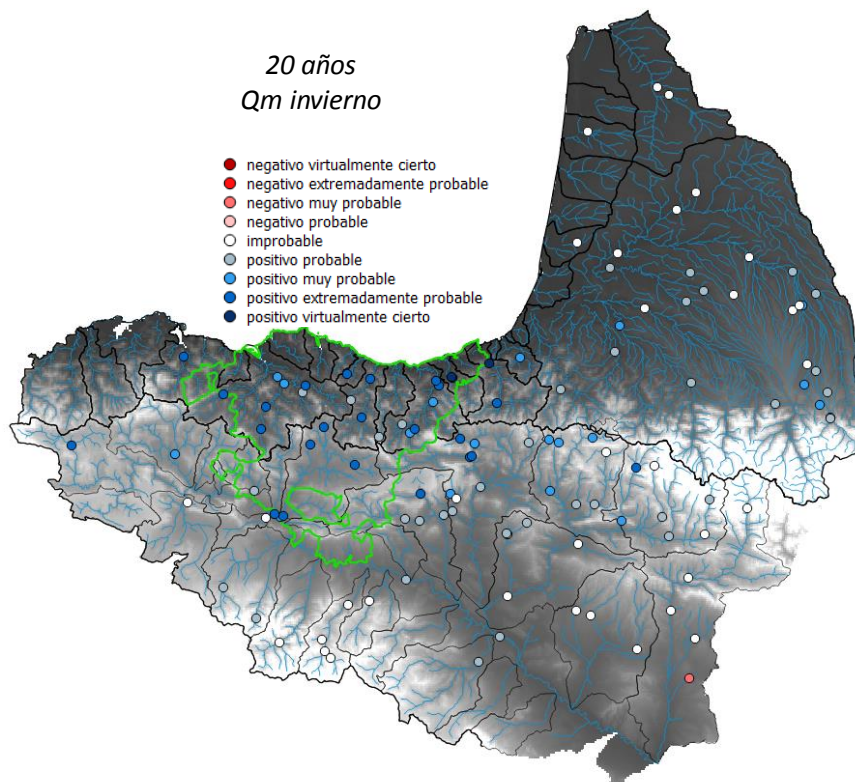


Figura 3.20: Tendencia de las series de caudales de Invierno, para el periodo de 20 años.

Finalmente, **en Verano** se dan tendencias de todo tipo, ascendentes y descendentes (figura 3.16), incluso bastante significativas en algunos puntos, pero sin relación espacial; solo en el Cantábrico hay un porcentaje considerable, un 40 %, de estaciones con tendencia negativa (figura 3.17). Para los Q20 en ninguna zona hay tendencias claras. Las tendencias observadas en Verano (Qm) se hacen mucho más evidentes, como se ha dicho anteriormente, en Otoño, con clara tendencia negativa generalizada. A pesar de ello, a escala anual la tendencia dominante en todas las zonas es la ascendente (figuras 3.16 y 3.17), sobre todo en la zona cantábrica, indicando la mayor influencia de Invierno, principalmente, y Primavera en el cómputo anual.

Resumen de la información correspondiente a este periodo (20 años): Las tendencias significativas generalizadas en las series de caudales (Qm) se limitan a Otoño (sobre todo Octubre), con tendencia negativa por todo el territorio, y a Invierno (sobre todo Febrero y Marzo), con tendencia ascendente en todo el territorio, pero sobre todo en el corredor cantábrico-pirenaico. En Primavera no hay tendencias significativas generalizadas, aunque las que hay son positivas, como una cierta prolongación del Invierno. En Verano se observan estaciones con tendencia clara en todas las zonas, pero de signo contrario, y más estaciones aún sin tendencia. La tendencia anual está condicionada por la de Invierno, sobre todo, y la de Primavera. Para los caudales bajos (Q20) lo más remarcable es la disminución de su duración y severidad en Invierno y Primavera (en Adour-Landas, en Primavera claramente) y su ascenso en Otoño.

Hay que tener en cuenta que 20 años es un periodo muy corto para poder deducir tendencias espaciales significativas, más aún teniendo en cuenta la posible variedad de casuísticas en las intervenciones locales sobre los recursos tanto en términos de caudales medios como caudales bajos (extracciones, gestión de embalses...). Por esta razón, se ha puesto el énfasis en aquellas tendencias que resultan más significativas y de mayor ámbito territorial.

40 años (1975-1976 a 2014-2015)

La figura 3.21 recoge la distribución general de las tendencias observadas en todos los puntos de control de caudal (estaciones), en términos porcentuales (arriba) y de significancia (abajo), tanto para los caudales medios (Qm) como para los bajos (Q20, en este caso se consideran la duración y la severidad). Como se ha indicado previamente, el color rojo representa tendencia negativa, el azul positiva y el blanco tendencia estadísticamente no significativa (por debajo del 66%). Se representan las tendencias por estaciones del año (O: Otoño, I: Invierno, P: Primavera, V: Verano) y a escala anual (A). La figura 3.22, por su parte, recoge la distribución por zonas.

Para el análisis de este periodo se cuenta con 43 estaciones, repartidas casi a partes iguales al norte (Adour-Landas) y sur (Cantábrico-Ebro) del área objeto de estudio. **En lo que se refiere a los caudales medios a escala diaria la tendencia más extendida en el territorio, y claramente significativa, es la negativa, es decir, tendencia a la disminución de los caudales** (figura 3.23). Esta tendencia se da prácticamente en todas las estaciones de la región Adour-Landas, y es ampliamente mayoritaria en la cuenca del Ebro, en la que las excepciones (tendencia ascendente significativa) se concentran en la cabecera de la zona semi-alta Ebro (figura 3.14) y en la única estación de la CAPV en la cuenca del Zadorra. La otra estación de la CAPV también muestra clara tendencia positiva, al aumento de caudales.

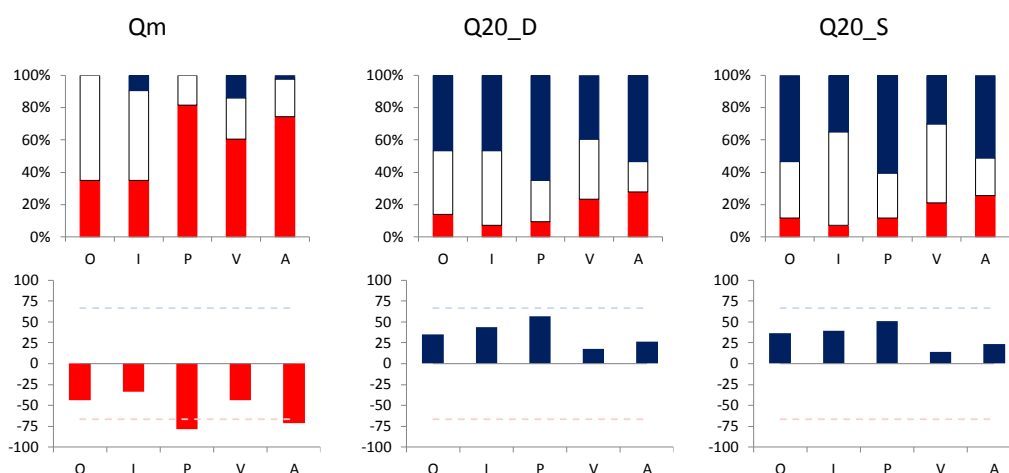


Figura 3.21: Distribución de tendencias (porcentual y por significancia) para las series de 40 años. Todos los datos (n=43). Azul, ascendente; blanco, no significativa; rojo, descendente.

A escala mensual la tendencia significativa más generalizada sigue siendo la negativa, pero con un número importante de estaciones sin tendencia, o con una menos significativa. Esa generalización va perdiendo peso, como se verá más adelante, a escala estacional y anual, aunque, comparativamente, sigue siendo **más evidente en la región Adour-Landas**, desapareciendo en el valle del Ebro. En lo que a los caudales bajos respecta (Q20), la duración y severidad no muestra tendencia clara alguna en ninguna de las escalas ahora consideradas.

Al pasar al análisis por periodos estacionales (figuras 3.21 y 3.22), **Otoño no muestra tendencia mayoritaria en zona alguna**, aunque todas las observadas son **negativas** (entre un 20% de los puntos, en el eje pirenaico, y un 40 % en el Ebro; sobre todo en Octubre). En los caudales bajos (Q20), sin embargo, se observan tendencias positivas y negativas, con una buena cantidad de puntos sin tendencia (en Adour-Landas todas son positivas). Parecido es el resultado en **Invierno**, donde aun habiendo un buen número de estaciones con tendencia negativa en Qm (sobre todo en Adour-Landas), predominan las estaciones sin tendencia, y aparecen algunas, pocas, con tendencia positiva. El panorama es similar para los caudales bajos (en Adour-Landas las tendencias, cuando las hay, son siempre de aumento de la duración y severidad del periodo de aguas bajas).

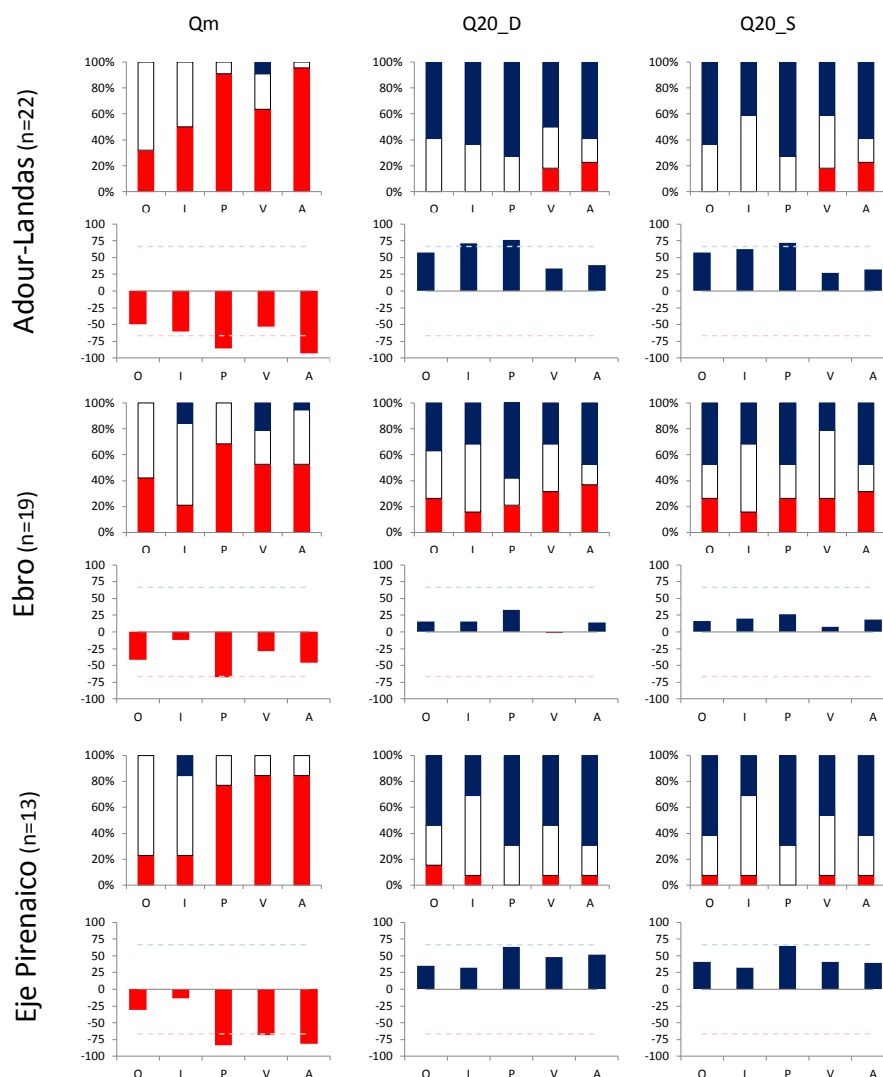


Figura 3.22: Distribución de tendencias (porcentual y por significancia) por zonas para las series de 40 años, con el número de estaciones consideradas. Azul, ascendente; blanco, no significativa; rojo, descendente.

En Primavera (figura 3.24) **la mayor parte de las estaciones** (sobre un 80 %) **muestran tendencias significativas a la disminución de los caudales** (figura 3.21); no aparecen tendencias positivas. Esto es así **en todo el territorio** (figura 3.22), sobre todo en Adour-Landas, y en el eje pirenaico. En lo que a los caudales bajos se refiere (Q20) la mayor parte de las estaciones, sobre todo en las dos zonas ahora citadas, muestra clara tendencia al aumento de la duración y severidad; sólo en el Ebro aparecen algunas con tendencia a la disminución. Respecto a los meses de la estación, en todos ellos (Abril, Mayo, Junio) se observa la clara tendencia descendente, que avanza de Abril a Junio en Adour, y que es más evidente en el Ebro (también en la CAPV), sobre todo en los dos primeros meses.

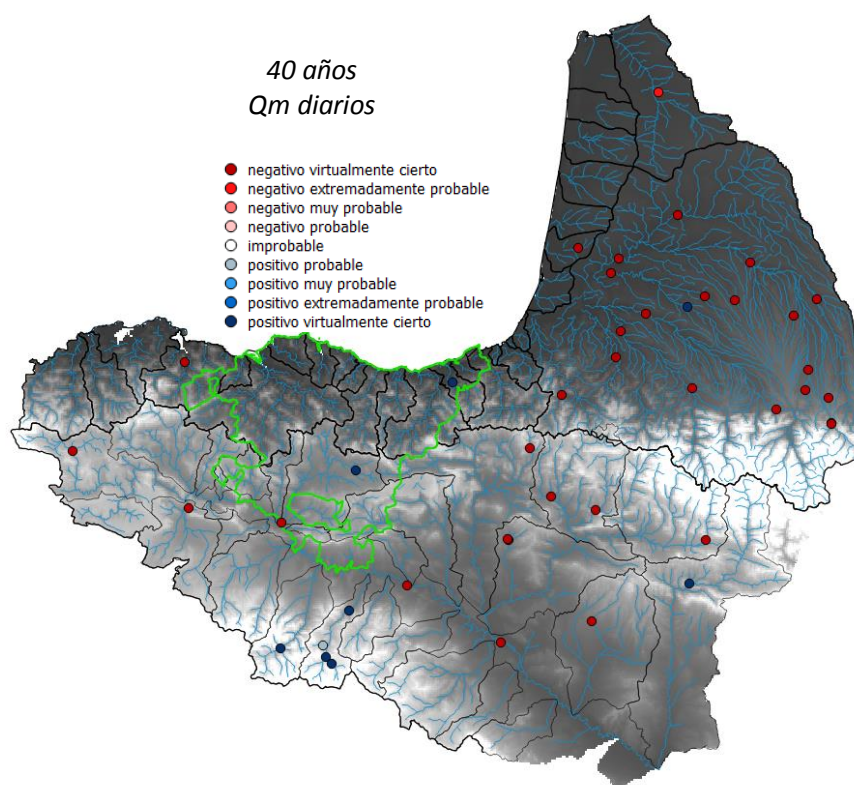


Figura 3.23: Tendencia de las series de caudales a escala diaria, para el periodo de 40 años.

El escenario en **Verano** (figuras 3.21 y 3.22) **también muestra una clara tendencia espacial a la disminución de caudales** en todo el territorio, menos generalizada que en Primavera (no así en el eje pirenaico, donde es similar). Esta tendencia es, sobre todo, muy clara en ese eje (más del 80% de las estaciones) y en Adour-Landas. En el Ebro hay algunas pocas estaciones con tendencia positiva. La duración y severidad de los caudales bajos (Q20) mantienen la tónica de las estaciones previas del año, con tendencias de signo contrario y un buen número de estaciones sin tendencia.

Resumen de la información correspondiente a este periodo (40 años): Se evidencia una **tendencia negativa clara, es decir, de disminución de los caudales, a lo largo del territorio, en Primavera y Verano, sobre todo en la zona de Adour-Landas y en el eje pirenaico.** Esta tendencia también aparece, aunque no de forma tan espacialmente evidente, en **Otoño** (sobre todo en el Ebro) e **Invierno** (sobre todo en Adour-Landas). La **tendencia anual está condicionada por la de Primavera, sobre todo, y la de Verano.** La **duración y severidad (Q20) presentan tendencias de todo tipo, aunque con una cierta preponderancia de las ascendentes** (sobre todo en Adour-Landas y eje pirenaico), y **sin una estacionalidad clara a lo largo del año, si bien es algo más evidente en Primavera.**

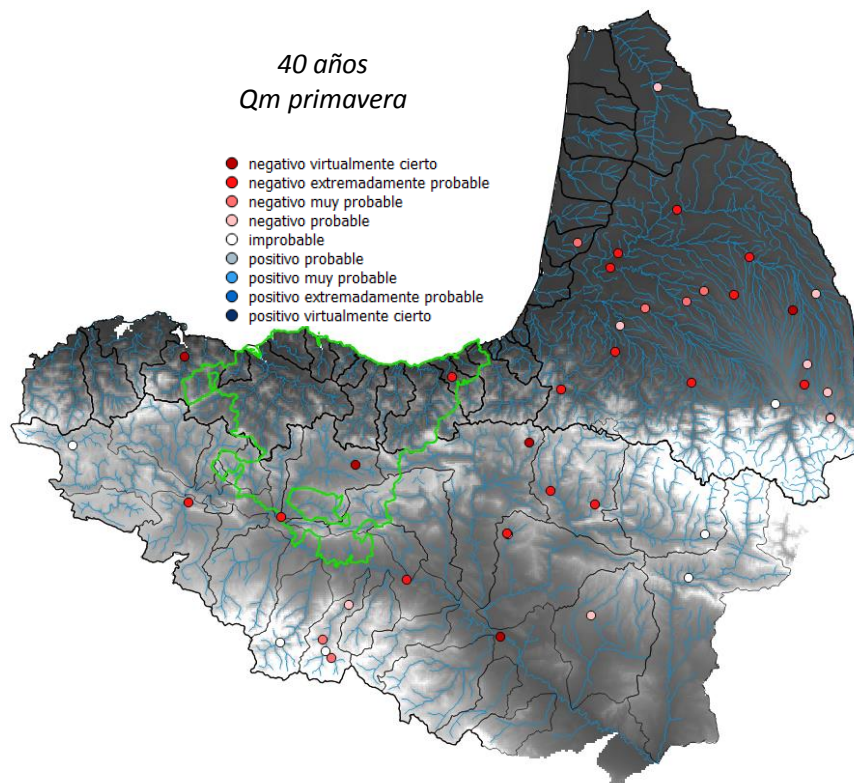


Figura 3.24: Tendencia de las series de caudales de Primavera, para el periodo de 40 años.

60 años (1955-1956 a 2014-2015)

La figura 3.25 recoge la distribución general de las tendencias observadas en todos los puntos de control de caudal (estaciones), en términos porcentuales (arriba) y de significancia (abajo), tanto para los caudales medios (Qm) como para los bajos (Q20, en este caso se consideran la duración y la severidad). Como se ha indicado en los dos apartados previos, el color rojo representa tendencia negativa, el azul positiva y el blanco tendencia estadísticamente no significativa (por debajo del 66%). Se representan las tendencias por estaciones del año (O: Otoño, I: Invierno, P: Primavera, V: Verano) y a escala anual (A). La figura 3.26, por su parte, recoge la distribución por zonas.

Para este periodo se cuenta con 18 estaciones, la mayoría en el valle del Ebro (11); no hay estaciones en la CAPV (la del Zadorra en Arce, está en Burgos). **Los caudales medios (Qm) a escala diaria muestran una clara tendencia negativa, a la disminución de caudales**, prácticamente en todas las estaciones del territorio; las dos excepciones, con clara tendencia ascendente, se dan en la zona semi-alta del Ebro (cuencas del Iregua y Najerilla, figura 3.14), sin que se pretenda ahora justificar esa excepcionalidad, que debe, en cualquier caso, tener causas locales. Cuando consideramos la escala mensual la tendencia es similar, y significativa en todo el territorio. En las escalas estacional y anual la tendencia se mantiene igual de evidente en el valle del Ebro, aunque en la cuenca del Adour, no hay tendencia espacial alguna. En lo que respecta a los caudales bajos (Q20) la duración y la severidad muestran tendencias ascendentes significativas, sobre todo en la cuenca del Ebro, lo que indica un aumento del periodo de tiempo con caudales bajos, así como un aumento temporal en su déficit volumétrico.

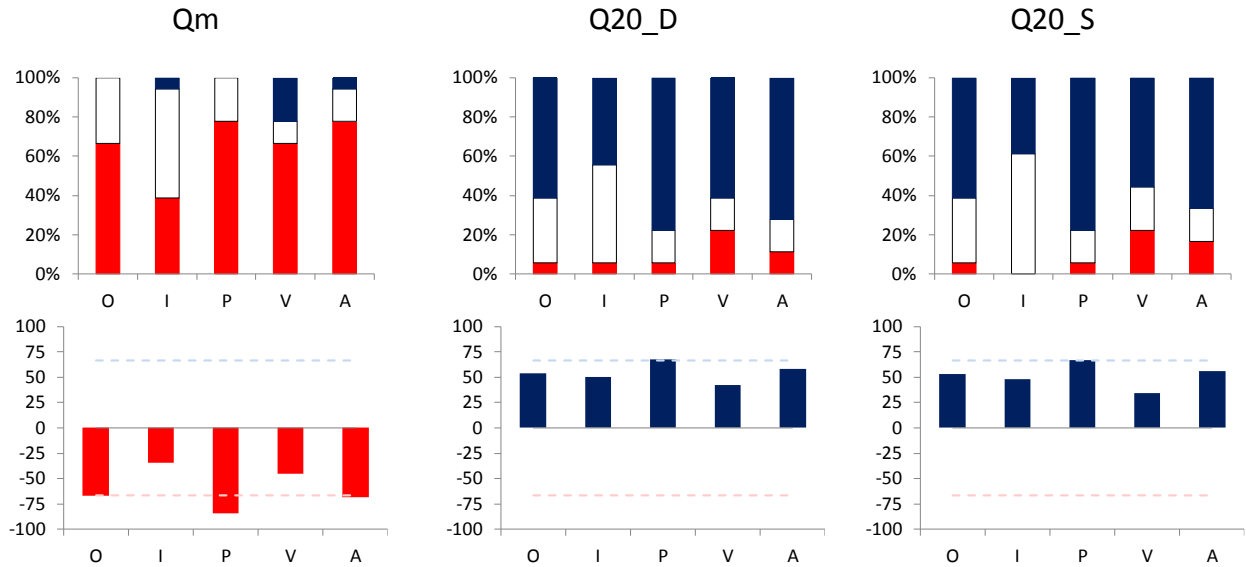


Figura 3.25: Distribución de tendencias (porcentual y por significancia) para las series de 60 años. Todos los datos (n=18). Azul, ascendente; blanco, no significativa; rojo, descendente.

En el análisis estacional (figuras 3.25 y 3.26), **Otoño muestra una muy evidente tendencia negativa (Qm) en todo el Ebro** (figura 3.27); en Adour-Landas y eje pirenaico, sin embargo, esa tendencia no es generalizable, aunque no aparecen tendencias opuestas. Esta situación se mantiene en los tres meses (Octubre, Noviembre, Diciembre). La duración y severidad de los caudales bajos (Q20), por su parte, presentan amplia tendencia al aumento de las mismas, sobre todo en las dos zonas citadas. **En Invierno** el escenario no es tan evidente, aunque **la tendencia más frecuente sigue siendo la negativa**, sobre todo en el Ebro (observable en Enero, Febrero, Marzo). En Adour-Landas la mayor parte de las estaciones no muestra tendencia significativa. En los caudales bajos, tanto la duración como la severidad mantienen una cierta tendencia ascendente, aunque solo es más generalizada en el Ebro.

En Primavera la tendencia descendente del valor Qm es más clara en todo el territorio, más aún en el Ebro (figuras 3.25 y 3.26). Esta tendencia se mantiene en Abril, Mayo y Junio. La duración y severidad (Q20) muestran tendencia ampliamente ascendente en todo el territorio, sobre todo en Adour-Landas y eje pirenaico. **En Verano continúa la tendencia descendente**, más extendida en las dos zonas ahora citadas, mientras que en el Ebro las estaciones de la zona semi-alta del Ebro (figura 3.14) muestran una clara tendencia positiva (las únicas en todo el territorio). Es similar escenario en Julio, Agosto y Septiembre. La duración y severidad (Q20) aumentan también en Verano, sobre todo en Adour-Landas y eje pirenaico.

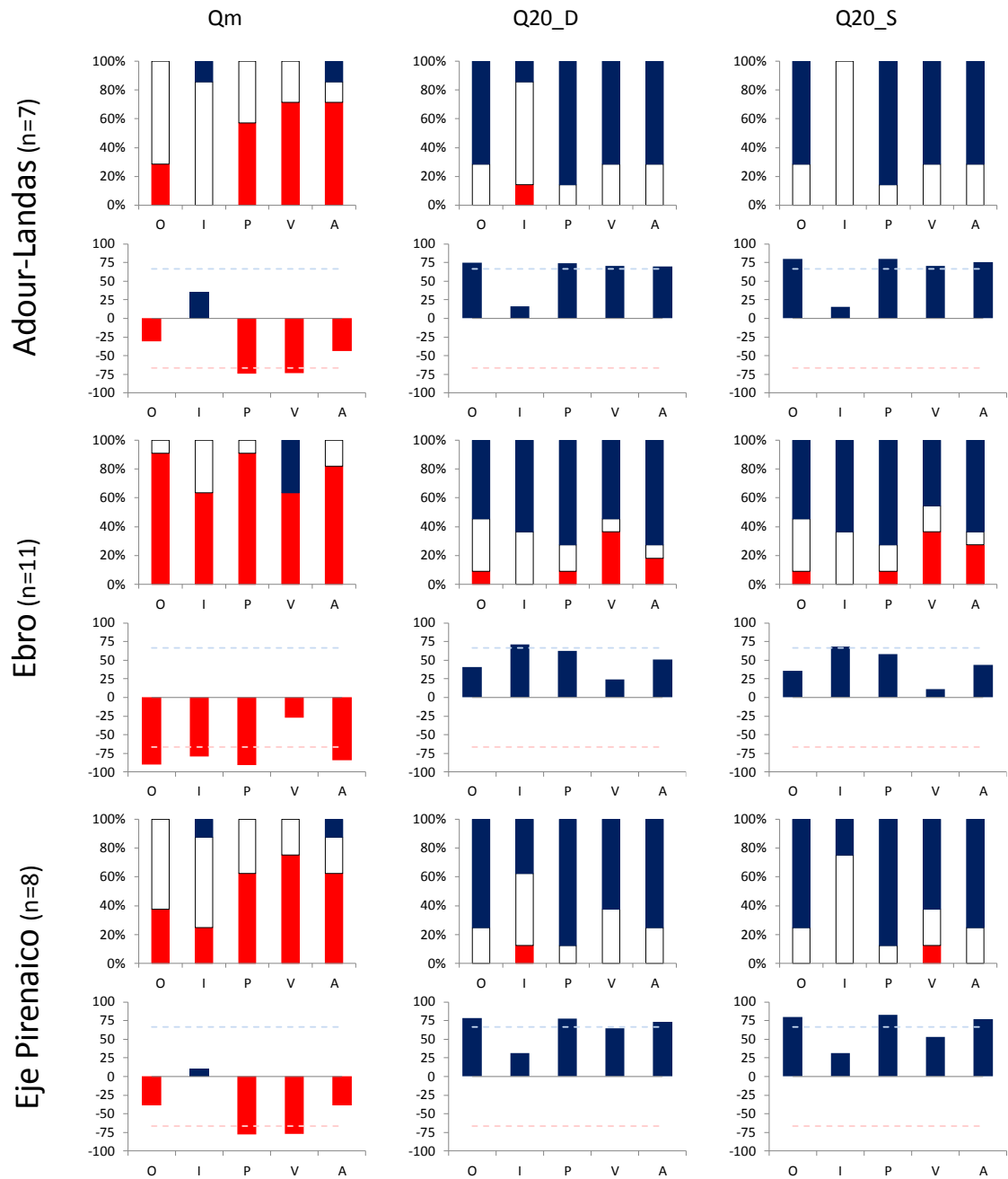


Figura 3.26: Distribución de tendencias (porcentual y por significancia) por zonas para las series de 60 años, con el número de estaciones consideradas. Azul, ascendente; blanco, no significativa; rojo, descendente.

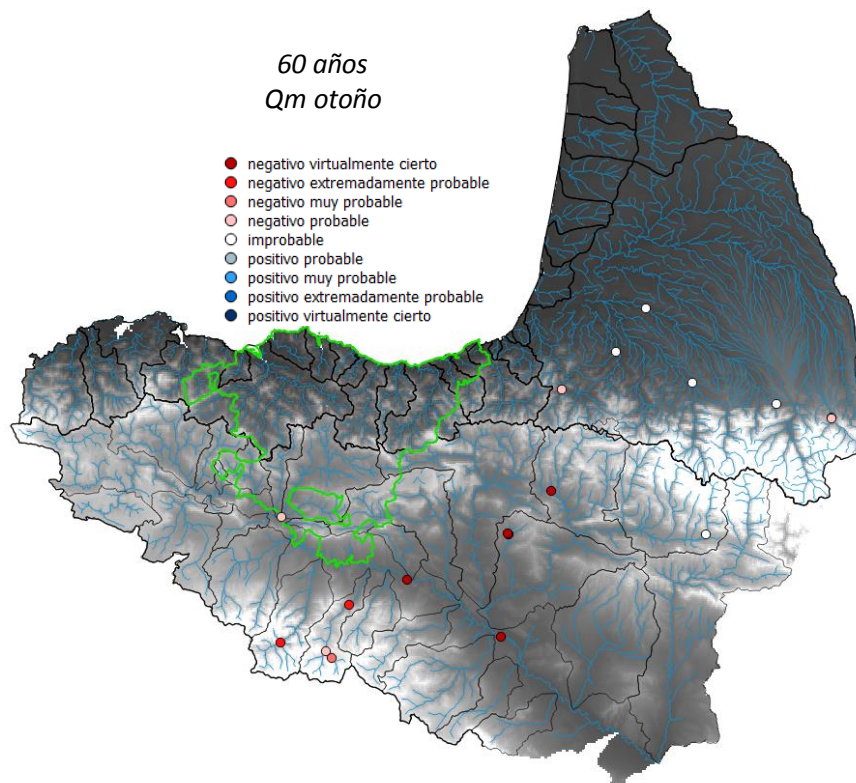


Figura 3.27: Tendencia de las series de caudales de Otoño, para el periodo de 60 años.

Resumen de la información correspondiente a este periodo (60 años): Se observa una muy clara tendencia a la disminución de los caudales medios (Qm) a lo largo del año, en todas las estaciones del año en el Ebro y en, sobre todo, Primavera y Verano en las otras dos zonas consideradas, siendo estas últimas las estaciones que condicionan la tendencia anual en cada zona. La duración y severidad (Q20) muestran la tendencia contraria a la observada en los Qm, lo cual es lógico, si bien es más evidente en Adour-Landas y eje pirenaico en Otoño, Primavera y Verano, e igual de evidente en el Ebro en todas las estaciones.

95 años (1920-1921 a 2014-2015)

Solo se cuenta con tres estaciones con esa longitud de serie de datos, las tres en la cuenca del Adour, en zonas de cabecera pirenaica. Se comentan aquí los resultados más relevantes del análisis (las tendencias coincidentes en las tres estaciones), pero, obviamente, sin poder otorgar a las conclusiones derivadas el mismo nivel de representatividad a escala regional que se ha dado a las de los periodos anteriormente analizados.

Las tres estaciones presentan tendencia negativa en los caudales medios a escala diaria. En el análisis estacional, **en Verano la tendencia es negativa** en las tres, debido al comportamiento en el mes de Septiembre. En Otoño es negativa claramente en dos, en Primavera no es tan evidente, y en Invierno no hay tendencia probable. La figura 3.28 recoge en diagramas radiales las tendencias mensuales del caudal medio y la duración y severidad de los caudales bajos. Este tipo de gráficos solo se han utilizado en este periodo, por contar con muy pocas estaciones.

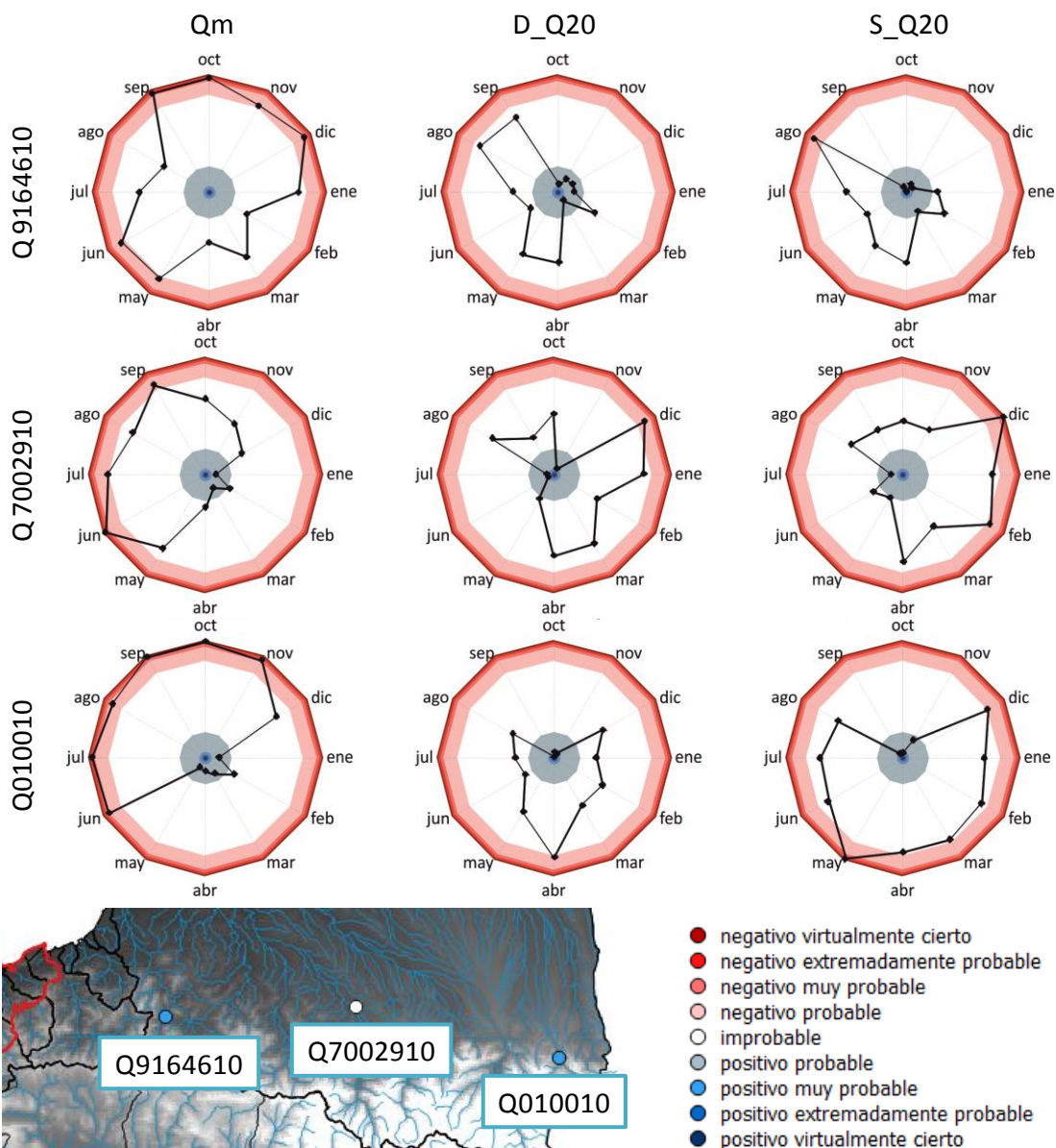


Figura 3.28: Gráficos radiales de las tendencias para cada mes de los caudales medios (Q_m) y de la duración y la severidad de los caudales bajos (D_{Q20} , S_{Q20}) para las estaciones con una serie de datos de 95 años.

Las gráficas indican que, en lo que se refiere a los caudales medios, hay tendencias negativas probables entre finales de Primavera (sobre todo, el mes de junio) y Otoño (alargándose en uno de los casos hasta el mes de diciembre), aunque en los meses de Verano las tendencias no están tan claras, ya que el mes de agosto no presenta tendencia probable en dos de las estaciones y tampoco julio en una de ellas. Por su parte, enero y marzo muestran tendencias negativas probables en dos de las tres estaciones, y en una de ellas esa tendencia negativa continúa durante abril y mayo. En lo referente a las tendencias del periodo de aguas bajas, las tendencias son más dispares entre estaciones, aunque coinciden en un probable aumento en la duración de los caudales bajos en el mes de noviembre.

3.5 Conclusiones: Integración de resultados

Se ha tratado de integrar aquí, a modo de síntesis, las observaciones más significativas hechas para cada intervalo de tiempo considerado. Se tiene en cuenta, sobre todo, la escala temporal, pero también la espacial, al menos a grandes rasgos, diferenciando las siguientes zonas o regiones: Valle del Ebro, Región de Adour-Landas, Corredor Cantábrico-Pirenaico, habida cuenta de la distribución de las estaciones. La figura 3.29 recoge lo más significativo a comentar (para los detalles ver figuras 3.13 y 3.14 para 20 años, 3.18 y 3.19 para 40 años, y 3.22 y 3.23 para 60 años).

Una primera conclusión, muy clara, es que en los **últimos 60 años** se ha dado una evidente tendencia descendente en los caudales medios (Qm), sea cual sea la escala considerada (diaria, mensual, estacional o anual) y para todas las estaciones del año (Otoño, Invierno, Primavera, Verano), así como para cada uno de los meses de esas estaciones. Esto es así para el Valle del Ebro, mientras que en la región Adour-Landas y en el eje pirenaico esta tendencia negativa sólo sería generalizable en Primavera y Verano. La tendencia anual, obviamente negativa, está condicionada por los datos de Primavera y Verano en estas dos últimas zonas, pero, además, también por los de Otoño en el Ebro. Los caudales bajos (Q20) muestran una imagen similar, pero ahora de aumento de su duración y severidad, sobre todo en Primavera, en todo el territorio y todos los periodos estacionales (excepto en Invierno en Adour-Landas y eje pirenaico).

En conjunto, esta situación indica una notable **homogeneidad espacio-temporal** de comportamiento de los caudales Qm en todo el territorio objeto de estudio en Primavera y Verano, e incluso, en menor medida, en Otoño. En Invierno la tendencia es la misma en el Ebro, pero no presenta tendencia significativa alguna en las otras dos zonas. Habría que ver si esa tendencia generalizada se corresponde con una similar, aunque pudiera estar desfasada en el tiempo, de descenso de las precipitaciones (o de aumento de las temperaturas), ámbito éste que quedaba fuera del presente estudio.

Al pasar al periodo intermedio, **los últimos 40 años**, se observa el mantenimiento de las tendencias negativas: muy clara en Primavera en todo el territorio, bastante clara en Verano (sobre todo en el eje pirenaico), y menos evidente en las otras dos estaciones del año (aunque a considerar en Otoño en el Ebro y en Invierno en Adour-Landas). La tendencia anual, negativa en todas las zonas, está condicionada, al igual que en el periodo de 60 años, por el comportamiento en Primavera y Verano.

años (n° estaciones)	OTOÑO	INVIERNO	PRIMAVERA	VERANO	Observaciones
60 (18)	negativa*	negativa*	negativa	negativa	La tendencia anual (Qm) está condicionada por Primavera y Verano. La duración y severidad (Q20) tienen tendencia al aumento.
40 (43)	negativa*	negativa**	negativa	negativa****	La tendencia anual (Qm) está condicionada por Primavera y Verano. En Q20 tendencia al aumento sobre todo en Adour-Landas y eje pirenaico.
20 (117)	negativa	positiva	positiva	negativa***	La tendencia anual (Qm) está condicionada por Invierno y Primavera. En Q20 tendencia a disminuir en Primavera, sobre todo, e Invierno.
	* Ebro	** Adour-Landas	*** Cantábrico		
	**** Eje Pirenaico				
	Sin asterisco, todo el Territorio				

Figura 3.29: Tendencias estacionales significativas derivadas del estudio realizado para los caudales medios (Qm), con las zonas en las que esas tendencias son más evidentes.

En lo que se refiere a los caudales bajos (Q20), su duración y severidad muestran tendencia al aumento, en línea a lo observado en el periodo de 60 años, pero de forma menos intensa, en todas las zonas del territorio; Primavera sigue siendo la estación con mayor tendencia. A citar, a diferencia del periodo anterior, la clara tendencia al aumento en Invierno en Adour-Landas.

A la vista de lo recogido en la figura 3.29, es evidente el cambio de escenario en **los últimos 20 años**: mientras que Otoño mantiene una muy clara tendencia negativa en todo el territorio, continuación de lo observado en los periodos anteriores (60 y 40 años), la de Invierno es aún más significativa, en todas las zonas (prácticamente total en el Cantábrico y en el eje pirenaico), pero ahora ascendente, lo que supone una notable inflexión respecto a los periodos previos. Esta tendencia positiva tiene continuación, aunque no tan evidente (muchos puntos sin tendencia, pero ninguno con negativa) en Primavera, también en todas las zonas. Verano aparece como una estación de tránsito, hacia el Otoño, ya que se dan tendencias de signo contrario; sólo en Cantábrico es notable la tendencia negativa. En consecuencia, la tendencia anual es positiva, y condicionada por Invierno y Primavera. Ahora, la duración y severidad de los caudales bajos (Q20) no muestran tendencias tan claras, aunque pasan a ser descendentes, sobre todo en Invierno y Primavera, en prácticamente todas las zonas; sólo en Otoño se sigue manteniendo una cierta tendencia ascendente.

Es decir, en estos 20 años se refleja una situación de **heterogeneidad temporal** de evolución de los caudales, que podría estar indicando un periodo temporal de cambios en el régimen hidrológico de las cuencas del territorio considerado. **Se puede pensar**, dada la relativa homogeneidad espacial del comportamiento de los caudales, **que se debe al impacto hidrológico de cambios a un nivel regional amplio, es decir, cambios en las condiciones climáticas** (que se verían aumentados o reducidos por cambios de otro tipo – usos del suelo, gestión de infraestructuras...- a escala de cuenca). Es verdad que 20 años es un periodo demasiado corto para extraer conclusiones afinadas, pero en cualquier caso se considera que hay que tener en cuenta la heterogeneidad deducida del análisis de tendencias, por su mayor influencia, al menos, a corto plazo.

años (n° estaciones)	OTOÑO	INVIERNO	PRIMAVERA	VERANO
60 (18)	negativa*	negativa*	negativa	negativa
40 (18)			negativa	negativa
20 (18)	negativa*	positiva**	positiva	
	* Ebro			
	** Corredor Cantábrico y Pirineos (<i>también Adour-Landás</i>)			
	Sin asterisco, todo el Territorio			

Figura 3.30: Tendencias estacionales significativas derivadas del estudio realizado para los caudales medios (Qm) de las 18 estaciones con series completas, con indicación de las zonas en las que esas tendencias son más evidentes.

Se han analizado también las tendencias que presentan las 18 estaciones que cuentan con 60 años de datos considerándolas, sólo ellas, en los intervalos de 40 y de 20 años, de forma que las nuevas estaciones de aforos que se han ido incorporando a las redes de control no desfiguren la evolución de las estaciones más longevas. El resultado de la comparación se recoge en la figura 3.30, en la que, obviamente, la información de 60 años es la misma que la de la figura 3.29. Las diferencias entre las dos figuras se centran en Otoño e Invierno para el periodo de 40 años, donde no se observan tendencias significativas en el conjunto de las 18 estaciones de aforo consideradas. Algo parecido ocurre en Verano para el periodo de 20 años. Por lo demás, las tendencias son similares, con la muy clara inflexión observada en el último intervalo en Invierno y Primavera.

Comparación con estudios previos

Una vez analizados los resultados, se han querido comparar con otros de estudios previos. En realidad, el único estudio de tendencias de evolución de caudales en estaciones de aforo de la CAPV fue desarrollado por personas que han participado en el estudio actual (Zabaleta y Antigüedad, 2012).

En aquel estudio, realizado con una metodología similar a la ahora utilizada (entonces con percentiles Q20, Q50 y Q80), y siguiendo también los criterios del IPCC, se consideraron 42 estaciones, prácticamente todas dentro de la CAPV (sólo 3 de ellas se situaban en Navarra, en ríos procedentes de la CAPV). Debido a la escasa longitud de las series de caudales disponibles se consideraron tres intervalos de tiempo: 12 años (1995-2007), periodo excesivamente corto para los objetivos propuestos, con las 42 estaciones; 20 años (1987-2007), con 18 estaciones; y 34 años (1973-2007) con solo 6 estaciones (algunas de ellas con series algo más largas).

	(1948)	1973	1987	1995	2007	
Urtea	Beheranzkoa	Beheranzkoa	Ezprobablea	Ezprobablea		Ekialdeko Kantaurialdea
Udazkena	Ezprobablea	Beheranzkoa	Ezprobablea	Ezprobablea		
Negua	Beheranzkoa	Beheranzkoa	Goranzkoa	Goranzkoa		
Udaberria	Beheranzkoa	Beheranzkoa	Beheranzkoa	Goranzkoa		
Uda	Ezprobablea	Ezprobablea	Ezprobablea	Beheranzkoa		
Urtea				Ezprobablea		Mendebaldeko Kantaurialdea
Udazkena				Ezprobablea		
Negua				Goranzkoa		
Udaberria				Goranzkoa		
Uda				Beheranzkoa		
Urtea	Beheranzkoa	Beheranzkoa	Goranzkoa ?	Goranzkoa		Mediterranea
Udazkena	Beheranzkoa	Ezprobablea	Goranzkoa	Ezprobablea		
Negua	Beheranzkoa	Ezprobablea	Goranzkoa	Goranzkoa		
Udaberria	Beheranzkoa	Beheranzkoa	Beheranzkoa	Goranzkoa		
Uda	Beheranzkoa	Beheranzkoa	Ezprobablea	Ezprobablea		

Figura 3.31: Tendencias en las series de caudales (Q50) de la CAPV para diferentes intervalos de tiempo. Zonas: Ekialdeko Kantaurialdea (Cantábrico Oriental), Mendebaldeko Kantaurialdea (Cantábrico Occidental), Mediterranea (Cuenca del Ebro). Tendencia anual (Urtea) y estacional (Udazkena: Otoño; Negua: Invierno; Udaberria: Primavera; Uda. Verano). Beheranzkoa (descendente), Goranzkoa (ascendente), Ezprobablea (improbable). En negrita las tendencias más significativas (Zabaleta y Antiguada, 2012).

Si bien las conclusiones de ambos estudios no son directamente comparables, debido a los diferentes ámbitos territoriales (lo que afecta al número de estaciones de aforo consideradas) y a los distintos intervalos de tiempo analizados (lo que puede influenciar los resultados si se dan cambios hidrológicos en periodos cortos de tiempo), sí hay aspectos comunes a recalcar, con las debidas precauciones. En relación a los caudales medios, la figura 3.31 recoge las tendencias observadas en los tres periodos, tanto la anual como las estacionales; se tuvieron en cuenta las tres zonas de la CAPV: vertiente mediterránea (Araba), vertiente cantábrica oriental (Gipuzkoa, prácticamente) y occidental (Bizkaia y parte de Araba).

Para los intervalos más amplios (más allá de 1987; 20 años) es evidente la tendencia negativa observada, regionalmente más clara en Primavera, de forma que también la anual resulta ser de ese signo. A pesar de contar sólo con 6 estaciones (2 en la vertiente cantábrica) estos resultados concuerdan con los ahora obtenidos para el periodo de 40 años (figura 3.22). En los últimos 20 años es notoria la tendencia significativamente positiva en Invierno, en las tres zonas, pero también, en menor medida, en Primavera en el periodo más corto (1995-2007), sobre todo en el Ebro (hasta el punto que en esta vertiente la tendencia anual resulta igualmente positiva), y la tendencia negativa en Verano en la vertiente cantábrica, lo cual es coincidente con lo observado en el presente estudio para el periodo de 20 años (figura 3.17).

Aunque es obvia la necesidad de seguir profundizando en el análisis de tendencias, a las escalas espacial y temporal, es evidente que en los últimos años se están dando cambios importantes en la evolución de los caudales, sobre todo en Invierno y Primavera, con tendencia al aumento de los caudales medios, a la vez que el Verano se prolonga cada vez más hacia el Otoño, con una clara tendencia a la disminución de los caudales medios y al aumento de la duración y severidad del periodo de aguas bajas en este último. La combinación de ambas informaciones implica un reparto progresivamente más desigual de caudales a lo largo del año. Además, esto estaría indicando una cierta deriva temporal en la evolución de los caudales, que, en la medida que sea generalizable a amplias zonas del territorio, puede considerarse una señal hidrológica del cambio climático.

A escala europea son varios los trabajos realizados sobre las tendencias observadas en las series de caudales. Se ha tomado como referencia el de Stahl et al. (2010) porque es en el que se basa la European Environment Agency en un informe reciente (EEA, 2016) referido a las tendencias, aunque no se entra aquí a analizar la metodología allí utilizada, sino solamente los resultados. El estudio, que consideró algo más de 400 estaciones de aforo, en cuencas a priori poco alteradas, con datos para el periodo 1962-2004, concluía en la necesidad de distinguir las tendencias anuales y las estacionales (“annual and seasonal trends need to be carefully distinguished”). La tendencia anual positiva, al aumento de caudales, observada en buena parte del norte y oeste de Europa, refleja la tendencia de los meses invernales. Por su parte, la fuerte tendencia anual negativa en el este y sur de Europa refleja, sobre todo, la tendencia en los meses estivales, que también es negativa en otras zonas europeas, aunque no llegue a condicionar la tendencia anual.

Estas tendencias, positiva en Invierno y negativa en Verano, han sido evidenciadas en el presente estudio, en el Golfo de Bizkaia, para los últimos 20 años (1995-1996 a 2014-2015), pero no en periodos anteriores para la tendencia positiva de Invierno. En este territorio también son importantes las tendencias observadas en Primavera y Otoño, normalmente no reflejadas en el estudio de Stahl et al. (2010), debido a la importancia que las precipitaciones en forma de nieve tienen en buena parte de Europa.

Evidentemente, no se pueden establecer relaciones directas entre las conclusiones de los estudios (sin un análisis más detallado de la forma en la que han sido llevados a cabo), pero sí al menos se puede comprobar que lo observado en el Golfo de Bizkaia puede tener una contextualización en el espacio europeo. No hay que olvidar, y la propia EEA (2016) lo recoge, que las regiones más problemáticas son aquéllas que están en zonas de transición entre regiones con diferentes tendencias en los caudales; ahí se incluye el Golfo de Bizkaia, entre las regiones europeas antes citadas, bajo el efecto del mar Cantábrico y de la cadena pirenaica. De ahí, el interés del estudio ahora realizado.

4 TENDENCIAS FUTURAS

4.1 Área de estudio

Esta investigación se centra en dos sub-cuencas de la cuenca del Zadorra. Este río es tributario del Ebro y su curso transcurre desde su nacimiento en las estribaciones de Sierra de Entzia (Araba) hasta su desembocadura al Ebro en Zambrana (Araba). La cuenca del Zadorra (figura 4.1) tiene una extensión de 1365 km² y la altitud varía entre 452 y 1548 m. Se sitúa inmediatamente al sur de la línea que conforma la divisoria cantábrico-mediterránea y constituye la zona más occidental de la denominada “Llanada Alavesa”, caracterizada por un corredor de suaves morfologías en dirección E-W y atravesado por el río Zadorra y sus afluentes. Los usos de suelo mayoritarios son el agrícola (tierras de labor en secano, 37%) y el forestal (bosques de frondosas, 26%).

La cuenca del Zadorra muestra una importante variabilidad de precipitación, así, en las zonas de mayor altitud puede variar de 900 a 1500 mm anuales, mientras que en las zonas bajas varía de 500 a 700 mm. Respecto a la temperatura, en las zonas más altas las temperaturas medias anuales son de unos 8-10 °C, y las zonas bajas rondan los 11-13 °C (1940-1990; Plan Hidrológico del Ebro, 1995). Este estudio, concretamente, está enfocado a las sub-cuencas de Otxandio y Audikana (figura 4.1), de una extensión aproximada de 36 y 82 km², respectivamente, cuencas de cabecera de los embalses Urrunaga y Ulibarri-Ganboa.

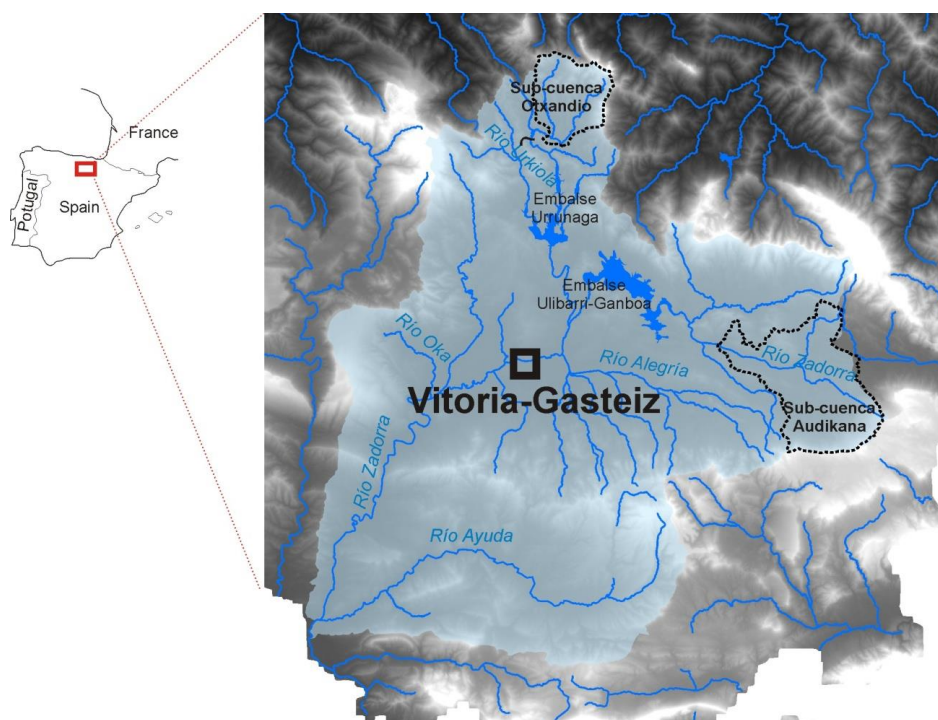


Figura 4.1: Localización de las sub-cuencas de Otxandio y Audikana en la cuenca del río Zadorra.

4.2 Metodología

4.2.1 Introducción al modelo hidrológico

El modelo numérico SWAT (Soil and Water Assessment Tool) tiene un amplio rango de aplicaciones, siendo especialmente empleado por la comunidad científica para estudiar los flujos de agua y nutrientes en cuencas agrícolas y forestales. Concretamente, en el Grupo Procesos Hidro-Ambientales de la UPV/EHU se han llevado a cabo diversos estudios con este modelo numérico, abarcando tanto estudios de impactos hidrológicos del cambio climático como de impactos de las prácticas agrarias sobre la calidad de las aguas. Precisamente, la cuenca del río Alegria, afluente del Zadorra, ha sido objeto de estudio en diferentes tesis doctorales (Cerro, 2013; Epelde, 2015) y proyectos de modelización numérica (Cerro et al., 2014; Epelde et al., 2015), algo que, sin lugar a dudas, ha ayudado a comprender mejor el funcionamiento hidrológico de esa cuenca.

El modelo numérico SWAT es un modelo de dominio público creado por el USDA (Agricultural Research Service at the Grassland, Soil and Water Research Laboratory de los Estados Unidos) que requiere el soporte gráfico y espacial de un sistema de información geográfica. La extensión ArcSWAT de ArcGIS es una de las interfaces gráficas de usuario del modelo SWAT y permite analizar la información resultante usando las características principales de ArcGIS. SWAT fue inicialmente creado con el fin de analizar el impacto de las prácticas agrarias sobre el agua, los sedimentos y su calidad (Arnold et al., 1998). Ha sido utilizado en cuencas de diferente tamaño de todo el mundo y en diferentes contextos geológicos (Laurent y Ruelland, 2011).

SWAT simula el flujo de agua, sedimentos y nutrientes, y también el crecimiento de la vegetación. Realiza simulaciones a nivel anual, mensual, diario y sub-diario, y es un modelo numérico semi-distribuido. Esto significa que el sistema es dividido en una serie de sub-modelos, trasladando la respuesta de cada uno de ellos hacia el punto de salida principal del dominio modelizado. Es un modelo numérico de base física, por lo que las transferencias de materia y energía se rigen mediante ecuaciones físicas que cumplen las leyes de conservación de la materia y energía tanto en el sistema general como en cada uno de los sub-modelos mencionados.

A partir del modelo digital de elevaciones y el punto de salida elegido por el usuario, SWAT delimita la cuenca y genera la red de drenaje. Así, se crean las sub-cuencas o sub-modelos. Posteriormente, se crea un mapa de pendientes, y solapándolo con los mapas de usos del suelo y el edafológico se crean las unidades espaciales con una respuesta hidrológica similar (Unidad de Respuesta Hidrológica - Hydrological Response Unit, HRU). Las HRUs son la división espacial de mayor resolución consideradas por SWAT.

La simulación hidrológica de la cuenca está dividida en dos fases: Por un lado, la fase en la que se calcula el flujo de agua y nutrientes (este último no considerado en este estudio) a escala de HRU y de sub-cuenca, y, por otro, la fase en la que se calcula el flujo de agua y nutrientes a lo largo de la red de drenaje hacia el punto de salida del dominio modelizado.

En ambas fases, el modelo numérico SWAT realiza un balance de masa considerando todos los procesos que afectan tanto a las entradas como a las salidas de agua en el sistema, de acuerdo con la ecuación 1.

$$SW_t = SW + \sum_{i=1}^t (R_i - Q_i - ET_i - P_i - QR_i) \quad (1)$$

donde, SW_t es el contenido de agua en el suelo en el día t (mm); SW es el contenido de agua inicial en el día i (mm); R_i es la precipitación diaria (mm); Q_i es la escorrentía diaria (mm); ET_i es la evapotranspiración diaria (mm); P_i es la percolación diaria (mm); y QR_i es el flujo diario de retorno (mm). Es importante considerar que SWAT permite realizar simulaciones a gran escala (tanto temporal como espacial), motivo por el que es considerado como uno de los más apropiados para llevar a cabo estudios relacionados con el cambio climático.

4.2.2 Caracterización física del medio

La primera etapa en la discretización espacial del modelo consiste en representar la red de drenaje y delimitar tanto la cuenca principal como las sub-cuencas. La delimitación de todos estos aspectos se basa en el Mapa Digital de Elevaciones (MDE). El MDE se ha obtenido de datos LIDAR (resolución 5x5 m) descargados de la página web www.geo.euskadi.eus. El presente modelo abarca toda la cuenca del Zadorra hasta su desembocadura en el Ebro (estación de Artze) y consta de un total de 69 sub-cuencas. De ellas, en este trabajo se han considerado las correspondientes a la sub-cuenca de Otxandio (35.7 km², sub-cuenca 1 del modelo) y a la de Audikana (81.5 km², sub-cuencas 22, 24, 25, 26 y 31 del modelo). A continuación, SWAT combina el mapa de suelos, el de usos de suelo y el de pendientes y divide la cuenca en diferentes Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU), que representan la discretización de menor tamaño considerada por el código SWAT. En este caso, el modelo se compone de 317 HRUs.

SWAT genera el mapa de pendientes a partir del MDE (figura 4.2). Por su parte, el mapa de **usos del suelo** se ha obtenido del programa de la Unión Europea CORINE que ofrece una cartografía a escala 1:100.000 que divide la mayor parte de la geografía europea en 44 usos del suelo. El siguiente paso es generar una relación entre los usos del suelo del CORINE y los de la base de datos del SWAT; así, se ha dividido la cuenca del Zadorra en 5 usos del suelo mayoritarios (figura 4.2). Cabe destacar que SWAT, al ser en su origen un modelo desarrollado para utilizar en cuencas agrícolas, posee una amplia base de datos con usos del suelo y de parámetros relacionados con éstos.

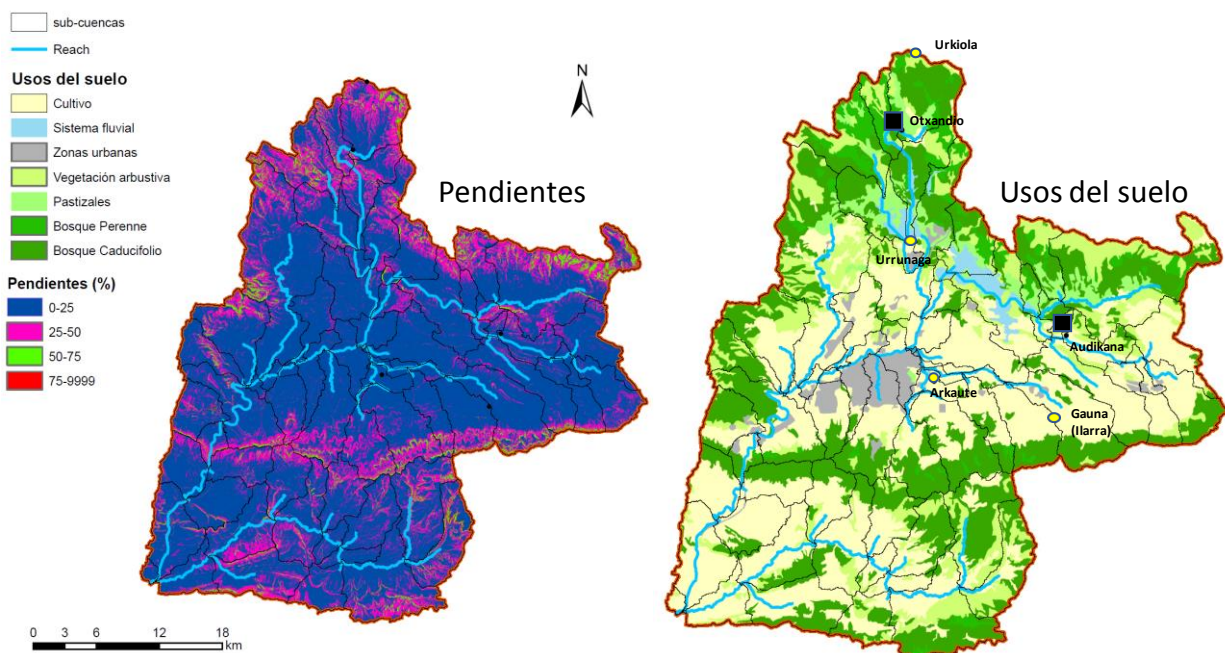


Figura 4.2: Mapas de pendientes y de usos del suelo de la cuenca del Zadorra. En el mapa de usos se han ubicado las estaciones de aforo y estaciones meteorológicas utilizadas en la modelización.

En cuanto al mapa de **suelos** se refiere, se ha optado por emplear un mapa de suelos (figura 4.3) elaborado a través de la metodología empleada durante el estudio de la erosión hídrica laminar (Gobierno Vasco, 2005). De acuerdo con esta metodología, en función de la combinación entre el uso de suelo y la litología (obtenida de www.geo.euskadi.eus) se establecen algunos datos físicos de los suelos, como por ejemplo la materia orgánica y la fracción de arcilla, limo y arena. Además de estos parámetros, SWAT necesita otros, como el agua disponible para las plantas (Available Water Content, AWC) y la conductividad hidráulica (Ks), que se pueden obtener mediante la combinación de la textura y el porcentaje de materia orgánica. En este caso, para el cálculo de dichos parámetros, se ha utilizado el programa de cálculo de propiedades hidráulicas SWC (Soil Water Characteristics; <https://hrsl.ba.ars.usda.gov/soilwater/Index.htm>) (tabla 4.1). La elección de esta metodología a la hora de establecer las características del suelo facilitará, en cierta medida, que el cambio de las propiedades del suelo al simular los caudales resultantes de cambios en los usos del suelo, se realice con cierta objetividad (no exenta de incertidumbre), y, por lo tanto, los resultados mantengan una misma coherencia (Apartado 4.3.3).

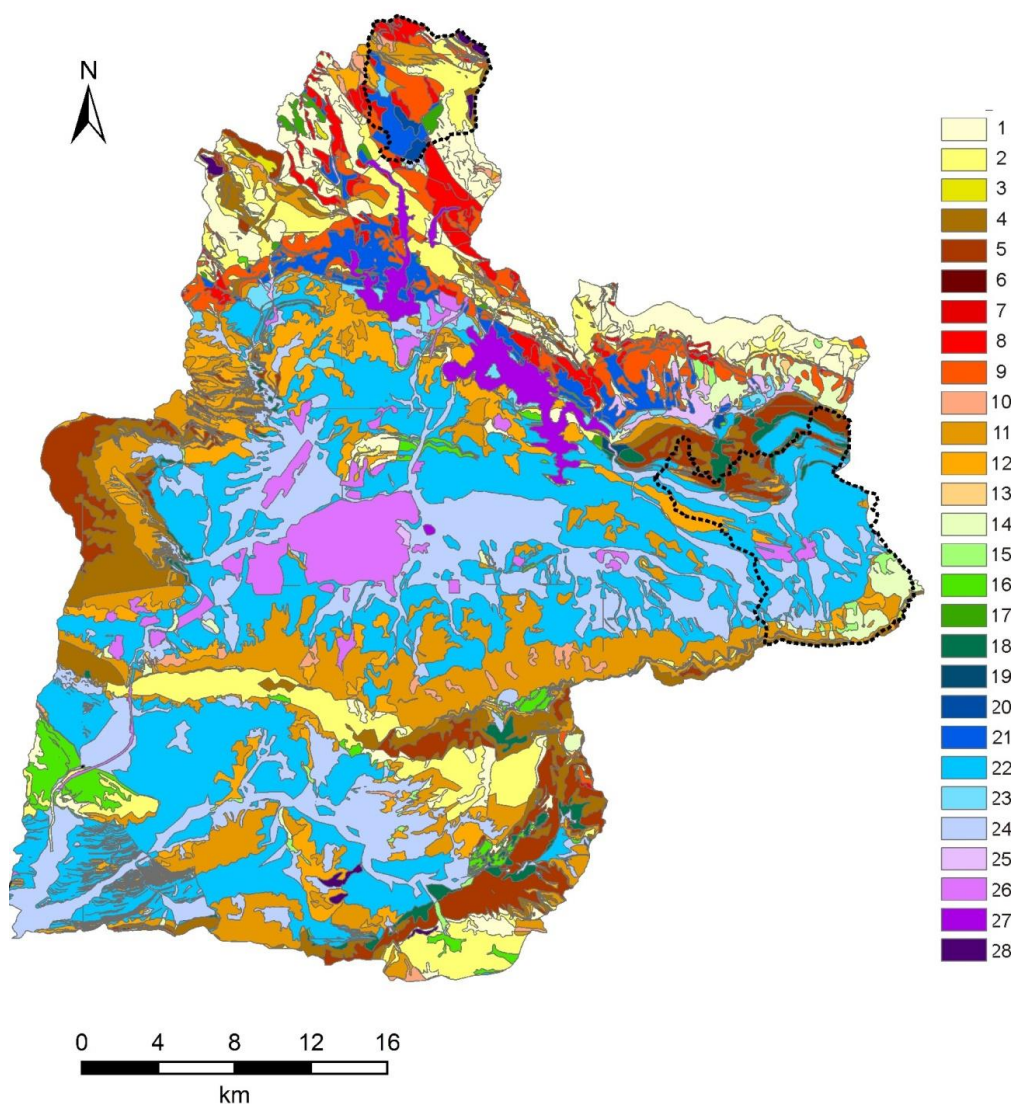


Figura 4.3: Mapa de suelos de la cuenca del río Zadorra, elaborado mediante la combinación de la litología y la vegetación. Ver tabla 4.1.

Tabla 4.1: Identificación de los suelos de la cuenca del Zadorra. De la combinación de la litología y los usos del suelo se obtienen los distintos tipos de suelo (ID): Los porcentajes de limo, arcilla, arena y materia orgánica se han obtenido del programa elaborado para la creación del Mapa de erosión de suelos de la Comunidad Autónoma de Euskadi (Gobierno Vasco, 2005), mientras que los valores del agua utilizable por las plantas (AWC), la conductividad hidráulica (Ks) y la densidad aparente (BD) se han conseguido introduciendo la textura y la materia orgánica en el programa SWC (Soil Water Characteristics).

ID	Litología	Uso	Limo	Arcilla	Arena	Materia orgánica	AWC	Ks	BD
			(%)	(%)	(%)	(%)	(cm ³ /cm ³)	(mm/h)	(g/cm ³)
1	Areniscas	Pino albar	24.2	16.9	58.9	8.95	0.14	50.57	1.12
2	Areniscas	Frondosa	25.5	20	54.5	6,025	0.13	30.32	1.26
3	Caliza	Pino albar	16.7	15.8	67.5	7.89	0.12	51.74	1.17
4	Caliza	Frondosa	41.7	23.1	35.2	0.94	0.14	7.57	1.52
5	Caliza	Pasto	30.2	27.2	42.6	9.88	0.15	23.28	1.14
6	Lutitas	Pino albar	25.9	29.2	44.9	8.95	0.14	17.97	1.18
7	Lutitas	Frondosa	46	27	27	5.12	0.17	16.51	1.23
8	Lutitas	Pasto	25.9	29.2	44.9	8.48	0.14	17.97	1.18
9	Lutitas y areniscas	Pino albar	32.8	24	43.2	8.95	0.16	31.13	1.11
10	Marga	Pino albar	21.6	11.6	66.8	10.24	0.13	77.21	1.09
11	Marga	Frondosa	41	32	27	4.4	0.15	8.75	1.3
12	Marga	Pasto	32.2	14.2	53.6	8.48	0.15	67.59	1.05
13	Mixta	Pino albar	26.2	19.8	54	8.95	0.14	39.59	1.13
14	Mixta	Frondosa	19.6	19.8	60.6	0.55	0.09	15.79	1.57
15	Mixta	Pasto	17.6	38.4	44	6.05	0.12	4.17	1.34
16	Areniscas	Cereal	26.6	21.4	52	4.03	0.13	20.63	1.38
17	Areniscas	Prado cultivo	17.8	21.4	60.8	6.41	0.12	27.83	1.28
18	Caliza	Cereal	22.8	20.2	57	6.72	0.13	32.83	1.23
19	Caliza	Prado cultivo	35.6	20.4	44	8.22	0.16	43.77	1.07
20	Lutitas y areniscas	Cereal	14.7	27.7	57.6	3.96	0.11	9.43	1.43
21	Lutitas y areniscas	Prado cultivo	24.8	21.4	53.8	7.4	0.14	33.25	1.18
22	Marga	Cereal	19.8	33.6	46.6	4.55	0.12	5.46	1.38
23	Marga	Prado cultivo	28.4	28	43.6	7.24	0.14	18.17	1.2
24	Mixta	Cereal	20.7	24	55.3	4.24	0.12	15.72	1.39
25	Mixta	Prado cultivo	18	22.8	59.2	3.98	0.11	16.99	1.41
26	Mixta	Cultivo	32.5	32.9	34.6	3.5	0.12	16.99	1.41
27	Superficie artificial	artificial	32.5	32.9	34.6	3.5	0.12	16.99	1.41
28	Zonas húmedas	húmedas	32.5	32.9	34.6	3.5	0.12	16.99	1.41

4.2.3 Datos de entrada del modelo: precipitación y temperatura

El modelo requiere que se introduzcan diferentes variables de entrada. Estas son las que establecen el flujo de entrada de agua y energía al sistema modelizado. Considerando la información existente en las estaciones meteorológicas de la zona de estudio, generalmente precipitación y en algunos casos temperatura, se optó por emplear un método que estime la evapotranspiración potencial basado en estas dos variables. Es la selección de este método, Hargreaves en este caso, el factor que limita el tipo de variable de entrada necesario.

Otro aspecto de gran importancia es la selección de las estaciones meteorológicas a considerar por el modelo. En la zona existen diversas estaciones gestionadas tanto por Euskalmet como por AEMET, no obstante, las de Euskalmet han sido descartadas puesto que su puesta en marcha es demasiado reciente (generalmente a partir del año 2000). En cuanto a las de AEMET se refiere, en la zona de estudio existen varias estaciones meteorológicas (tabla 4.2), pero no todas están en funcionamiento actualmente. En

concreto, la de mayor interés es la estación de Urrunaga presa-9080 (en adelante, Urrunaga), puesto que, de todas las estaciones consideradas en la tabla, únicamente para ésta ha elaborado AEMET proyecciones climatológicas, que son las que van a ser empleadas en este estudio. No obstante, la estación no está operativa en la actualidad y, a pesar de que el registro abarque el periodo 1943-2002, aquellos datos registrados durante los últimos 4 años presentan una gran incertidumbre y, además, el registro no es completo.

Tabla 4.2: Estaciones de AEMET cercanas a la zona de estudio.

Estación	Indicativo	Coordenada X	Coordenada Y	Altitud Z	Funciona en la actualidad	Proyecciones climatológicas	Variables disponibles
Albina (Embalse)	9078	530186	4760134	600	Sí	No	Precip.
Gauna (La Ilarra)	9082T	540760	4742305	599	Sí	No	Precip.
Escalmendi	9084U	529288	4747606	515	Sí	No	Precip. & temp.
Arkaute	9086	530662	4744557	515	Sí	No	Precip. & temp.
Urrunaga presa	9080	528481	4756333	540	No	Sí	Precip. & temp.

Lo ideal sería emplear los datos meteorológicos, en este caso temperatura y precipitación, de una misma estación tanto para alimentar el modelo durante las fases de calibración y validación del mismo, como durante la fase de aplicación de los escenarios climáticos (o de usos del suelo) que se quieran considerar. En cualquier caso, debe adoptarse una estrategia que permita elaborar las series meteorológicas necesarias durante ambas fases. Fundamentalmente existen dos opciones: por un lado, emplear las series meteorológicas de una estación para alimentar el modelo (para calibrarlo y validarlo) y las de otra estación para representar las proyecciones climáticas, y, por otro, estudiar las relaciones entre las distintas estaciones y obtener, mediante análisis de correlación, series representativas de la estación de interés.

Dado que las de la estación de Urrunaga son las únicas proyecciones climáticas existentes en la zona y teniendo en cuenta la incertidumbre de los datos de los últimos 4 años de registro (1999-2002) en esta estación, así como la ausencia de datos a partir del año 2002, para poder utilizar los series climáticas de Urrunaga en las dos fases mencionadas, se estima necesario completar las series de precipitación y temperatura (máxima y mínima) de forma que abarquen el periodo considerado para la calibración y la validación del modelo. Sin embargo, la zona de estudio presenta una importante variabilidad de precipitación; por ejemplo, la precipitación media anual registrada en la estación de Otxandio entre 2005 y 2015 fue de 1479 mm, mientras que para el mismo periodo en Urkiola (aprox. 2 km al NW) se registraron 1928 mm y 932 mm en Urrunaga (aprox. 9 km al S) (figura 4.3). Además, las relaciones existentes entre las variables meteorológicas de distintas estaciones no son buenas, por lo que se optó por no completar la serie de Urrunaga, desechando esta opción.

Así, la primera fase, la calibración y validación del modelo, se ha realizado con datos meteorológicos de las propias sub-cuencas de Otxandio y Audikana. Y, para la segunda fase, aplicación de escenarios, tal y como se explica en el apartado 4.2.6, se ha realizado una corrección de sesgo de las variables meteorológicas para poder utilizar en Otxandio y en Audikana las proyecciones climáticas existentes para Urrunaga. En la tabla 4.3 se observan las estaciones meteorológicas de las cuales se han obtenido los datos empleados en la calibración y la validación del modelo. En un principio se introdujeron los datos de otras estaciones, como Dima y Aramaio, sin embargo, el modelo solo utiliza los datos de las estaciones más cercanas a cada sub-cuenca.

Tabla 4.3: Estaciones meteorológicas utilizadas en la calibración y en la validación del modelo.

Estación	Indicativo	Coordenada X	Coordenada Y	Altitud Z	Funciona en la actualidad	Proyecciones climatológicas	Variables disponibles
Gauna (La Ilarra)	9082T	540760	4742305	599	Sí	No	Precip.
Urkiola	1069E	529229	4771861	737	Sí	No	Precip.
Arkaute	9086	530662	4744557	515	Sí	No	Temp.
Otxandio	C054	528001	4765557	556	No	Sí	Precip. & temp.

4.2.4 Calibración, validación y evaluación de la modelización hidrológica

El proceso de calibración, en el caso del modelo numérico SWAT, consiste en ir modificando de forma coherente sus parámetros, en función del ajuste existente entre el caudal simulado y el caudal observado. Con tal fin, se han utilizado los datos de caudal diario ($m^3 s^{-1}$) de las estaciones de aforo de Otxandio (H153) y Audikana (H152), propiedad de Iberdrola (tabla 3.1), para calibrar las sub-cuencas de Otxandio y Audikana, respectivamente. Por supuesto, para que la calibración sea satisfactoria la calidad de los datos observados ha de ser buena. En este sentido, es necesario mencionar que, tal y como se expone a continuación, los datos registrados muestran incertidumbres.

Estación meteorológica (C054 Euskalmet) y de aforo de Otxandio (H153):

Es sospechoso que el caudal registrado en la estación de Otxandio entre 1985 y 2015 sea mayor que la precipitación registrada en la misma. Además, la diferencia entre ambas variables va aumentando de forma gradual, puesto que el caudal registrado aumenta con el tiempo, aunque sin una tendencia clara que permita corregir los datos de una manera más o menos sencilla. Se considera que ello es debido al progresivo deterioro que ha sufrido el cauce de la estación de aforo, que con el paso del tiempo se colmata de sedimentos y vegetación. En la foto 4.1 se observa el estado del cauce de la estación de aforo. No obstante, se realizaron algunos intentos de corregir la serie de caudales, los cuales no dieron resultados satisfactorios.

Además, es necesario tener en cuenta el alto gradiente de precipitación existente en la cuenca y que la estación de Otxandio se encuentra en la zona de menor precipitación dentro de ese gradiente. Por ello, se consideró más correcto utilizar la estación meteorológica de Urkiola (Iberdrola), que estando dentro de la cuenca, se ubica en una zona con precipitaciones considerablemente mayores que las de Otxandio (en el periodo 2005-2015 la precipitación media anual fue 460 mm mayor en Urkiola), quedando mejor reflejadas las precipitaciones en la cuenca.

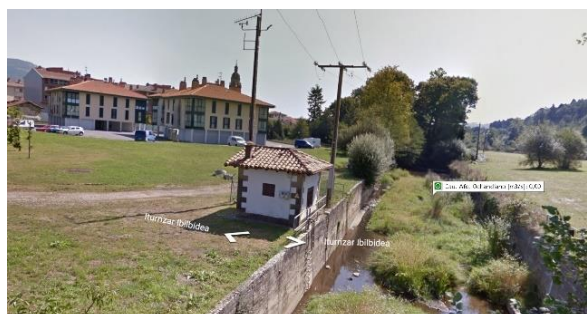


Foto 4.1: Estación de aforo de Otxandio, sin fecha conocida (Fuente: Iberdrola).

Estación de aforo de Audikana (H152):

La forma del hidrograma de esta estación (figura 4.4) refleja la incertidumbre existente en los caudales bajos. Como se puede apreciar, en ocasiones el caudal desciende de forma significativa y muestra formas anómalas en el hidrograma (ej. Verano de 2003). En diciembre de 2012 la Agencia Vasca del Agua URA comenzó a medir el nivel de agua en una sección del río cercana a la estación de Audikana. Con estos datos, y con los valores de la curva de gastos, se ha estimado el caudal (figura 4.4). En Verano de 2012, según los datos recogidos en la estación de Audikana, el nivel desciende de forma que prácticamente el cauce se queda seco, sin embargo, los datos de URA muestran que, aunque el descenso es considerable, no es tan extremo. Por otro lado, en general, los datos de URA muestran picos de caudal más altos que los registrados en la estación de Audikana, por lo que también podría existir incertidumbre en los caudales altos. Además, también se observa que en ocasiones las lluvias registradas en la estación meteorológica de Gauna no generan crecidas en Audikana, o su magnitud no es la esperada, y viceversa.

La ejecución del modelo en ambas cuencas se realizó a escala diaria. Se utilizó el periodo 1987-1994 para la calibración y el 2005-2015 para la validación. La interrupción entre los dos periodos es debida a que no hay datos de precipitación de Urkiola para ese periodo. En cualquier caso, los 18 años de simulación garantizan que existan años húmedos, secos e intermedios, por lo que la calibración y la validación abarcan todo tipo de condiciones hidro-meteorológicas. Se optó por utilizar los mismos periodos en las dos sub-cuencas para facilitar el procedimiento.

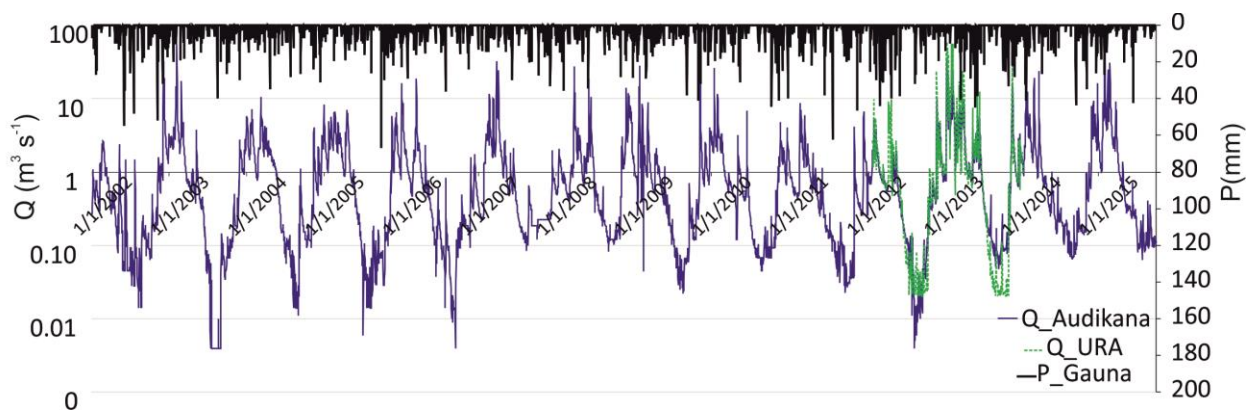


Figura 4.4: Hidrograma (m^3s^{-1}) de la estación de aforo de Audikana e hidrograma obtenido de los datos de nivel medidos por URA. En la parte superior la precipitación registrada en la estación de Gauna (mm).

El primer paso en la calibración fue identificar los parámetros más sensibles para el caudal de cada sub-cuenca. Se utilizó el programa de autocalibración SWAT CUP (Abbaspour et al., 2007) para calcular los parámetros más sensibles mediante el método “one at a time” (van Griensven et al., 2006). Este método consiste en evaluar la sensibilidad de cada parámetro mientras el resto se mantienen constantes. Los dos parámetros más sensibles en ambas cuencas son el curve number (CN2), o número de curva, que calcula el valor de la escorrentía superficial, el baseflow alpha factor (Alpha_BF) o constante de recesión. Posteriormente, se realizó una primera calibración manual para ajustar un **rango realista** para cada uno de los parámetros, y, por último, para concretar los valores óptimos de los parámetros, los rangos establecidos en la calibración manual se introdujeron en el programa SWAT CUP para realizar una autocalibración utilizando el algoritmo SUFI2 (Abbaspour et al., 2004, 2007).

El análisis de los resultados del modelo, tanto en el proceso de calibración como en el de validación, se ha llevado a cabo siguiendo la metodología propuesta por Moriasi et al., 2007. Se han utilizado en todo momento técnicas gráficas que aportan una comparación visual entre los datos simulados y medidos además de una primera perspectiva sobre el funcionamiento del modelo (ASCE, 1993). También se han calculado distintos parámetros estadísticos con el fin de comprobar la buena correlación entre los datos observados y simulados. A continuación, se muestra una breve descripción de estos métodos:

- **Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE):** es la unidad menos la magnitud relativa de la varianza residual (ruido) comparada con la varianza de los datos medidos. Va desde $-\infty$ a 1 y los valores más altos indican un rendimiento mejor (Nash y Sutcliffe, 1970).
- **Coefficiente de correlación (r2):** describe la proporción de la varianza en los datos medidos respecto a los modelados. Oscila entre 0 y 1 y los valores más altos indican un rendimiento mejor.
- **Porcentaje PBIAS:** mide la tendencia de los datos simulados a ser mayores o menores que los observados. Cuanto más se acerca a 0 mejor es la relación entre los datos observados y los simulados. Los valores positivos indican una sobre-estimación mientras que los negativos muestran una subestimación (Gupta et al, 1999.)
- **Razón de desviación estándar (RSR):** cociente entre la raíz del error cuadrado y la desviación estándar de los datos observados. Cuanto más se acerque a 0 mejor será el resultado (Moriassi et al., 2007).

Según Moriassi et al., 2007, se puede dar por satisfactoria una simulación de caudal cuando el índice NSE > 0.5, RSR ≤ 0.7, y PBIAS < 25%. Sin embargo, no se ha considerado la importancia de todos los parámetros por igual. Por ejemplo, los valores altos influyen más los estadísticos NSE y RSR. Dado que en este estudio se realiza un análisis de caudales bajos y medios, aunque ambos estadísticos se han tenido en cuenta, se han considerado de menor importancia. Tanto en el proceso de calibración manual como en la autocalibración el parámetro estadístico que se ha tomado como referencia ha sido el PBIAS.

Como el objetivo del estudio es evaluar las afecciones del cambio climático en la hidrología, pero centrándonos sobre todo en los caudales medios (Qm) y bajos (Q20), también se ha realizado un esfuerzo en asegurar que el modelo simula bien las partes bajas del hidrograma. Por un lado, se ha utilizado el programa Base Flow Filter Program-BFP (Arnold et al., 1998) para separar el flujo base de la escorrentía superficial. Así, comparando el flujo base del hidrograma simulado con el observado mediante los métodos estadísticos anteriormente descritos, es posible observar si el modelo simula bien esta parte del hidrograma. Por otro lado, se ha calculado el percentil Q20 y la mediana mensual de los datos simulados y observados y se ha realizado el mismo análisis estadístico. Por último, y teniendo en cuenta que para el norte de la Península Ibérica las proyecciones climáticas futuras a menudo predicen un clima más extremo que el de las últimas décadas (por ejemplo, IPCC, 2013), siguiendo la propuesta de Brigode et al. (2013), se eligieron los tres años consecutivos más secos y más húmedos para analizar si el modelo calibrado es capaz de simular correctamente condiciones extremas. Los años más secos y húmedos se seleccionan mediante el cálculo de un "Aridity Index" o índice de aridez (en adelante, AI) para todos los datos disponibles (1987-1994, 2005-2015), siendo AI la relación entre la evapotranspiración potencial y la precipitación (Görgen et al., 2010 Brigode et al., 2013). Los tres años con el AI más bajo son los mismos en ambas sub-cuencas (2010, 2011 y 2012), mientras que los tres años consecutivos con mayor AI en Audikana son 2007, 2008 y 2009 y en Otxandio son 1991, 1992 y 1993.

Utilizando todos estos criterios, es posible evaluar si el modelo es capaz de simular las proyecciones climáticas futuras e identificar dónde están las mayores incertidumbres de las simulaciones obtenidas.

4.2.5 Evaluación de la influencia del uso del suelo en los recursos hídricos.

El uso del suelo tiene efecto sobre la hidrología por su vinculación con la evapotranspiración (Fohrer et al., 2001), pero también porque afecta a las características de los suelos y a cómo éstos dividen, almacenan y regulan los flujos de agua (Mirus y Loague, 2013). La cuantificación de estos efectos es

crucial para muchos problemas ambientales, incluida la predicción de los impactos del cambio climático (Poff et al., 1997).

En este trabajo se realiza una primera aproximación en el estudio de los efectos de los usos del suelo en la hidrología de las sub-cuencas de Otxandio y Audikana. Para ello, se han planteado tres escenarios de cambio posible en cada sub-cuenca teniendo en cuenta factores como la pendiente o los usos de suelo en zonas cercanas. La sub-cuenca de Otxandio es fundamentalmente forestal (figura 4.5). Debido a su orografía, en la que aproximadamente la mitad de la sub-cuenca tiene pendientes de entre 25-50 %, no parece probable que en algún momento pudiera predominar el uso del suelo agrícola. Por este motivo, a excepción del primer escenario de cambio de usos del suelo (O1) en el que el 30 % de la cuenca es agrícola (en las zonas de menor pendiente) en los otros dos escenarios (O2 y O3) se plantean distintas posibilidades de cuenca forestal (figura 4.5). El uso del suelo en Audikana es mayoritariamente agrícola por lo que se ha optado por aumentar el bosque y la vegetación arbustiva en los distintos escenarios de usos del suelo (figura 4.5; A1, A2, A3).

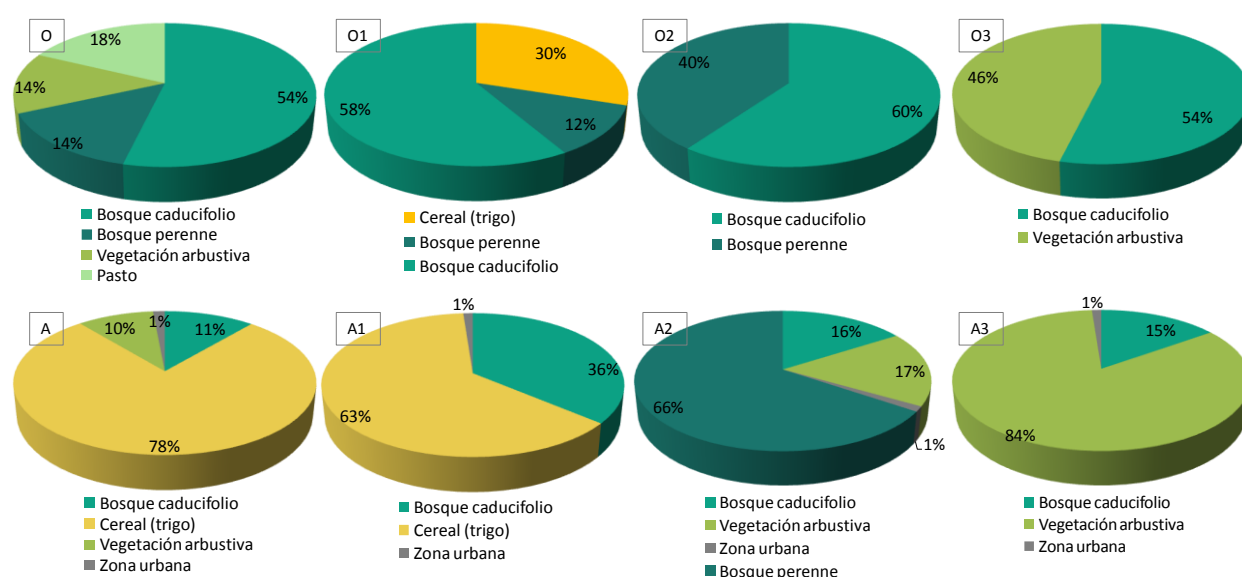


Figura 4.5: Uso del suelo en las sub-cuencas de Otxandio (O) y Audikana (A). Se incluyen los escenarios de cambio de usos del suelo en Otxandio (O1, O2, O3) y Audikana (A1, A2, A3).

Los mapas de usos del suelo modificados se han introducido en el modelo SWAT. Es necesario destacar que según el planteamiento explicado en el apartado 4.2.2. (Caracterización física del medio) los usos del suelo afectan a las características y, por tanto, a los parámetros hidrológicos del suelo. Por lo tanto, una vez introducido cada uno de los nuevos escenarios de usos del suelo, también se han cambiado las características y los parámetros del suelo en función del nuevo uso. De esta forma no se suponen cambios progresivos en el desarrollo del suelo, sino que se considera que el nuevo uso del suelo ha tenido el tiempo suficiente para desarrollar el suelo y, por lo tanto, que se consoliden sus características. Por último, se ha realizado la simulación hidrológica sin cambiar los valores del resto de parámetros del modelo obtenidos en la calibración del mismo. Para poder analizar con el menor grado de incertidumbre los posibles efectos de los cambios en los usos del suelo en la respuesta hidrológica, en lugar de incluir estos cambios en las proyecciones climáticas futuras se ha realizado el análisis para el mismo periodo que el de la calibración y la validación (1987-2015), de esta forma es posible aislar la influencia de los usos del suelo en los caudales.

4.2.6 Selección de los escenarios climáticos

Los Modelos Generales de Circulación (MGC) son la herramienta más utilizada para realizar proyecciones climáticas. Sin embargo, su resolución espacial es muy pequeña por lo que no es posible utilizar sus resultados para hacer proyecciones a escala de cuenca. Para hacer frente al problema de la resolución espacial, la Agencia Estatal de Meteorología, AEMET ha realizado el “downscaling” o reducción de escala (en adelante downscaling) de algunos MGC de la quinta fase del Proyecto de comparación de modelos acoplados (CMIP5). Los métodos estadísticos de downscaling aplicados en los MGC son los análogos AEMET (AN) (Petisco y Martín, 2006) y el Método Estadístico de Reducción de Escala (SDSM) (Wilby et al., 2002).

Tabla 4.4: Resumen de las proyecciones climáticas utilizadas en este trabajo.

Nombre del MGC	Institución	País	Método de downscaling	Nombre del “baseline”	RCP	Nombre de las proyecciones
ACCESS1-0	CSIRO-BOM	Australia	AEMET analog	ACCESS1-0_AN	4.5	ACCESS1-0_AN_R45
					8.5	ACCESS1-0_AN_R85
BNU-ESM	College of Global Change and Earth System Science	China	AEMET analog	BNU-ESM_AN	4.5	BNU-ESM_AN_R45
					8.5	BNU-ESM_AN_R85
			SDSM	BNU-ESM_SDSM	4.5	BNU-ESM_SDSM_R45
					8.5	BNU-ESM_SDSM_R85
CMCC-CESM	Centro Euro-Mediterraneo per i Cambiamenti Climatici	Italy	AEMET analog	CMCC-CESM_AN	8.5	CMCC-CESM_AN_R85
			SDSM	CMCC-CESM_SDSM	8.5	CMCC-CESM_SDSM_R85
MPI-ESM-LR	Max-Planck-Institut für Meteorologie	Germany	AEMET analog	MPI-ESM-LR_AN	4.5	MPI-ESM-LR_AN_R45
					8.5	MPI-ESM-LR_AN_R85
			SDSM	MPI-ESM-LR_SDSM	4.5	MPI-ESM-LR_SDSM_R45
					8.5	MPI-ESM-LR_SDSM_R85
MPI-ESM-MR	Max-Planck-Institut für Meteorologie	Germany	AEMET analog	MPI-ESM-MR_AN	4.5	MPI-ESM-MR_AN_R45
					8.5	MPI-ESM-MR_AN_R85
			SDSM	MPI-ESM-MR_SDSM	4.5	MPI-ESM-MR_SDSM_R45
					8.5	MPI-ESM-MR_SDSM_R85

De todos los MGC a los que AEMET les ha realizado downscaling, se ha realizado una selección de 5. Para realizar la selección se han tenido en consideración los resultados de trabajos de investigación como el de Perez et al. (2014), en el que se evalúan los modelos del CMIP5 para la región del Atlántico Nordeste. Todas las proyecciones de los MGC ofrecen los datos de un periodo base, o “baseline” (en adelante baseline), que corresponde al periodo comprendido entre 1961 y 2000. Así, es posible comparar los datos observados con los de las proyecciones climáticas. Este criterio de comparación también se ha utilizado a la hora de escoger los MGC que aparecen en la tabla 4.4.

AEMET ha realizado el downscaling a proyecciones de fundamentalmente dos "Trayectorias de Concentración Representativas" (en inglés Representative Concentration Pathway; RCP): el escenario de mitigación (RCP 4.5) y el escenario de altas emisiones (RCP 8.5). En el escenario RCP 4.5, el forzamiento radiativo se estabiliza antes de 2100 a 4.5 W m^{-2} mediante el uso de una gama de tecnologías y estrategias para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Por otra parte, el escenario del RCP 8.5 se caracteriza por el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero de forma que el forzamiento radiativo en 2100 llega a 8.5 W m^{-2} (Moss et al., 2010, Taylor et al., 2012).

AEMET suministra las proyecciones de las variables climáticas diarias para varios MGC (previa realización del downscaling) para la estación meteorológica Urrunaga (AEMET 9080) (figura 4.2). Para considerar la incertidumbre inherente a las proyecciones climáticas en las proyecciones hidrológicas resultantes, este documento se basa en 5 MGC (ACCESS1-0, BNU-ESM, MPI-ESM-LR, MPI-ESM-MR, CMCC-CESM), 2 RCPs (8.5 y 4.5) y 2 métodos de downscaling (AN y SDSM). Como se ha reconocido ampliamente, un conjunto de escenarios diferentes da resultados más confiables que las simulaciones de un solo modelo (ej. IPCC,

2013). Con estas combinaciones, 5 MGC, 2 RCPs y 2 métodos de downscaling, se han simulado con SWAT las proyecciones hidrológicas para 16 proyecciones climáticas (tabla 4.4).

Los baseline de los MGC (aplicado el downscaling) se han comparado con los datos registrados en la estación de Urrunaga en el periodo (1961-2000) y se han calculado las diferencias existentes entre el baseline de las proyecciones climáticas y los datos observados para la precipitación y la temperatura media (%) (figura 4.6).

Los datos meteorológicos registrados en Urrunaga no son completos y sobre todo en el caso de la temperatura, la falta de datos es importante. Por lo tanto, las diferencias que se calculan en este apartado pueden estar sujetas a errores. Sin embargo, se considera que sirven para esbozar una idea de las diferencias entre los datos obtenidos de los MGC y los datos registrados. A escala anual el ajuste es mejor que a escala estacional. Las mayores diferencias en temperaturas máximas se registran en Verano, y vienen dadas por los MGC a los que se les ha aplicado el método de downscaling de los análogos (AN). En general, tanto a escala estacional, para todas las estaciones, como a escala anual, son estos modelos (a los que se les ha aplicado el método de downscaling AN) los que más se alejan de los datos registrados.

En cuanto a los baseline de precipitación, las proyecciones realizadas con el MGC MPI-ESM-MR son las de mayor incertidumbre puesto que son las que mayores diferencias muestran. Por ejemplo, el modelo MPI-SM-MR_SDSM proyecta casi un 80 % más de precipitación en Verano. CMCC-CESM_SDSM también destaca, puesto que, aunque su ajuste es bastante bueno a escala anual y, en general, también estacional, en Verano proyecta casi un 60 % más de precipitación que la registrada. Teniendo en cuenta la variabilidad de la precipitación, se puede considerar que, a escala anual, las precipitaciones obtenidas de los MGC y las registradas en Urrunaga se ajustan bastante bien (con excepciones como las ya mencionadas).

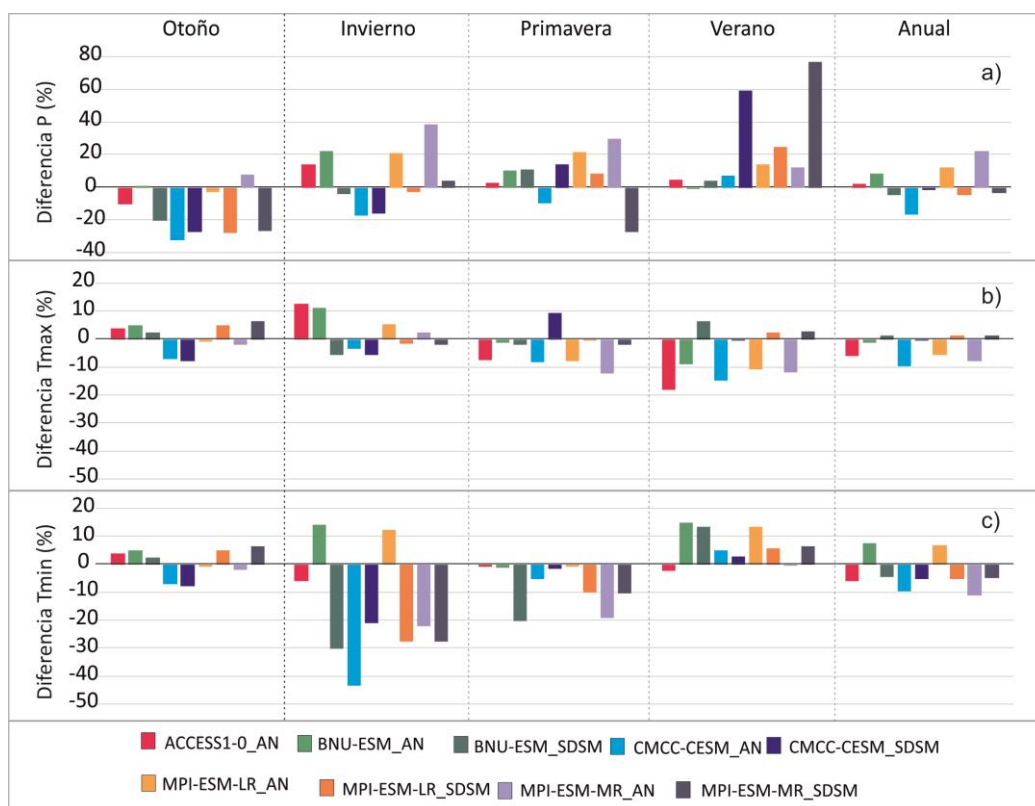


Figura 4.6: Diferencia entre el promedio anual de la precipitación (a) y el promedio de la temperatura máxima (b) y mínima (c) entre los baseline de las proyecciones climáticas y los datos registrados en Urrunaga. Los datos se presentan en diferencias estacionales y anuales.

Como se ha podido observar, aunque se haya realizado un downscaling de los resultados de los MGC todavía existen diferencias entre los datos registrados y los proyectados. Además, como ya se ha mencionado, en la cuenca del Zadorra la variabilidad de los datos meteorológicos es importante. Por ello, para la simulación de caudales, tanto para el baseline como para las proyecciones futuras, se han corregido los datos de las proyecciones climáticas realizadas para la estación de Urrunaga, teniendo en cuenta los datos de precipitación de la estación de Urkiola (Iberdrola) y la temperatura registrada en Otxandio, para la sub-cuenca de Otxandio, y los datos de precipitación de la estación de Gauna y la temperatura registrada en Arkaute para la sub-cuenca de Audikana.

Para corregir el sesgo de las proyecciones de series climáticas de precipitación y temperatura máxima y mínima (tanto las del baseline como las futuras) se ha utilizado la metodología propuesta por Lenderink et al. (2007). Este método utiliza los datos mensuales para corregir la diferencia entre los datos observados y los obtenidos de los MGC. Los valores diarios se ajustan con el mismo factor de corrección cada mes, y este factor no varía en el tiempo. Se ha escogido este método porque no afecta a las posibles tendencias climáticas futuras (se analizarán posteriormente) y a sus proyecciones hidrológicas derivadas.

En el caso de la precipitación la corrección de sesgo se realiza de la siguiente manera:

$$P_{CP}^*(d) = P_{CP}(d) \cdot \left[\frac{\bar{P}_{obs}}{\bar{P}_{CP}} \right]$$

Donde, $P_{CP}^*(d)$ es la precipitación de la proyección climática a la que se le ha corregido el sesgo a escala diaria, $P_{CP}(d)$ es la precipitación de la proyección climática que proporciona AEMET a escala diaria, \bar{P}_{obs} es la precipitación media mensual (en el caso de Otxandio se han utilizado los datos de la estación de Urkiola (1069E) y en el caso de Audikana los de Gauna (9082T)) y, \bar{P}_{CP} es la precipitación media mensual del baseline de cada proyección.

Para la temperatura máxima y mínima la corrección es la siguiente:

$$T_{CP}^*(d) = T_{CP} + \bar{T}_{obs} - \bar{T}_{CP}$$

Donde, $T_{CP}^*(d)$ es el valor de temperatura de la proyección climática a la que se le ha corregido el sesgo a escala diaria, $T_{CP}(d)$ es la temperatura de la proyección climática que proporciona AEMET a escala diaria, \bar{T}_{obs} es la temperatura a media mensual (en el caso de Otxandio se han utilizado los datos de la estación de Otxandio (C054) y en el caso de Audikana los de Arkaute (9086)) y, \bar{T}_{CP} es la temperatura media mensual del baseline de cada proyección.

Una vez aplicado este método las diferencias a escala mensual entre las variables meteorológicas registradas y proyectadas son mínimas pero la distribución de las precipitaciones y los días calurosos/fríos varía a lo largo del mes. Son los valores corregidos los que se han introducido en SWAT como datos meteorológicos.

4.2.7 Evaluación del impacto de las proyecciones climáticas en los recursos hídricos

Con el objetivo de evaluar su impacto hidrológico, las proyecciones se han dividido en tres horizontes futuros: 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100, que en adelante denominaremos 2030, 2060 y 2090, respectivamente. Las proyecciones hidrológicas futuras (caudales medios) se han comparado con las proyecciones hidrológicas de sus baseline a escala anual y estacional.

Además, también se han estudiado las tendencias que pueden existir en las proyecciones hidrológicas. Para hacer este análisis, se han calculado los caudales medios (Q_m) y la duración y la severidad de los caudales bajos (Q_{20}) y posteriormente se han analizado sus tendencias mediante la misma metodología explicada en los apartados 3.3.4 y 3.3.5. Se han tomado en cuenta las duraciones anuales y estacionales. La severidad define el déficit de caudal (volumen), en este caso anual, por debajo de Q_{20} .

4.3 Resultados

4.3.1 Calibración validación e incertidumbre de la modelización hidrológica

La calibración (1987-1994) y la validación (2005-2015) de las sub-cuencas de Otxandio y Audikana se ha realizado por separado. Como se ha expuesto en el apartado 4.2.4. Calibración, validación y evaluación de la modelización hidrológica, para realizar este proceso se han utilizado los datos diarios de caudal ($m^3 s^{-1}$) registrados en las estaciones de aforo de Otxandio y Audikana, y tal y como se ha mencionado, estos datos están sujetos a numerosas incertidumbres, lo cual ha dificultado el proceso.

Los parámetros modificados en cada sub-cuenca y el rango utilizado en el proceso de autocalibración, se pueden observar en la tabla 4.5. En un principio, la calibración comenzó con unos 15 parámetros relacionados con el caudal, pero debido a su escasa influencia se fueron descartando hasta modificar tan solo los 12 parámetros de la tabla 4.5. Los parámetros relacionados con las propiedades físicas de los suelos no se han modificado durante la calibración, con el fin de posibilitar una mejor evaluación del impacto de los usos del suelo en los recursos hídricos (apartado 4.2.5).

Los parámetros más sensibles son el número de curva (CN_2) y la constante de recesión (α_{BF}). El primero se ha incrementado en una pequeña proporción para ajustar mejor los picos, mientras que el valor del segundo se ha aumentado de forma considerable para que el flujo base no descienda de forma abrupta. La mayor parte de los parámetros calibrados se han modificado de forma similar en ambas cuencas, sin embargo, a algunos como el LAT_TIME (tiempo de circulación de flujo lateral) o el CH_K2 (conductividad del canal principal) se les han atribuido valores finales muy distintos. Estas diferencias son producidas por las necesidades de incremento o descenso del caudal en cada sub-cuenca. A la hora de realizar la calibración se ha tenido en cuenta que el rango de valores de los parámetros escogido sea apropiado a las características de la cuenca. Para más información sobre los parámetros calibrados, consultar la documentación del modelo SWAT (<http://swat.tamu.edu/>).

Tabla 4.5: Resumen de los parámetros ajustados en el proceso de calibración, su descripción y rango. *v significa que el valor del parámetro se cambia por el nuevo valor y r significa que el valor del parámetro se cambia de forma relativa.

Tipo de cambio	Nombre del parámetro	Descripción	Caudal		Rango valores de parámetros
			Otxandio	Audikana	
r	CN2.mgt	Número de curva	↑0.9 %	↑0.9 %	↑5-↓5 %
v	CH_K2.rte	Conductividad del canal principal	23.05	175	0.045-200
v	SURLAG.bsn	Coefficiente de retención de la escorrentía superficial	3.64	3.64	0-10
v	ALPHA_BF.gw	Constante de recesión	0.9	0.9	0.5-1
v	ESCO.bsn	Factor de compensación de la evaporación del suelo	0.98	0.98	0.8-1
v	GW_DELAY.gw	Retardo (días) del agua subterránea	10	10	may-25
v	ELEV_FR. sub	Fracción del área de la sub-cuenca con bandas de elevación.	0.2	0.2	-
v	LAT_TTIME.hr	Tiempo de circulación del flujo lateral	4.55	75	0-100
v	OV_N.hru	Valor de <i>n</i> (Manning) para la escorrentía superficial	0.075	0.075	0.01-0.3
v	SFTMP.bsn	Temperatura a la que nieva	0.25	0.25	-3
v	SMTMP.bsn	Temperatura base para que la nieve comience a derretirse.	1.65	1.65	0-5
v	RCHR_DP.gw	Factor de percolación al acuífero profundo	0	0	0

Los resultados de la calibración se han comparado de forma gráfica con los datos observados durante todo el proceso. En general se podría decir que en ambas sub-cuencas los caudales pico se han subestimado. Sin embargo, es necesario recordar que, aunque en todo momento se haya intentado que en conjunto la calibración sea satisfactoria, el interés se ha puesto fundamentalmente en los caudales medios y bajos. En la sub-cuenca de Otxandio, el caudal simulado tiende a ser menor que el observado. Es necesario tener en cuenta que la falta de mantenimiento del cauce en la estación de aforos puede dar como resultado el registro de caudales mayores a los reales, sobre todo en aguas bajas, por lo que la subestimación de caudales por parte del modelo quedaría, hasta cierto punto, justificada. Por otro lado, los caudales simulados de la sub-cuenca de Audikana tienden a ser ligeramente mayores que los registrados. Como ya se ha mencionado, los caudales bajos de la estación muestran numerosas incertidumbres, lo que dificulta el proceso de calibración. Los resultados gráficos de la calibración y la validación de estas dos sub-cuencas se puede observar en el Anexo 2.

Una vez calibrado el modelo (1987-1994), se procede a la validación (2005-2015) introduciendo los datos meteorológicos de este periodo, pero sin modificar los parámetros calibrados. Los resultados estadísticos de la calibración y la validación se pueden observar en las tablas 4.6 y 4.7. En estas tablas además de los resultados estadísticos para los periodos de validado y calibrado en su totalidad, se han incluido los estadísticos para el flujo base de los hidrogramas obtenidos, los de los percentiles Q20 y Qm de los mismos y los de los años de alto AI (años húmedos) y bajo AI (años más secos) por separado. Se puede observar que, a pesar de los problemas de los caudales registrados en ambas cuencas, se ha obtenido una buena calibración que ha podido ser validada, también para los caudales bajos, a los que se presta especial interés en este estudio.

Tabla 4.6: Resultados estadísticos para la sub-cuenca de Otxandio. Según Moriasi et al., 2007, la calibración se considera satisfactoria cuando $NSE > 0.5$, $r2 > 0.5$, $RSR \leq 0.7$, y $PBIAS < 25\%$, los resultados no satisfactorios se han indicado con negrita.

OTXANDIO		Caudal				Flujo base			
		NSE	r2	PBIAS	RSR	NSE	r2	PBIAS	RSR
Calibración	1987-1994	0.69	0.69	9.04	0.56	0.30	0.58	-22.91	0.84
Validación	2005-2015	0.57	0.58	19.13	0.66	0.67	0.72	12.17	0.57
Años áridos	2010-2012	0.67	0.67	9.94	0.58	0.74	0.79	-6.50	0.51
Años húmedos	1991-1993	0.50	0.51	14.58	0.71	0.70	0.73	13.08	0.55
Q50	1987-1994 2005-2015	0.73	0.75	2.01	0.52				
Q20	1987-1994 2005-2015	0.58	0.67	2.16	0.65				

Tabla 4.7: Resultados estadísticos para la sub-cuenca de Audikana. Según Moriasi et al., 2007, la calibración se considera satisfactoria cuando $NSE > 0.5$, $r2 > 0.5$, $RSR \leq 0.7$, y $PBIAS < 25\%$, los resultados no satisfactorios se han indicado con negrita.

AUDIKANA		Caudal				Flujo base			
		NSE	r2	PBIAS	RSR	NSE	r2	PBIAS	RSR
Calibración	1987-1994	0.56	0.57	12.61	0.67	0.69	0.73	16.79	0.56
Validación	2005-2015	0.57	0.59	16.29	0.66	0.75	0.79	7.13	0.50
Años áridos	2010-2012	0.48	0.49	16.95	0.72	0.84	0.79	23.59	0.40
Años húmedos	2007-2009	0.65	0.59	12.10	0.60	0.76	0.71	11.81	0.49
Q50	1987-1994 2005-2015	0.77	0.80	2.08	0.48				
Q20	1987-1994 2005-2015	0.69	0.74	10.36	0.55				

Respecto a las incertidumbres asociadas a la modelización hidrológica, por un lado, existen las relacionadas con los caudales registrados en ambas sub-cuencas y que ya se han mencionado con anterioridad. Obviamente, si los caudales con los que se calibra el modelo no son adecuados, independientemente de si la calibración (estadística y gráficamente) es satisfactoria o no, ésta estará sujeta a incertidumbres. En relación con los índices estadísticos obtenidos en la calibración y la validación del modelo, es posible destacar que los valores no satisfactorios que se pueden ver en las tablas 4.6 y 4.7 están relacionados con índices estadísticos cuyo valor está influenciado por los caudales pico. Centrándonos en el índice RSR, en la sub-cuenca de Otxandio los años húmedos son los que muestran mayor incertidumbre, mientras que en Audikana ocurre al contrario. En ambos casos se considera que la calibración y la validación son lo suficientemente buenas para hacer un análisis de caudales medios (Qm) y bajos (Q20).

4.3.2 Impacto hidrológico de las proyecciones climáticas futuras: escala anual y estacional (2011-2100)

Una vez calibrado y validado el modelo hidrológico, se ha procedido a introducir en él las proyecciones climáticas para evaluar su impacto en los recursos hídricos de las cuencas de estudio. Ya se ha dicho anteriormente que AEMET ha realizado downscaling estadístico a los datos obtenidos de los MGC (Modelo General de Circulación) para la estación de Urrunaga. Para poder utilizar estos datos en las sub-cuencas de Otxandio y Audikana y para corregir las diferencias existentes entre los datos históricos y las proyecciones climáticas, a estas últimas se les ha aplicado una corrección de sesgo. Son precisamente estos datos corregidos los que se han introducido en el modelo para obtener los caudales proyectados.

Se analizan primero las diferencias existentes entre los caudales simulados con a) los datos climáticos históricos y b) los obtenidos de las proyecciones climáticas para el baseline o periodo base. La comparación se realiza entre caudales simulados (y no con los observados) (1987-2000) porque de esta forma no se transfieren las diferencias debidas a la propia modelización. Después, se ha calculado la diferencia (%) existente entre las proyecciones hidrológicas futuras y su proyección del periodo baseline. Este análisis se ha dividido en tres horizontes (2030, 2060 y 2090) y se ha realizado tanto a escala estacional como a escala anual.

Sub-cuenca de Otxandio

La comparación entre el caudal medio simulado para la sub-cuenca de Otxandio ($Q_{\text{Sim Otxandio}}$) y el obtenido de las proyecciones hidrológicas de los baseline de los escenarios climáticos se pueden observar en la figura 4.7.

En general, a escala anual, el caudal simulado en Otxandio y el obtenido de los baseline de las proyecciones climáticas puede considerarse bastante similar (entre -2.5 % y + 10 %) con excepción de ACCESS1-0_AN que es aproximadamente un 20 % menor que $Q_{\text{Sim Otxandio}}$. En Verano todas las proyecciones subestiman el caudal, mientras que en Invierno la sobreestiman. Otoño y Primavera muestran resultados variables, pero en general se podría decir que los baseline de las proyecciones subestiman el caudal, sobre todo en Otoño.

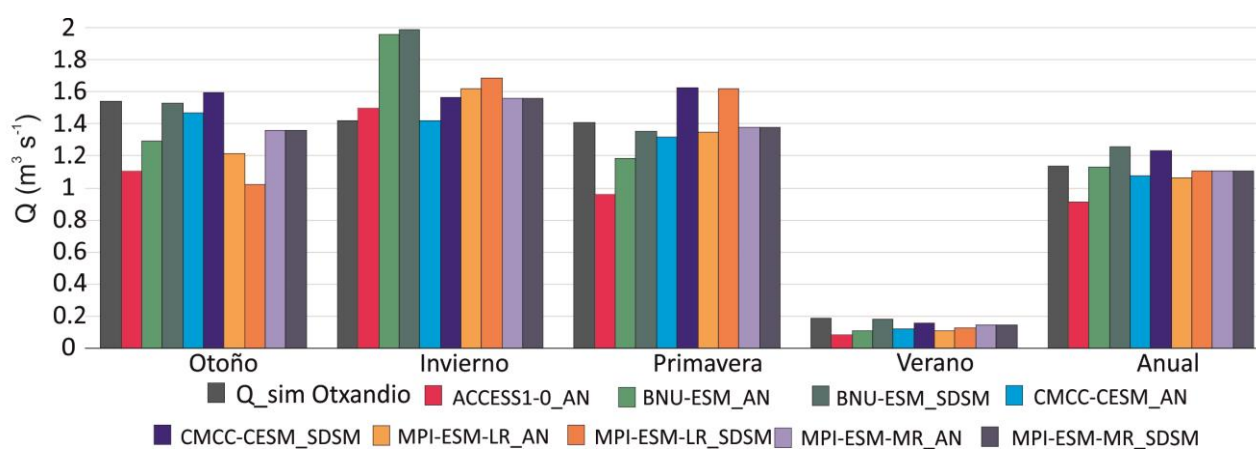


Figura 4.7: Promedio de caudal ($m^3 s^{-1}$) para el periodo 1987-2000. Aparece el caudal simulado con los datos climáticos históricos de la estación de Otxandio ($Q_{\text{Sim Otxandio}}$) y los resultados de los baseline de las proyecciones climáticas.

Para una mejor comprensión de las proyecciones hidrológicas futuras, las diferencias (%) de las proyecciones respecto a su baseline se han agrupado en función del RCP y el método de downscaling, calculando su valor medio. Todos los resultados de pueden observar en el Anexo 3.

Como se puede apreciar en la figura 4.8, el descenso del caudal medio va siendo mayor de forma progresiva del horizonte 2030 hasta el 2090, de forma generalizada y en todas las estaciones del año. A finales de siglo, se espera que el caudal medio anual descienda entre un 10% y un 17%. Otoño será la estación más afectada, mientras que los menores descensos se darán en Invierno. A finales de siglo se espera que el caudal medio de Verano descienda entre un 20 y un 27 %. Primavera (abril) es la estación en la que mayores caudales se registran (figura 4.9), a lo largo del siglo XXI el caudal en esta estación también descenderá, pero según las proyecciones lo hará en menor medida que en Otoño y Verano.

Por último, utilizando los valores máximos y mínimos del caudal medio proyectado en cada horizonte, se ha elaborado la figura 4.9. De esta forma es posible evaluar el rango de variación del caudal proyectado. En la figura, al igual que en la figura 4.8, se puede observar el descenso progresivo que se da en el caudal a medida que los horizontes proyectados son más lejanos en el tiempo (la banda que representa el rango del caudal cada vez es más estrecha e indica un descenso del caudal). Los mayores rangos de variación del caudal se dan entre enero y abril, mientras que a medida que el caudal desciende (meses más secos) el rango es más estrecho.

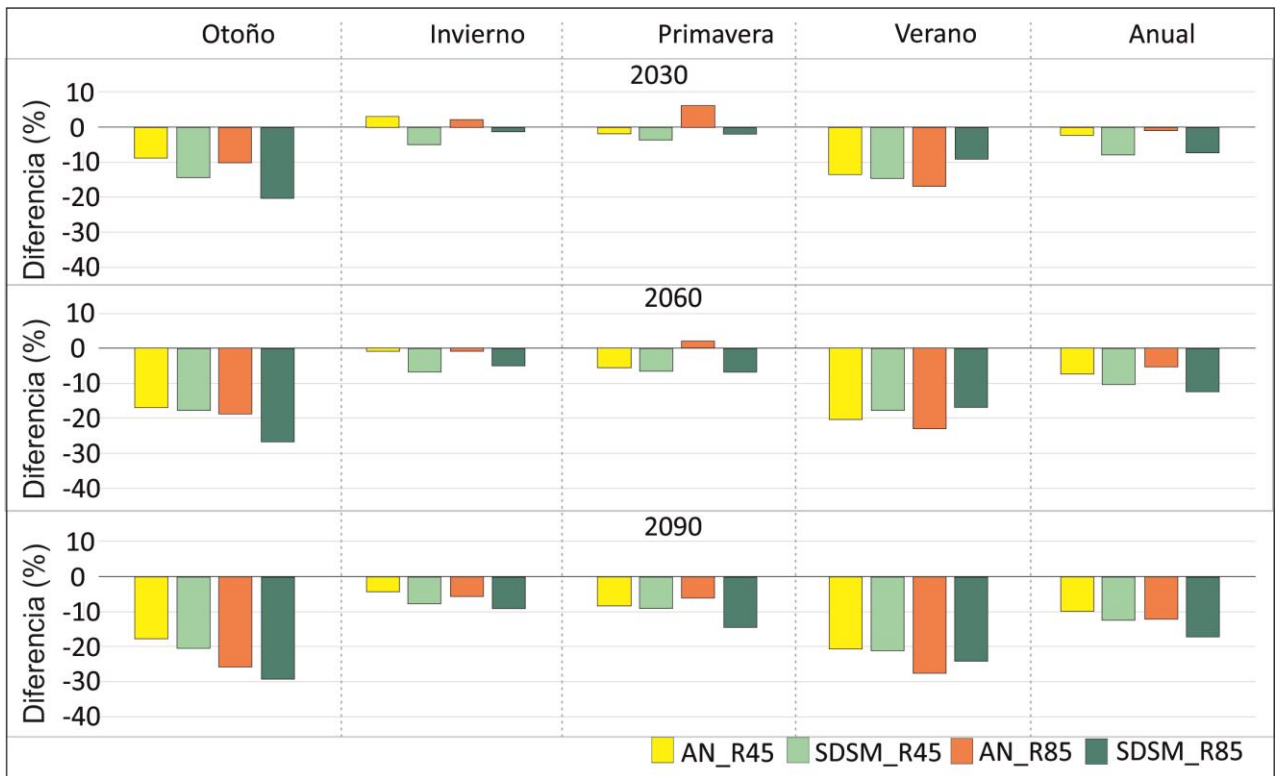


Figura 4.8: Diferencia (%) entre las proyecciones hidrológicas futuras y su baseline para Otxandio. Para agrupar la diferencia en función del RCP (4.5 y 8.5) y el método de downscaling (SDSM o AN) se ha calculado el valor medio de la diferencia. Los datos aparecen separados en función de los horizontes 2030, 2060 y 2090 y en valores estacionales y anuales.

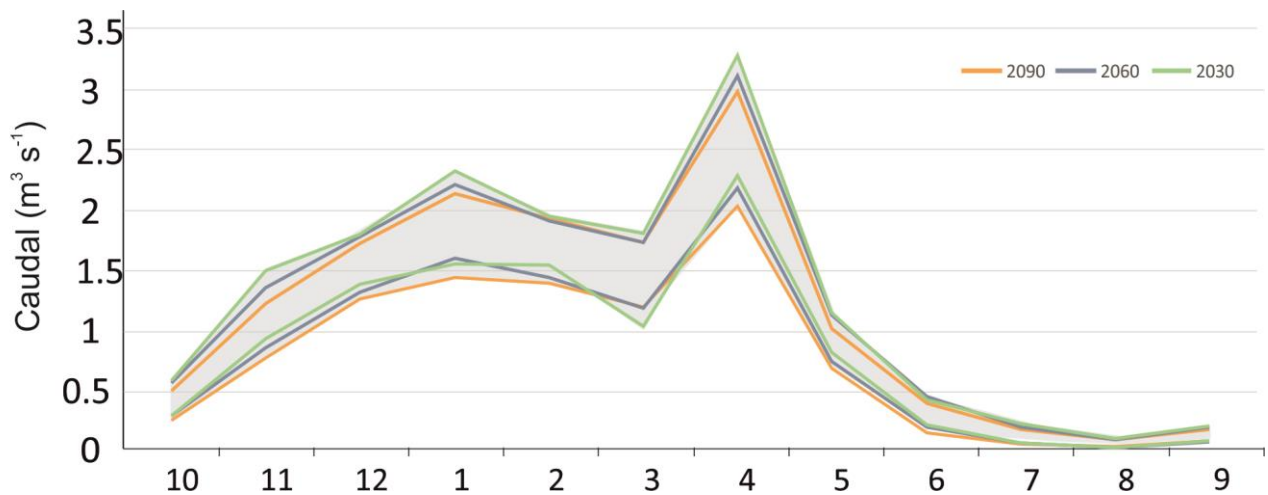


Figura 4.9: Rango de variación del caudal medio mensual ($m^3 s^{-1}$) simulado con las 16 proyecciones climáticas para los horizontes 2030, 2060 y 2090 en Otxandio. El color gris representa el rango de posibles valores medios de caudal.

Sub-cuenca de Audikana

En la figura 4.10 se puede observar el caudal medio simulado para la estación de Audikana (Q_{Sim} Audikana) y el baseline de las proyecciones hidrológicas. Tanto a escala anual como en Otoño, Verano y Primavera (excepción de CMCC-CESM_SDSM) los caudales proyectados son menores que los simulados con los datos de precipitación registrados en esta cuenca. Invierno es la única estación en la que algunas de las proyecciones muestran valores de caudal mayores. En caudales bajos, como los de Verano, la

diferencia existente entre el caudal simulado y el obtenido del baseline de las proyecciones climáticas es considerable, entre un 56 % y un 76 % menor. CMCC-CESM_SDSM muestra las menores diferencias respecto a Q_Sim Audikana; por ejemplo, a escala anual, la diferencia es de tan solo un 0.2 %.

Al igual que para las proyecciones hidrológicas futuras de la estación de Otxandio, las diferencias de caudal existentes entre las proyecciones hidrológicas de los baseline de los escenarios climáticos y sus proyecciones futuras, se han agrupado en función del RCP y el método de downscaling (los resultados de cada proyección. En el segundo apartado del Anexo 3 se pueden observar las diferencias para cada proyección.

Los resultados, aunque no son iguales a los de Otxandio indican que los descensos pueden ser mayores), muestran la misma tendencia de descenso del caudal a lo largo del siglo XXI (figura 4.11). Para el horizonte 2090 se espera que el caudal anual pueda descender entre un 11 y un 26 %. Otoño es la estación que mayores descensos podrá sufrir (entre un 20 y un 33 %), mientras que en Primavera, el caudal podrá descender entre un 10 y un 25 %. En Verano e Invierno, los caudales proyectados para finales de siglo son bastante similares, en ambos casos los descensos son aproximadamente de entre un 4 y un 14 %.

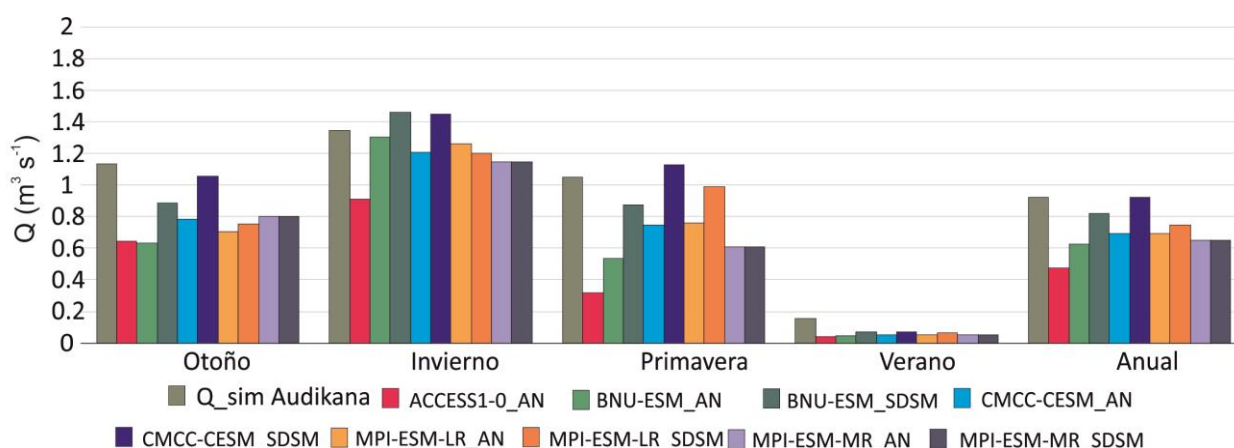


Figura 4.10: Promedio de caudal ($m^3 s^{-1}$) para el periodo 1987-2000. Aparece el caudal simulado con los datos climáticos históricos de la estación de Audikana (Q_Sim Audikana) y los resultados de los baseline de las proyecciones climáticas.



Figura 4.11: Diferencia (%) entre las proyecciones hidrológicas futuras y su baseline para Audikana. Para agrupar la diferencia en función del RCP (4.5 y 8.5) y el método de downscaling (SDSM o AN) se ha calculado el valor medio de la diferencia. Los datos aparecen separados en función de los horizontes 2030, 2060 y 2090 y en valores estacionales y anuales.

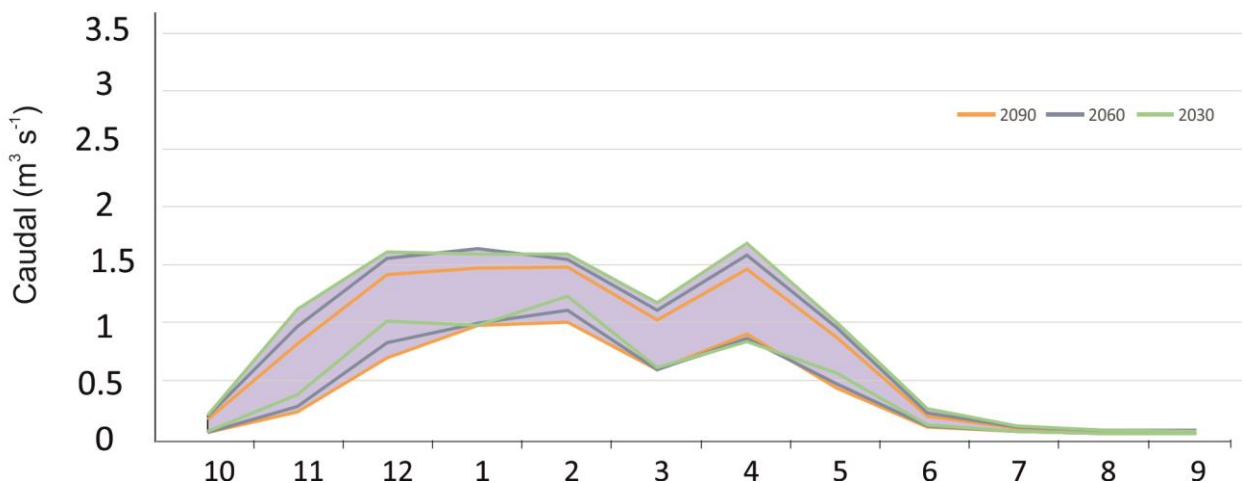


Figura 4.12: Rango de variación del caudal medio mensual ($m^3 s^{-1}$) simulado con las 16 proyecciones climáticas para los horizontes 2030, 2060 y 2090 en Audikana. El color morado representa el rango de posibles valores medios de caudal.

La figura 4.12 muestra el rango de valores de caudal ($m^3 s^{-1}$) que se podría registrar en la estación de Audikana en función de los resultados de las proyecciones hidrológicas realizadas en este trabajo (valores máximo y mínimo de caudal para cada horizonte). En esta figura, al igual que en la figura 4.11, se puede apreciar el descenso de caudal a medida que los horizontes son más lejanos. Donde se aprecia con mayor claridad este descenso es en los caudales máximo y mínimo proyectados entre noviembre y febrero, donde se observa claramente que el caudal desciende del horizonte 2030 al 2060 y del 2060 al 2090. En Verano el rango de caudales posibles es muy estrecho.

4.3.3 Impacto hidrológico de los escenarios climáticos futuros: tendencias de caudales medios (Qm) y bajos (Q20, duración y severidad)

Los resultados obtenidos en los análisis de tendencias realizados para los caudales medios y bajos se muestran en las figuras 4.13 y 4.14, donde se han considerado las tendencias para el periodo 2011-2100. Las metodologías utilizadas, tanto para el cálculo de los caudales medios (Qm) y bajos (duración y severidad de Q20) como en el cálculo de las tendencias, han sido las mismas que para las tendencias pasadas y han sido descritas en los apartados 3.3.4 y 3.3.5 de este informe, respectivamente.

A escala anual, en los caudales medios (Qm) y para el RCP 4.5, se observa que, tanto en Otxandio como en Audikana, para la mitad de las proyecciones climáticas la probabilidad de que exista una tendencia no es clara, mientras que para la otra mitad la tendencia es claramente descendente. Para el RCP 8.5, el porcentaje de proyecciones climáticas que provocaría un descenso de los caudales medios aumenta claramente, siendo la mayoría; a escala anual no se observan tendencias ascendentes del Qm para ninguna de las proyecciones. Las tendencias observadas para el Q20 son muy parecidas, con aproximadamente la mitad de las proyecciones mostrando un aumento de la duración (figura 4.13) y la severidad (tabla 4.8) del periodo de aguas bajas (Q20) para el RCP 4.5, y un mayor porcentaje, con tendencias ascendentes para el RCP 8.5.

Si observamos estas mismas tendencias a escala estacional, veremos que en Otoño se repiten las mismas tendencias que a escala anual para los caudales medios (Qm), y que las tendencias de ascenso para la duración de los caudales bajos (Q20) se mantienen en el RCP 8.5, sin embargo, para el RCP 4.5 las tendencias no son tan claras.

Invierno es la estación que muestra mayores incertidumbres, sobre todo para los caudales medios en el RCP 4.5 y para los caudales bajos en el RCP 8.5. Las tendencias más claras observadas son, por un lado, el aumento de la duración del periodo de aguas bajas para el RCP 4.5 en Otxandio y, por otro, la disminución de los caudales medios en ambas cuencas para el RCP 8.5. Al contrario que en Invierno, en Primavera las tendencias son claras con un gran porcentaje de las proyecciones de ambos RCPs mostrando una disminución del caudal medio y un aumento del periodo de aguas bajas en ambas cuencas. En Verano las tendencias son similares a las de Primavera con la excepción de que para el RCP 4.5 las incertidumbres son algo mayores.

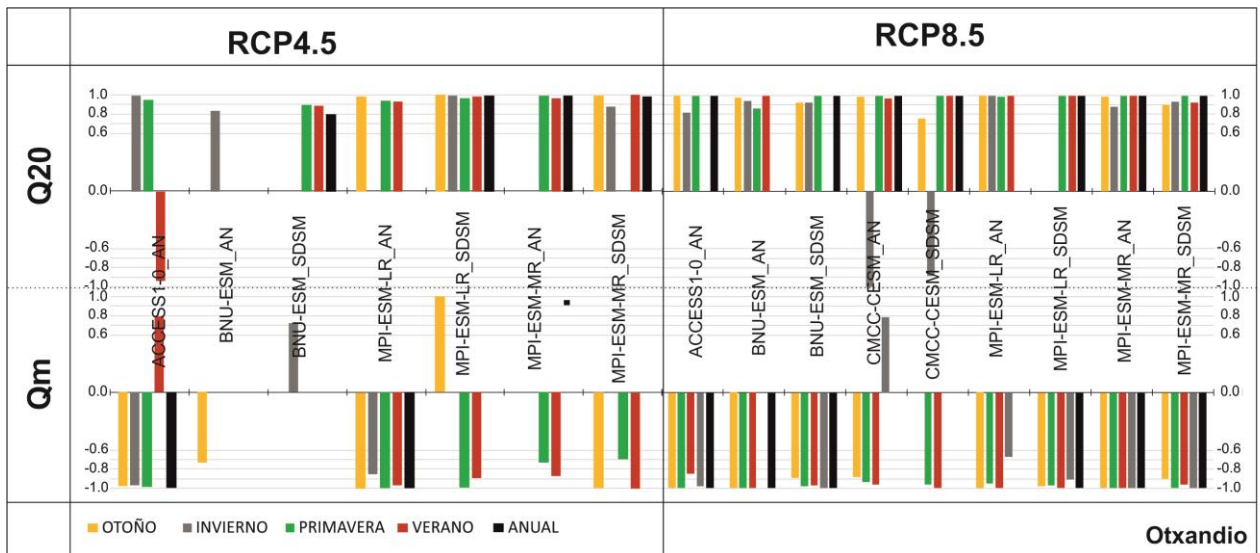


Figura 4.13: Tendencias para los caudales medios (Qm) y para la duración de los caudales bajos (Q20) de Otxandio representadas a escala anual y estacional para el periodo 2011-2100. Las proyecciones realizadas para los RCP 4.5 (escenario de mitigación) y los RCP 8.5 (escenario de altas emisiones) se muestran separadas. Solo se muestran aquellos valores con una probabilidad de ocurrencia mayor al 66% (0.66).

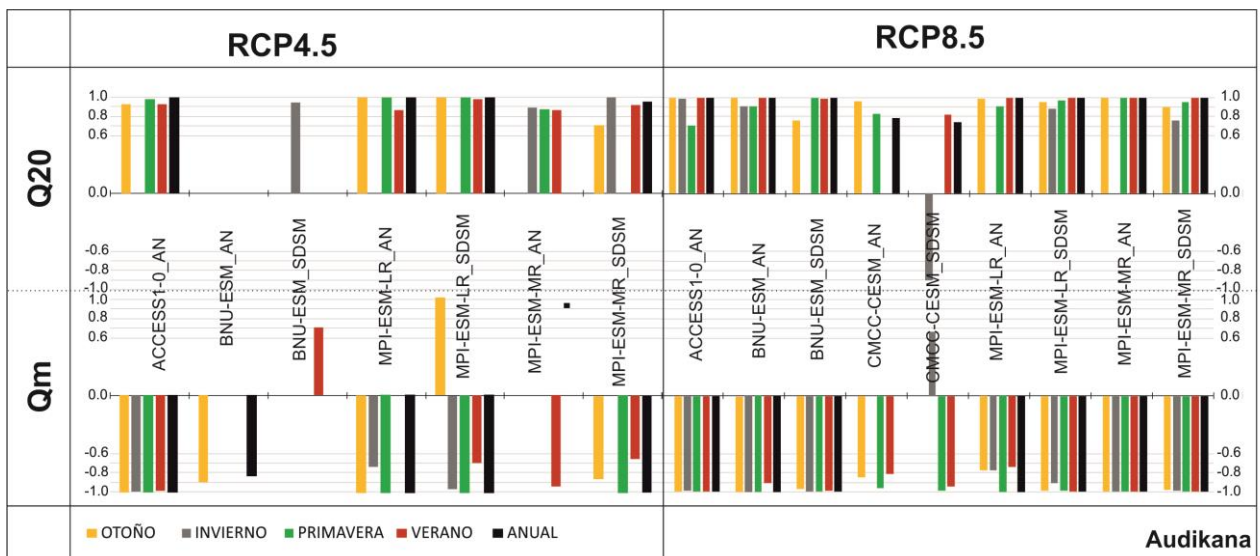


Figura 4.14: Tendencias para los caudales medios (Qm) y para la duración de los caudales bajos (Q20) de Audikana representadas a escala anual y estacional para el periodo 2011-2100. Las proyecciones realizadas para los RCP 4.5 (escenario de mitigación) y los RCP 8.5 (escenario de altas emisiones) se muestran separadas. Solo se muestran aquellos valores con una probabilidad de ocurrencia mayor al 66% (0.66).

Tabla 4.8: Tendencias para la severidad de los caudales bajos (Q20) de Otxandio y Audikana obtenidos a escala anual para el periodo 2011-2100. Se muestran los valores de probabilidad de ocurrencia en %. El signo, ninguno para el ascendente y - para el descendente, se refiere al signo de la tendencia.

	Audikana	Otxandio
ACCESS1-0-R45	90	-47
BNU-ESM_AN_R45	-66	74
CMCC_CESM_SDSM_R45	100	100
MPI-ESM-LR_AN_R45	80	100
MPI-ESM-LR_SDSM_R45	100	100
MPI-ESM-MR_AN_R45	85	100
MPI-ESM-MR_SDSM_R45	82	100
ACCESS1-0_AN_R85	-9	19
BNU-ESM_AN_R85	100	100
BNU-ESM_SDSM_R45	12	75
BNU-ESM_SDSM_R85	64	100
CMCC-CESM_AN_R85	100	100
MPI-ESM-LR_AN_R85	100	100
MPI-ESM-LR_SDSM_R85	100	99
MPI-ESM-MR_AN_R85	85	100
MPI-ESM-MR_SDSM_R85	100	100

Los resultados obtenidos del análisis de tendencias de la severidad del periodo de aguas bajas para el periodo 2011-2100 se pueden observar en la tabla 4.8. En general, las tendencias obtenidas muestran un ascenso muy probable de la severidad en ambas cuencas. Así, en Audikana 12 de las 16 proyecciones hidrológicas en las que se ha analizado la tendencia de este parámetro muestran tendencias ascendentes probables, siendo en 8 de ellas la tendencia virtualmente cierta. Solamente en uno de los casos, BNU-ESM_AN_R45, la tendencia de la severidad es descendente, con una probabilidad de ocurrencias del 66%. En Otxandio, 14 proyecciones hidrológicas muestran una tendencia ascendente de la severidad, al menos, probable, mostrando 11 de ellas una probabilidad de ocurrencia del 100%. En Otxandio no se observan tendencias probables a la disminución de la severidad del periodo de aguas bajas.

4.3.4 Influencia del uso del suelo en los recursos hídricos

Para evaluar la influencia que los usos del suelo pueden tener en los caudales, se han planteado diferentes escenarios en las dos sub-cuencas. Se trata, hay que dejarlo claro, de una primera aproximación para conocer mejor los efectos de los cambios en los usos del suelo (y según la metodología empleada también en los parámetros del suelo) sobre los recursos hídricos. Este paso, a modo de ejercicio, es importante realizarlo (habría que jugar con más escenarios “posibles”) para conocer mejor esos efectos, y es, además, necesario previamente a una consideración conjunta de los efectos, sobre los caudales, de los cambios de usos del suelo y los climáticos, paso este que habrá que realizar en otros trabajos. En el actual los escenarios tenidos en cuenta se han aplicado para el periodo 1985-2015.

Se han planteado tres escenarios de usos del suelo en cada sub-cuenca (apartado 4.2.5. Evaluación de la influencia del uso del suelo en los recursos hídricos, figura 4.5), en los que la vegetación actual y la superficie que ocupa dentro de la sub-cuenca han sido modificadas. SWAT se basa en el código EPIC (Williams et al., 1990) para simular el crecimiento de la vegetación. Este código asume que el desarrollo de la vegetación puede ser simulado por la teoría de unidades de calor (Boswell, 1926) la cual postula que las plantas tienen una demanda de calor que se puede cuantificar y que está vinculada al tiempo de maduración. Así, cuando la planta alcanza su punto máximo de maduración, es decir, las unidades de

calor máximas, su producción de biomasa desciende de forma drástica. En el caso de los bosques, la vegetación arbustiva y el pasto, la producción de biomasa comienza en Primavera (entre abril y mayo) y se completa en Invierno (entre diciembre y enero). En el caso del cereal, la producción también comienza en Primavera, pero llega al punto máximo de madurez entre los meses de agosto, septiembre u octubre en función de las condiciones que se den ese año para que el cultivo alcance las unidades máximas de calor. Es necesario mencionar que SWAT permite establecer tanto los periodos de siembra y de recogida como las unidades de calor, pero en este caso, al tratarse de una primera aproximación, se ha optado por utilizar las condiciones estándar del modelo.

Otxandio es una sub-cuenca fundamentalmente forestal. Los escenarios de usos del suelo que se han planteado en esta sub-cuenca son:

- **O1: Se cambian las zonas de pasto de la parte más llana de la sub-cuenca por cereal.**
- **O2: La sub-cuenca evoluciona a bosque en toda su extensión.**
- **O3: Se combinan la vegetación arbustiva y los bosques.**

En la figura 4.15 están representados los caudales medios mensuales (m^3/s) en cada escenario, en líneas continuas, y, las diferencias (%) de caudal generadas por los cambios en los usos del suelo, respecto al uso actual (Q_Sim Otxandio), a escala mensual y anual, mediante barras. A escala anual las diferencias no son importantes, esto es debido a que en los meses de mayor caudal (sobre todo en Invierno) los tres escenarios planteados y Q_Sim Otxandio muestran caudales muy similares. Sin embargo, las diferencias observadas en la distribución de los caudales a lo largo del año son más relevantes, sobre todo en los meses de Verano y en Otoño, cuando los caudales son más bajos.

El escenario O1, en el que las zonas de pasto y vegetación arbustiva de las partes más llanas de la sub-cuenca son cambiadas por cereal, se pueden apreciar cambios considerables en los meses de Verano donde, debido a un aumento de la evapotranspiración de los meses previos (junio-julio), el caudal del escenario O1 descendería de forma progresiva entre julio y septiembre (hasta un 14 % en septiembre). En el resto de estaciones del año las diferencias en caudales son poco significativas para este escenario, si bien la simulación refleja un descenso importante de la evapotranspiración en Otoño (cerca del 10 % en octubre y noviembre), respecto a la situación actual. Esto indicaría un aumento de la reserva de agua en el suelo que justificaría la mayor evapotranspiración en Verano.

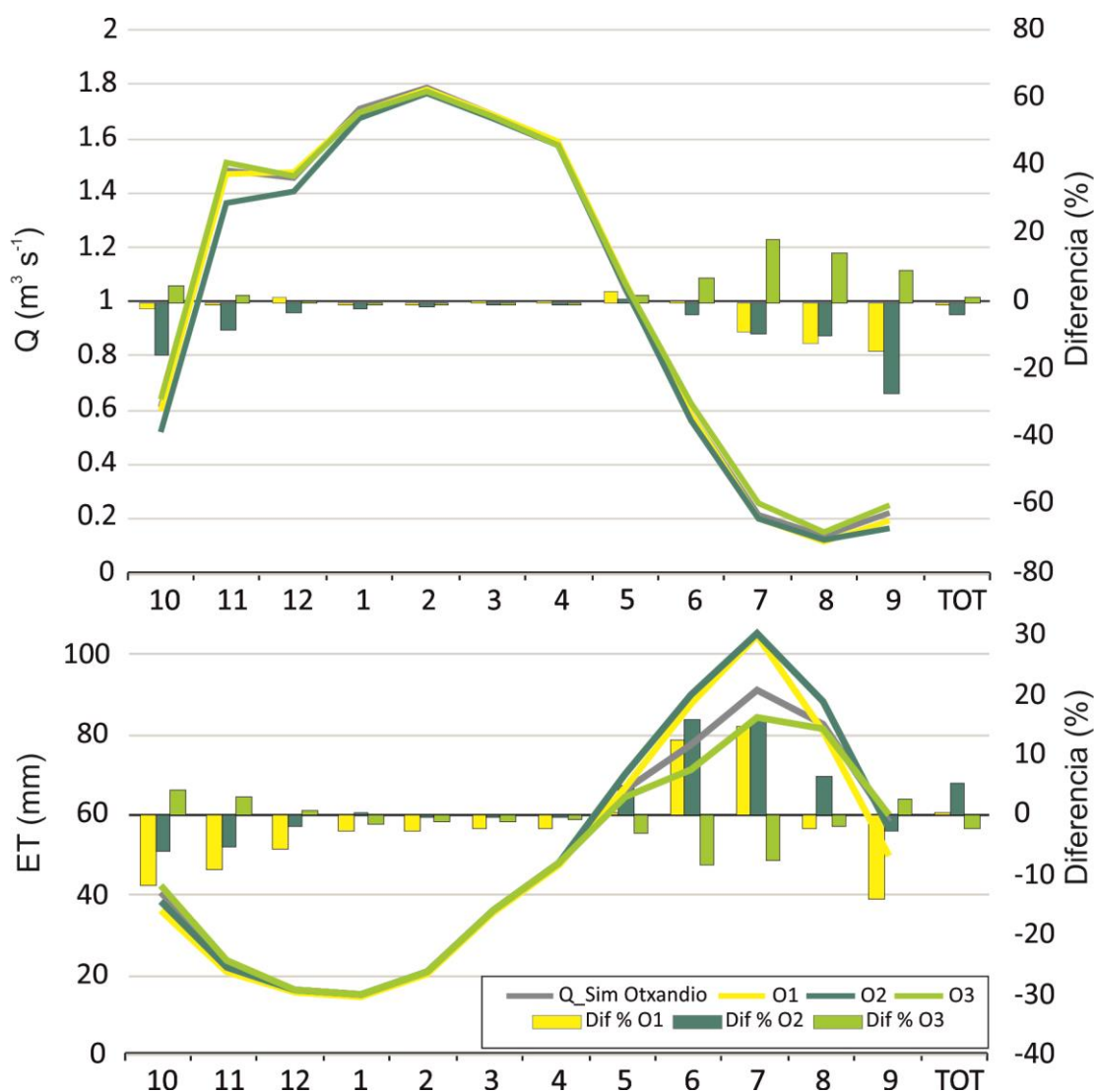


Figura 4.15: En la parte superior, caudal medio ($m^3 s^{-1}$) y diferencia de caudal medio (%) mensual (octubre a septiembre, 1985-2015), obtenido de la simulación en la sub-cuenca de Otxandio con el uso del suelo actual ($Q_{Sim_Otxandio}$) y con los escenarios de usos O1, O2 y O3. En la parte inferior, evapotranspiración media (mm) y diferencia de la evapotranspiración media (%) mensual (octubre a septiembre, 1985-2015), obtenida de la simulación en la sub-cuenca de Otxandio con el uso del suelo actual ($Q_{Sim_Otxandio}$) y con los escenarios O1, O2 y O3.

Es el escenario O2, en el que se ha considerado que toda la superficie de la sub-cuenca está cubierta por bosque, el que proyectaría mayores descensos de caudales. Aunque, a escala anual el descenso no es considerable (3.5 %), en los meses de Verano, e incluso en los de Otoño, el caudal descendería por encima de un 8 % (en septiembre un 27 %, en octubre un 15 %, y cerca de un 10 % en el resto de meses). El principal motivo de este descenso en los caudales puede encontrarse en el importante incremento de la evapotranspiración que supone el bosque, desde mayo a agosto. Esto es así para el Verano, pero no para Otoño, periodo en el que tanto los caudales como la evapotranspiración disminuyen, lo que hace pensar en un aumento de la reserva de agua regulada en ese momento en el suelo, que justificaría la mayor evapotranspiración en Verano. Esta regulación sería ahora mayor que la del escenario O1.

Por tanto, ambos escenarios, O1 y O2, muestran un decremento de los caudales, prácticamente en todos los meses, y de forma muy notable en Verano. El aumento de la reserva de agua en el suelo, debida a la menor evapotranspiración que los nuevos escenarios simulan desde septiembre a diciembre, termina favoreciendo el incremento de la evapotranspiración, de mayo a agosto, pero no repercute en un

aumento de los caudales. De hecho, en el cómputo anual se observa un aumento de la evapotranspiración (hasta un 5 % en O2) y un descenso, parecido, del caudal.

Por último, el escenario O3 plantea una sub-cuenca cubierta por bosque caducifolio y vegetación arbustiva (casi al 50 %) que, a escala anual, prácticamente no modifica la cantidad de caudal (es ligeramente superior). A escala mensual, sin embargo, se aprecia un claro aumento del caudal en Verano (entre 8 y 18 %), y menor en Otoño (< 5 %), permaneciendo casi sin cambios en los meses más caudalosos (Invierno y Primavera). En cuanto a la evapotranspiración, a escala anual es algo menor que en la situación actual (2 %), con claro descenso en Verano (hasta un 8 % en junio y julio), coincidiendo con el aumento del caudal (entre junio y octubre) llegando a superar el 20 % de aumento en el mes de julio. Sin embargo, la evapotranspiración aumenta en Otoño (por debajo del 5 %), época en la que también los caudales aumentan, lo que hace pensar en un consumo de la reserva de agua (en el suelo, alimentando la evapotranspiración, y en el subsuelo, alimentando la escorrentía) que ha podido irse acumulando en las épocas más lluviosas (Invierno y Primavera).

De este análisis destaca la importancia que tiene la consideración de los cambios, y la variabilidad, en caudales y evapotranspiración a escala mensual, ya que la escala anual enmascara procesos de relevancia para la vegetación y para la escorrentía; normalmente lo que favorece a una perjudica a la otra, ya que la cantidad de agua a repartir viene impuesta. Destaca también la importancia de considerar el papel hidrológico del suelo (variación de humedad), en la medida que su reserva de agua puede favorecer el escalonamiento temporal de procesos. En resumen, y centrándonos en la evapotranspiración a escala anual, podemos establecer un orden de usos del suelo, de menor a mayor capacidad de evapotranspiración: arbustivo -pasto/cereal - bosque.

En el caso de **Audikana** los escenarios de usos del suelo se han planteado considerando una evolución de la sub-cuenca hacia usos del suelo forestales. Actualmente el uso del suelo en la zona es predominantemente agrícola (cereal) y se han considerado los siguientes cambios:

- **A1: El bosque caducifolio aumenta su superficie en la sub-cuenca de un 11 % a un 36 %.**
- **A2: Fundamentalmente el uso del suelo en la sub-cuenca es forestal.**
- **A3: Es un posible escenario intermedio entre los dos anteriores, planteando que se abandona la actividad agrícola y la vegetación arbustiva ocupa su lugar.**

Tal y como se ha mencionado con anterioridad, los escenarios A1, A2 y A3 plantean una evolución de la cuenca de principalmente agrícola a cuenca forestal. Estos escenarios supondrían, a escala anual, menores caudales que los obtenidos con los usos del suelo actuales, pero que en ningún caso superan el 10 % de pérdida de recurso hídrico. Al igual que en la sub-cuenca de Otxandio, es a escala mensual donde mayores diferencias se pueden observar, sobre todo en Verano y Otoño. En los meses de julio y agosto, en los tres escenarios planteados habría mayor caudal que en el actual, mientras que a partir de septiembre y hasta diciembre, el caudal sería menor. Este descenso de los caudales medios se registraría, incluso, entre enero y abril, aunque las diferencias con respecto a la situación actual serían mínimas.

En el escenario A1 la sub-cuenca sigue siendo fundamentalmente agrícola, aunque la superficie boscosa aumenta en decremento de la vegetación arbustiva. En este escenario se observan pocos cambios en los caudales con respecto a los obtenidos con Q_Sim Audikana (figura 4.16). A escala anual, el caudal desciende (< 5 %) por un aumento en la evapotranspiración. Debido a que en este escenario la superficie boscosa es mayor, en Otoño la evapotranspiración aumenta de forma que los mayores descensos de caudal se registran en esta estación (< 15 %). En Invierno, el descenso de caudal es prácticamente

inapreciable, mientras que en Primavera la evapotranspiración aumenta, lo cual no se traduce en los caudales que sufren descensos mínimos. Este hecho, podría deberse a la capacidad de regulación de agua de los bosques, que en los meses de Invierno acumulan más agua que las zonas de cultivo y, por lo tanto, la cantidad de agua disponible en Primavera es mayor. En el primer mes de Verano, esta tendencia se mantiene, e incluso aumenta el caudal, sin embargo, en agosto, aunque el caudal aumente la evapotranspiración desciende de forma importante (> 20 %). Considerando que en este escenario tanto en Primavera (desde mayo) como en julio el aumento de la evapotranspiración es notorio, se podría pensar que en agosto desciende debido a que el agua disponible por las plantas acumulada en el suelo durante el Invierno y utilizada en Primavera y julio se agota. Así, la evapotranspiración desciende en agosto y septiembre.

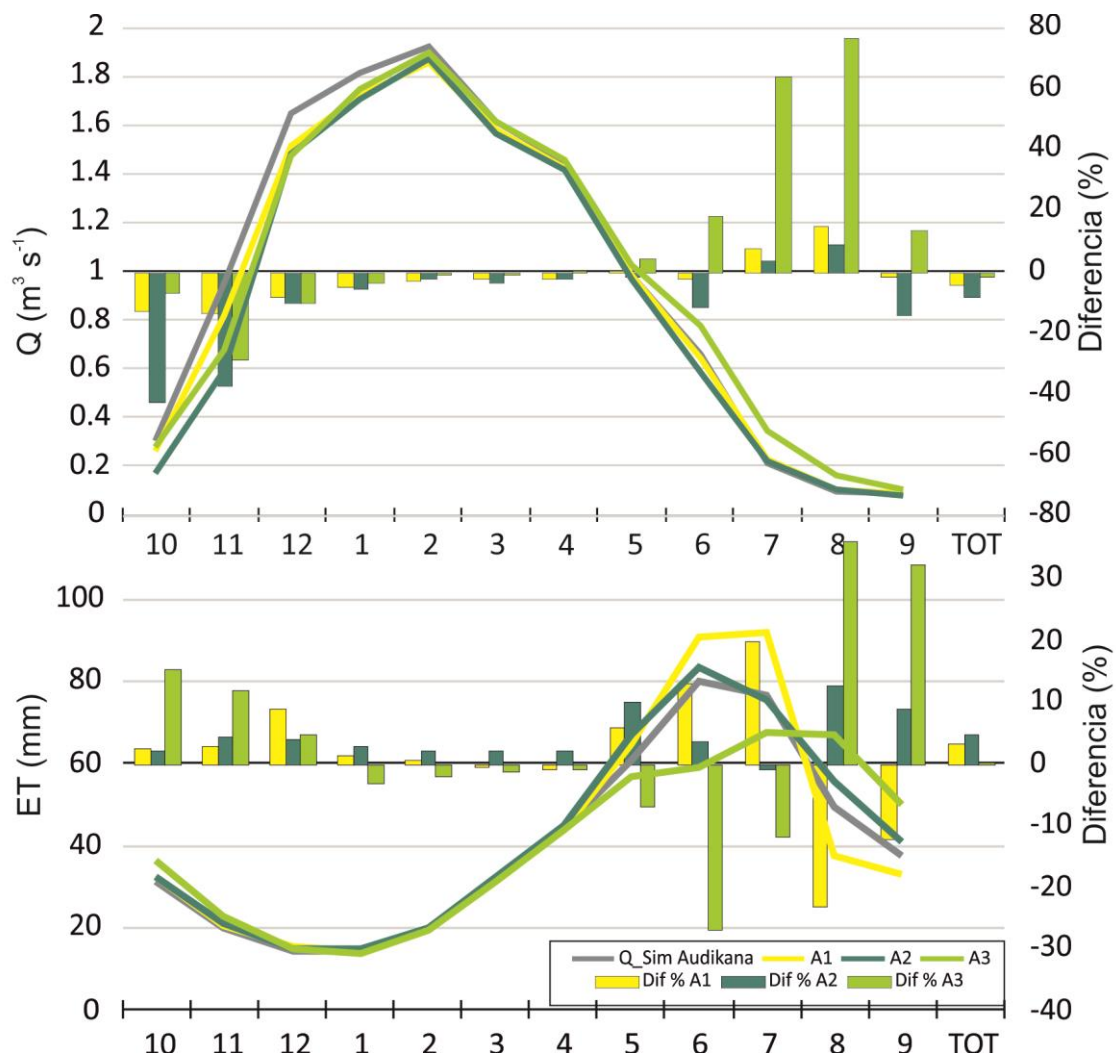


Figura 4.16: En la parte superior de la figura, caudal medio ($m^3 s^{-1}$) y diferencia de caudal medio (%) mensual (octubre a septiembre, 1985-2015), obtenido de la simulación en la sub-cuenca de Audikana con el uso del suelo actual ($Q_{Sim_Audikana}$) y con los escenarios de usos A1, A2 y A3. En la parte inferior de la figura, evapotranspiración (mm) y diferencia de evapotranspiración media (%) mensual (octubre a septiembre, 1985-2015), obtenida de la simulación en la sub-cuenca de Audikana con el uso del suelo actual ($Q_{Sim_Audikana}$) y con los escenarios de usos A1, A2 y A3.

Bajo el escenario A2, siendo éste fundamentalmente boscoso, se obtendrían caudales medios anuales menores a los actuales (del orden del 10%). A escala mensual, como consecuencia del aumento de la evapotranspiración, los mayores descensos se observarían entre septiembre y diciembre y en el mes de junio. Por el mismo motivo, en menor medida, el caudal también disminuiría entre enero y mayo. En julio y agosto, aunque la evapotranspiración sea mayor en agosto, los caudales serían algo mayores. Este descenso de los caudales generalizado y el aumento de los mismos en los meses de Verano podrían estar

relacionados con que el modelo simula, bajo este escenario, un aumento del porcentaje de agua infiltrada en los suelos, y hacia el subsuelo, durante la mayor parte del año y, por lo tanto, un retardo mayor en el tiempo de tránsito de este agua hasta su llegada al río. Así, parte del déficit de caudal en Invierno se repondría en Verano, a la vez que aumenta la evapotranspiración desde el suelo.

En el escenario A3, donde aproximadamente el 85 % de la sub-cuenca está compuesta por vegetación arbustiva, a escala anual prácticamente no se observan diferencias respecto a Q_Sim Audikana. A escala mensual se registrarían mayores caudales medios en los meses de Primavera-Verano (de mayo a septiembre), debido a una menor demanda de agua de los arbustos, una menor evapotranspiración, durante el Invierno, y, sobre todo, la Primavera y el principio del Verano (julio) con respecto a los cultivos. Sin embargo, la diferencia (%) entre la demanda de agua de la vegetación arbustiva y el cultivo aumenta a partir de agosto porque el cereal obtiene su punto máximo de madurez y, por lo tanto, el modelo reduce su producción de biomasa hasta 0, mientras que el arbusto continúa produciendo biomasa y, por tanto, demandando agua. Por ello, a partir de septiembre los caudales medios son menores que los actuales. En resumen, y centrándonos en la evapotranspiración a escala anual, podemos establecer un orden de usos del suelo, de menor a mayor capacidad de evapotranspiración: arbustivo - cereal - bosque, similar al deducido para Otxandio.

A la vista de estos resultados, y con las precauciones debidas a las incertidumbres asociadas (a las propias de modelizar sistemas hidrológicos complejos hay que añadir las debidas a las simplificaciones asumidas en la modelización de estos escenarios, en los que al cambiar los usos del suelo no se han tenido en cuenta todos los aspectos añadidos que tales cambios pueden acarrear), resulta obvio que la ampliación espacial del bosque (escenarios O2 y A2) implica una disminución en los caudales (indicando una mayor evapotranspiración real que la de la actual ocupación de los suelos), lo cual, en principio, parece lógico. Hay que tener en cuenta, sin embargo, varias simplificaciones de partida en la simulación efectuada. Cuando se habla de ampliar el bosque, nos referimos a un bosque en estado ya maduro (sin considerar el propio crecimiento de los árboles), es decir, en una fase de menor consumo de agua que en las fases previas. Por otro lado, respecto a las necesidades hídricas de la vegetación, se han utilizado valores que el propio modelo SWAT proporciona (no hay que olvidar que SWAT es un modelo agro-hidrológico, en origen; pero no necesariamente deben ser los idóneos para las características del medio físico en las cuencas aquí consideradas).

En cualquier caso, hay que insistir en que el objetivo fundamental de este ejercicio de simulación era plantear la necesidad de considerar los cambios en los usos del suelo, sea cual sea su origen, como causas, añadidas a los cambios en el clima, de modificaciones en el régimen de caudales (estacional y anual), modificaciones éstas que, incluso, pueden ser de diferente naturaleza en una cuenca y en otra, hasta cercana. De todas maneras, es una línea de investigación que hay que profundizar, tratando de ir aclarando las incertidumbres asociadas.

4.4 Conclusiones

En este estudio para evaluar los posibles efectos del cambio climático en la respuesta hidrológica de las sub-cuencas de Otxandio y Audikana (Cuenca del Zadorra) se han utilizado 16 proyecciones climáticas, surgidas de la combinación de 5 Modelos Generales de Circulación -MGC- (ACCESS1-0, BNU-ESM, MPI-ESM-LR, MPI-ESM -MR, CMCC-CESM), 2 métodos de downscaling (análogos AEMET -AN- y el downscaling estadístico -SDSM-) y 2 Trayectorias de Concentración Representativas (RCP 4.5 y RCP 8.5). La simulación hidrológica se ha realizado utilizando el modelo hidrológico numérico SWAT. Aunque exista una importante incertidumbre en los datos disponibles de caudal registrados en ambas sub-cuencas, los resultados de su calibración y validación han sido satisfactorios (1987-1994 y 2005-2015).

Existen numerosas fuentes de incertidumbre relacionadas con las proyecciones hidrológicas (MGC, método de downscaling, RCP, modelo hidrológico). De los resultados obtenidos en este estudio se pueden extraer algunas conclusiones, aunque la cuantificación de la incertidumbre habrá de afrontarse en trabajos posteriores. La diferencia existente entre los baseline de los modelos climáticos (1961-2000) y los datos meteorológicos observados en la estación de Urrunaga (en función de la época del año los modelos simulan más o menos lluvia; en Primavera y Verano sobreestiman la precipitación, en Otoño la subestiman y en Invierno es aleatorio) evidencia la incertidumbre asociada a los MGC en el área de estudio. Además, el método de downscaling también ha resultado ser una importante fuente de incertidumbre. Los resultados de los mismos MGC, a priori, deberían mostrar mayores descensos de caudal al considerar el escenario de altas emisiones (RCP 8.5). Sin embargo, esto no ocurre siempre así puesto que el método de downscaling tiene mucha influencia en los resultados. Al menos a escala anual, en ambas sub-cuencas (figuras 4.8 y 4.11), las proyecciones climáticas a las que se les ha aplicado el método de downscaling SDSM, simulan mayores descensos de caudal (comparando proyecciones del mismo RCP). Este hecho es bastante significativo si tenemos en cuenta que el baseline de las proyecciones a las que se les ha aplicado el método SDSM simulan mayores caudales que a los que se les ha aplicado el método AN (figuras 4.9 y 4.10). Esto quiere decir que las proyecciones futuras realizadas con el método de downscaling AN simulan caudales considerablemente mayores que los calculados mediante SDSM.

De los resultados obtenidos a partir de cinco MGC analizados, se puede decir que, a pesar de la excepción de algunas proyecciones, el caudal descenderá en todas las épocas del año y por consiguiente también lo hará a escala anual. Esta tendencia es más clara en la sub-cuenca de Audikana que en la de Otxandio.

En Otxandio, las proyecciones basadas en el método AN proyectan una diferencia respecto al baseline en los caudales anuales de entre -10 % y -12 % para el horizonte 2090 (figura 4.8). En cambio, las proyecciones basadas en el método de downscaling SDSM proyectan mayores descensos (entre -12 % y -17 %). Para el mismo periodo, en Audikana las proyecciones basadas en el método de AN proyectan descensos anuales de entre -12 % y -16 % y los basados en SDSM entre -13 % y -26 % (figura 4.11). En ambas sub-cuencas la estación que presenta la mayor disminución del caudal es Otoño (alrededor de -30% para 2090). Estas tendencias a la baja también se detectan en zonas de la región atlántica de Francia y la Península Ibérica, aunque generalmente los estudios de proyecciones hidrológicas realizados en estas áreas muestran descensos más importantes en Invierno (Meaurio *et al.*, 2017).

Para el conjunto de las 16 proyecciones hidrológicas analizadas en Otxandio en los tres horizontes, el rango más amplio entre los valores mensuales más altos y más bajos de caudal ocurriría de noviembre a abril (rango de $0.78-1.5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ y $2.1-3.2 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, respectivamente). El rango más estrecho se daría en Verano (rango de $0.07-0.23 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$). En Audikana, al igual que en Otxandio, el rango más amplio ocurriría entre noviembre y abril (rango de $0.2-1.1 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ y $0.8-1.7 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, respectivamente) y el más estrecho se proyecta para Verano (entre $0.04-0.1 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$).

Los resultados obtenidos en los análisis de tendencias realizados para los caudales medios y bajos muestran una alta probabilidad de descenso de los caudales medios (Q_m) y aumento de la duración y la severidad de los caudales bajos (Q_{20}) a escala anual, sobre todo para las proyecciones climáticas obtenidas bajo el RCP 8.5. A escala estacional, estas tendencias, disminución de caudal medio y aumento de la duración del periodo de aguas bajas, son muy claras en Primavera para ambos RCPs y en Verano y en Otoño para el RCP 8.5. Invierno es la estación del año que muestra una mayor incertidumbre en las tendencias observadas. Las mayores diferencias entre cuencas se dan en el Otoño para el RCP 4.5, donde la cuenca de Otxandio, más forestada que la de Audikana, muestra una mayor incertidumbre en las tendencias.

El análisis preliminar realizado para estudiar la influencia de los usos del suelo en los recursos hídricos muestra que, aunque a escala anual las diferencias entre distintos escenarios no son grandes, los usos del suelo pueden tener un papel importante en la regulación del agua de la cuenca (variación de la humedad del suelo) sobre todo en caudales bajos. Esto puede ser muy importante desde el punto de vista de la gestión, puesto que tal y como se ha visto con anterioridad, en general las proyecciones hidrológicas futuras muestran tendencias que indican que la duración y sobre todo la severidad de los caudales bajos pueden aumentar. En esta parte del estudio, el interés se ha centrado en evidenciar los impactos que cambios en los usos del suelo pueden tener sobre el régimen de caudales. Obviamente, en el estudio detallado de una cuenca concreta habría que considerar todos los demás aspectos, específicos de la cuenca, que pueden incidir en la evolución de caudales (cambios en la captación o en los usos del agua); esto es, si cabe, más importante en periodos de aguas bajas, en los que cualquier cambio puede tener una mayor incidencia en el régimen de caudales.

Los resultados obtenidos en este estudio muestran la necesidad de considerar una amplia gama de proyecciones climáticas a la hora de simular regímenes hidrológicos futuros; es decir, se trata de trabajar en términos de rangos esperables de caudales, en el espacio y en el tiempo, como forma de ir acotando las diversas incertidumbres inherentes a la temática objeto de estudio. También resaltan la importancia de considerar la evolución temporal no solo de los caudales medios (importantes en términos de recursos disponibles) sino también de los caudales bajos y altos, por las diferentes repercusiones a ellos asociadas. Y considerar esa evolución, además, tanto a escala anual como a escala estacional, ya que el aumento o disminución de los caudales no va a suponer el mismo impacto en una u otra época del año.

El trabajo ahora realizado debe considerarse como un punto de partida para afianzar una línea de investigación sobre los impactos hidrológicos esperables en el contexto del cambio climático, con la necesaria consideración de las implicaciones hidrológicas de los usos del suelo. Con cierta frecuencia, la calidad de las series disponibles de caudales (con una longitud adecuada) necesarias para realizar la modelización (calibración y validación) no es todo lo óptima que sería deseable, pero es la única base sobre la que se puede sustentar el conocimiento.

Respecto a las propias incertidumbres climáticas, inherentes a los MGC y al método de downscaling utilizado, las personas investigadoras en el ámbito de la Hidrología están supeditadas a la información suministrada por las agencias meteorológicas correspondientes. Ahora bien, sería de interés que a nivel del País Vasco se fuera concretando una gama de escenarios climáticos, con sus características, de manera que todas las personas investigando en el ámbito Clima-Agua cuenten con referencias comunes, lo que facilitaría la comparación de resultados y la concreción de nuevos interrogantes a responder.

5 CONCLUSIONES

El objetivo principal de este trabajo ha sido dar respuesta, con todas las incertidumbres asociadas, a dos preguntas de enfoque temporal: ¿de dónde venimos?, ¿hacia dónde parece que vamos?, ambas claves para el conocimiento en el que deben sustentarse las medidas de Adaptación.

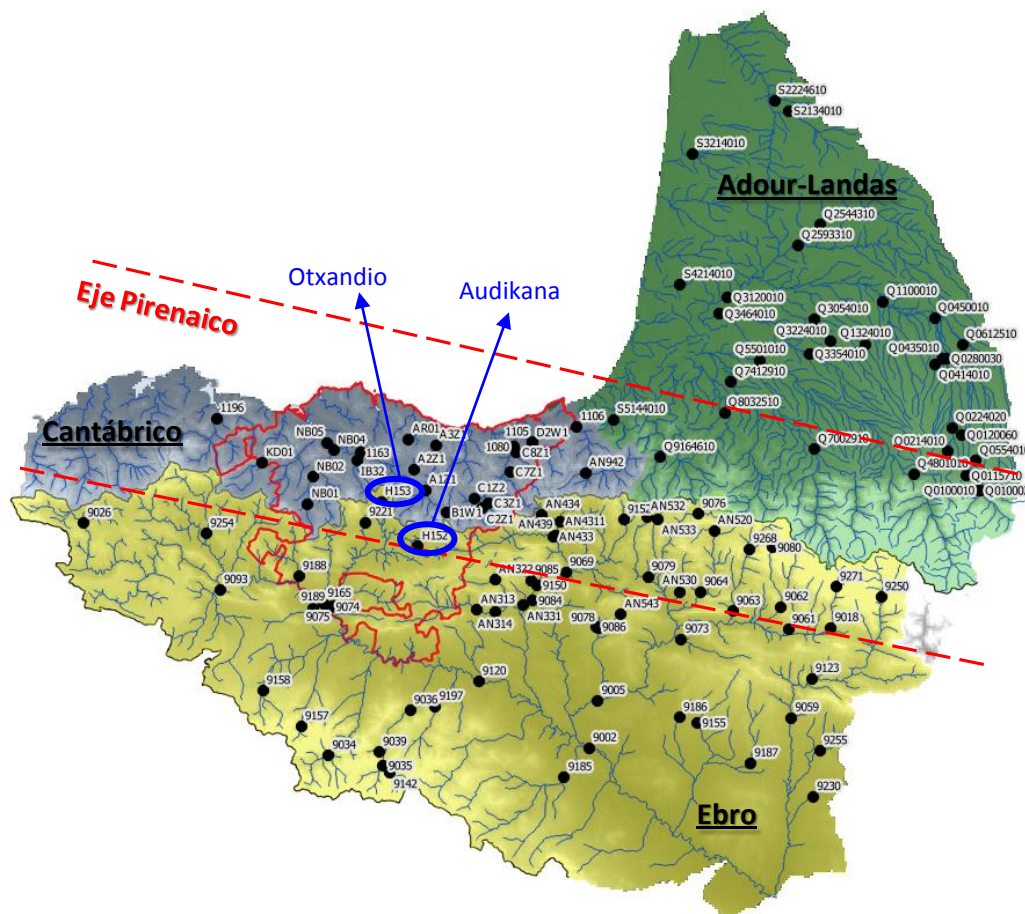


Figura 5.1: Ubicación y código de las estaciones analizadas (ver tabla 3.1). Zonación espacial general utilizada en este estudio: Cuencas hidrográficas de Adour-Landas, Cantábrico, y Ebro. Adicionalmente se ha considerado el Eje Pirenaico (zona cantábrica y Pirineos). Ubicación de las estaciones de Otxandio y Audikana.

¿De Dónde Venimos?

En los últimos 60 años (1955/1956 a 2014/2015) se ha dado una evidente tendencia descendente, negativa, en los caudales medios (Q_m) y un aumento de la duración y severidad de los bajos (Q_{20}). Estas tendencias son generalizables a la totalidad del territorio analizado (figura 5.1) para Primavera y Verano (también para Otoño en el caso de los caudales bajos), sea cual sea la escala considerada (diaria, mensual, estacional o anual), y se extienden a Otoño e Invierno para el Valle del Ebro. La tendencia anual resultante es negativa, y está condicionada, sobre todo, por las tendencias de Primavera y Verano.

En conjunto, esta situación indica una notable **homogeneidad espacial y temporal** de comportamiento de los caudales en el territorio objeto de estudio, lo cual debe entenderse como la consecuencia de una causa también regional. Habría que ver si esa tendencia generalizada se corresponde con una similar, aunque pudiera estar desfasada en el tiempo, de descenso de las precipitaciones (y/o de aumento de las

temperaturas), ámbito éste que quedaba fuera del presente estudio. Lo que está claro es que causas locales no pueden generar esa homogeneidad regional en las tendencias de los caudales.

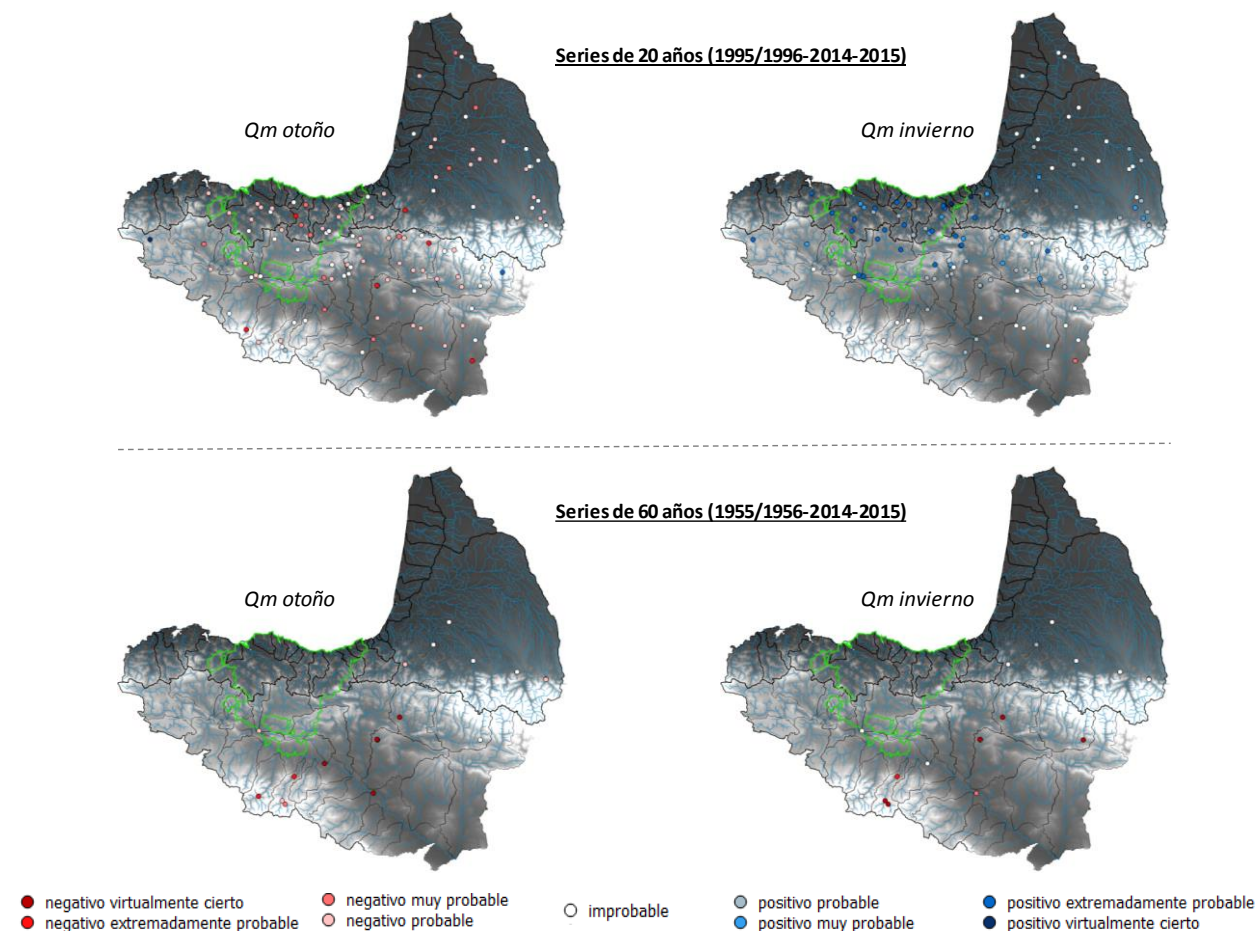


Figura 5.2: Tendencias de las series de caudales medios para las estaciones de Otoño e Invierno, para los periodos de 20 y 60 años.

Sin embargo, en los últimos 20 años (1995/1996 a 2014/2015) se observa un claro cambio de escenario (figura 5.2), y una situación de **heterogeneidad temporal**. Mientras que Otoño mantiene una muy clara tendencia negativa en todo el territorio, continuación de lo observado en los periodos anteriores (60 y 40 años), Invierno muestra una tendencia ascendente de los caudales medios en todas las zonas, lo que supone una notable inflexión respecto a lo observado en los periodos previos. Esta tendencia positiva tiene continuación, aunque no tan evidente, en Primavera. Verano aparece como una estación de tránsito, hacia Otoño, si bien en el Cantábrico su tendencia es notablemente negativa. La duración y severidad de los caudales bajos (Q20) no muestran tendencias tan claras, aunque pasan a ser descendentes, es decir, disminuye el número de días y el déficit volumétrico, sobre todo en Invierno y Primavera, y se mantienen en Otoño con una cierta tendencia ascendente.

En resumen, para el periodo más reciente se observa una tendencia al aumento de los caudales medios en Invierno y Primavera, a la vez que el Verano se prolonga cada vez más hacia el Otoño, con una clara tendencia a la disminución de los caudales medios y al aumento de la duración y severidad del periodo de aguas bajas. La combinación de ambas observaciones conlleva un reparto progresivamente más desigual de caudales a lo largo del año. Es verdad que 20 años es un periodo demasiado corto para extraer conclusiones más fiables, pero de todas formas las tendencias observadas en los caudales

(estadísticamente significativas) deben ser tenidas en cuenta en la planificación hidrológica, y territorial, por su mayor influencia a corto, o incluso medio, plazo.

A la vista de esta evolución del comportamiento hidrológico, hacia escenarios más cambiantes a lo largo del año, se puede pensar que lo observado en los últimos 20 años corresponde al **impacto hidrológico producido por cambios a un nivel regional amplio, probablemente en las condiciones climáticas**. Estos impactos se verían aumentados o reducidos por cambios de otro tipo -usos del suelo, gestión de infraestructuras...- a escala de cuenca, escala en la que habría que centrar la investigación, en su caso.

Los resultados obtenidos son coherentes, hasta cierto punto, con los de estudios a escala Europea (EEA, 2016), que concluyen la necesidad de distinguir las tendencias anuales y las estacionales. La tendencia anual positiva, al aumento de caudales, observada en buena parte del norte y oeste de Europa, refleja la tendencia de los meses invernales. Por su parte, la fuerte tendencia anual negativa en el este y sur de Europa refleja, sobre todo, la tendencia en los meses estivales. Estas tendencias, positiva en Invierno y negativa en Verano, han sido evidenciadas en este informe para los últimos 20 años, pero no en periodos anteriores para la tendencia positiva de Invierno. En el territorio considerado, también son importantes las tendencias observadas en Primavera y Otoño, normalmente no reflejadas en el estudio de la EEA, debido a la importancia que las precipitaciones en forma de nieve tienen en buena parte de Europa. No hay que olvidar, y la propia EEA (2016) lo recoge, que las regiones más problemáticas son aquéllas que están en zonas de transición entre regiones con diferentes tendencias; ahí se incluye el Golfo de Bizkaia, bajo el efecto del mar Cantábrico y de la cadena pirenaica. De ahí, el interés del estudio ahora realizado.

¿Hacia dónde parece que vamos?

En este estudio se han elegido dos sub-cuencas para evaluar los posibles efectos que el cambio climático puede tener en la respuesta hidrológica: Otxandio y Audikana (sub-cuencas de cabecera de los embalses de la Cuenca del Zadorra), ambas con series largas de datos de caudal. Se han considerado 16 proyecciones climáticas, resultado de la combinación de 5 Modelos Generales de Circulación -MGC- (ACCESS1-0, BNU-ESM, MPI-ESM-LR, MPI-ESM-MR, CMCC-CESM), 2 métodos de downscaling (análogos AEMET -AN- y el downscaling estadístico -SDSM-) y 2 Trayectorias de Concentración Representativas (RCP 4.5 y RCP 8.5). La simulación hidrológica se ha realizado utilizando el modelo hidrológico numérico SWAT. Aunque existe una importante incertidumbre en los datos de caudal registrados en ambas sub-cuencas, los resultados de la calibración (1987-1994) y validación (2005-2015) del modelo han sido satisfactorios, a la vista de los parámetros estadísticos habitualmente usados. A partir de ahí, el modelo ha sido utilizado para evaluar el impacto hidrológico de las proyecciones climáticas en tres horizontes futuros: 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100.

Existen numerosas fuentes de incertidumbre en las etapas que llevan a la proyección hidrológica (MGC, método de downscaling, RCP, modelo hidrológico) que necesariamente hay que considerar al analizar los resultados obtenidos. La diferencia entre los datos meteorológicos de los periodos base (*baseline*) de los modelos climáticos (1961-2000) y los realmente observados en la estación de Urrunaga para ese periodo (en Primavera y Verano sobreestiman la precipitación, y en Otoño la subestiman) evidencia la incertidumbre asociada a los MGC en el área de estudio. El método de downscaling también ha resultado ser una importante fuente de incertidumbre. De hecho, los resultados de un mismo MGC, a priori, deberían mostrar mayores descensos de caudal en el escenario de altas emisiones (RCP 8.5); sin embargo, esto no siempre es así ya que el método de downscaling influencia mucho los resultados. Al menos a escala anual, en ambas sub-cuencas, las proyecciones climáticas a las que se ha aplicado el método de downscaling SDSM, simulan mayores descensos futuros en los caudales (para proyecciones del mismo RCP).

De los resultados obtenidos con las 16 proyecciones climáticas se deduce que, con la excepción de algunas de ellas, el caudal descenderá progresivamente a lo largo del siglo XXI (mayores descensos en el horizonte 2100), en todas las estaciones del año y, por tanto, también a escala anual. Esta tendencia es más evidente en la sub-cuenca de Audikana (de clima más mediterráneo) que en la de Otxandio. En ambas, la estación que presenta la mayor disminución de caudal es Otoño (en Otxandio también Verano), con descensos a final de siglo (con respecto al baseline) entre 20 y 33%, y la de menor disminución es Invierno, entre 4 y 14%. A escala anual la reducción de caudal en ese horizonte es del orden de 10-17% en Otxandio, y de 11-26% en Audikana. Esta tendencia a la baja también se detecta en zonas de la región atlántica de Francia y la Península Ibérica, aunque generalmente los estudios de proyecciones hidrológicas realizados en estas áreas muestran descensos más importantes en Invierno.

Se ha efectuado un análisis de tendencias con las series de caudales medios y bajos (Q20) proyectados a futuro, usando la misma metodología del punto anterior (¿de dónde venimos?). Los resultados muestran alta probabilidad de descenso de los caudales medios, y de aumento de la duración y severidad de los bajos a escala anual, sobre todo para las proyecciones climáticas obtenidas bajo el RCP 8.5. A escala estacional, estas tendencias son muy claras en Primavera, para ambos RCPs, y en Verano y Otoño para el RCP 8.5. Invierno es la estación que muestra una mayor incertidumbre en las tendencias observadas.

El análisis preliminar realizado para estudiar la influencia que diferentes escenarios de usos del suelo tienen sobre los recursos hídricos evidencia que, aunque a escala anual las diferencias entre escenarios no sean grandes, los usos del suelo sí pueden tener un papel importante en la regulación del agua de la cuenca (variación de la humedad del suelo), afectando sobre todo a los caudales bajos. Esto es importante desde el punto de vista de la gestión puesto que, como se ha comentado, las proyecciones hidrológicas futuras muestran, en general, tendencias que indican que la duración y, sobre todo, la severidad de los caudales bajos pueden aumentar a futuro.

De los resultados obtenidos en esta parte del estudio se deriva la necesidad de considerar una amplia gama de proyecciones climáticas a la hora de simular regímenes hidrológicos futuros. Se trata de trabajar en términos de rangos de caudales esperables en diferentes espacios y tiempos, como forma de ir acotando incertidumbres. Los resultados también resaltan la importancia de considerar la evolución temporal no solo de los caudales medios (importantes en términos de recursos) sino también de los bajos y altos, con sus diferentes repercusiones. Y considerar esa evolución tanto a escala anual como estacional, o mensual, ya que el aumento o descenso de los caudales no origina el mismo impacto en una u otra época del año. Además, está la necesidad de considerar los posibles impactos hidrológicos del cambio climático desde un enfoque integral de la cuenca fluvial, incorporando los posibles efectos de los usos del suelo y de la propia gestión de los recursos hídricos, sobre todo en aguas bajas.

Conclusiones conjuntas. Desde las tendencias del pasado hacia las del futuro

Tanto en las series de caudal históricas más largas (60 años; 1955-1956 a 2014-2015), como en las series de caudal simuladas a partir de las proyecciones climáticas (2011-2100), resulta clara la tendencia a la disminución de los caudales medios y al aumento de la duración del periodo de aguas bajas, tanto a escala estacional como anual. Aunque la escala espacial de cada uno de estos enfoques (de dónde venimos y hacia dónde vamos) es totalmente diferente, más amplia, regional, la primera (por tanto, con más valor espacial), y más concreta, de cuenca, la segunda, los resultados parecen converger hacia una disminución de los caudales medios y bajos, con diferentes incertidumbres, para cada estación del año.

Hay que considerar que más allá de las tendencias climáticas esperables a futuro (en el marco del Cambio Climático), hay una variabilidad climática natural, que en el ámbito del Golfo de Bizkaia parece darse con una frecuencia de unos 20-30 años, lo que pudiera justificar tendencias diferentes en periodos “cortos”

de tiempo. De hecho, la tendencia creciente observada en los caudales, a nivel regional, en Invierno y Primavera en el último periodo de tiempo de los datos históricos (20 años, 1995-2015) tiene cierta continuación, en las sub-cuencas de Otxandio y Audikana, en el más corto de los horizontes simulados para el siglo XXI (periodo 2011-2040), al menos, en algunas de las proyecciones hidrológicas obtenidas (figura 5.3).

años				OTOÑO	INVIERNO	PRIMAVERA	VERANO	ANUAL
Tendencias Pasadas	60 (1955-2015)			negativa	negativa	negativa	negativa	negativa
	40 (1975-2015)			negativa	?	negativa	negativa	negativa
	20 (1995-2015)			negativa	positiva	positiva	negativa	positiva
Tendencias Futuras	30 (2011-2040)	Otxandio	AN		positiva	positiva RCP8.5		negativa
			SDSM		negativa	negativa		negativa
		Audikana	AN		positiva	positiva		negativa
			SDSM		negativa	negativa		negativa

Figura 5.3: Tendencias estacionales y anuales, pasadas y futuras, derivadas de los estudios realizados en los Apartados 3 y 4 para los caudales medios (Qm).

A la vista de la figura, se deduce que el comportamiento a escala anual está más condicionado por las tendencias de Invierno y Primavera. Estas estaciones son, además, las que presentan mayores incertidumbre en los escenarios futuros, al menos en el horizonte 2030, con tendencias tanto crecientes como decrecientes según las proyecciones climáticas utilizadas. De todas formas, las tendencias en los siguientes horizontes temporales (2070 y 2100) son decrecientes para todas las estaciones del año.

Estos resultados refuerzan la importancia de abordar los estudios de los posibles impactos hidrológicos derivados del cambio climático a escalas más finas que la anual (estacional, mensual), y de combinar para el estudio de las tendencias intervalos de tiempo de diferente longitud en años para que tendencias a largo plazo no enmascaren tendencias a más corto plazo, que deben ser tenidas en cuenta en la planificación de las cuencas.

6 BIBLIOGRAFÍA

- Abbaspour KC, Johnson CA, van Genuchten MT, 2004. Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure. *Vadose Zone J.* 3 (4), 1340–1352. <http://dx.doi.org/10.2113/3.4.1340>.
- Abbaspour KC, Vejdani M, Haghghat S, 2007. SWAT CUP calibration and uncertainty programs for SWAT. *International Congress on Modelling and Simulation (MODSIM)*. 7, 1603-1609.
- Arnold JG, Srinivasan R, Muttiah RS, Williams JR, 1998. Large area hydrologic modeling and assessment – Part 1: model development. *J. Am. Water Resour. As.* 34 (1), 73–89. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>.
- ASCE. 1993. Criteria for evaluation of watershed models. *J. Irriga- tion Drainage Eng.* 119(3), 429-442.
- Boé J, Terray L, Martin E, Habets F, 2009. Projected changes in components of the hydrological cycle in French river basins during the 21st century. *Water Resour. Res.* 45, W08426. <http://dx.doi.org/10.1029/2008WR007437>
- Boswell VG, 1926. The influence of temperature upon the growth and yield of garden peas. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 23, 162-168
- Brigode P, Oudin L, Perrin C, 2013. Hydrological model parameter instability: A source of additional uncertainty in estimating the hydrological impacts of climate change? *J. Hydrol.* 476 (0), 410-425. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.11.012>.
- Bronaugh D y Werner A, 2014. Zhang + Yue-Pilon trends package. R Package ‘zyp’.
- Carvalho-Santos C, Nunes JP, Monteiro AT, Hein L, Honrado JP, 2015. Assessing the effects of land cover and future climate conditions on the provision of hydrological services in a medium-sized watershed of Portugal. *Hydrol. Process.* n/a-n/a. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.10621>
- CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas) 2010. Necesidades de adaptación al cambio climático de la red troncal de infraestructuras de transporte en España. Informe final. http://www.adaptecca.es/sites/default/files/editor_documentos/acctit_informe_final_septiembre_2013.pdf. Visitado el 5 de Agosto de 2015.
- Cerro I, 2013. Impacto de las crecidas en la calidad del agua (Cuenca agrícola del río Alegria, País Vasco). Aplicación del modelo agro-hidrológico SWAT. Tesis Doctoral. Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU).
- Cerro I, Antiguiedad I, Srinivasan R, Sauvage S, Volk M, Sánchez-Pérez JM, 2014. Simulating land management options to reduce nitrate pollution in an agricultural watershed dominated by an alluvial aquifer. *Journal of Environmental Quality*, 43, 67-74.
- Epelde AM, 2015. Modelización de procesos hidrológicos y de contaminación por nitratos mediante dos códigos numéricos (SWAT y MOHID). Cuenca agrícola del río Alegria (País Vasco). Tesis Doctoral. Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU).
- Epelde A, Cerro I, Sánchez-Pérez JM, Sauvage S, Srinivasan R, Antiguiedad I, 2015. Application of the SWAT model to assess the impact of changes in agricultural management practices on water quality. *Hydrological Science Journal*, 60 (5), 825-843.
- Estrategia de Cambio Climático 2050 del País Vasco, 2015. Eusko Jaurlaritza/Gobierno Vasco.
- European Environment Agency, 2016: River flow (<http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/river-flow-3/assessment>)
- Eusko Jaurlaritza, 2015. Documento Base para la revisión de las Directrices de Ordenación Territorial de la CAPV.
- Fohrer N, Haverkamp S, Eckhardt K, Frede H, 2001. Hydrologic Response to land use changes on the catchment scale. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere.* 26, 577-582.
- Fohrer N, Haverkamp S, Frede HG, 2005. Assessment of the effects of land use patterns on hydrologic landscape functions: development of sustainable land use concepts for low mountain range areas. *Hydrological Processes*, 19, 659-672.

- Gobierno Vasco, 2005. Mapa de erosión de suelos de la Comunidad Autónoma de Euskadi Informe realizado por IDER Ingeniería y Desarrollo Rural, S.A. para el Departamento de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. Dirección de Biodiversidad y Participación Ambiental del Gobierno Vasco.
- Görgen K, Beersma J, Brahmer G, Buiteveld H, Carambia M, de Keizer O, Krahe P, Nilson E, Lammersen R, Perrin C, Volken D, 2010. Assessment of Climate Change Impacts on Discharge in the Rhine River Basin: Results of the RheinBlick2050 Project, CHR Report, 1–23, 229 pp, Lelystad, ISBN 978-90-70980-35-1.
- Gupta HV, Sorooshian S, Yapo PO, 1999. Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. *J. Hydrol.Eng.* 4 (2), 135-143.
- IPCC, 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [Stocker TF, D Qin, G-K Plattner, M Tignor, SK Allen, J Boschung, A Nauels, Y Xia, V Bex, PM Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535p. Johnson, F and Sharma, A, 2009. Measurement of GCM skill in predicting variables relevant for hydroclimatological assessments. *J. Climate.* 22 (16), 4373-4328. <http://doi.org/10.1175/2009JCLI2681.1>.
- Killick R, Eckley I, Haynes K, Fearnhead P, 2015. An R package for changepoint analysis. R Package 'changepoint'.
- Laurent F y Ruelland D, 2011. Assessing impacts of alternative land use and agricultural practices on nitrate pollution at the catchment scale. *Journal of Hydrology*, 409: 440–450.
- Lenderink G, Buishand A, van Deursen W, 2007. Estimates of future discharges of the river Rhine using two scenario methodologies: direct versus delta approach. *Hydrol. Earth Syst. Sc.* 11 (3), 1145–1159. <http://dx.doi.org/10.5194/hess-11-1145-2007>.
- Mastrandrea MD, Field CB, Stocker TF, Edenhofer O, Ebi KL, Frame DJ, Held H, Kriegler E, Mach KJ, Matschoss PR, Plattner GK, Yohe GW, Zwiars FW, 2010. Guidance Note for Lead Authors of the IPCC Fifth Assessment Report on Consistent Treatment of Uncertainties. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Disponible en <<http://www.ipcc.ch>>
- Meaurio M, Zabaleta A, Boithias L, Epelde AM, Sauvage S, Sanchez-Perez JM, Srinivasan R, Antiguada I, 2017. Assessing the hydrological response from an ensemble of CMIP5 climate projections in the transition zone of the Atlantic region (Bay of Biscay). *Journal of Hydrology*. 548, 46-62.
- Mirus BB y Loague K, 2013. How runoff begins (and ends): characterizing hydrologic response at the catchment scale. *Water Resources Research* 49, 2987–3006. DOI: 10.1002/wrcr.20218
- Moriasi DN, Arnold JG, Van Liew MW, Bingner RL, Harmel RD and Veith, TL, 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Watershed Simulations. T. ASABE.* 50 (3), 885–900.
- Moss RH, Edmonds JA, Hibbard KA, Manning MR, Rose SK, van Vuuren DP, Carter TR, Emori S, Kainuma M, Kram T, Meehl GA, Mitchell JFB, Nakicenovic N, Riahi K, Smith SJ, Stouffer RJ, Thomson AM, Weyant JP, Wilbanks TJ, 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature.* 463 (7282), 747-756. <http://dx.doi.org/10.1038/nature08823>.
- Nash JE y Sutcliffe JV, 1970. River flow forecasting through conceptual models: Part 1. A discussion of principles. *J. Hydrol.*10 (3), 282-290. [http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6).
- Perez J, Menendez M, Mendez F, Losada I, 2014. Evaluating the performance of CMIP3 and CMIP5 global climate models over the north-east Atlantic region. *Clim. Dynam.* 43 (9-10), 2663-2680. <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-014-2078-8>.
- Petisco SE y Martín JM, 2006. Escenarios de temperatura y precipitación para la España peninsular y Baleares durante el período 2001-2100 basados en “downscaling” estadístico mediante métodos de análogos. XXIX Jornadas Científicas de la Asociación Meteorológica Española. Pamplona.
- Poff NL, Allan JD, Bain MB, Karr JR, Prestegard KL, Richter BD, Sparks RE, Stromberg JC, 1997. The natural flowregime. *BioScience* 47, 769–784.
- Stahl K, Hisdal H, Hannaford J, Tallaksen LM, van Lanen HAJ, Sauquet E, Demuth S, Fendekova M, Jódar J, 2010. Streamflow trends in Europe: evidence from a dataset of near-natural catchments. *Hydrology and Earth System Sciences* 14, 2367–2382. doi:10.5194/hess-14-2367-2010
- Taylor KE, Stouffer RJ, Meehl GA, 2012. An overview of CMIP5 and the experiment design. *American Meteorological Society.* 93, 485-498. doi:10.1175/BAMS-D-11-00094.1.
- van Griensven A, Meixner T, Grunwald S, 2006. A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. *J. Hydrol.* 324, 10-23. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.09.008>.
- Wilby RL, Dawson CW, Barrow EM, 2002. SDSM-A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environ. Modell. Softw.* 17, 145-157. [http://dx.doi.org/10.1016/S1364-8152\(01\)00060-3](http://dx.doi.org/10.1016/S1364-8152(01)00060-3).
- Williams, JR, 1990. The erosion productivity impact calculator (EPIC) model: A case history. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 329, 421-428.

Yue S, Pilon P, Phinney B, Cavadias G, 2002. The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series. *Hydrological Processes*, 16, 1807-1829.

Zabaleta A y Antiguada I, 2012. Klimaren seinale hidrologikoak EAeko arrotako ur-emarien joeretan. Gerora begirako proiektio hidrologikoak. *Ekaia* 25, 89-118.

Zambrano-Bigiarini M, 2014. Time series management, analysis and interpolation for hydrological modelling. R Package 'hydroTSM'.

www.geo.euskadi.eus

<https://hrsl.ba.ars.usda.gov/soilwater/Index.htm>

<http://swat.tamu.edu/>

LISTA DE ANEXO DIGITAL

Lista de carpetas de Anexos en formato digital y contenido de las mismas

TENDENCIAS PASADAS

1. Datos Datuak: en esta carpeta se encuentran los datos de partida utilizados para la realización del informe.

- estaciones_estazioak.xlsx: **lista de las estaciones incluidas en el estudio, donde se describen su localización, longitud de la serie, organismo gestor, la aplicación de los test estadísticos y la longitud de las series analizadas.**
- todos ordenados_denak ordenatuta.xlsx: **datos originales a escala diaria de todas las estaciones.**

2. Mapas Mapak: se incluye la información necesaria para la realización de los mapas de tendencias presentados en el informe.

- mapas_base_oinarrizko_mapak: **en esta carpeta se incluyen los mapas de base utilizados (cuencas, hipsométricos, ríos...)**
- tendencias_joerak: **en esta carpeta se encuentran los resultados de probabilidad de ocurrencia de las tendencias y su signo para proyectarlos en los mapas.**
- estaciones_estazioak.csv: **estaciones incluidas, localización, longitud de series...**

3. Scripts estadísticos Script estatistikoak: Se incluyen los scripts estadísticos utilizados en el análisis de datos.

- Análisis exploratorio: **Script de R utilizado para contar el número de datos válidos de las series.**
- Cambio bruscos_Aldaketa_bortitzak: **Script de R utilizado para detectar cambios bruscos en las series.**
- Tendencias_Joerak: **Script de R utilizado para analizar tendencias en las series.**

4. Variables Aldagaiak: Series de variables calculadas a partir de los datos originales.

5. Resultados de tendencias Joeren emaitzak: Resultados brutos obtenidos de los análisis de tendencias.

TENDENCIAS FUTURAS

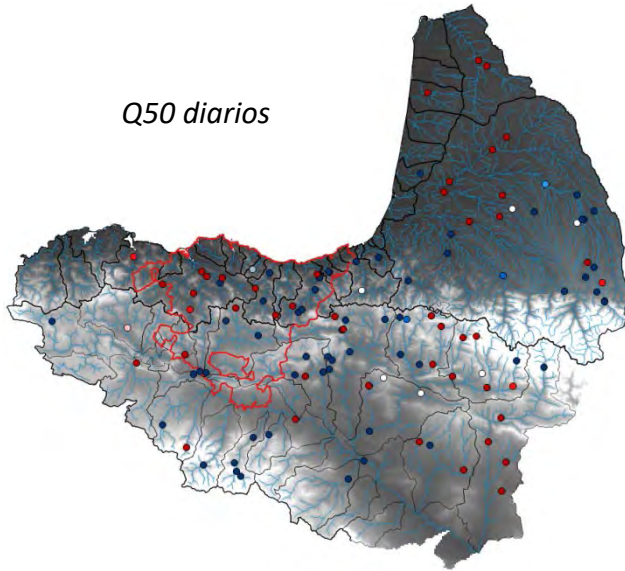
1. Mapas Mapak

2. Proyecciones Proiekzioak

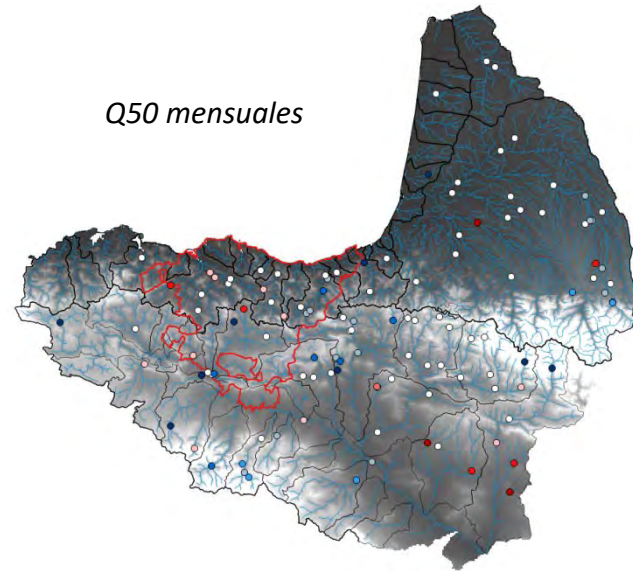
ANEXO 1
MAPAS DE TENDENCIAS PASADAS

Series de 20 años (1995/1996-2014-2015)

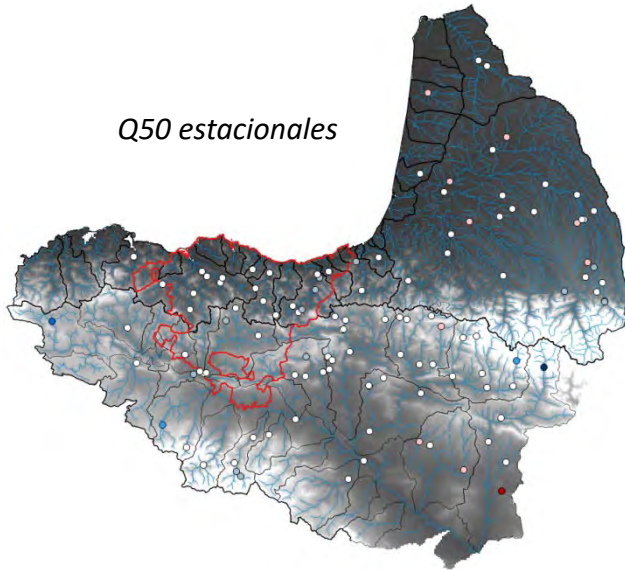
Q50 diarios



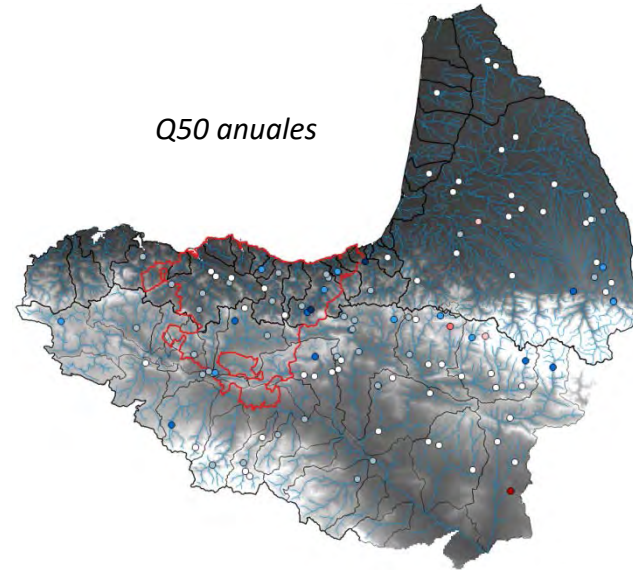
Q50 mensuales



Q50 estacionales



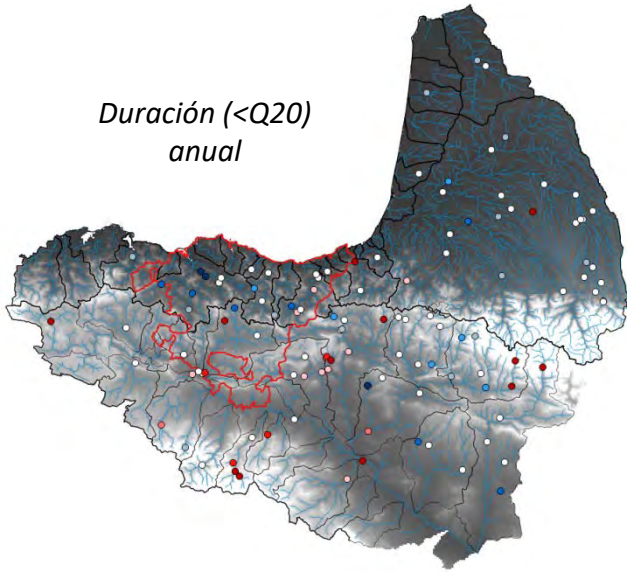
Q50 anuales



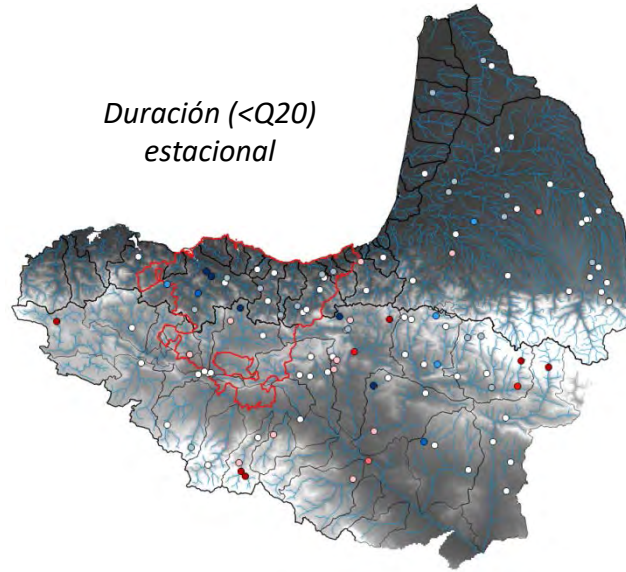
- | | | | | |
|------------------------------------|-------------------------|--------------|-------------------------|------------------------------------|
| ● negativo virtualmente cierto | ● negativo muy probable | ○ improbable | ● positivo probable | ● positivo extremadamente probable |
| ● negativo extremadamente probable | ● negativo probable | | ● positivo muy probable | ● positivo virtualmente cierto |

Series de 20 años (1995/1996-2014-2015)

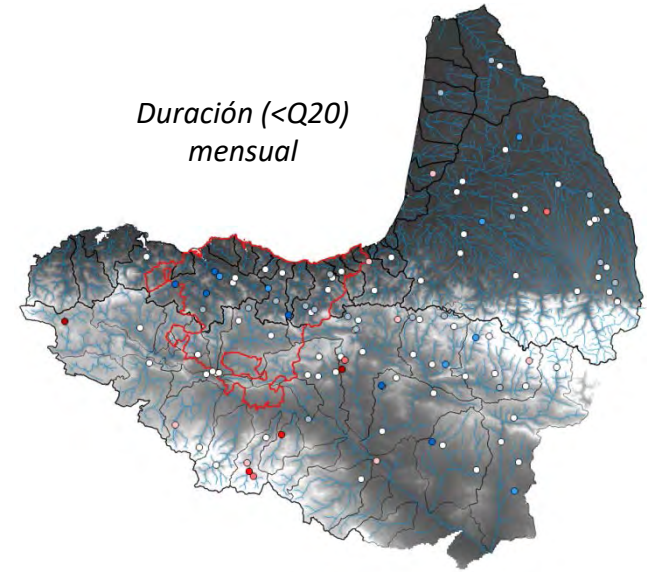
*Duración (<Q20)
anual*



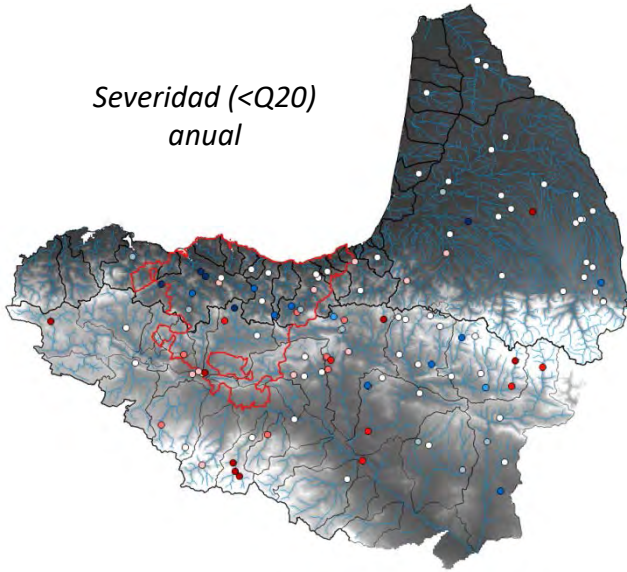
*Duración (<Q20)
estacional*



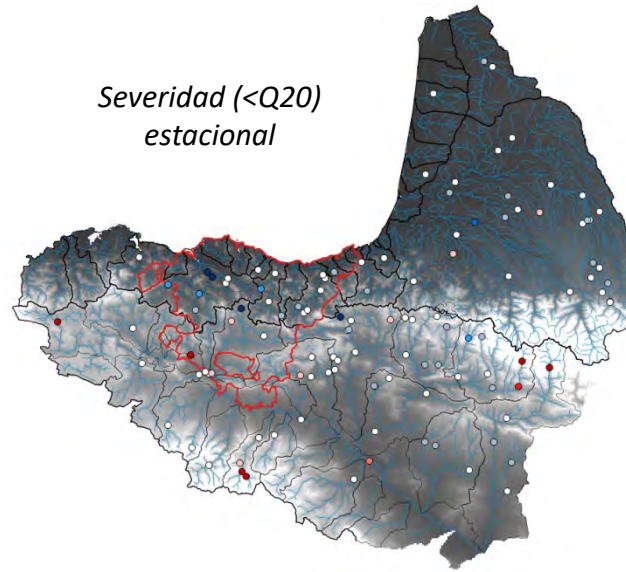
*Duración (<Q20)
mensual*



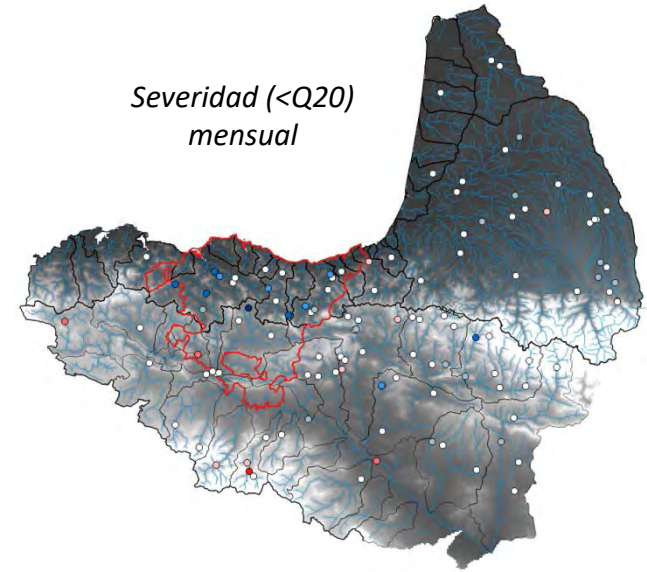
*Severidad (<Q20)
anual*



*Severidad (<Q20)
estacional*



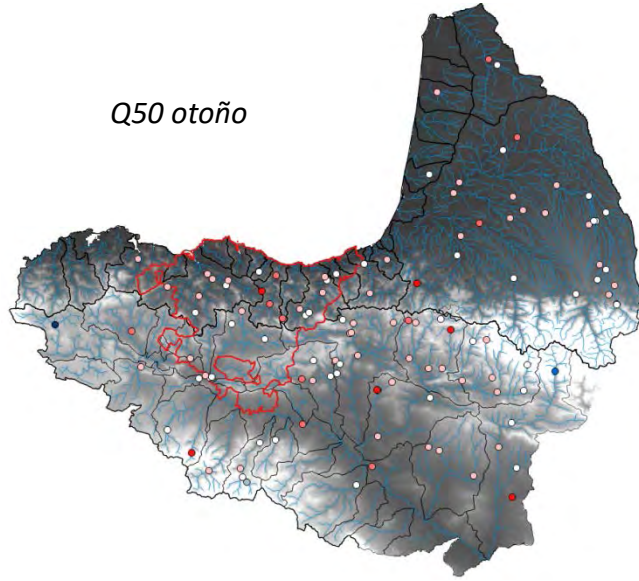
*Severidad (<Q20)
mensual*



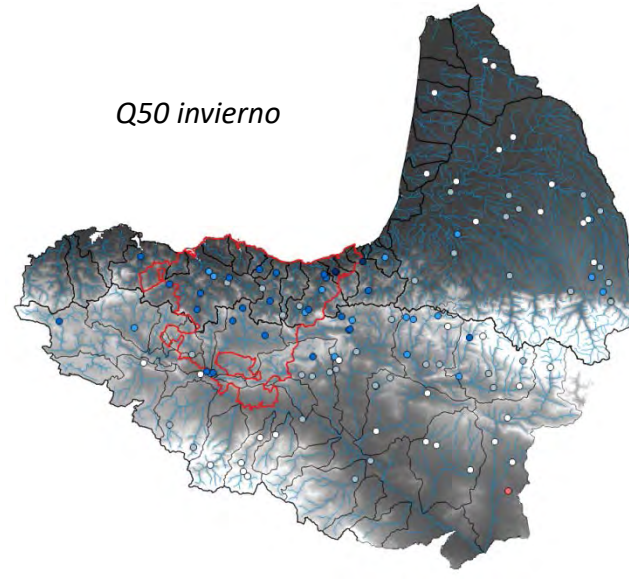
- | | | | | |
|------------------------------------|-------------------------|--------------|-------------------------|------------------------------------|
| ● negativo virtualmente cierto | ● negativo muy probable | ○ improbable | ● positivo probable | ● positivo extremadamente probable |
| ● negativo extremadamente probable | ● negativo probable | | ● positivo muy probable | ● positivo virtualmente cierto |

Series de 20 años (1995/1996-2014-2015)

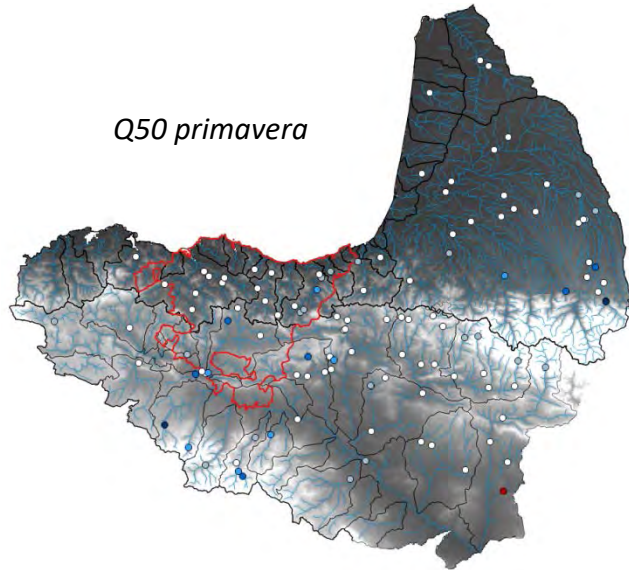
Q50 otoño



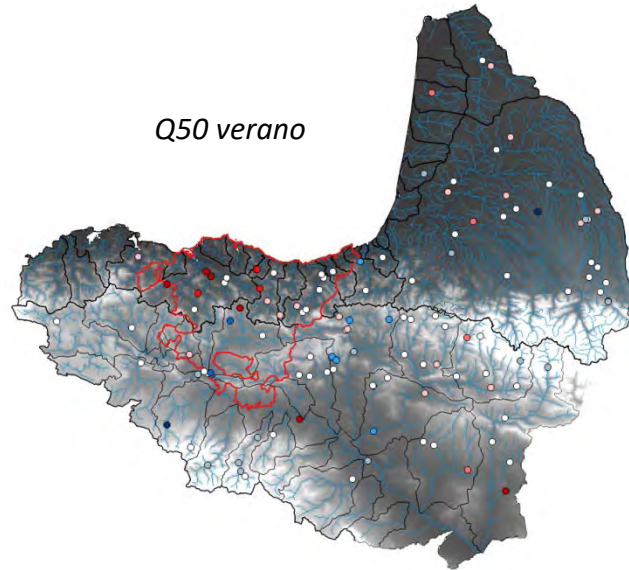
Q50 invierno



Q50 primavera



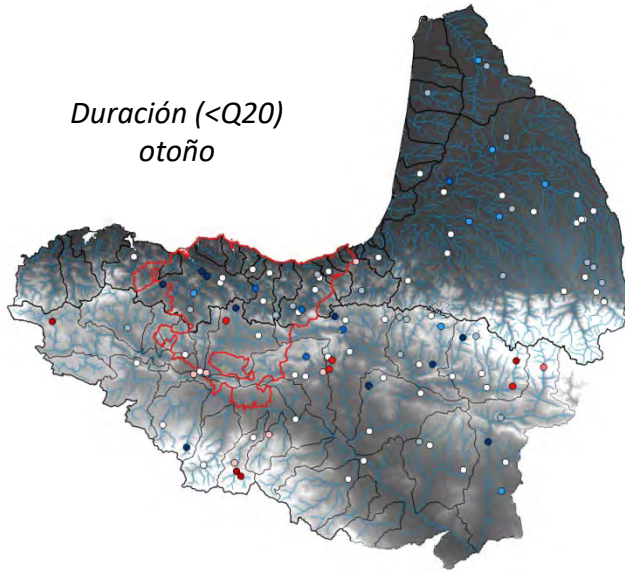
Q50 verano



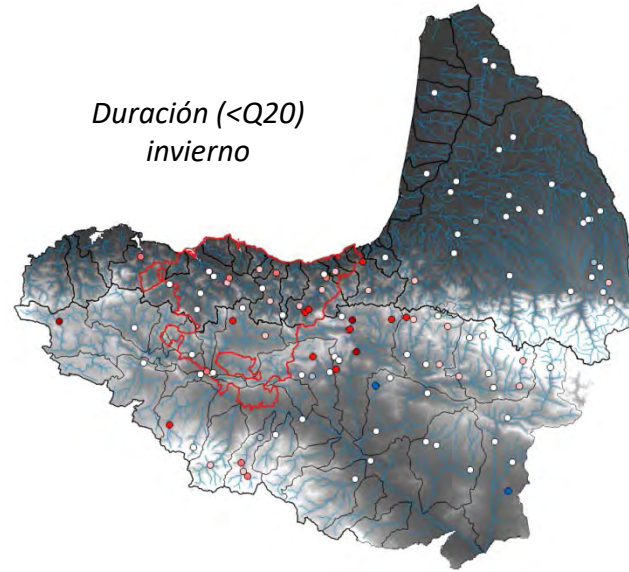
- | | | | | |
|------------------------------------|-------------------------|--------------|-------------------------|------------------------------------|
| ● negativo virtualmente cierto | ● negativo muy probable | ○ improbable | ● positivo probable | ● positivo extremadamente probable |
| ● negativo extremadamente probable | ● negativo probable | | ● positivo muy probable | ● positivo virtualmente cierto |

Series de 20 años (1995/1996-2014-2015)

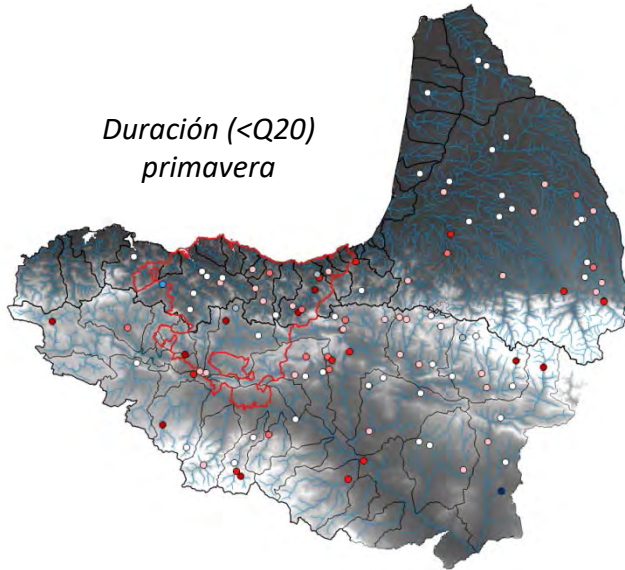
*Duración (<Q20)
otoño*



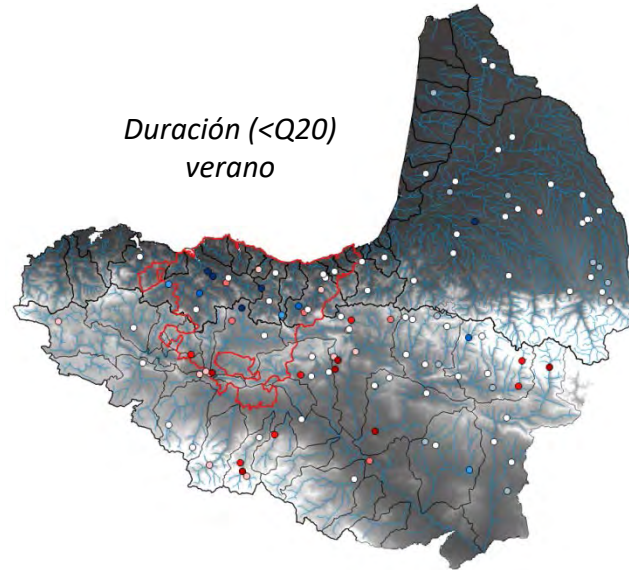
*Duración (<Q20)
invierno*



*Duración (<Q20)
primavera*



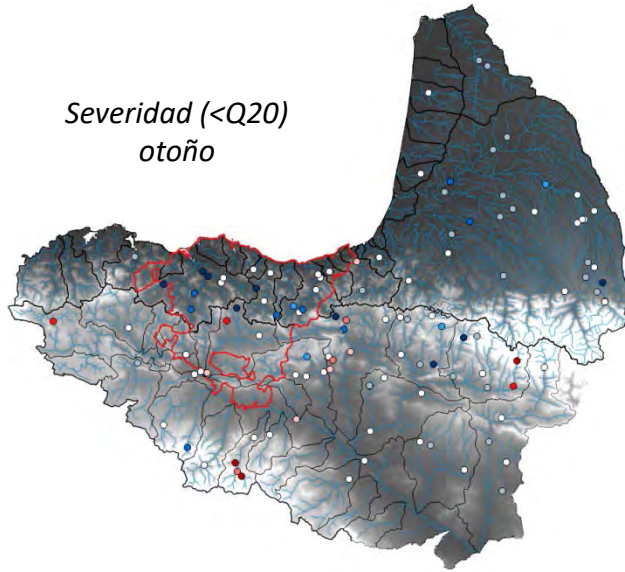
*Duración (<Q20)
verano*



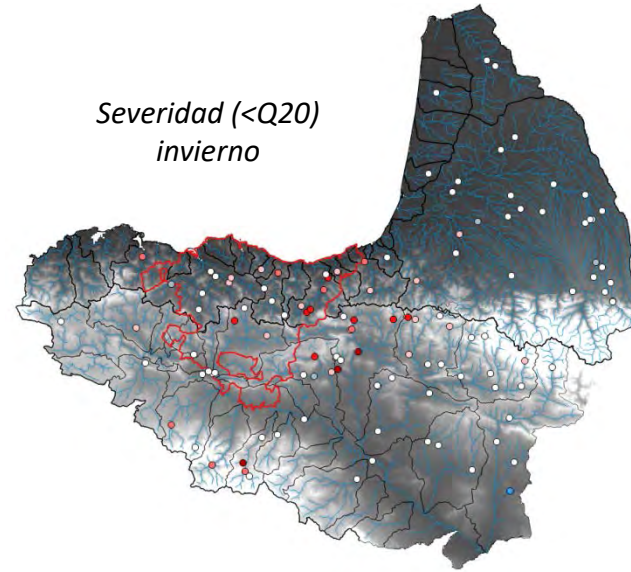
- | | | | | |
|------------------------------------|-------------------------|--------------|-------------------------|------------------------------------|
| ● negativo virtualmente cierto | ● negativo muy probable | ○ improbable | ● positivo probable | ● positivo extremadamente probable |
| ● negativo extremadamente probable | ● negativo probable | | ● positivo muy probable | ● positivo virtualmente cierto |

Series de 20 años (1995/1996-2014-2015)

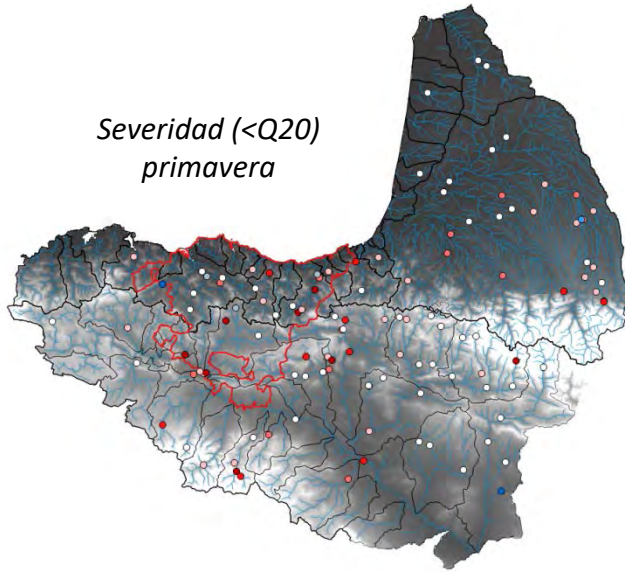
Severidad (<Q20)
otoño



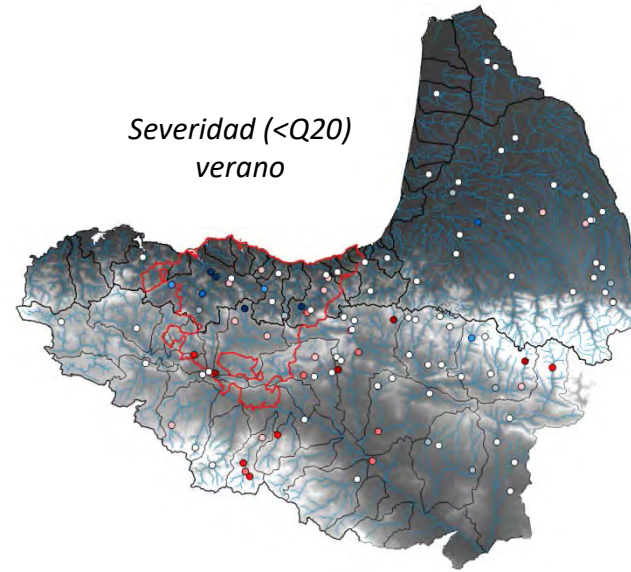
Severidad (<Q20)
invierno



Severidad (<Q20)
primavera



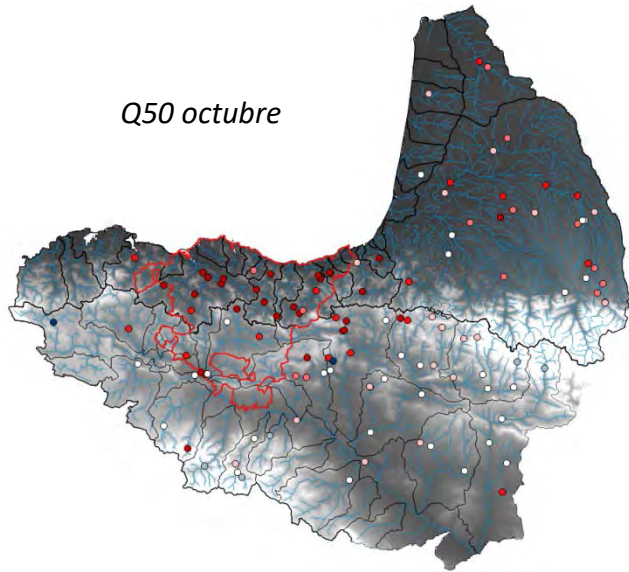
Severidad (<Q20)
verano



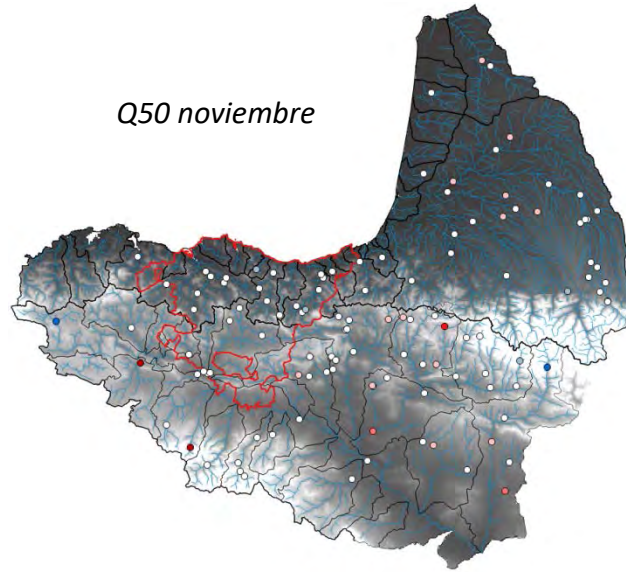
- | | | | | |
|------------------------------------|-------------------------|--------------|-------------------------|------------------------------------|
| ● negativo virtualmente cierto | ● negativo muy probable | ○ improbable | ● positivo probable | ● positivo extremadamente probable |
| ● negativo extremadamente probable | ● negativo probable | | ● positivo muy probable | ● positivo virtualmente cierto |

Series de 20 años (1995/1996-2014-2015)

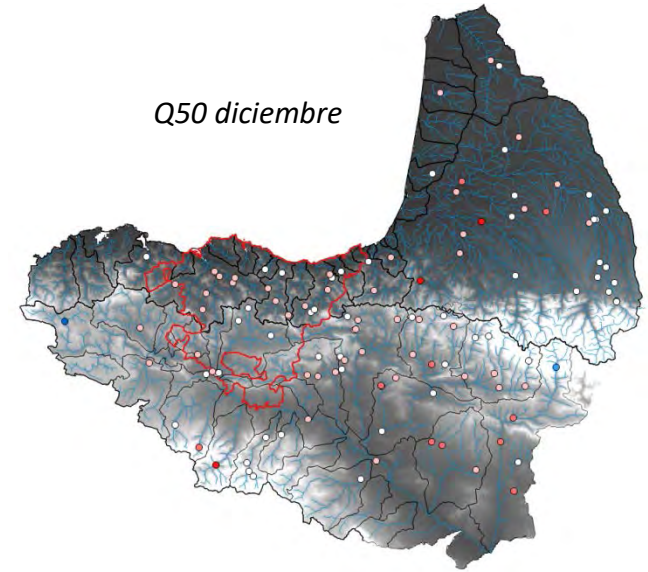
Q50 octubre



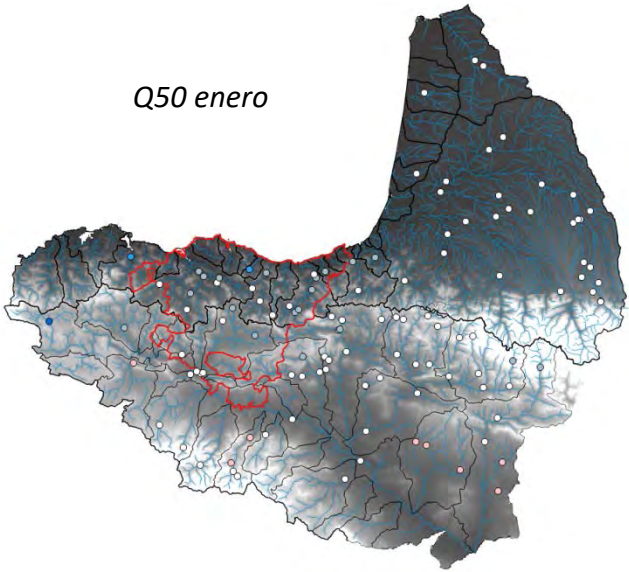
Q50 noviembre



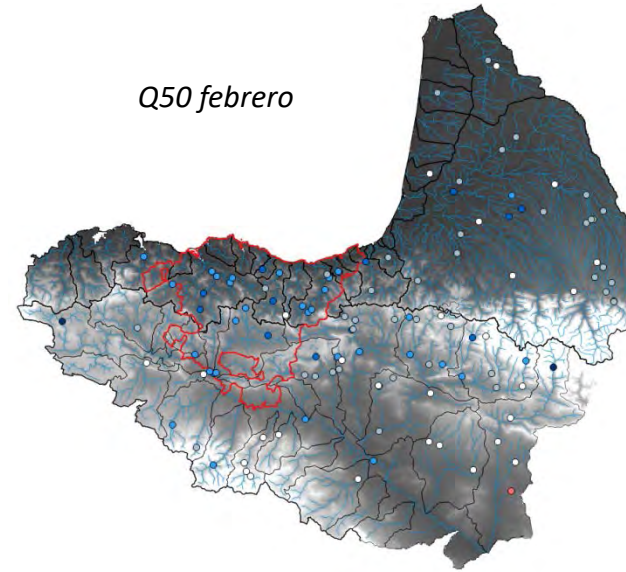
Q50 diciembre



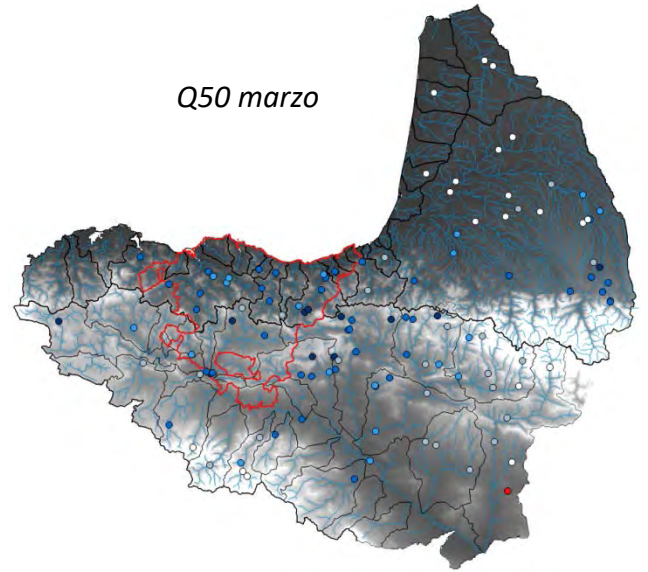
Q50 enero



Q50 febrero



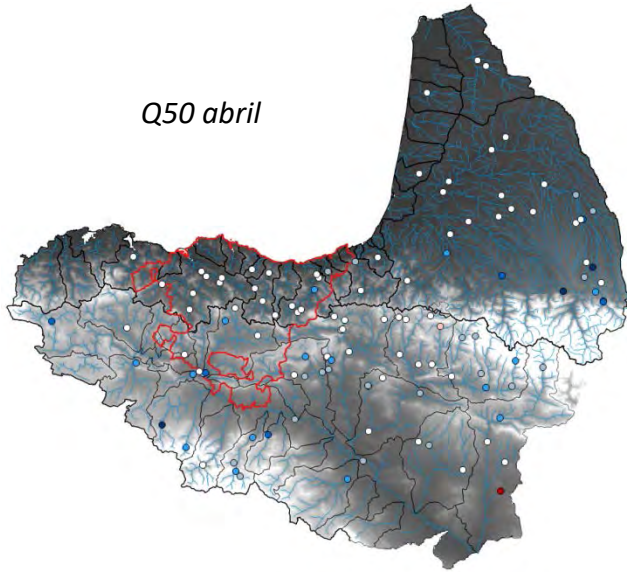
Q50 marzo



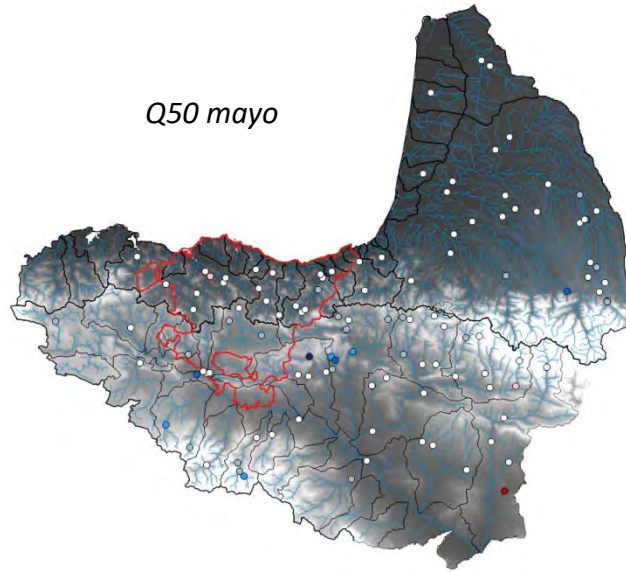
- | | | | | |
|------------------------------------|-------------------------|--------------|-------------------------|------------------------------------|
| ● negativo virtualmente cierto | ● negativo muy probable | ○ improbable | ● positivo probable | ● positivo extremadamente probable |
| ● negativo extremadamente probable | ● negativo probable | | ● positivo muy probable | ● positivo virtualmente cierto |

Series de 20 años (1995/1996-2014-2015)

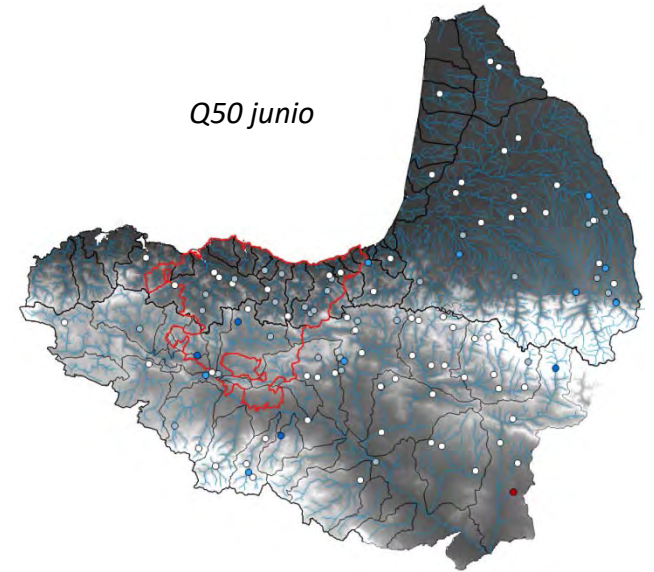
Q50 abril



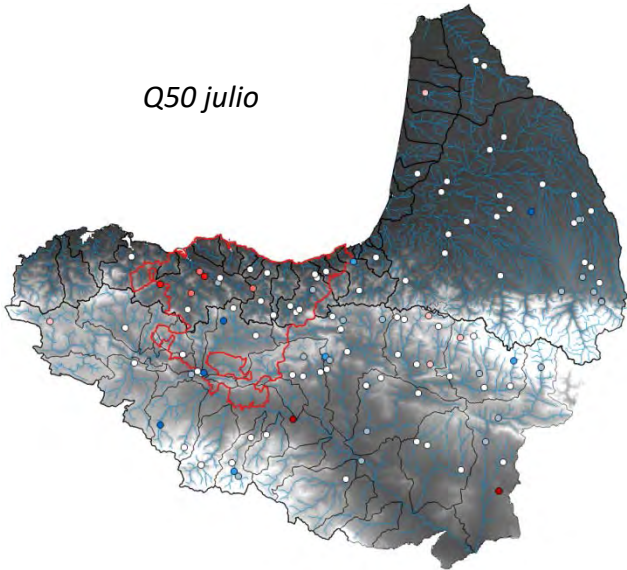
Q50 mayo



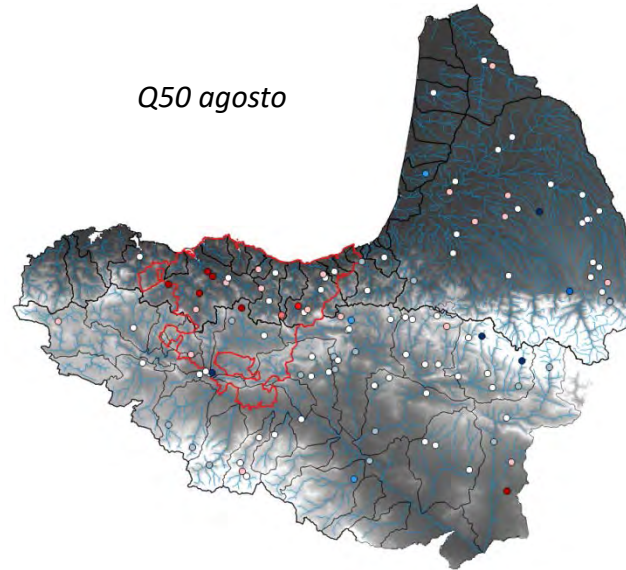
Q50 junio



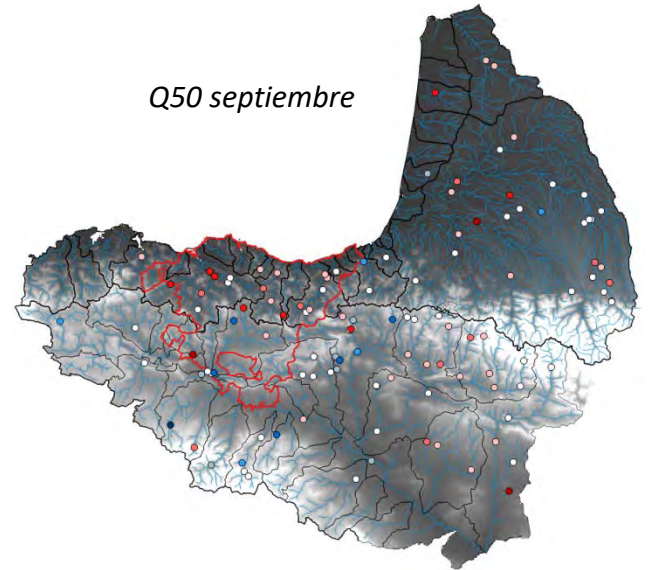
Q50 julio



Q50 agosto



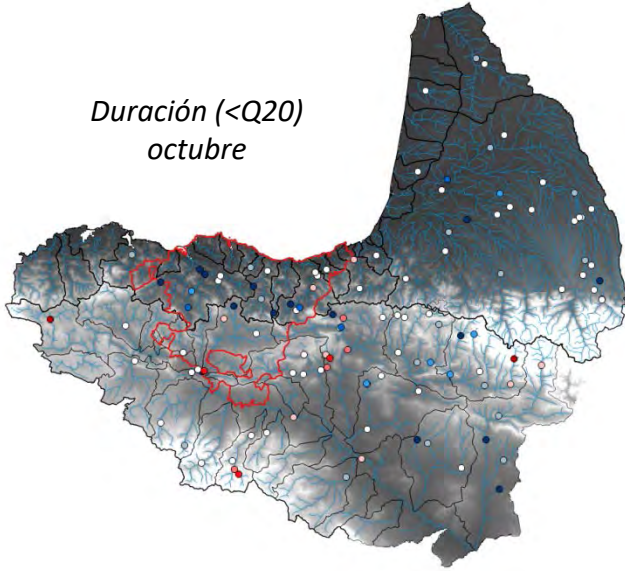
Q50 septiembre



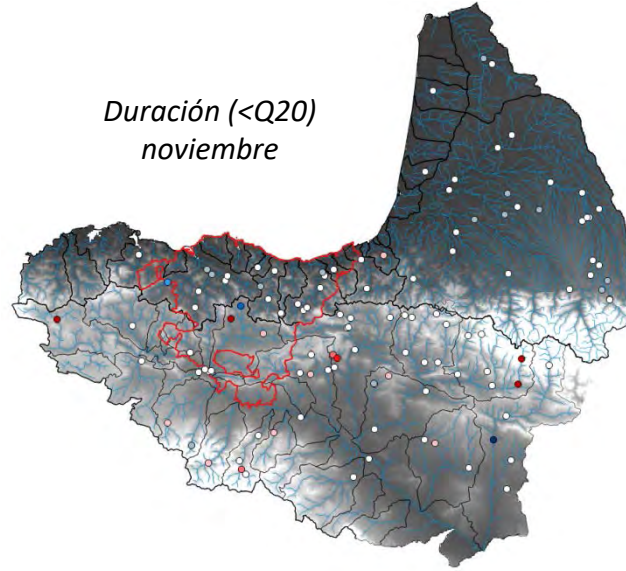
- | | | | | |
|------------------------------------|-------------------------|--------------|-------------------------|------------------------------------|
| ● negativo virtualmente cierto | ● negativo muy probable | ○ improbable | ● positivo probable | ● positivo extremadamente probable |
| ● negativo extremadamente probable | ● negativo probable | | ● positivo muy probable | ● positivo virtualmente cierto |

Series de 20 años (1995/1996-2014-2015)

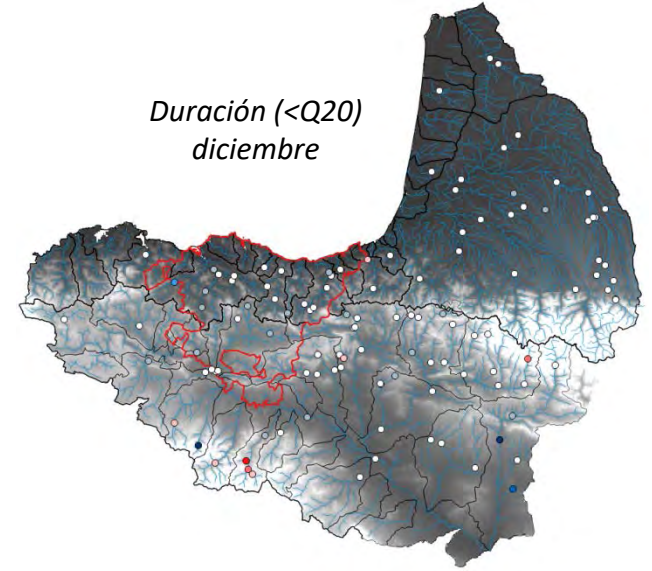
*Duración (<Q20)
octubre*



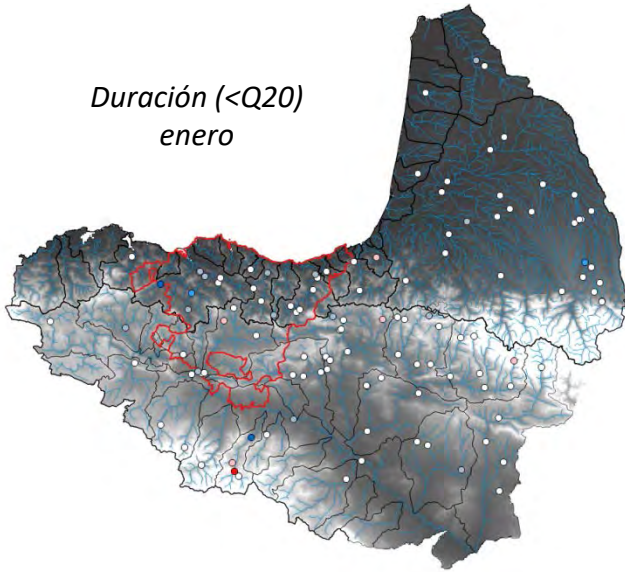
*Duración (<Q20)
noviembre*



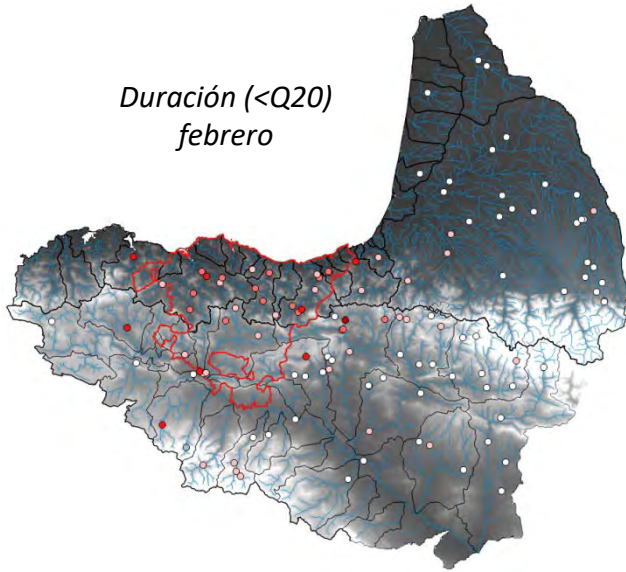
*Duración (<Q20)
diciembre*



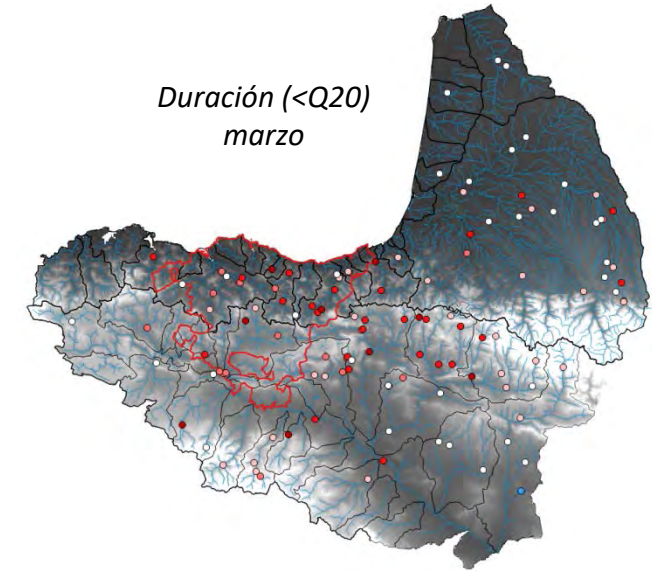
*Duración (<Q20)
enero*



*Duración (<Q20)
febrero*



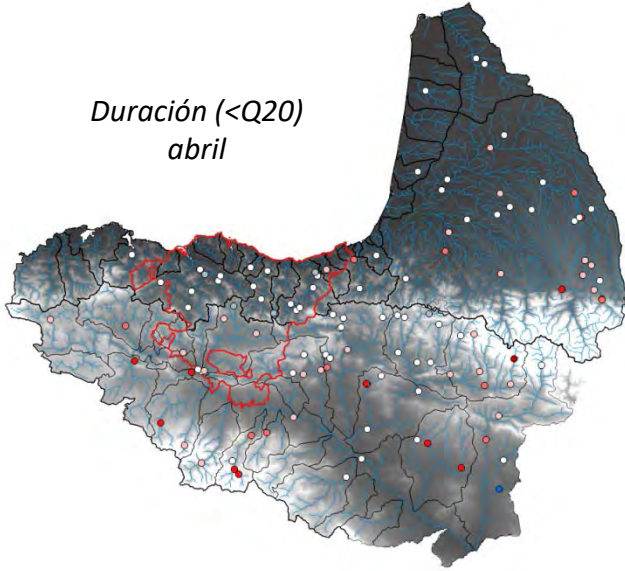
*Duración (<Q20)
marzo*



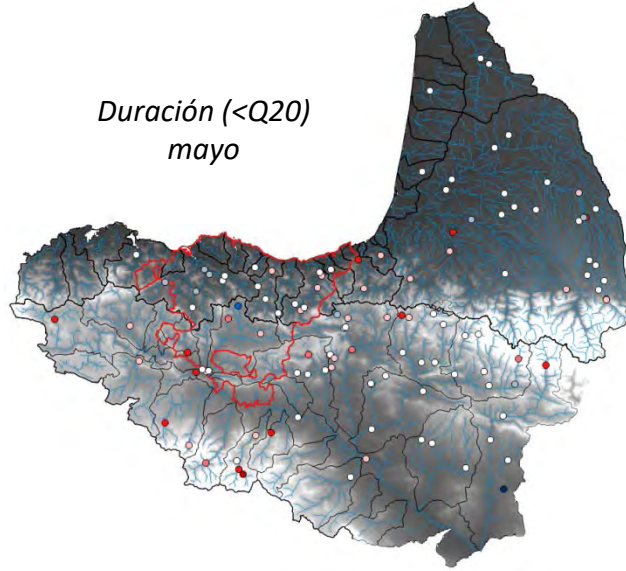
- | | | | | |
|------------------------------------|-------------------------|--------------|-------------------------|------------------------------------|
| ● negativo virtualmente cierto | ● negativo muy probable | ○ improbable | ● positivo probable | ● positivo extremadamente probable |
| ● negativo extremadamente probable | ● negativo probable | | ● positivo muy probable | ● positivo virtualmente cierto |

Series de 20 años (1995/1996-2014-2015)

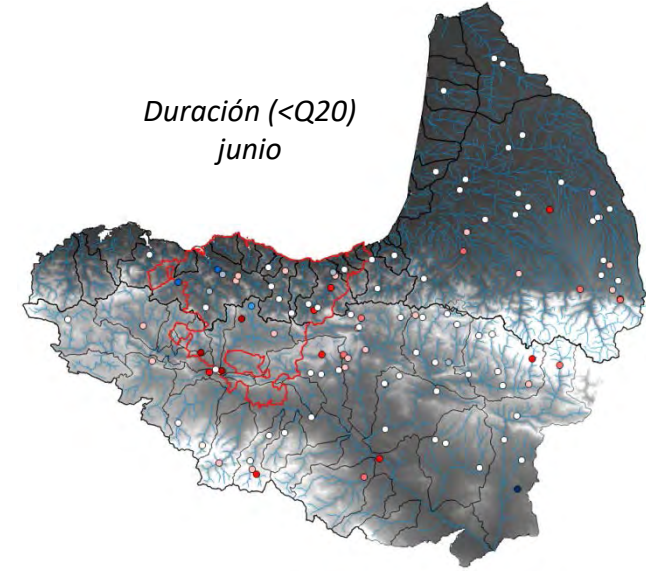
*Duración (<Q20)
abril*



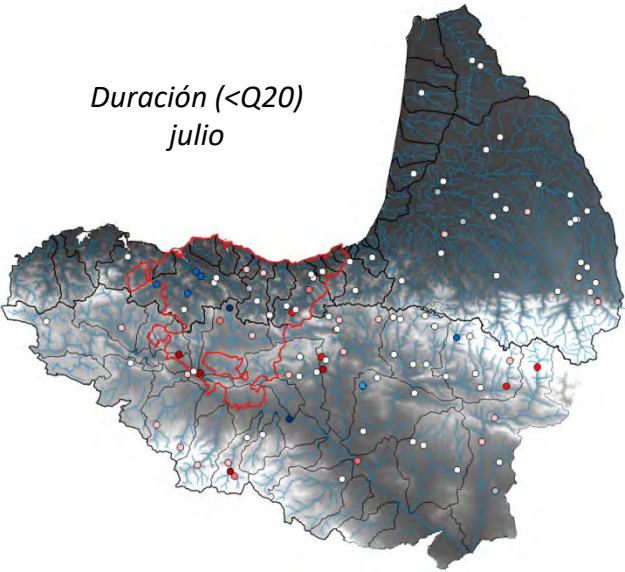
*Duración (<Q20)
mayo*



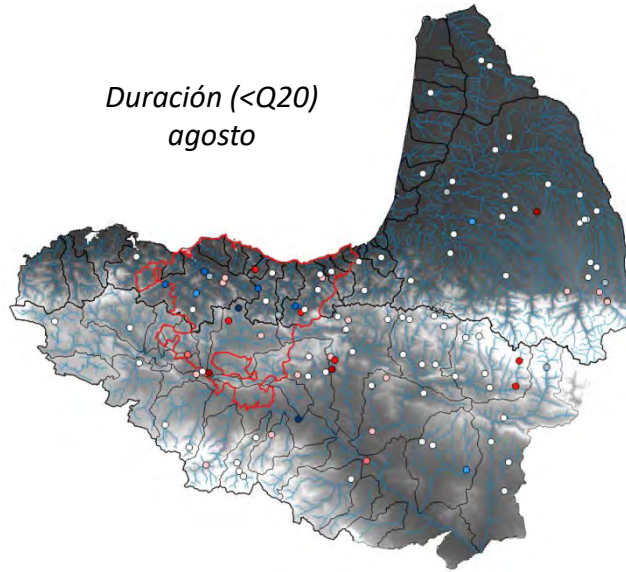
*Duración (<Q20)
junio*



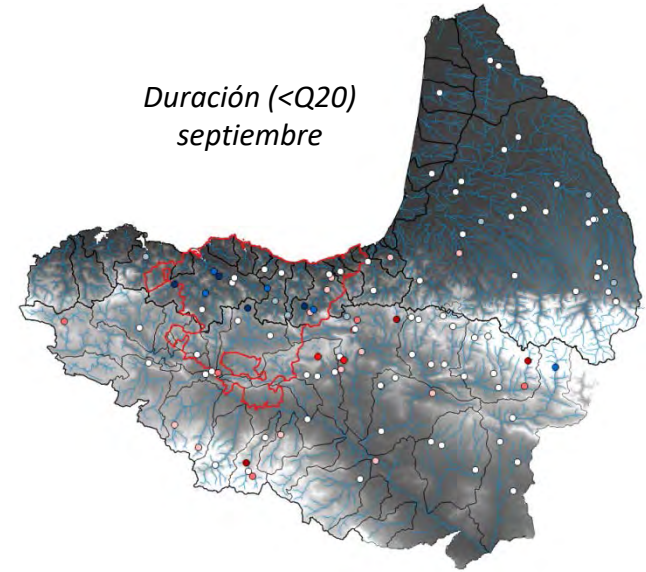
*Duración (<Q20)
julio*



*Duración (<Q20)
agosto*



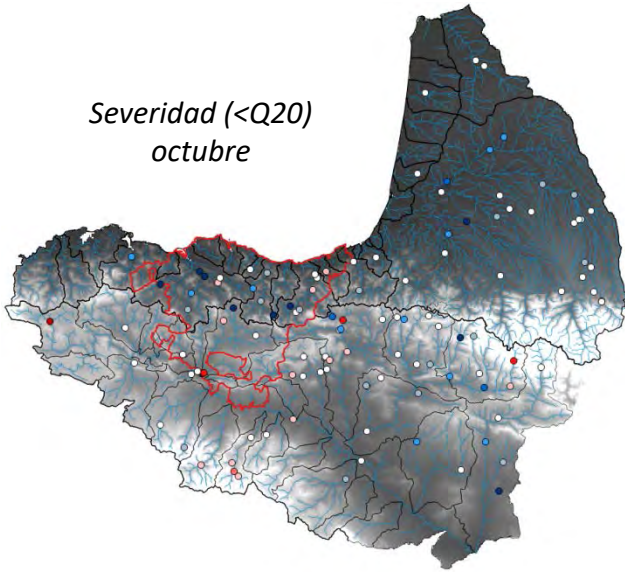
*Duración (<Q20)
septiembre*



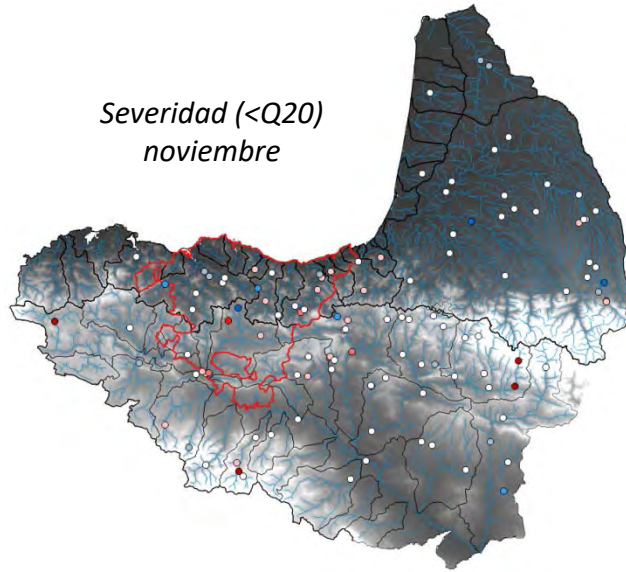
- | | | | | |
|------------------------------------|-------------------------|--------------|-------------------------|------------------------------------|
| ● negativo virtualmente cierto | ● negativo muy probable | ○ improbable | ● positivo probable | ● positivo extremadamente probable |
| ● negativo extremadamente probable | ● negativo probable | | ● positivo muy probable | ● positivo virtualmente cierto |

Series de 20 años (1995/1996-2014-2015)

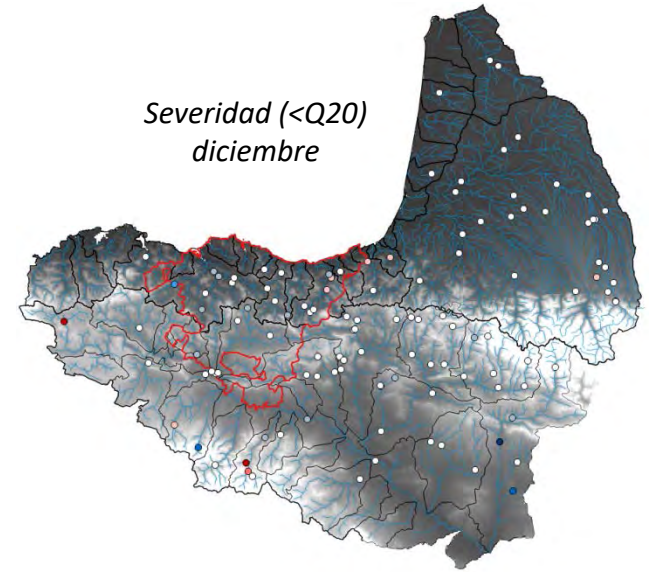
*Severidad (<Q20)
octubre*



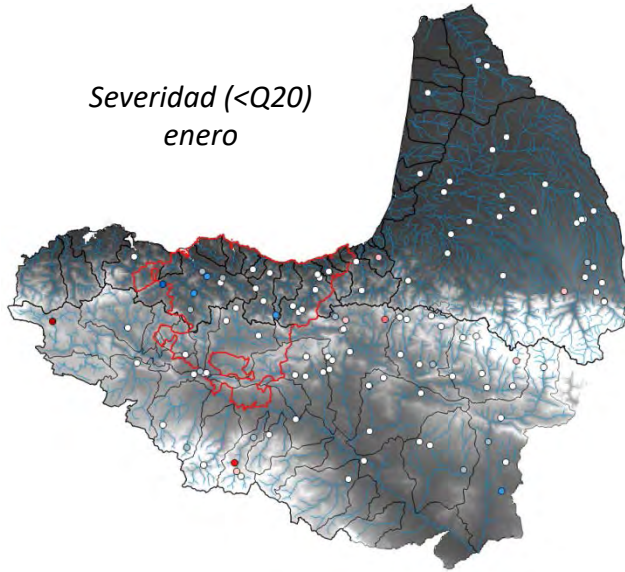
*Severidad (<Q20)
noviembre*



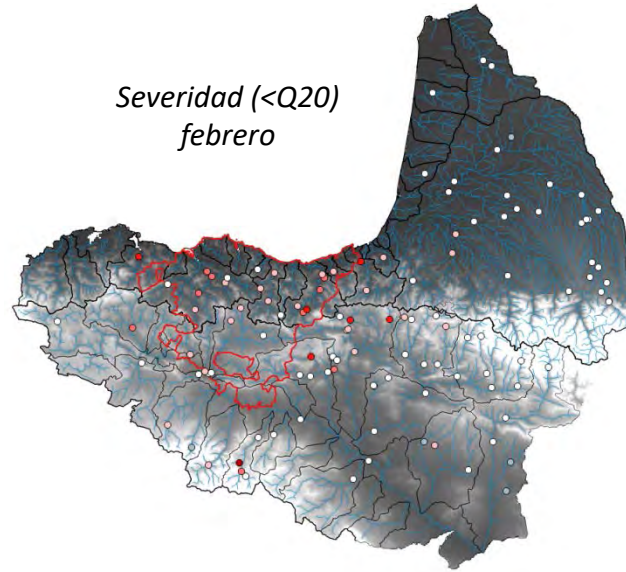
*Severidad (<Q20)
diciembre*



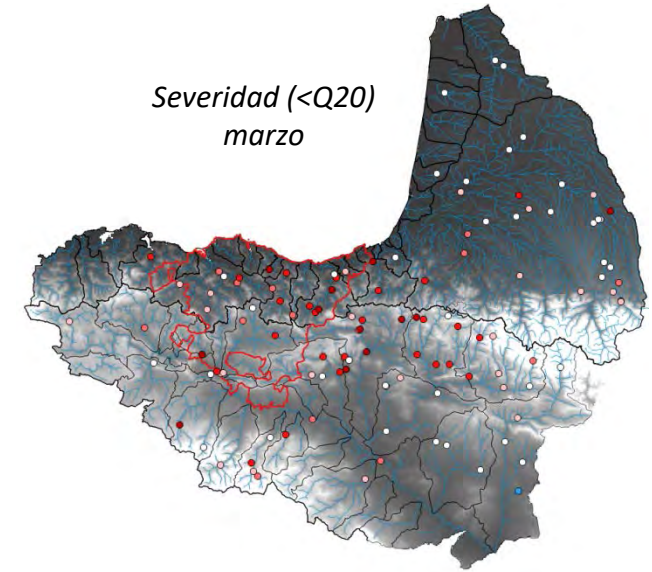
*Severidad (<Q20)
enero*



*Severidad (<Q20)
febrero*



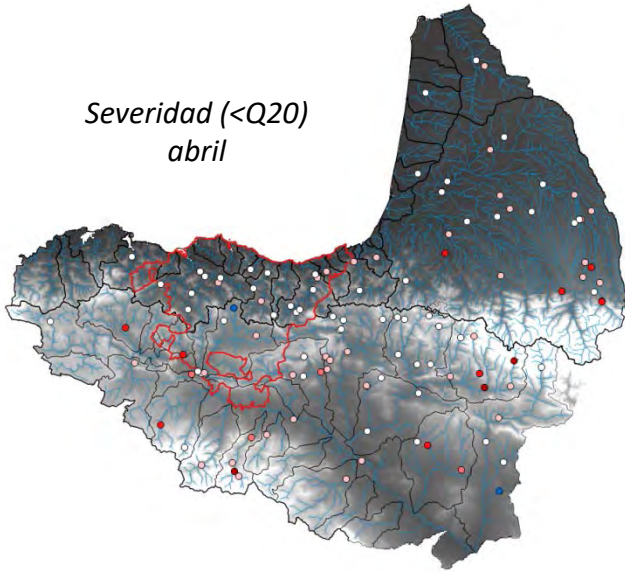
*Severidad (<Q20)
marzo*



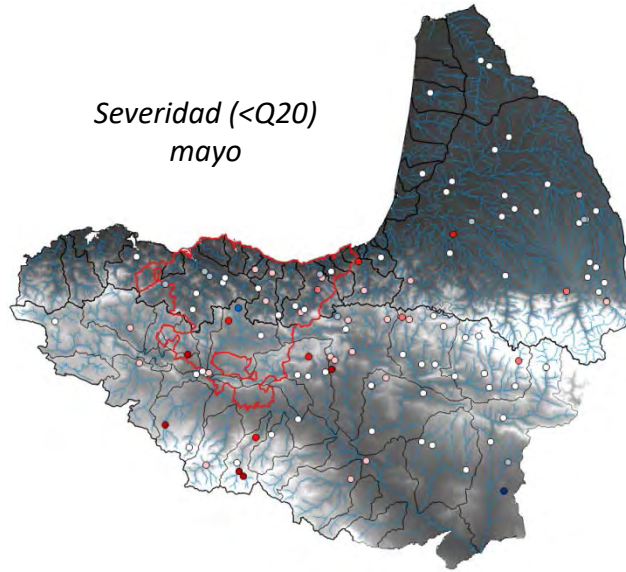
- | | | | | |
|------------------------------------|-------------------------|--------------|-------------------------|------------------------------------|
| ● negativo virtualmente cierto | ● negativo muy probable | ○ improbable | ● positivo probable | ● positivo extremadamente probable |
| ● negativo extremadamente probable | ● negativo probable | | ● positivo muy probable | ● positivo virtualmente cierto |

Series de 20 años (1995/1996-2014-2015)

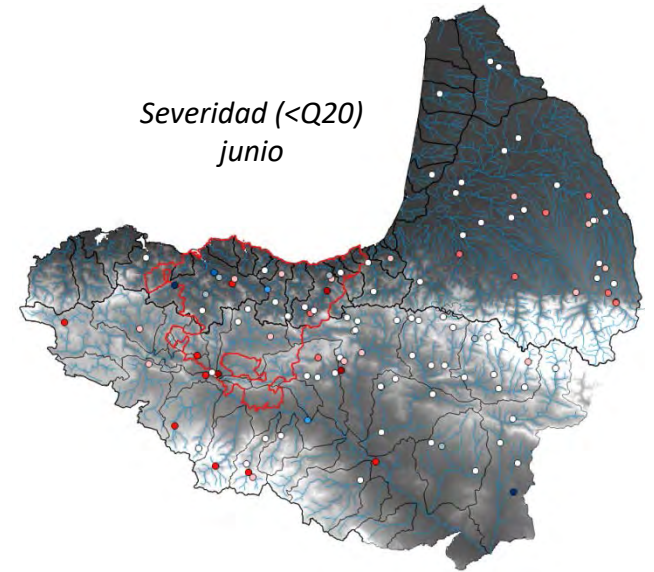
Severidad (<Q20)
abril



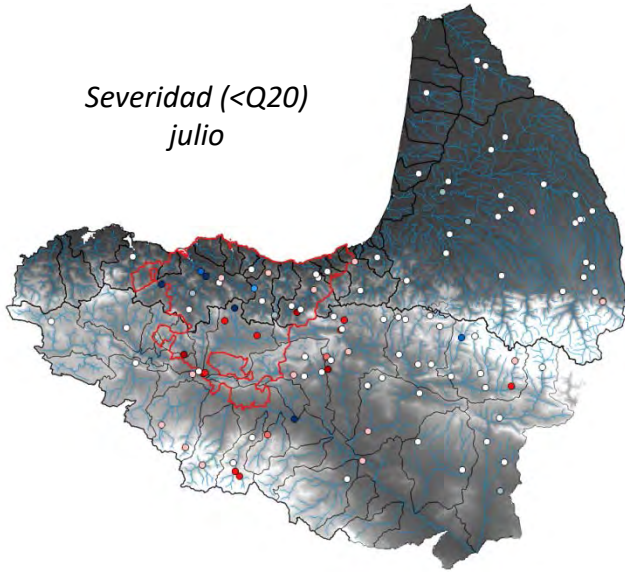
Severidad (<Q20)
mayo



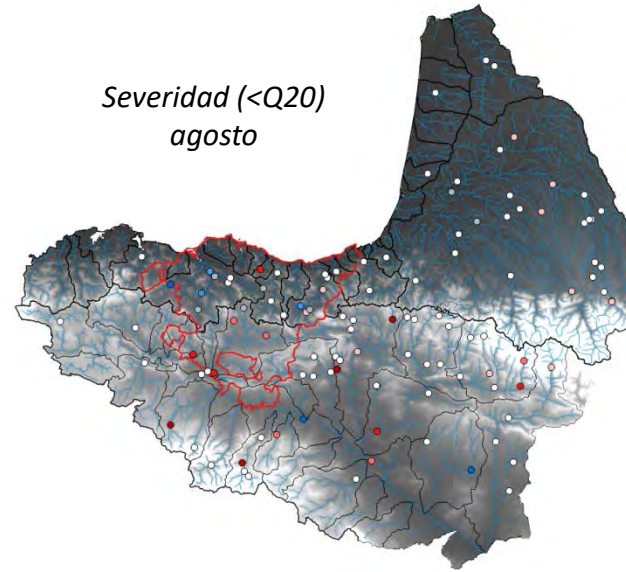
Severidad (<Q20)
junio



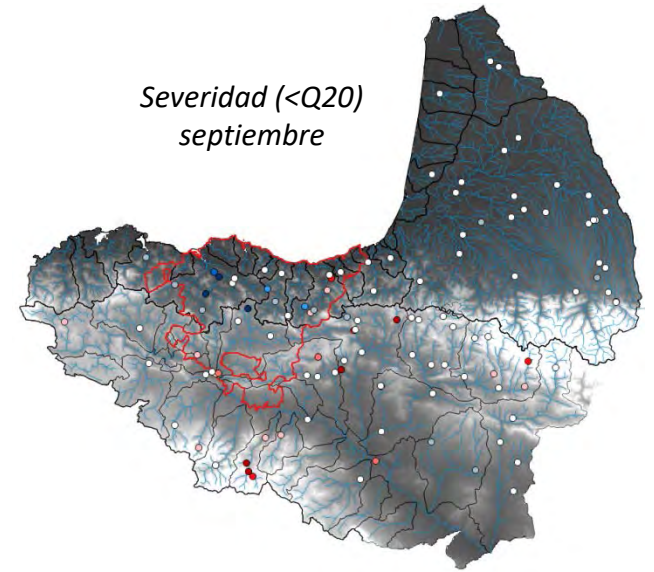
Severidad (<Q20)
julio



Severidad (<Q20)
agosto



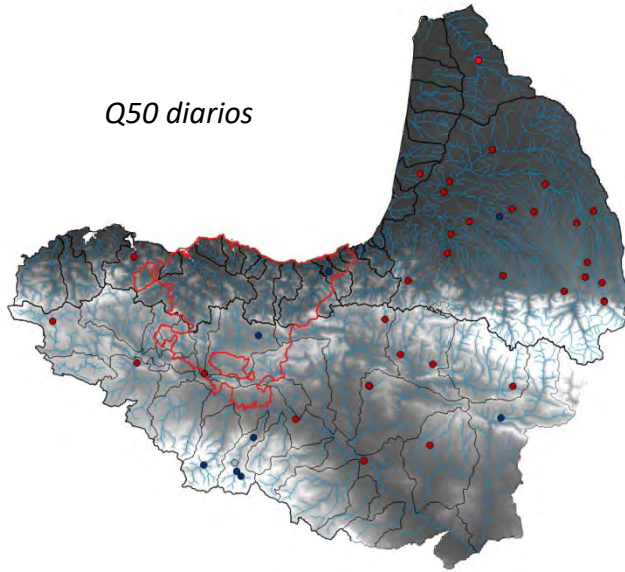
Severidad (<Q20)
septiembre



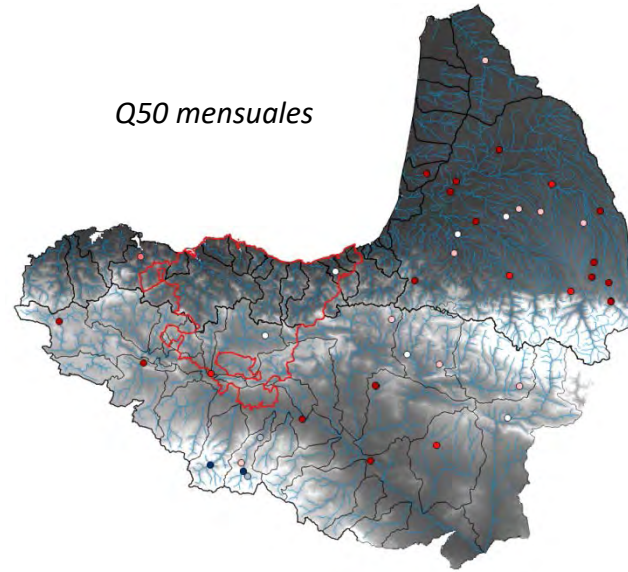
- | | | | | |
|------------------------------------|-------------------------|--------------|-------------------------|------------------------------------|
| ● negativo virtualmente cierto | ● negativo muy probable | ○ improbable | ● positivo probable | ● positivo extremadamente probable |
| ● negativo extremadamente probable | ● negativo probable | | ● positivo muy probable | ● positivo virtualmente cierto |

Series de 40 años (1975/1976-2014-2015)

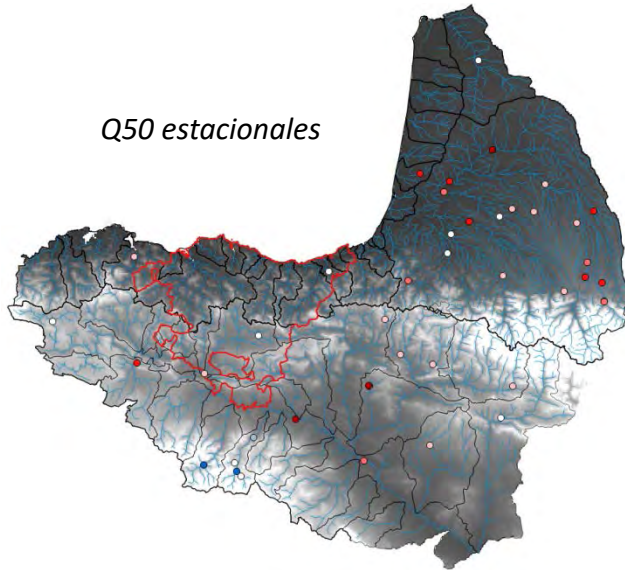
Q50 diarios



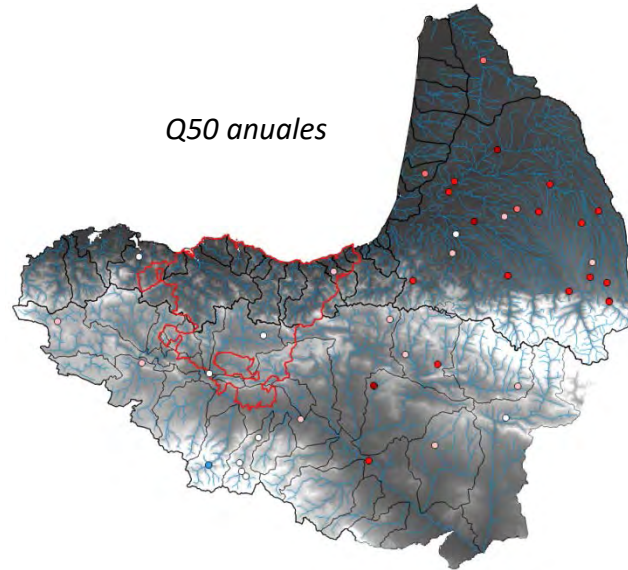
Q50 mensuales



Q50 estacionales



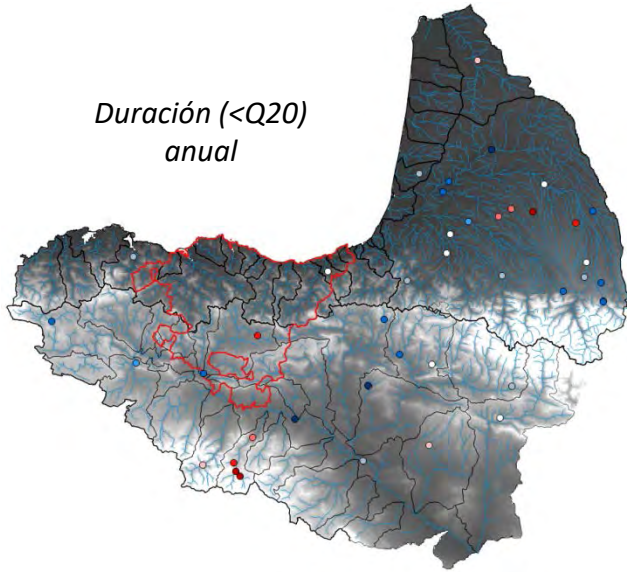
Q50 anuales



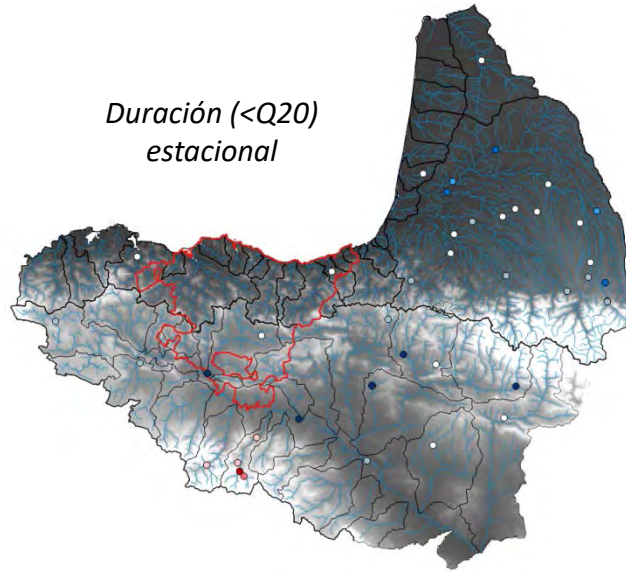
- | | | | | |
|------------------------------------|-------------------------|--------------|-------------------------|------------------------------------|
| ● negativo virtualmente cierto | ● negativo muy probable | ○ improbable | ● positivo probable | ● positivo extremadamente probable |
| ● negativo extremadamente probable | ● negativo probable | | ● positivo muy probable | ● positivo virtualmente cierto |

Series de 40 años (1975/1976-2014-2015)

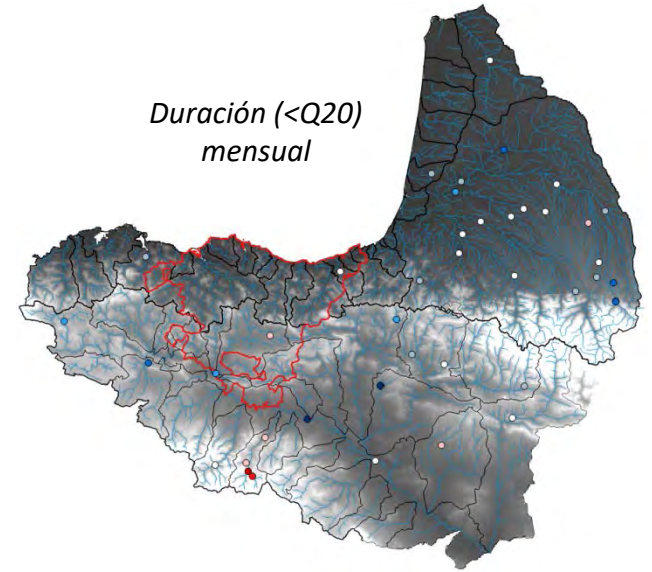
*Duración (<Q20)
anual*



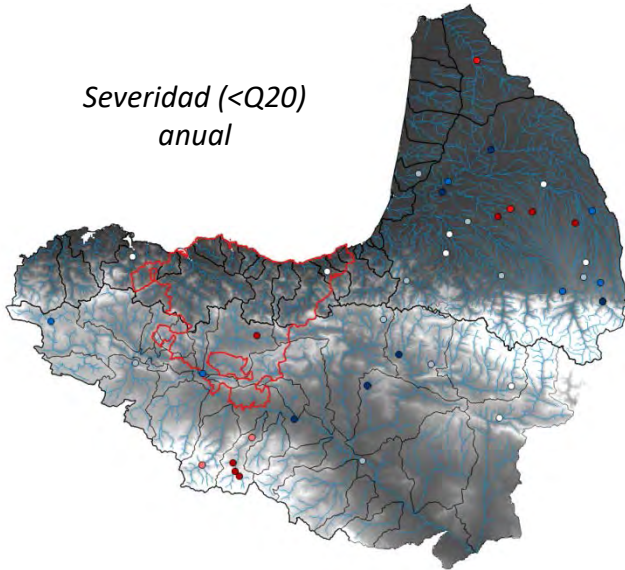
*Duración (<Q20)
estacional*



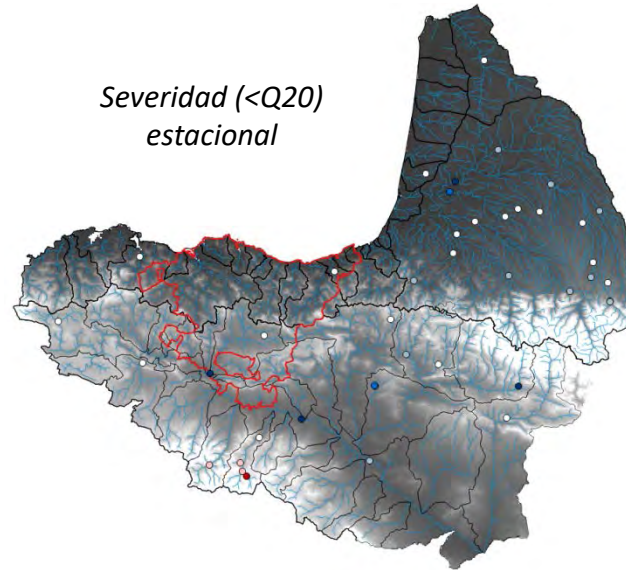
*Duración (<Q20)
mensual*



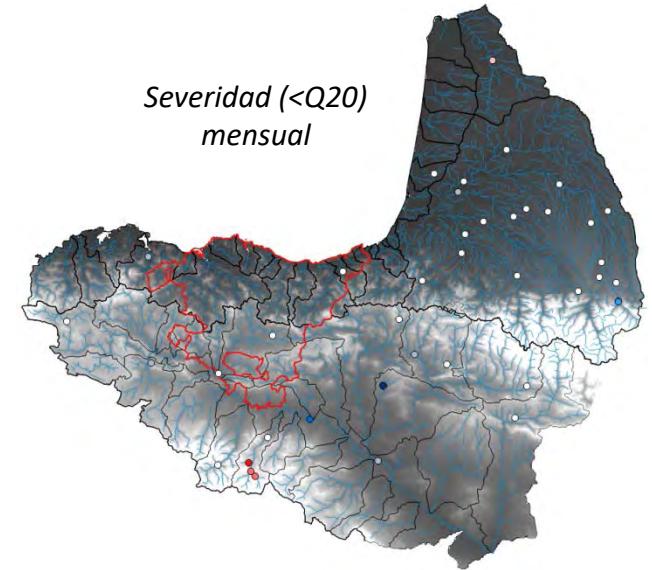
*Severidad (<Q20)
anual*



*Severidad (<Q20)
estacional*



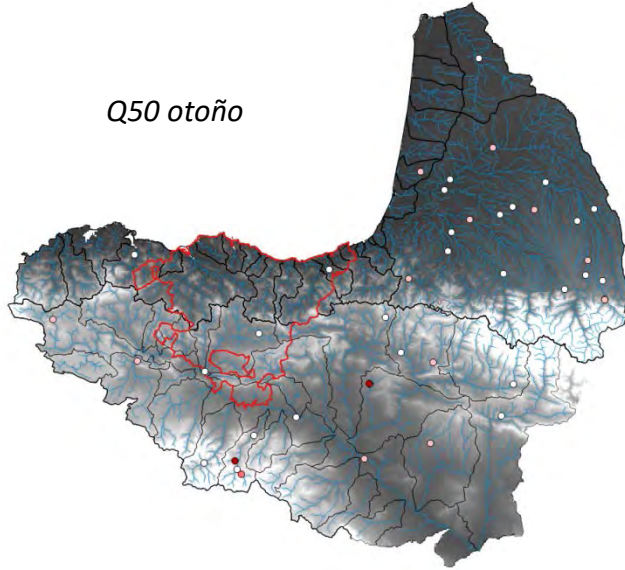
*Severidad (<Q20)
mensual*



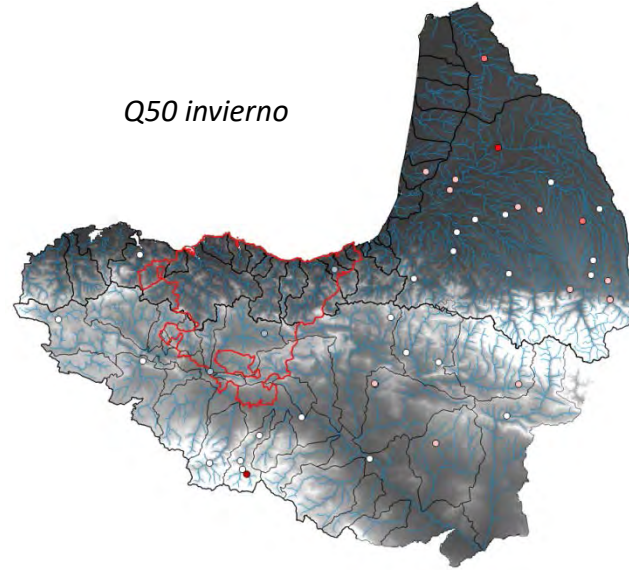
- | | | | | |
|------------------------------------|-------------------------|--------------|-------------------------|------------------------------------|
| ● negativo virtualmente cierto | ● negativo muy probable | ○ improbable | ● positivo probable | ● positivo extremadamente probable |
| ● negativo extremadamente probable | ● negativo probable | | ● positivo muy probable | ● positivo virtualmente cierto |

Series de 40 años (1975/1976-2014-2015)

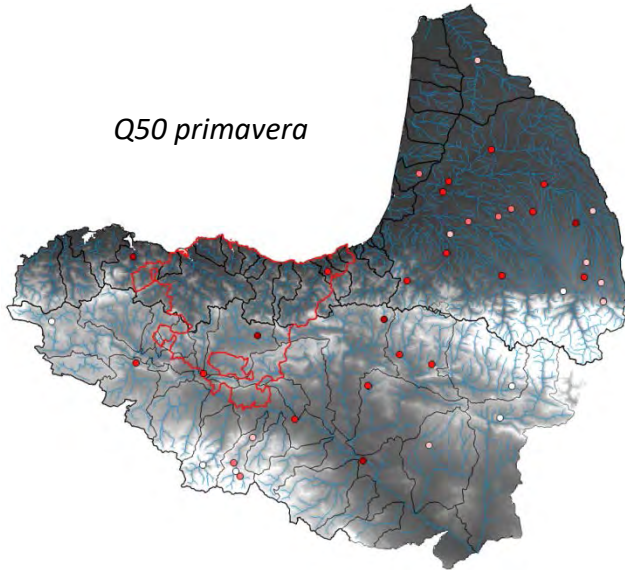
Q50 otoño



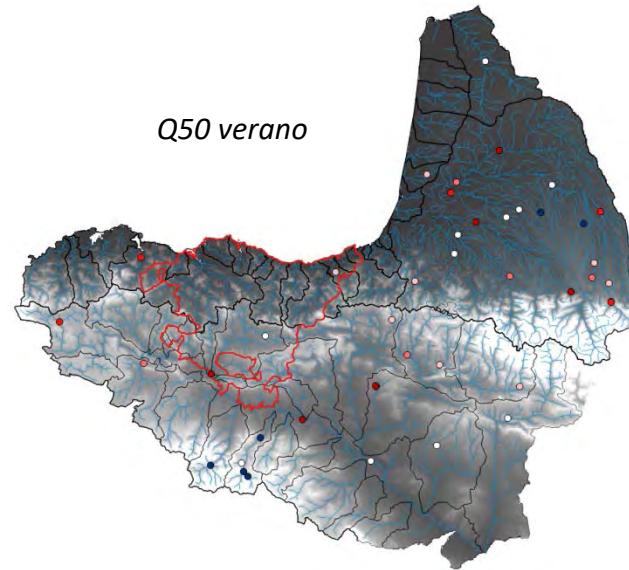
Q50 invierno



Q50 primavera



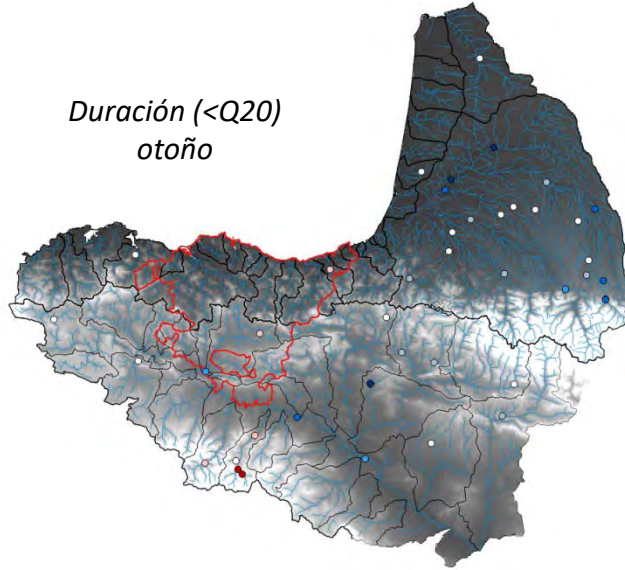
Q50 verano



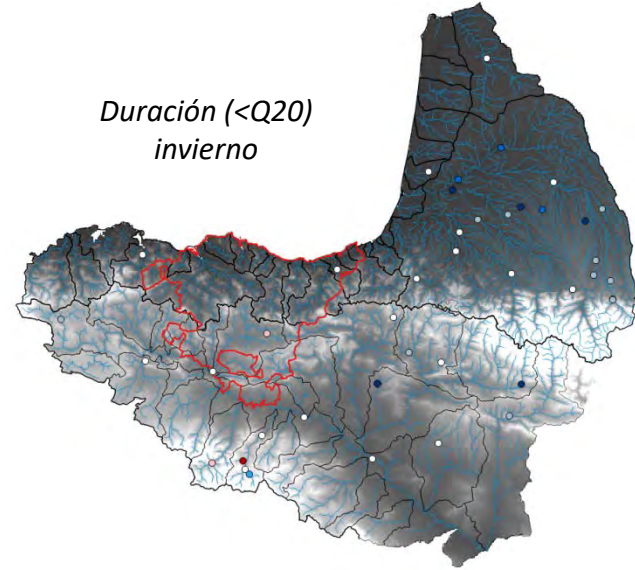
- | | | | | |
|------------------------------------|-------------------------|--------------|-------------------------|------------------------------------|
| ● negativo virtualmente cierto | ● negativo muy probable | ○ improbable | ● positivo probable | ● positivo extremadamente probable |
| ● negativo extremadamente probable | ● negativo probable | | ● positivo muy probable | ● positivo virtualmente cierto |

Series de 40 años (1975/1976-2014-2015)

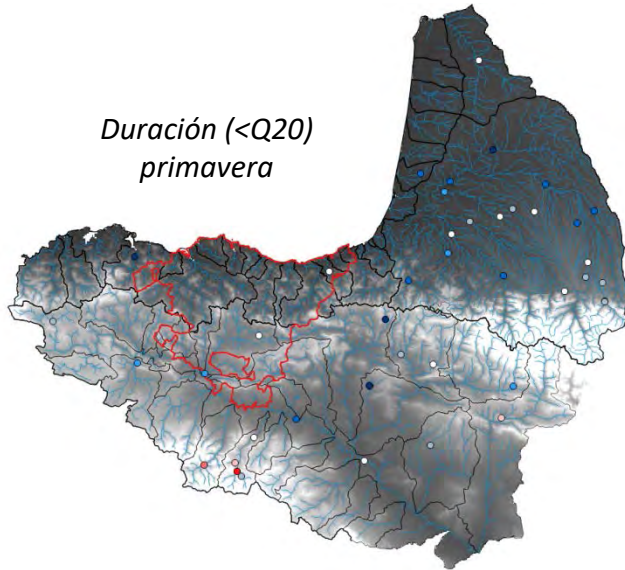
*Duración (<Q20)
otoño*



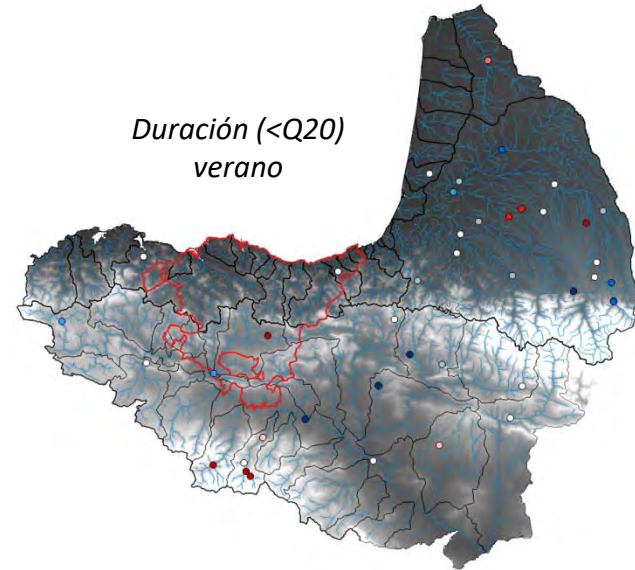
*Duración (<Q20)
invierno*



*Duración (<Q20)
primavera*



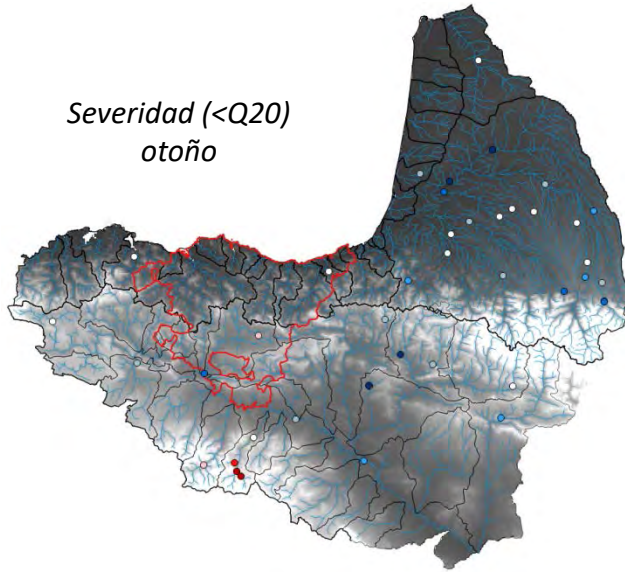
*Duración (<Q20)
verano*



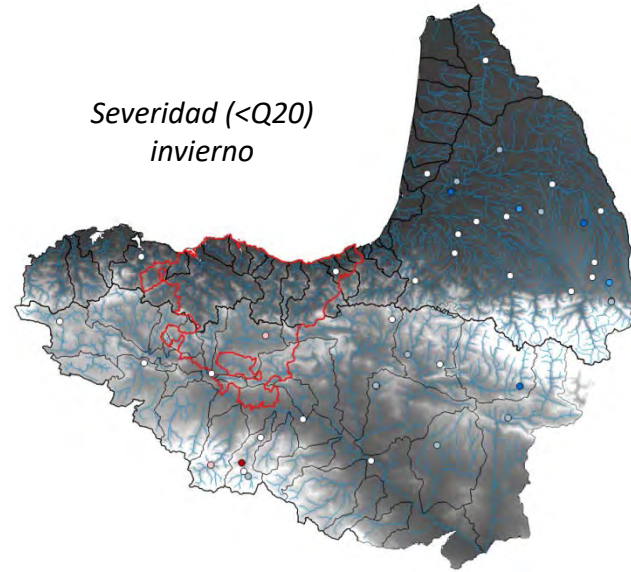
- | | | | | |
|------------------------------------|-------------------------|--------------|-------------------------|------------------------------------|
| ● negativo virtualmente cierto | ● negativo muy probable | ○ improbable | ● positivo probable | ● positivo extremadamente probable |
| ● negativo extremadamente probable | ● negativo probable | | ● positivo muy probable | ● positivo virtualmente cierto |

Series de 40 años (1975/1976-2014-2015)

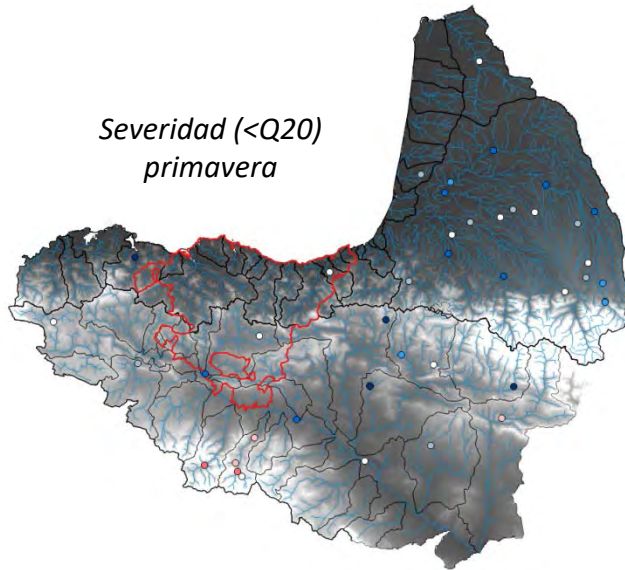
Severidad (<Q20)
otoño



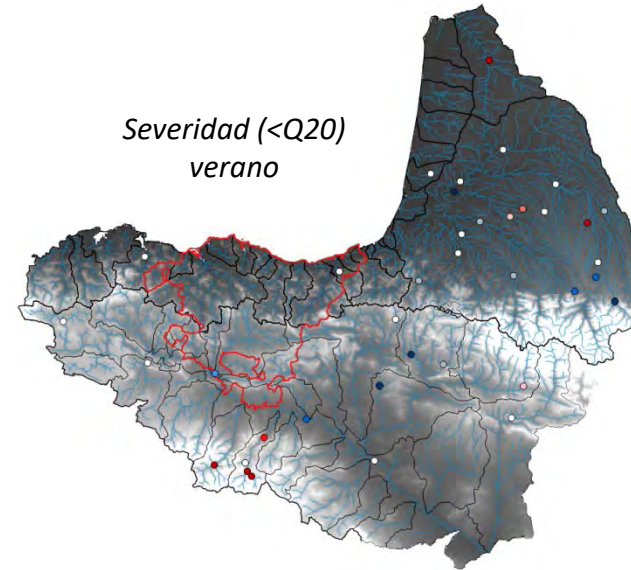
Severidad (<Q20)
invierno



Severidad (<Q20)
primavera



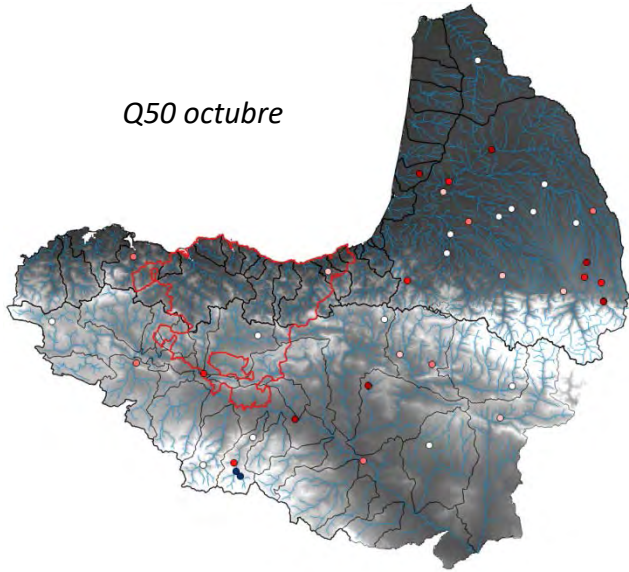
Severidad (<Q20)
verano



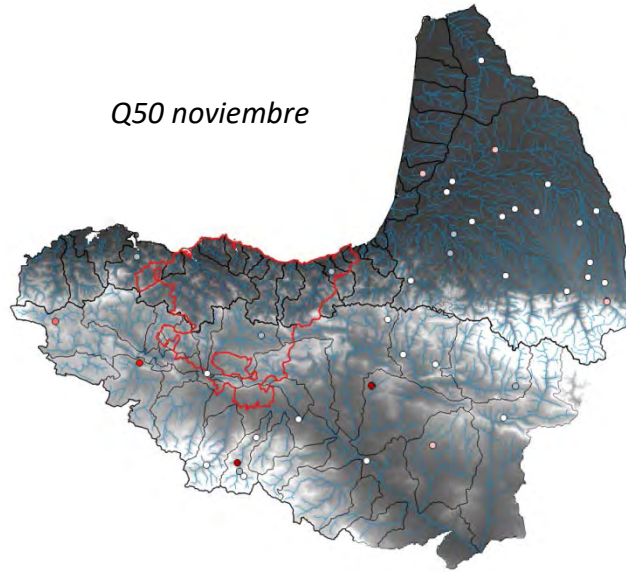
- | | | | | |
|------------------------------------|-------------------------|--------------|-------------------------|------------------------------------|
| ● negativo virtualmente cierto | ● negativo muy probable | ○ improbable | ● positivo probable | ● positivo extremadamente probable |
| ● negativo extremadamente probable | ● negativo probable | | ● positivo muy probable | ● positivo virtualmente cierto |

Series de 40 años (1975/1976-2014-2015)

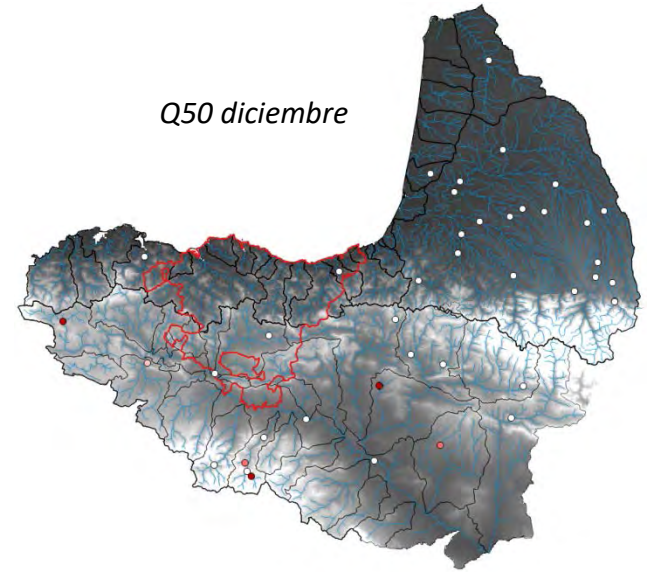
Q50 octubre



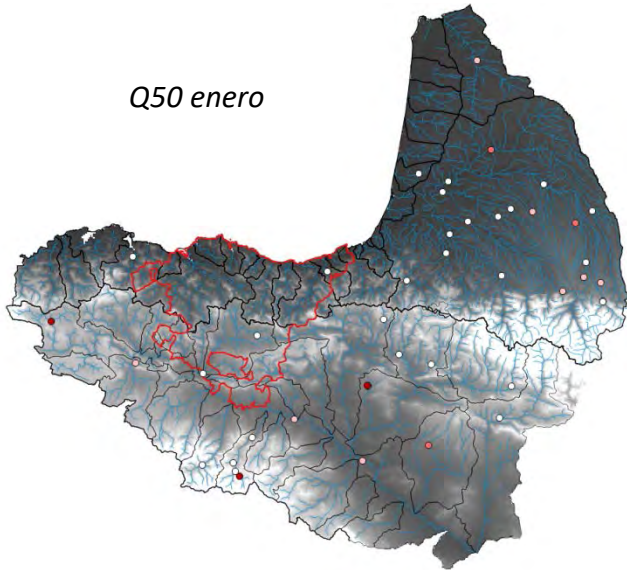
Q50 noviembre



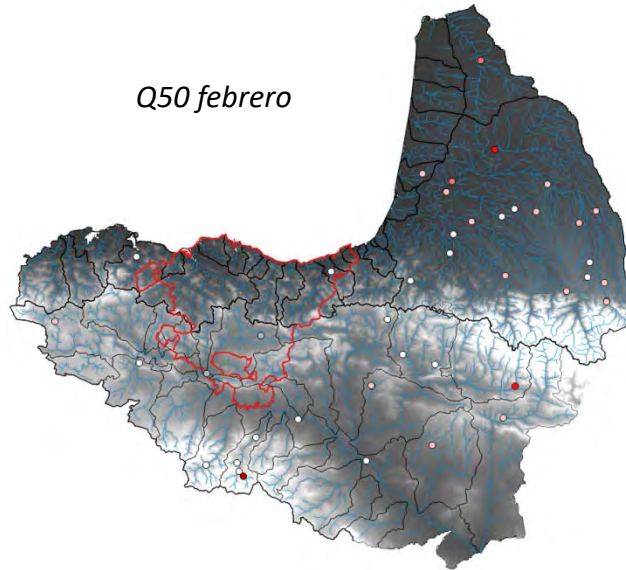
Q50 diciembre



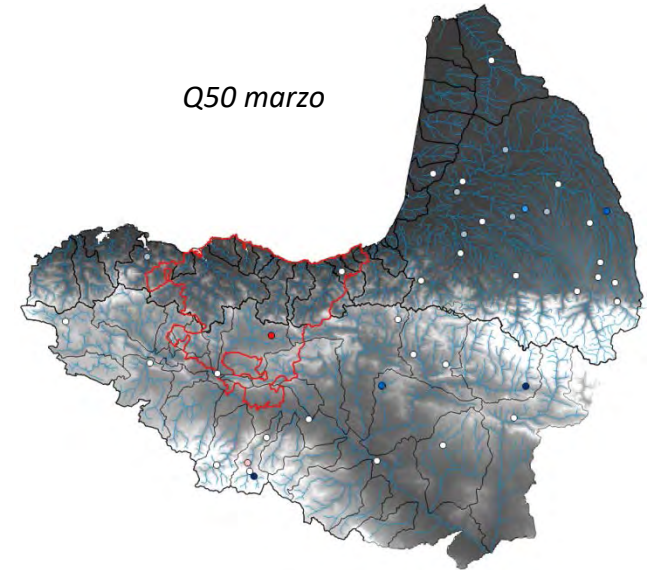
Q50 enero



Q50 febrero



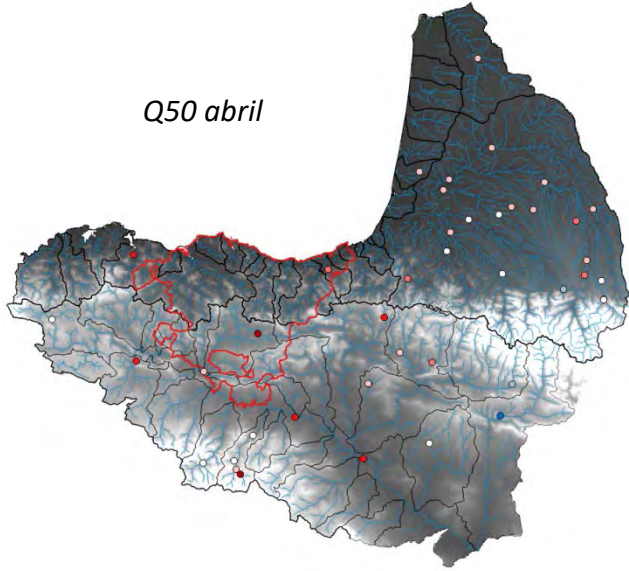
Q50 marzo



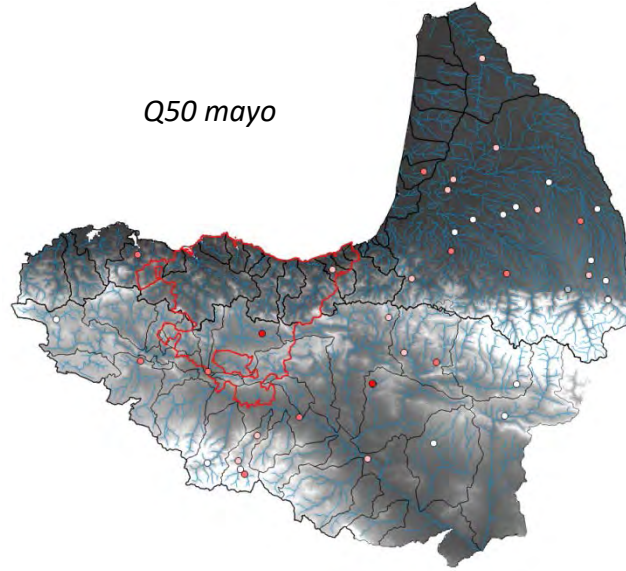
- | | | | | |
|------------------------------------|-------------------------|--------------|-------------------------|------------------------------------|
| ● negativo virtualmente cierto | ● negativo muy probable | ○ improbable | ● positivo probable | ● positivo extremadamente probable |
| ● negativo extremadamente probable | ● negativo probable | | ● positivo muy probable | ● positivo virtualmente cierto |

Series de 40 años (1975/1976-2014-2015)

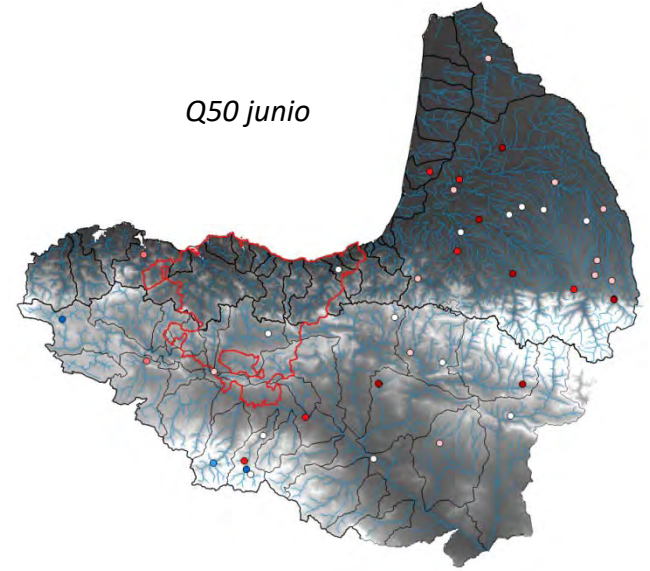
Q50 abril



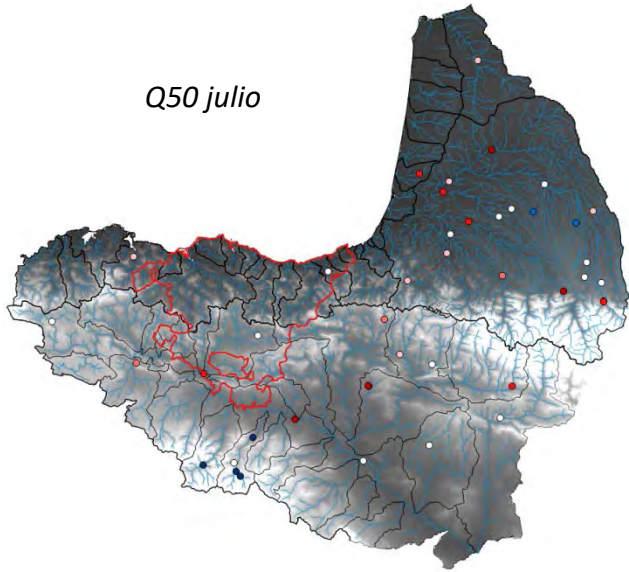
Q50 mayo



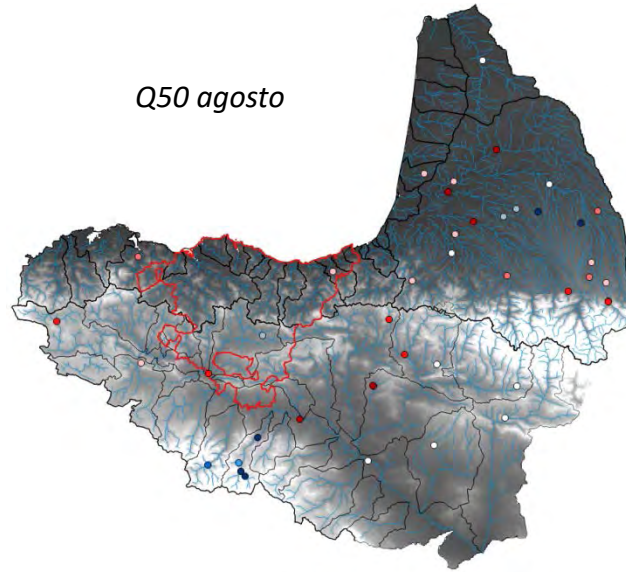
Q50 junio



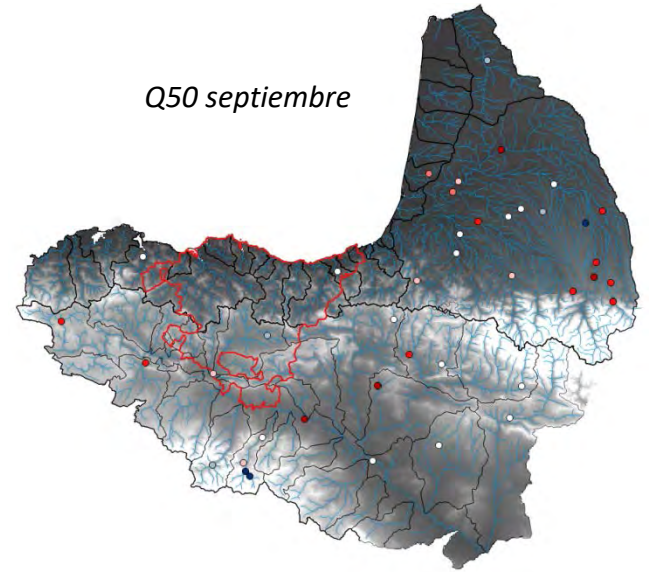
Q50 julio



Q50 agosto



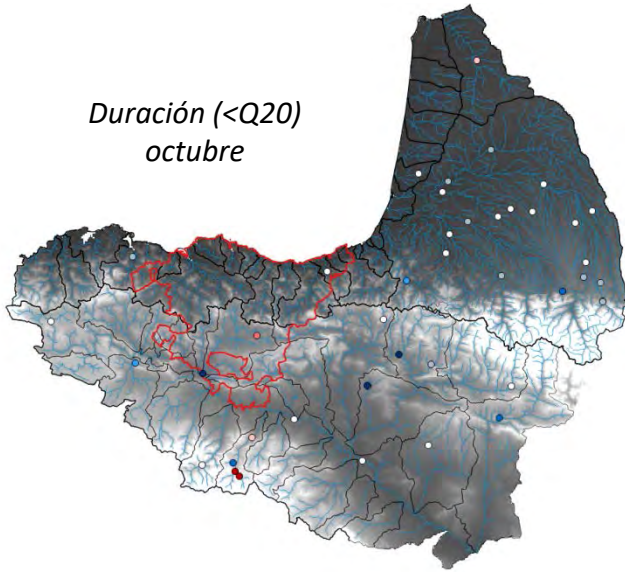
Q50 septiembre



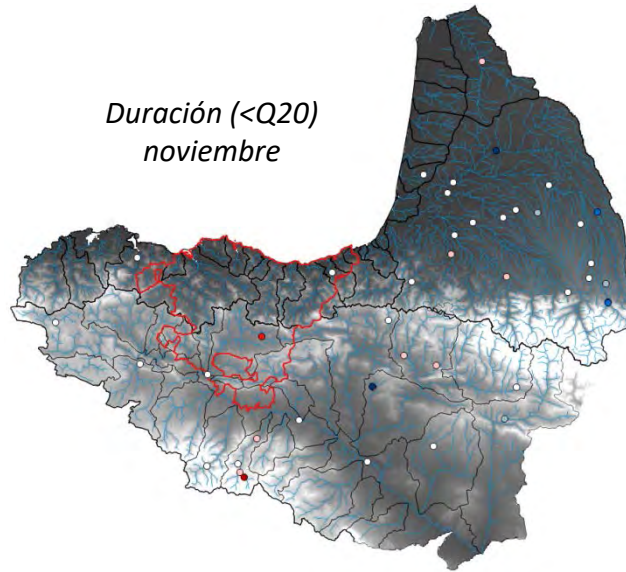
- | | | | | |
|------------------------------------|-------------------------|--------------|-------------------------|------------------------------------|
| ● negativo virtualmente cierto | ● negativo muy probable | ○ improbable | ● positivo probable | ● positivo extremadamente probable |
| ● negativo extremadamente probable | ● negativo probable | | ● positivo muy probable | ● positivo virtualmente cierto |

Series de 40 años (1975/1976-2014-2015)

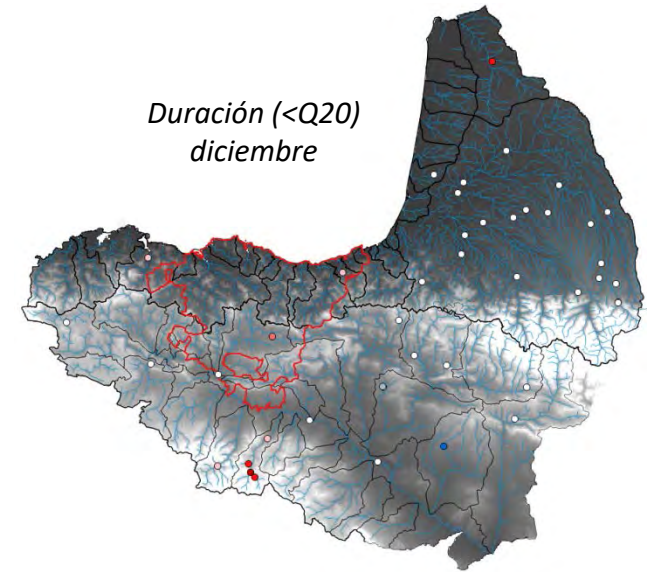
*Duración (<Q20)
octubre*



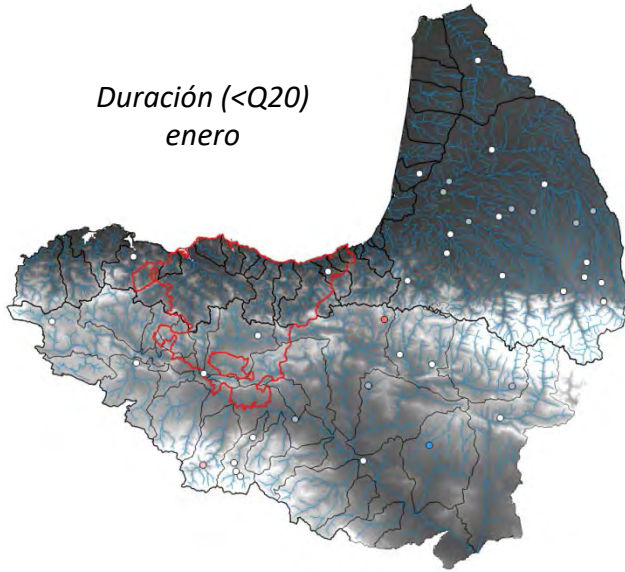
*Duración (<Q20)
noviembre*



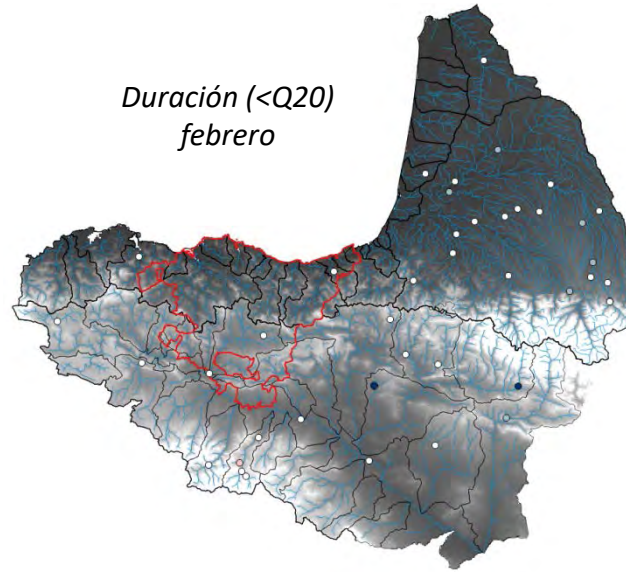
*Duración (<Q20)
diciembre*



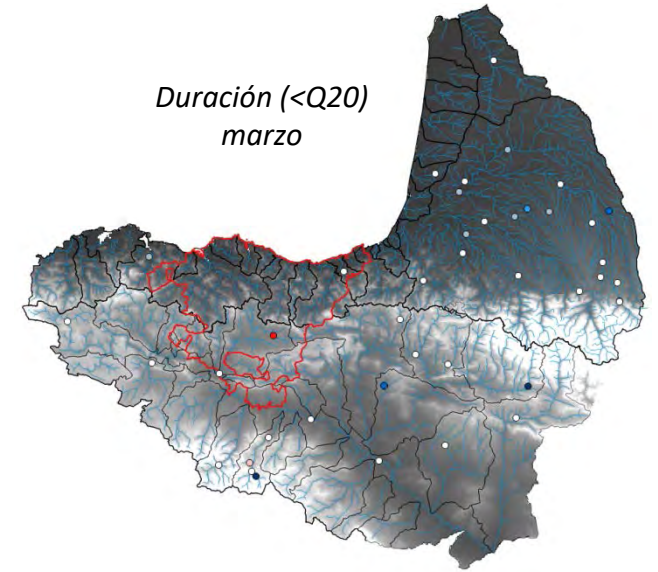
*Duración (<Q20)
enero*



*Duración (<Q20)
febrero*



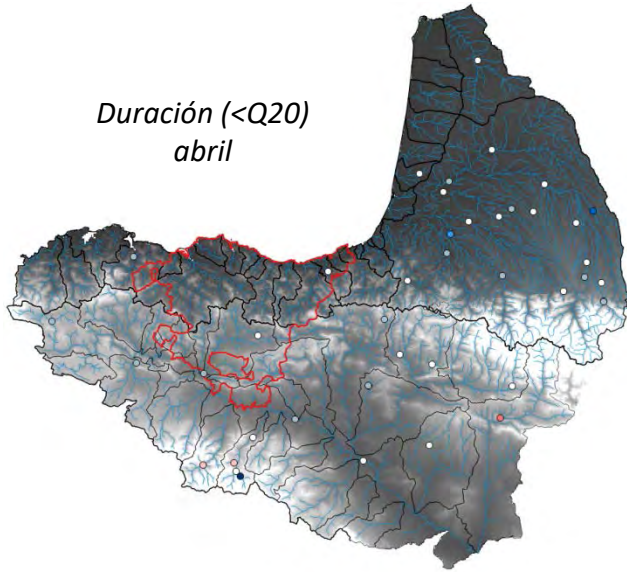
*Duración (<Q20)
marzo*



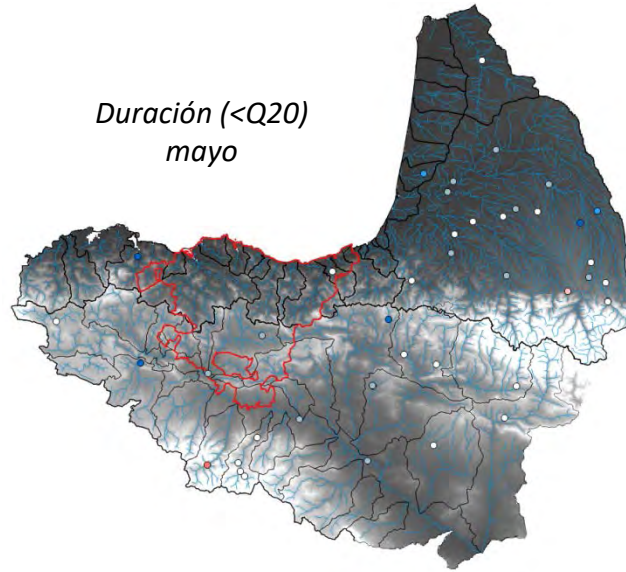
- | | | | | |
|------------------------------------|-------------------------|--------------|-------------------------|------------------------------------|
| ● negativo virtualmente cierto | ● negativo muy probable | ○ improbable | ● positivo probable | ● positivo extremadamente probable |
| ● negativo extremadamente probable | ● negativo probable | | ● positivo muy probable | ● positivo virtualmente cierto |

Series de 40 años (1975/1976-2014-2015)

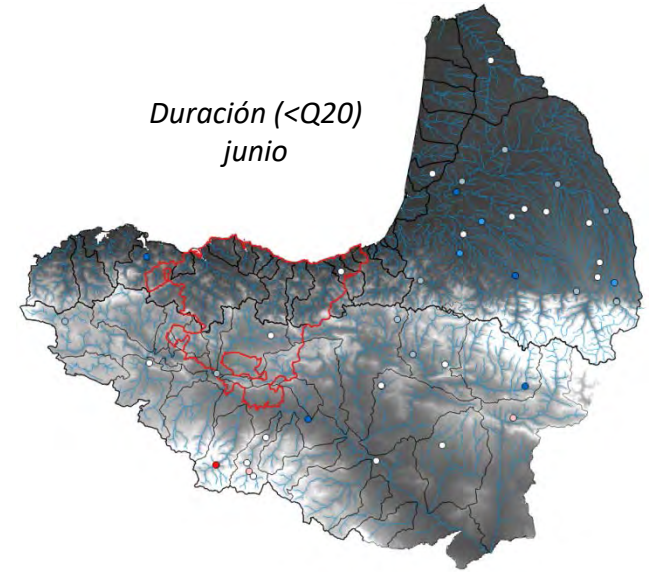
*Duración (<Q20)
abril*



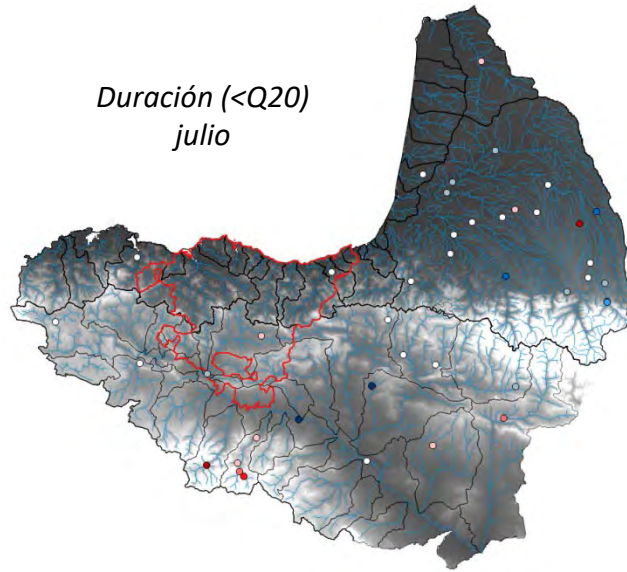
*Duración (<Q20)
mayo*



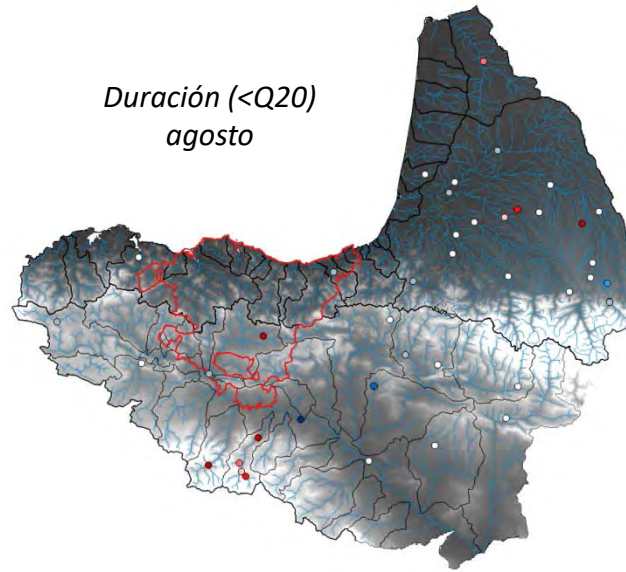
*Duración (<Q20)
junio*



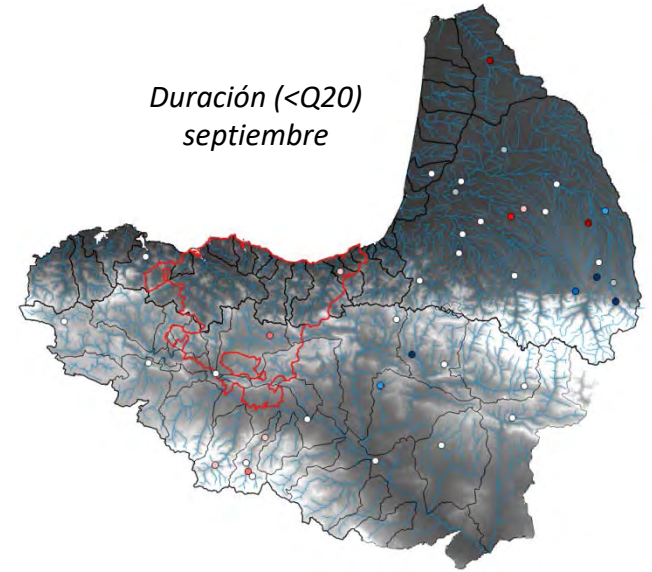
*Duración (<Q20)
julio*



*Duración (<Q20)
agosto*



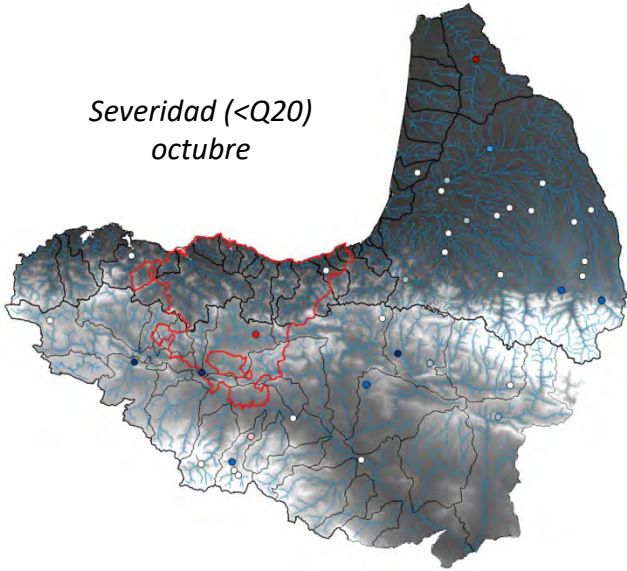
*Duración (<Q20)
septiembre*



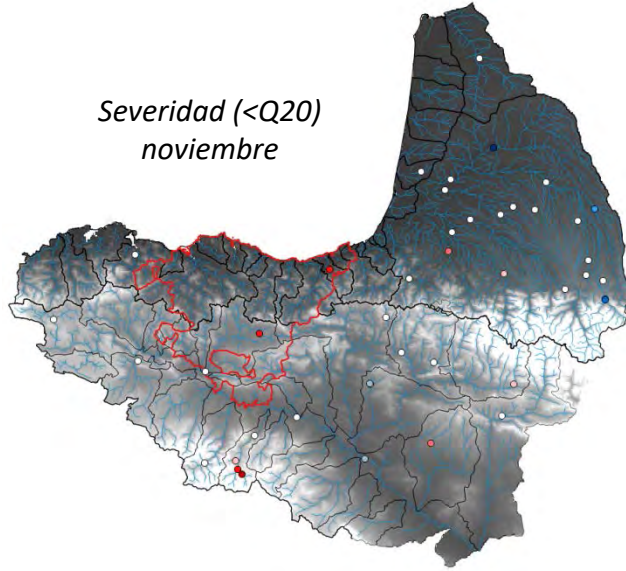
- | | | | | |
|------------------------------------|-------------------------|--------------|-------------------------|------------------------------------|
| ● negativo virtualmente cierto | ● negativo muy probable | ○ improbable | ● positivo probable | ● positivo extremadamente probable |
| ● negativo extremadamente probable | ● negativo probable | | ● positivo muy probable | ● positivo virtualmente cierto |

Series de 40 años (1975/1976-2014-2015)

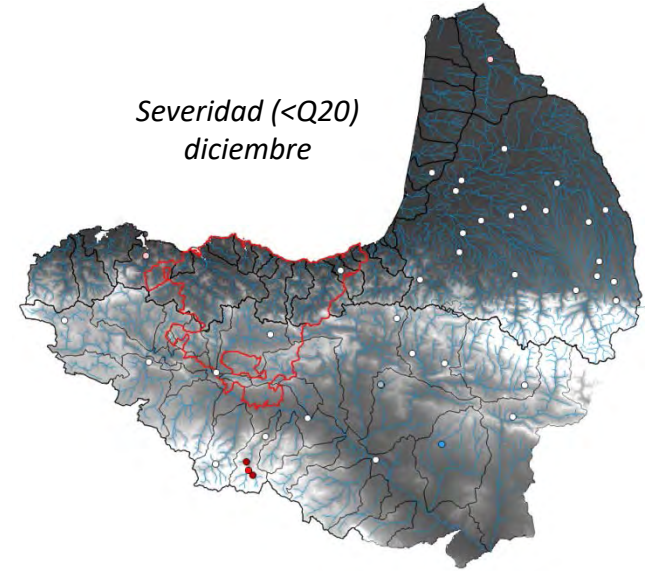
Severidad (<Q20)
octubre



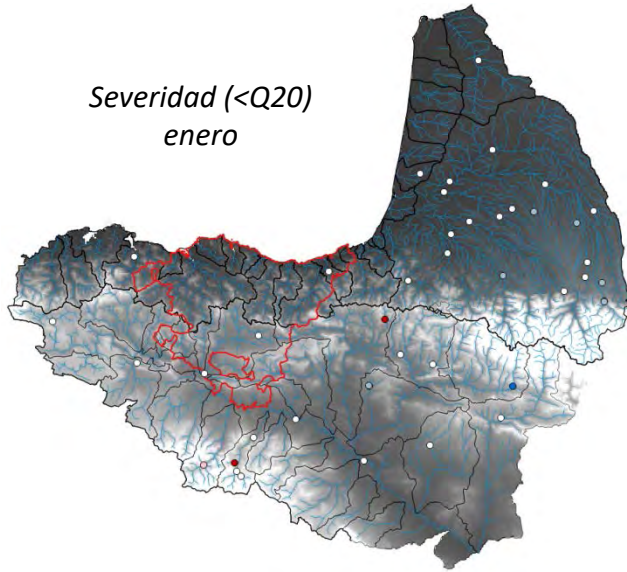
Severidad (<Q20)
noviembre



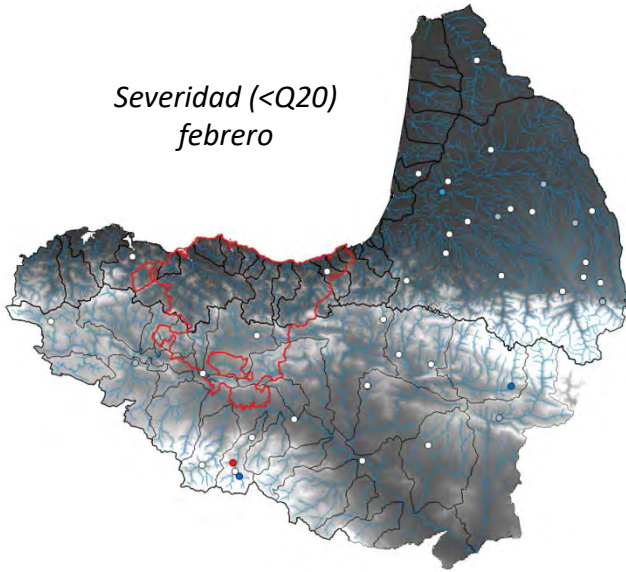
Severidad (<Q20)
diciembre



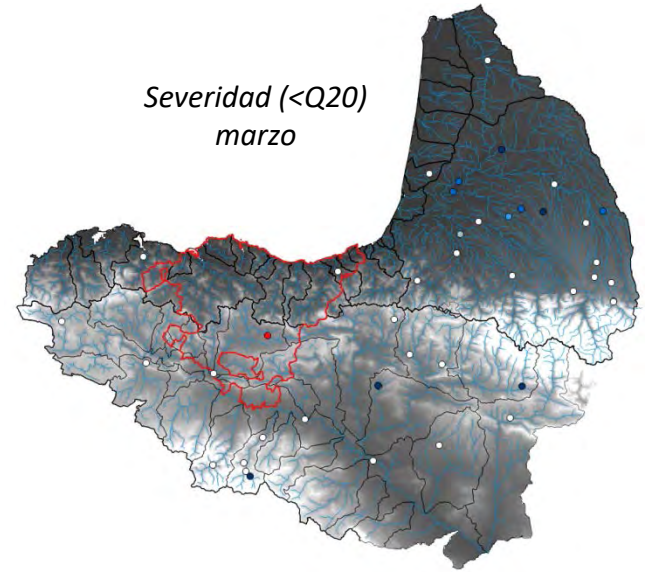
Severidad (<Q20)
enero



Severidad (<Q20)
febrero



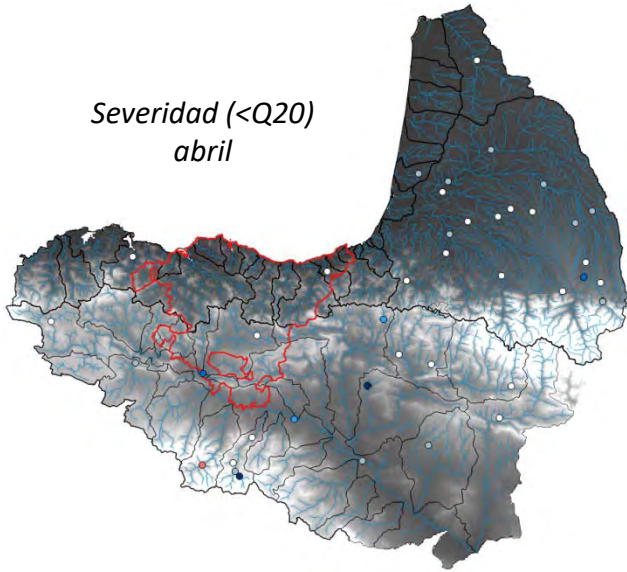
Severidad (<Q20)
marzo



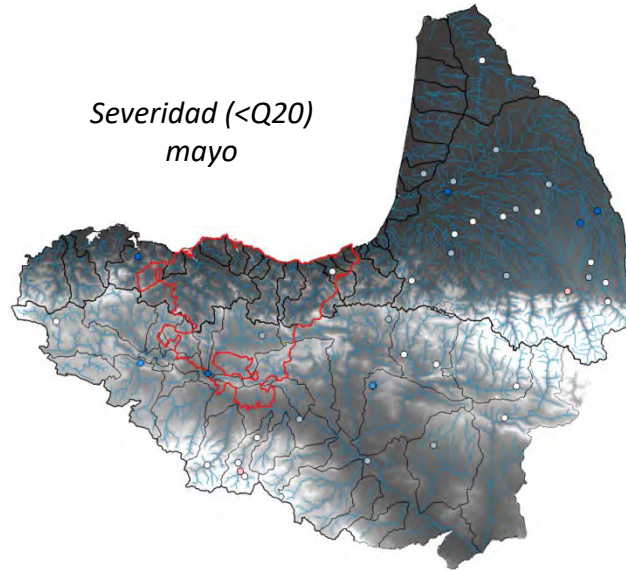
- | | | | | |
|------------------------------------|-------------------------|--------------|-------------------------|------------------------------------|
| ● negativo virtualmente cierto | ● negativo muy probable | ○ improbable | ● positivo probable | ● positivo extremadamente probable |
| ● negativo extremadamente probable | ● negativo probable | | ● positivo muy probable | ● positivo virtualmente cierto |

Series de 40 años (1975/1976-2014-2015)

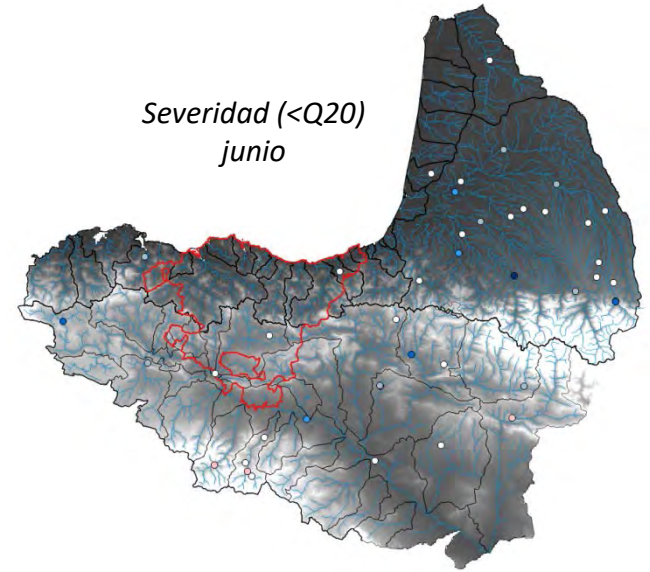
Severidad (<Q20)
abril



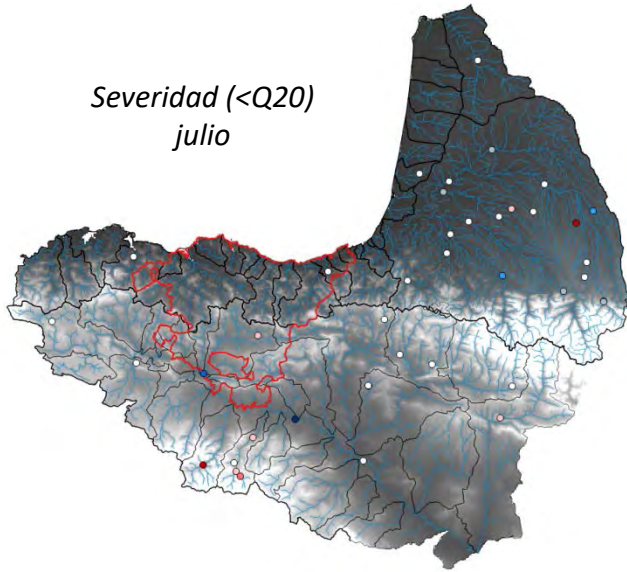
Severidad (<Q20)
mayo



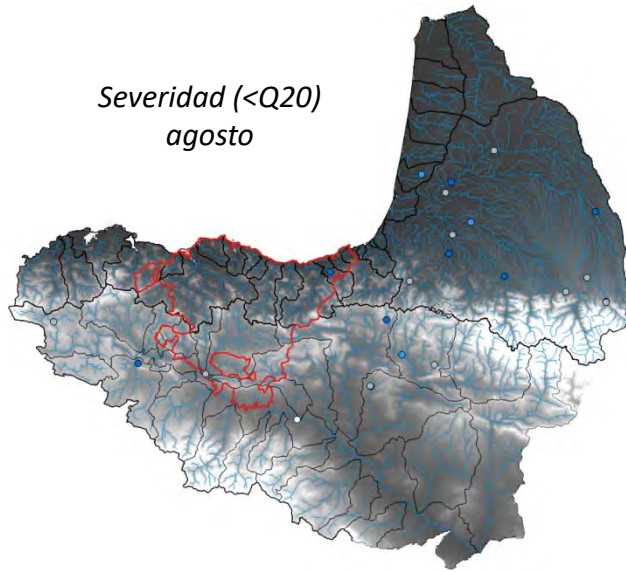
Severidad (<Q20)
junio



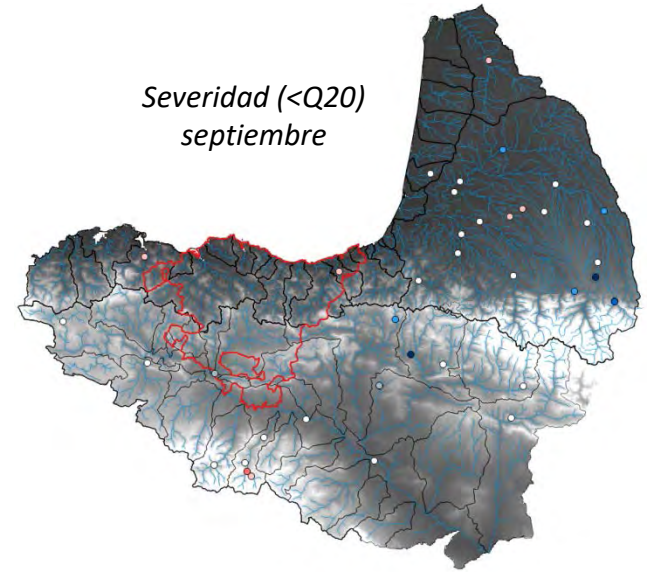
Severidad (<Q20)
julio



Severidad (<Q20)
agosto



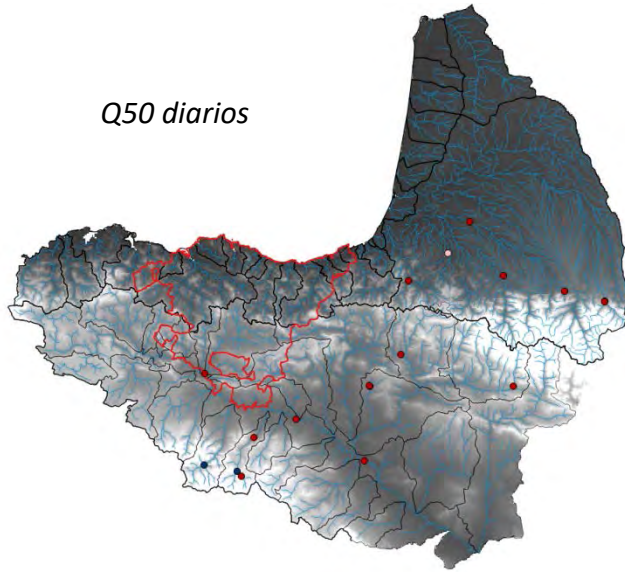
Severidad (<Q20)
septiembre



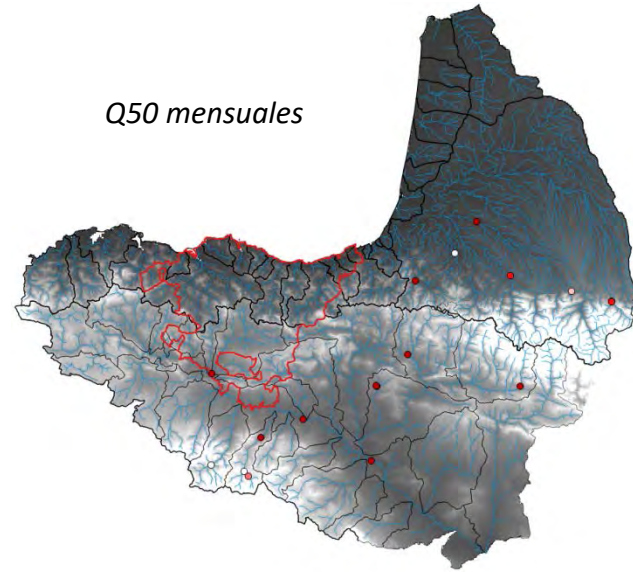
- | | | | | |
|------------------------------------|-------------------------|--------------|-------------------------|------------------------------------|
| ● negativo virtualmente cierto | ● negativo muy probable | ○ improbable | ● positivo probable | ● positivo extremadamente probable |
| ● negativo extremadamente probable | ● negativo probable | | ● positivo muy probable | ● positivo virtualmente cierto |

Series de 60 años (1995/1996-2014-2015)

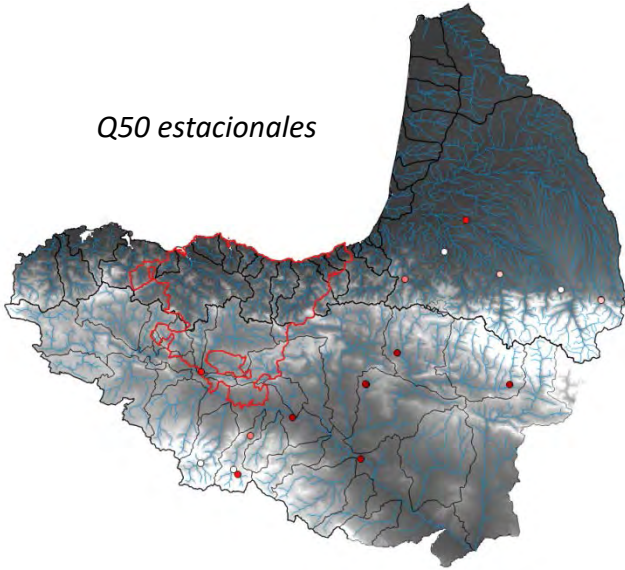
Q50 diarios



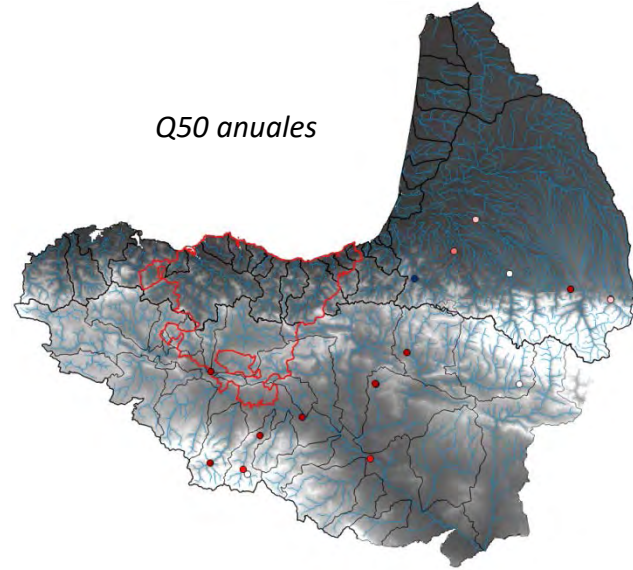
Q50 mensuales



Q50 estacionales



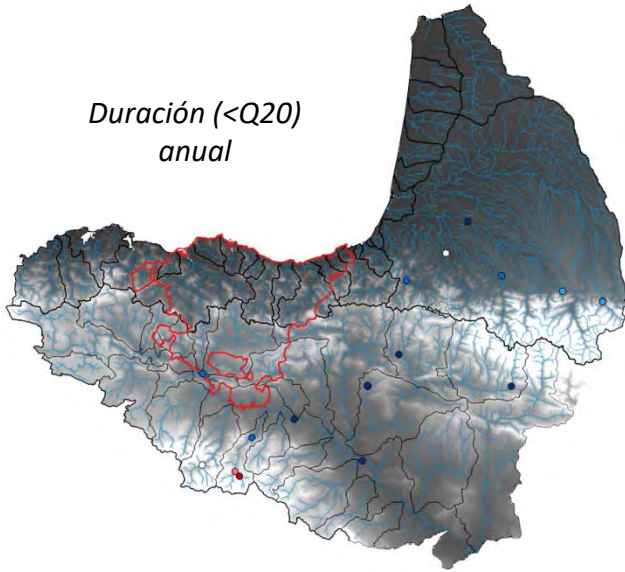
Q50 anuales



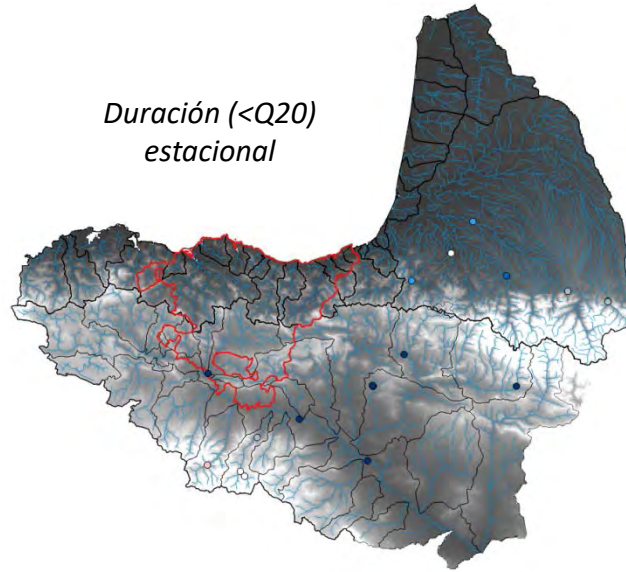
- | | | | | |
|------------------------------------|-------------------------|--------------|-------------------------|------------------------------------|
| ● negativo virtualmente cierto | ● negativo muy probable | ○ improbable | ● positivo probable | ● positivo extremadamente probable |
| ● negativo extremadamente probable | ● negativo probable | | ● positivo muy probable | ● positivo virtualmente cierto |

Series de 60 años (1995/1996-2014-2015)

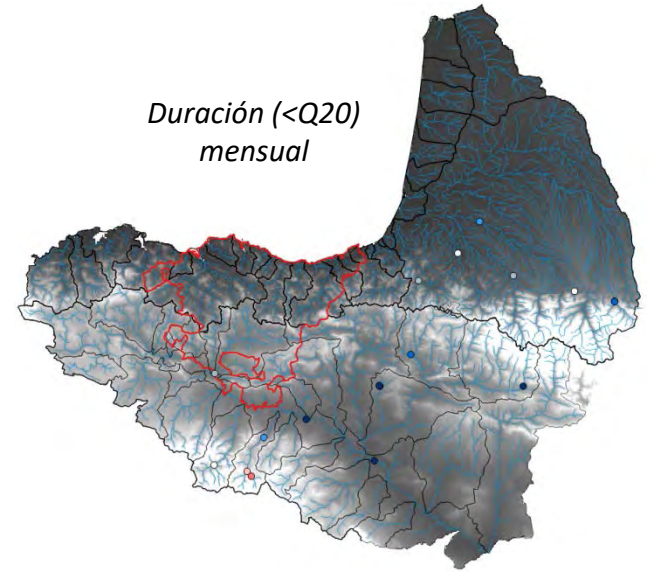
*Duración (<Q20)
anual*



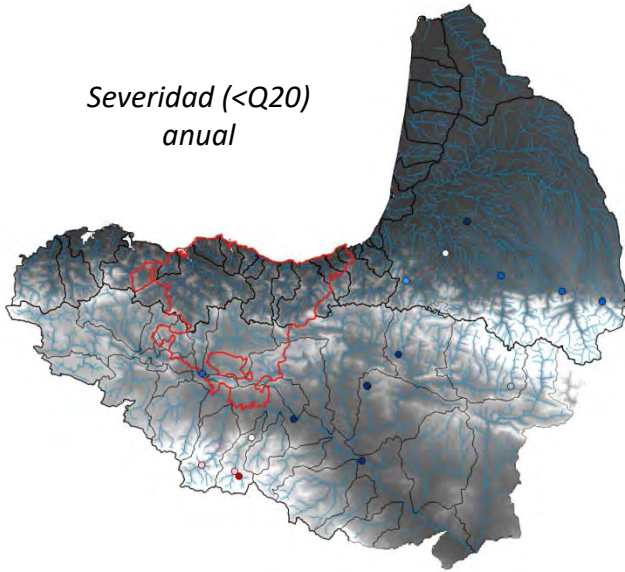
*Duración (<Q20)
estacional*



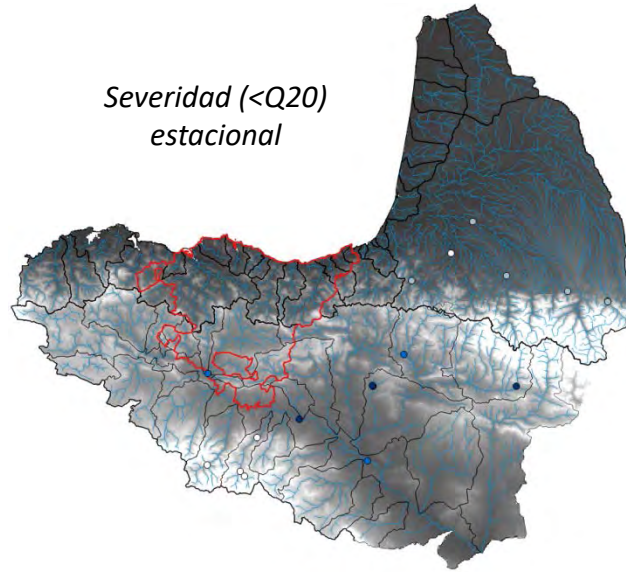
*Duración (<Q20)
mensual*



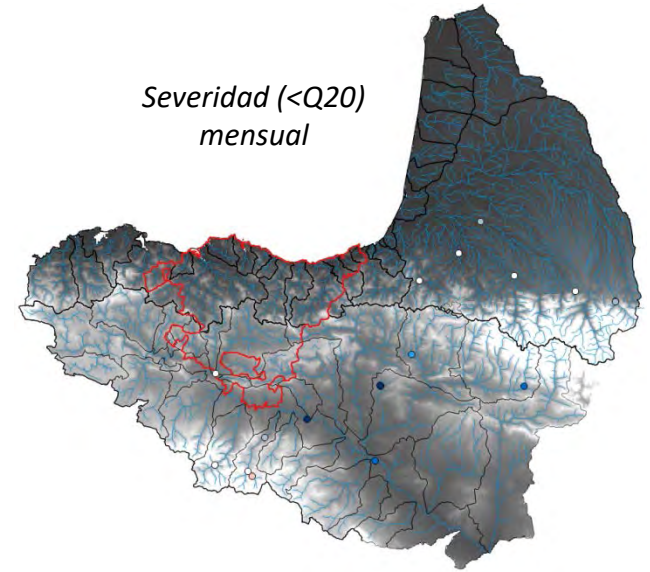
*Severidad (<Q20)
anual*



*Severidad (<Q20)
estacional*

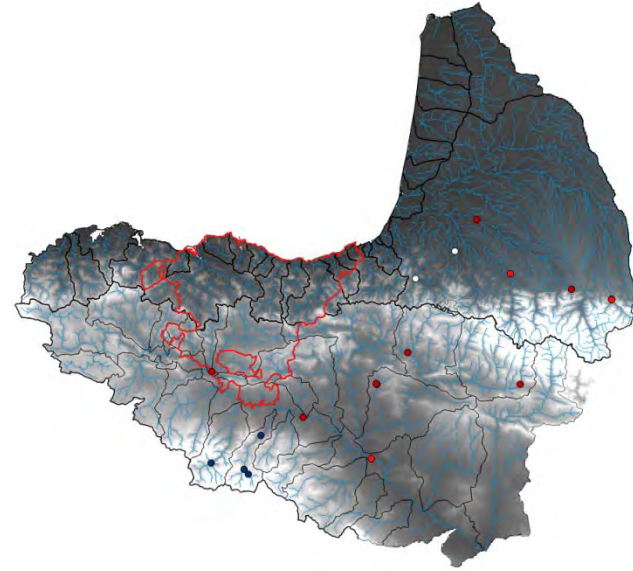
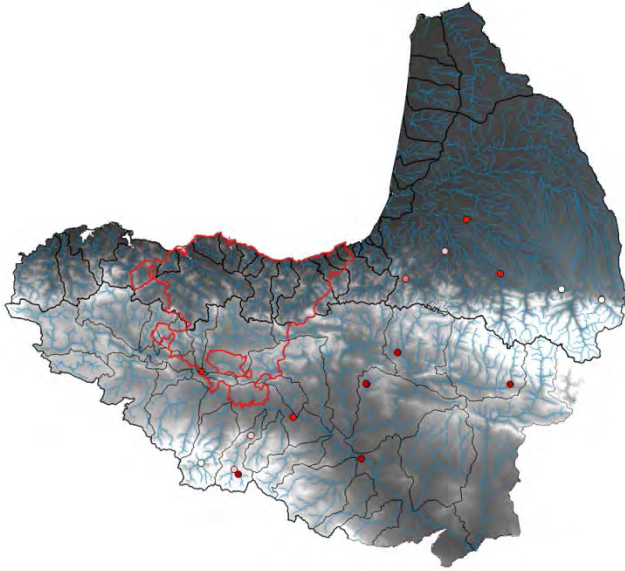
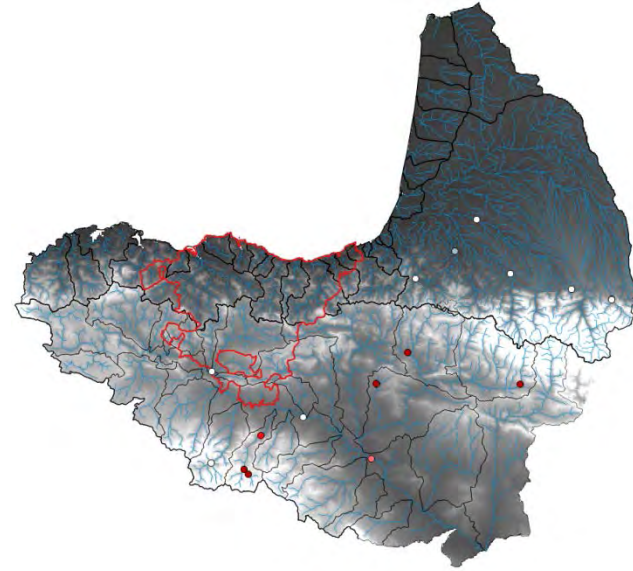
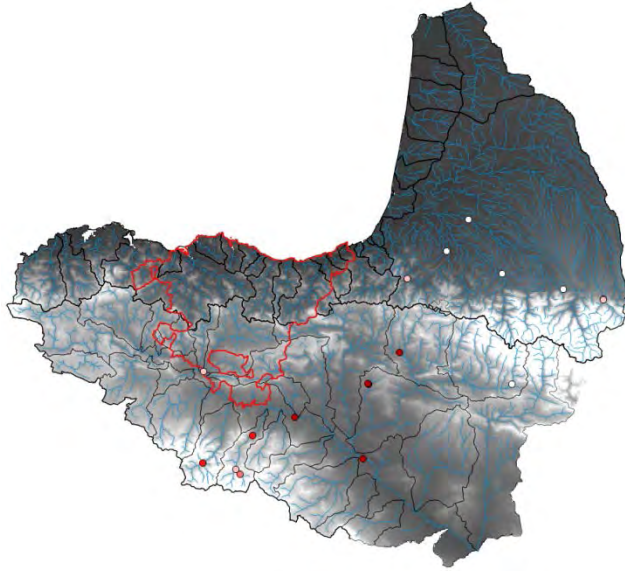


*Severidad (<Q20)
mensual*



- | | | | | |
|------------------------------------|-------------------------|--------------|-------------------------|------------------------------------|
| ● negativo virtualmente cierto | ● negativo muy probable | ○ improbable | ● positivo probable | ● positivo extremadamente probable |
| ● negativo extremadamente probable | ● negativo probable | | ● positivo muy probable | ● positivo virtualmente cierto |

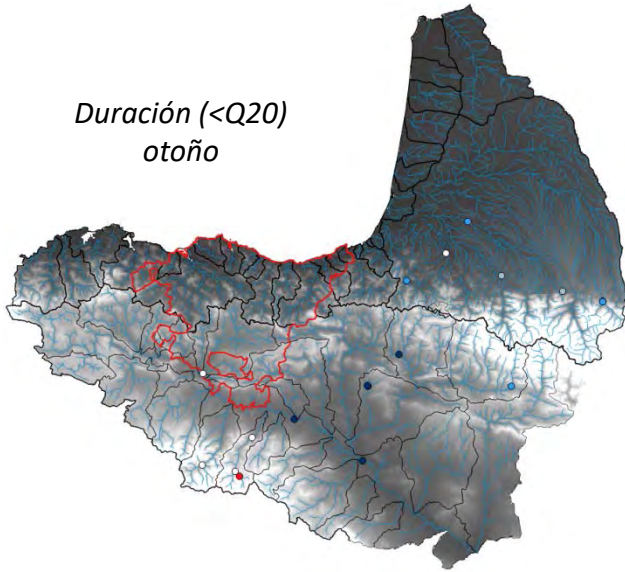
Series de 60 años (1995/1996-2014-2015)



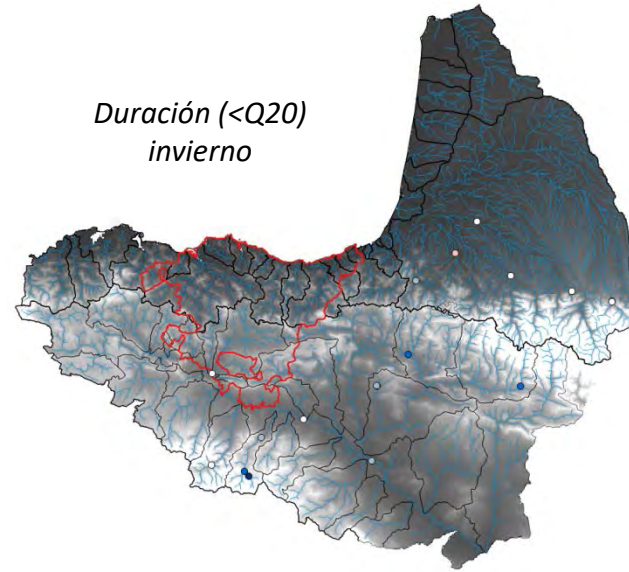
- | | | | | |
|------------------------------------|-------------------------|--------------|-------------------------|------------------------------------|
| ● negativo virtualmente cierto | ● negativo muy probable | ○ improbable | ● positivo probable | ● positivo extremadamente probable |
| ● negativo extremadamente probable | ● negativo probable | | ● positivo muy probable | ● positivo virtualmente cierto |

Series de 60 años (1995/1996-2014-2015)

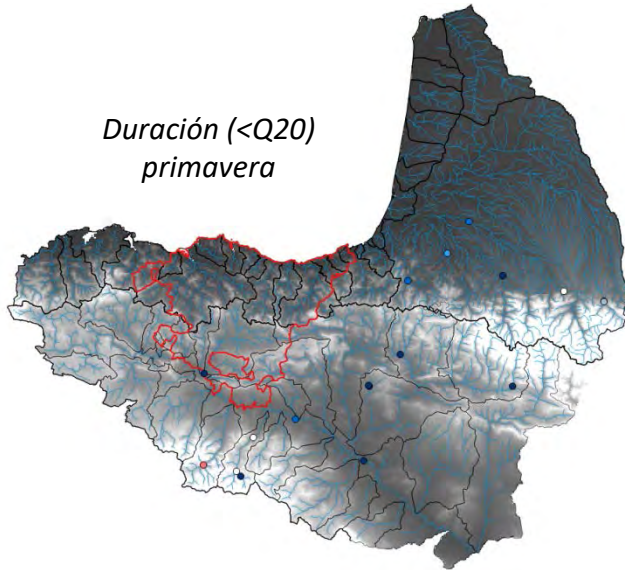
*Duración (<Q20)
otoño*



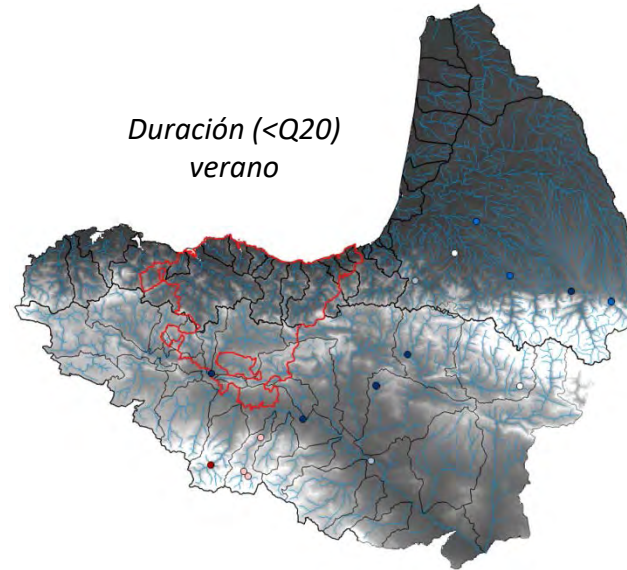
*Duración (<Q20)
invierno*



*Duración (<Q20)
primavera*

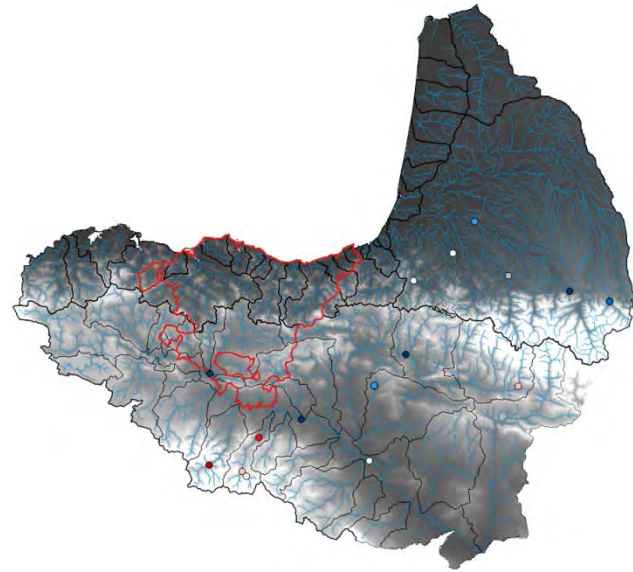
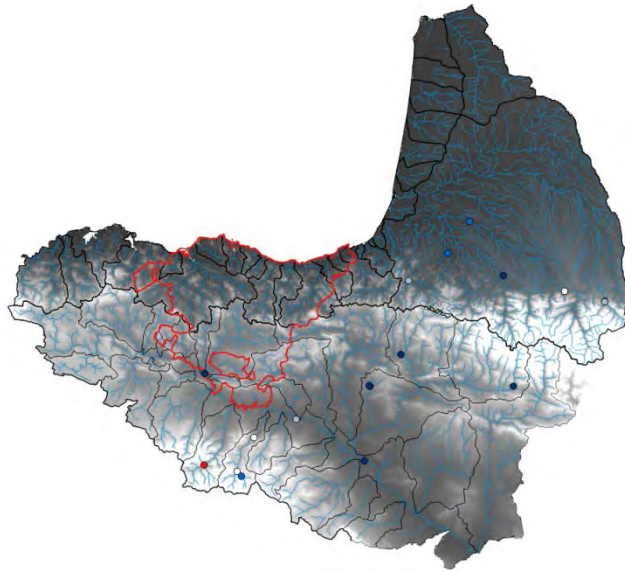
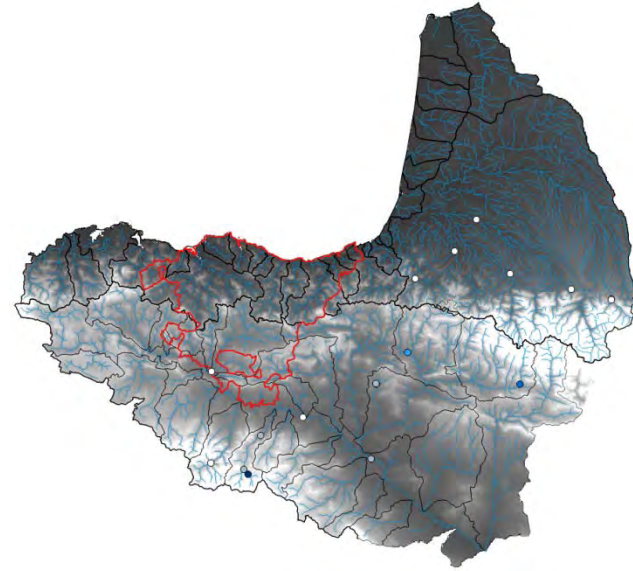
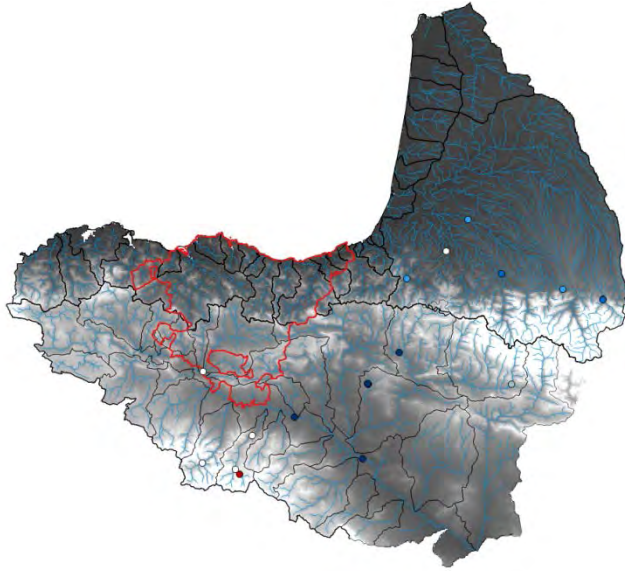


*Duración (<Q20)
verano*



- | | | | | |
|------------------------------------|-------------------------|--------------|-------------------------|------------------------------------|
| ● negativo virtualmente cierto | ● negativo muy probable | ○ improbable | ● positivo probable | ● positivo extremadamente probable |
| ● negativo extremadamente probable | ● negativo probable | | ● positivo muy probable | ● positivo virtualmente cierto |

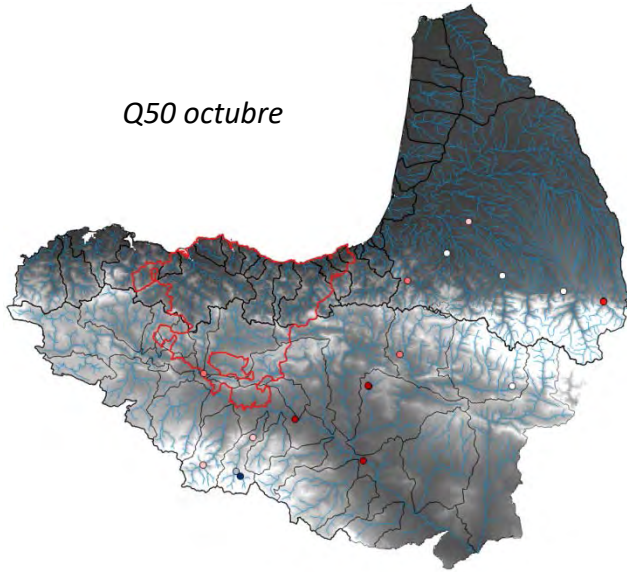
Series de 60 años (1995/1996-2014-2015)



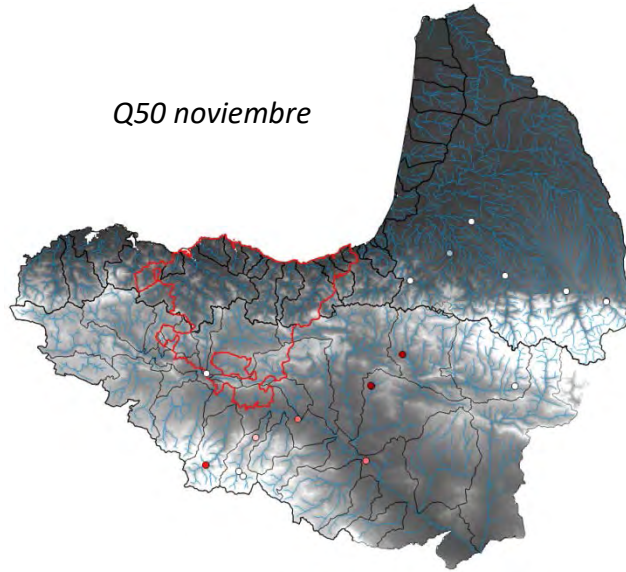
- | | | | | |
|------------------------------------|-------------------------|--------------|-------------------------|------------------------------------|
| ● negativo virtualmente cierto | ● negativo muy probable | ○ improbable | ● positivo probable | ● positivo extremadamente probable |
| ● negativo extremadamente probable | ● negativo probable | | ● positivo muy probable | ● positivo virtualmente cierto |

Series de 60 años (1995/1996-2014-2015)

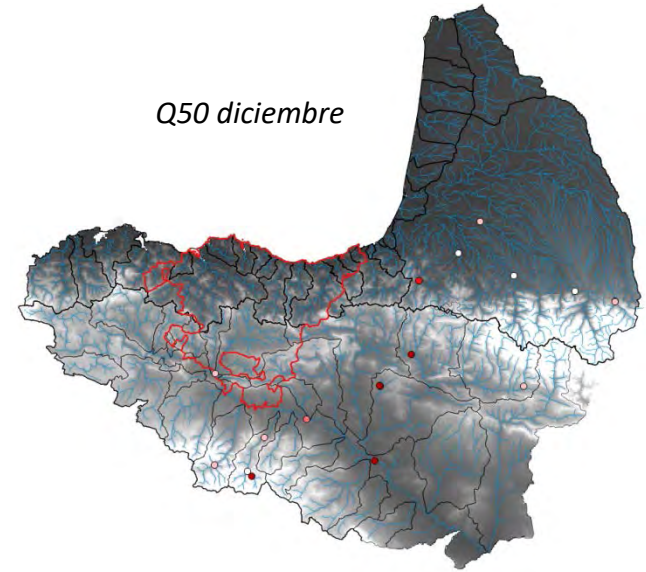
Q50 octubre



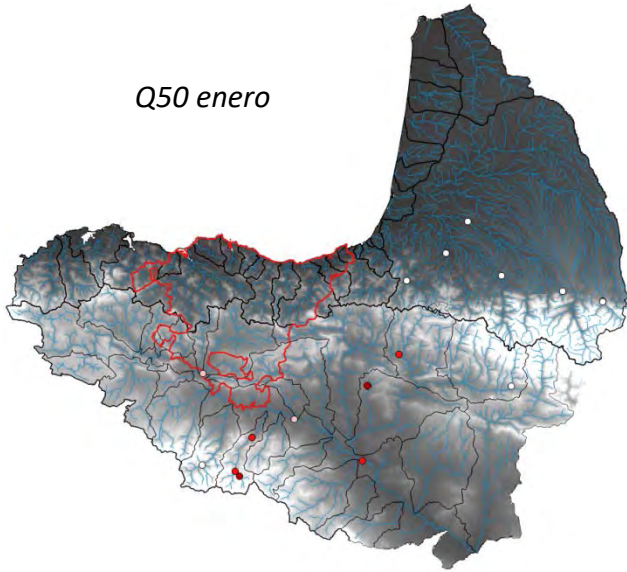
Q50 noviembre



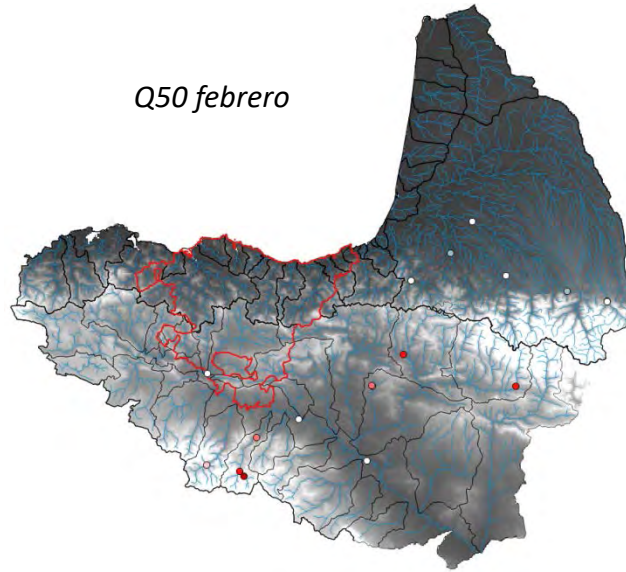
Q50 diciembre



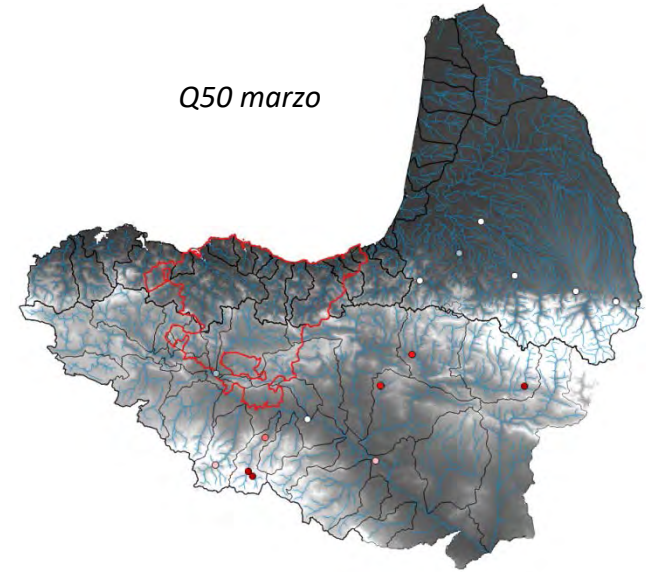
Q50 enero



Q50 febrero



Q50 marzo



● negativo virtualmente cierto
● negativo extremadamente probable

● negativo muy probable
● negativo probable

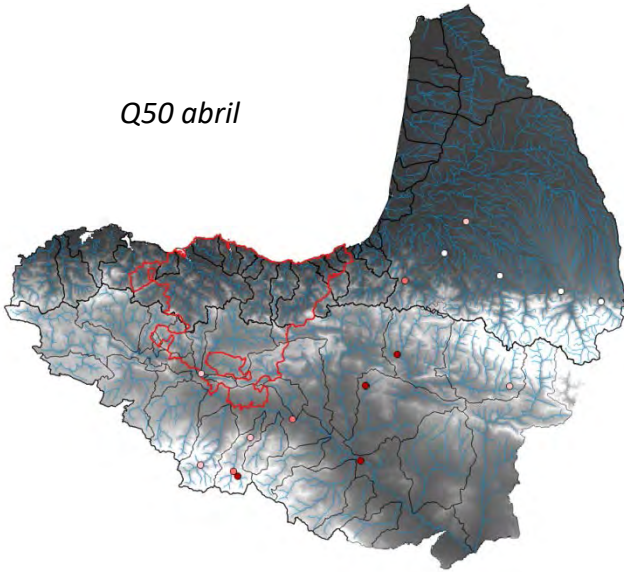
○ improbable

● positivo probable
● positivo muy probable

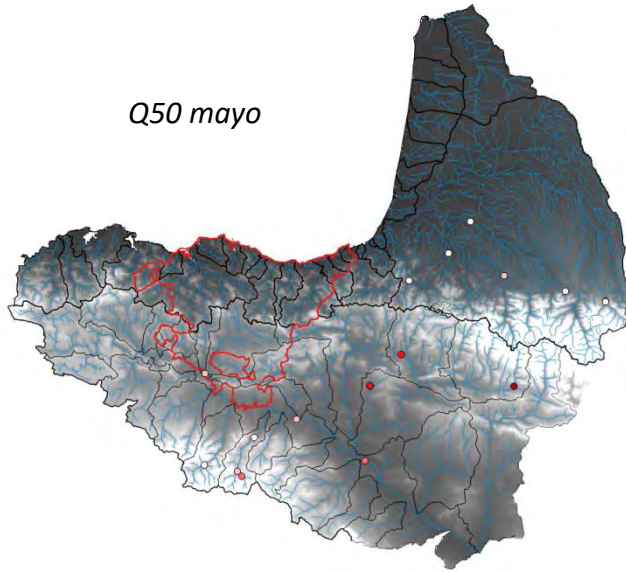
● positivo extremadamente probable
● positivo virtualmente cierto

Series de 60 años (1995/1996-2014-2015)

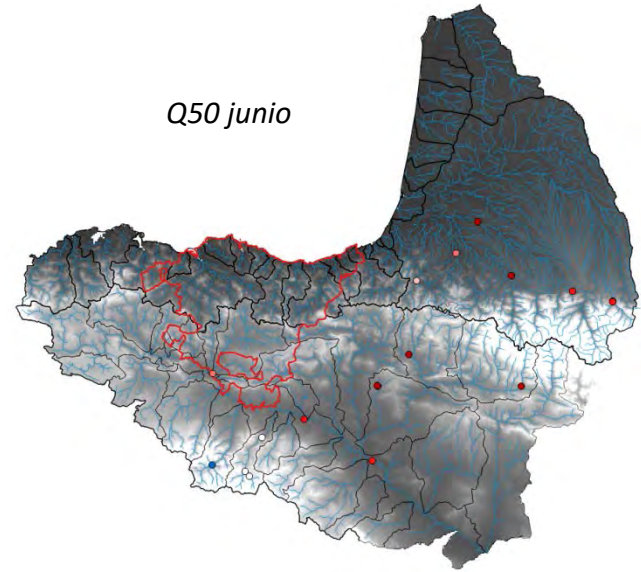
Q50 abril



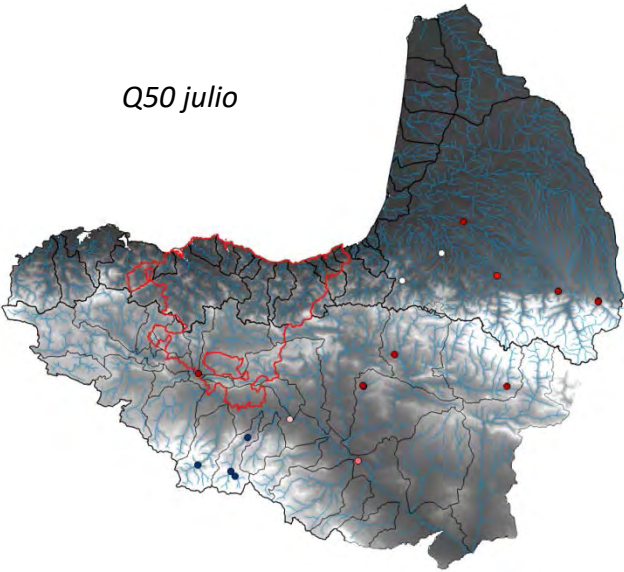
Q50 mayo



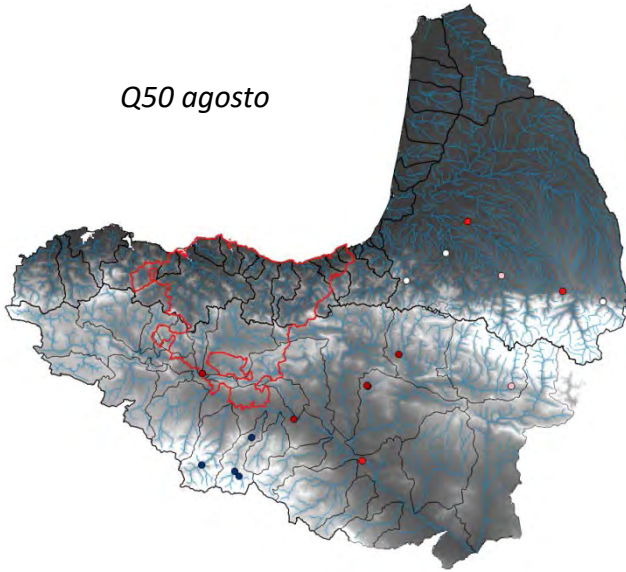
Q50 junio



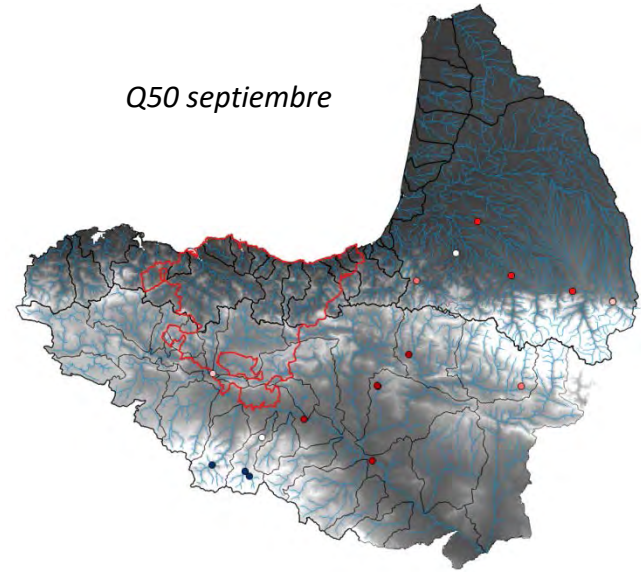
Q50 julio



Q50 agosto



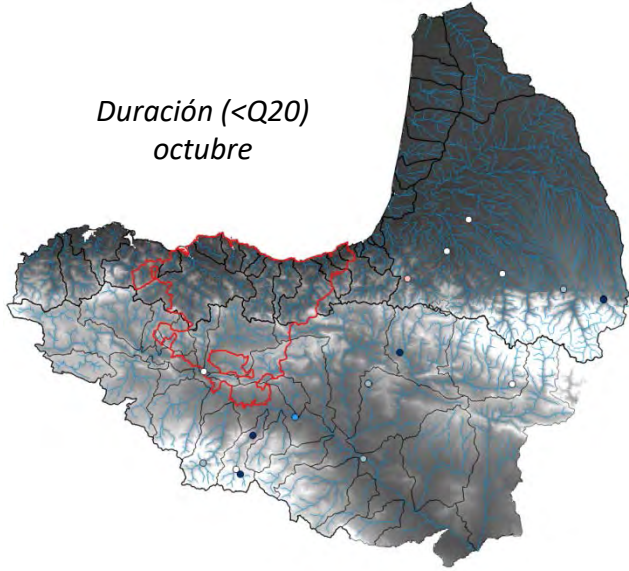
Q50 septiembre



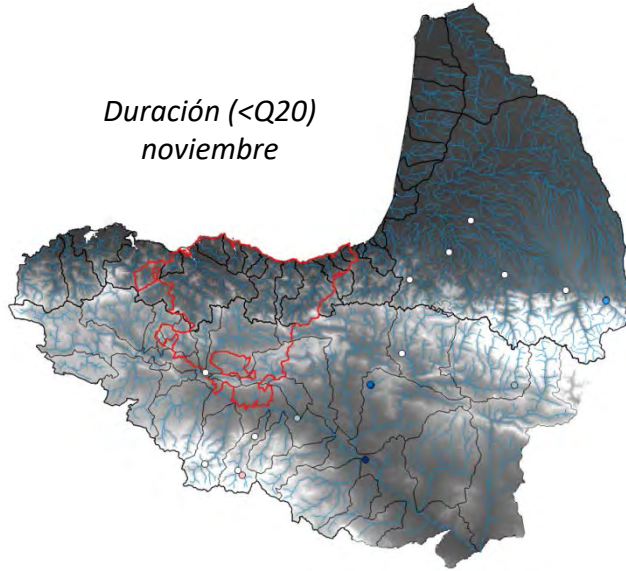
- | | | | | |
|------------------------------------|-------------------------|--------------|-------------------------|------------------------------------|
| ● negativo virtualmente cierto | ● negativo muy probable | ○ improbable | ● positivo probable | ● positivo extremadamente probable |
| ● negativo extremadamente probable | ● negativo probable | | ● positivo muy probable | ● positivo virtualmente cierto |

Series de 60 años (1995/1996-2014-2015)

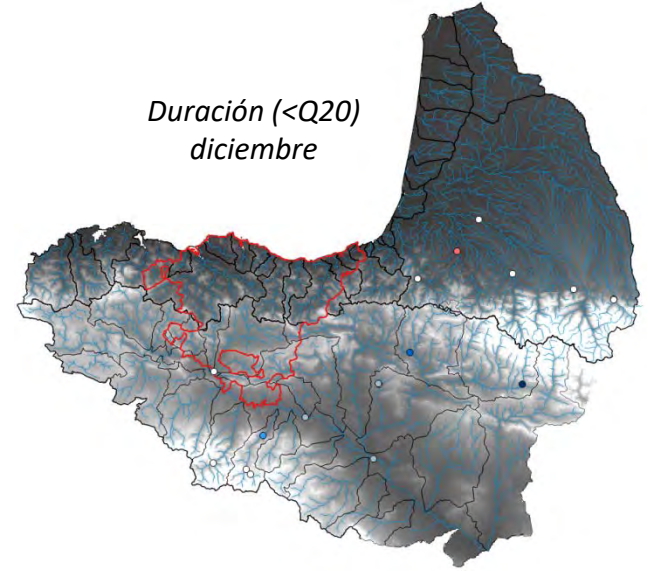
*Duración (<Q20)
octubre*



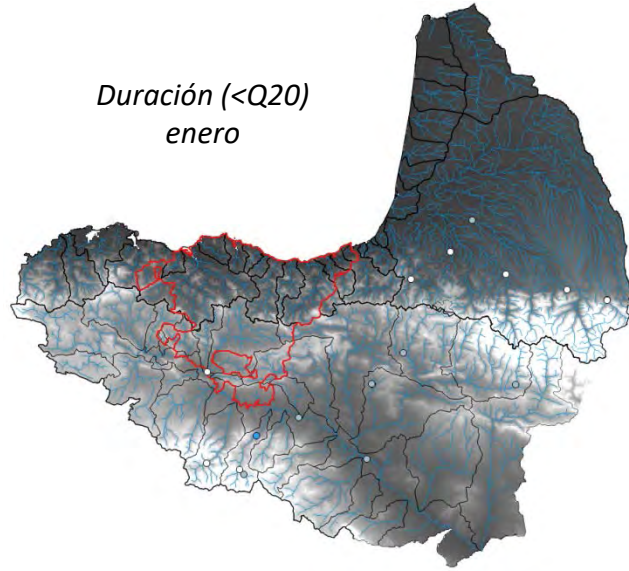
*Duración (<Q20)
noviembre*



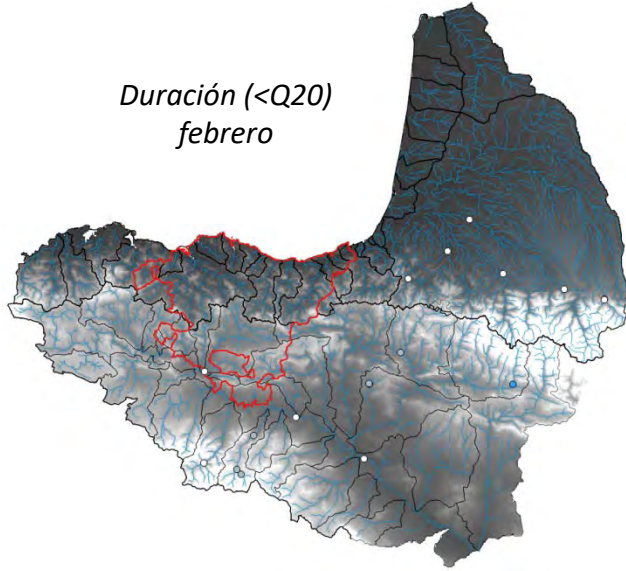
*Duración (<Q20)
diciembre*



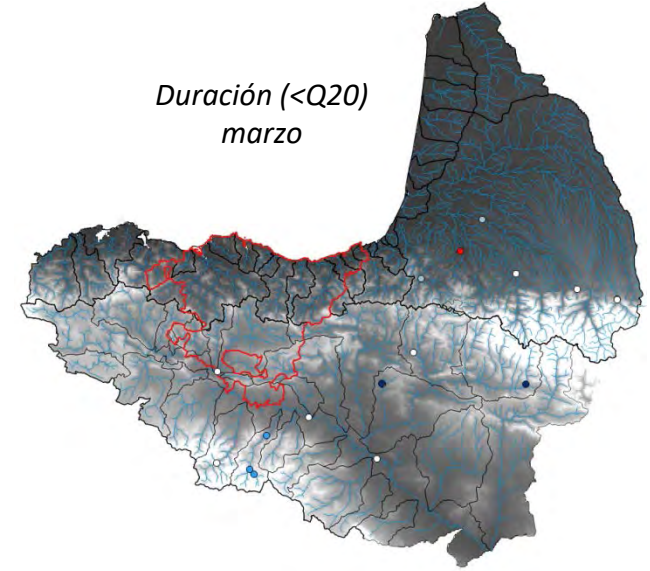
*Duración (<Q20)
enero*



*Duración (<Q20)
febrero*



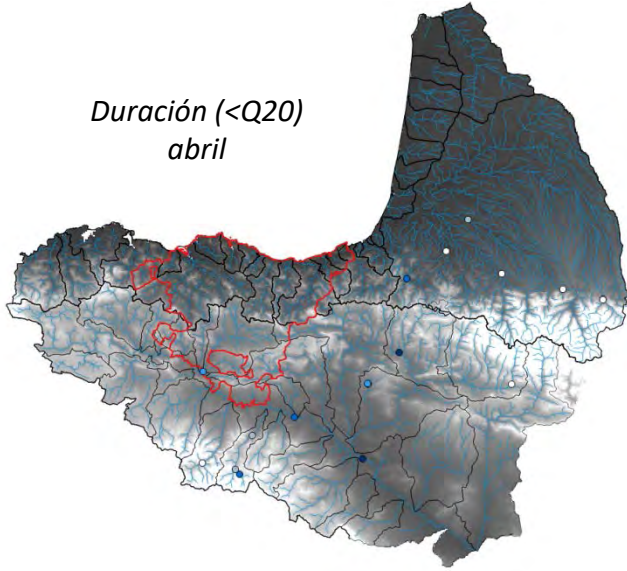
*Duración (<Q20)
marzo*



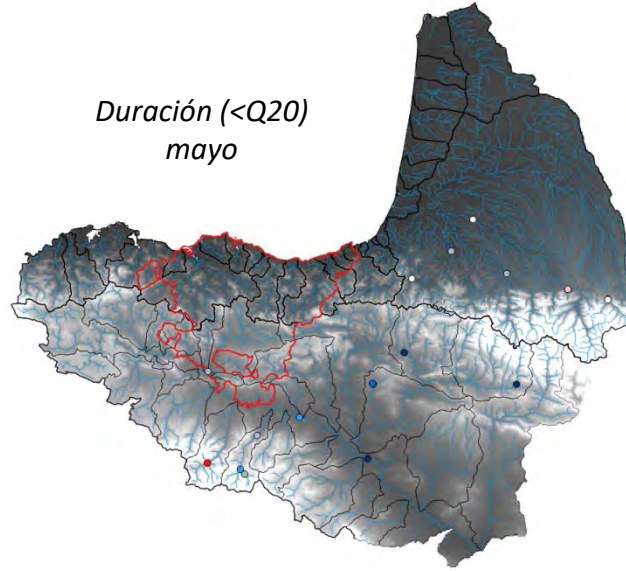
- | | | | | |
|------------------------------------|-------------------------|--------------|-------------------------|------------------------------------|
| ● negativo virtualmente cierto | ● negativo muy probable | ○ improbable | ● positivo probable | ● positivo extremadamente probable |
| ● negativo extremadamente probable | ● negativo probable | | ● positivo muy probable | ● positivo virtualmente cierto |

Series de 60 años (1995/1996-2014-2015)

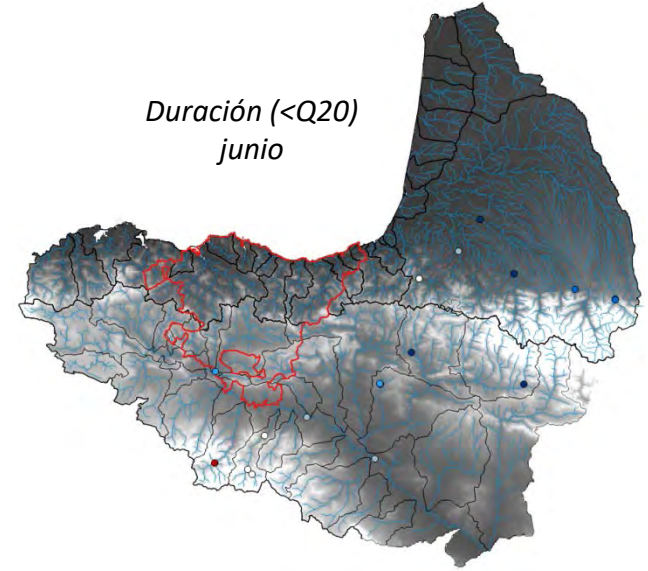
*Duración (<Q20)
abril*



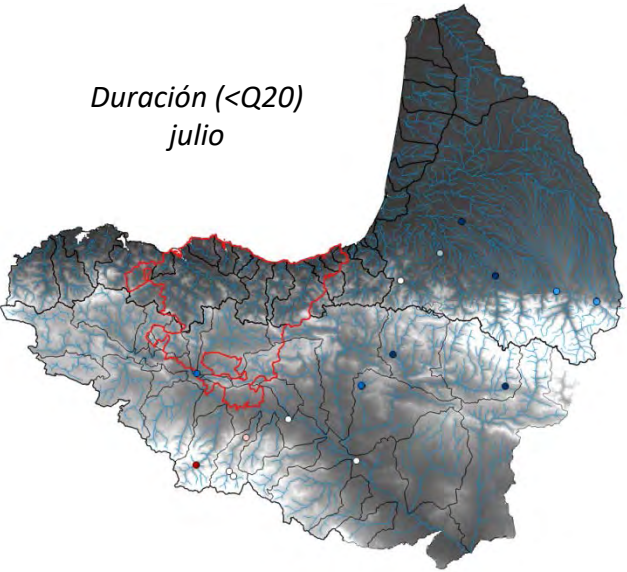
*Duración (<Q20)
mayo*



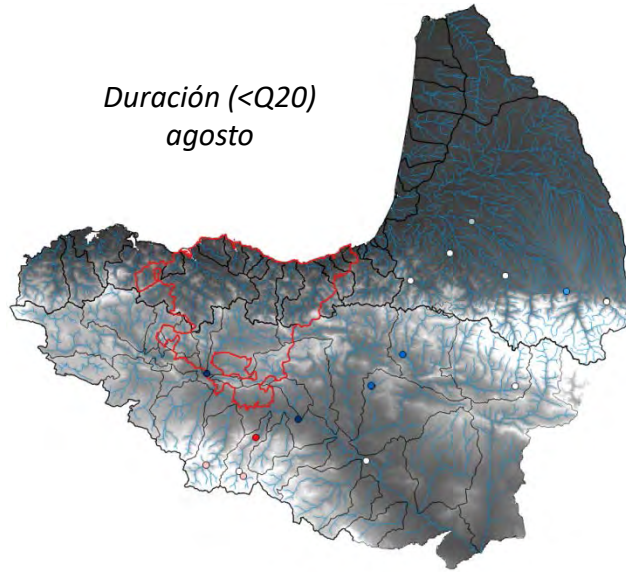
*Duración (<Q20)
junio*



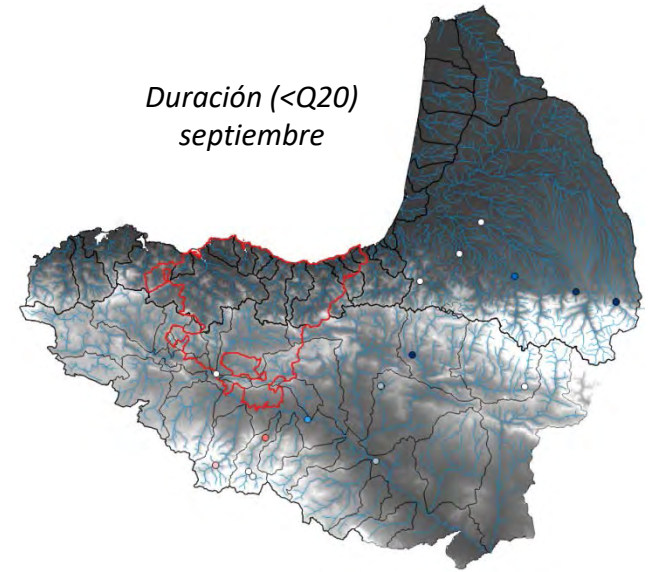
*Duración (<Q20)
julio*



*Duración (<Q20)
agosto*



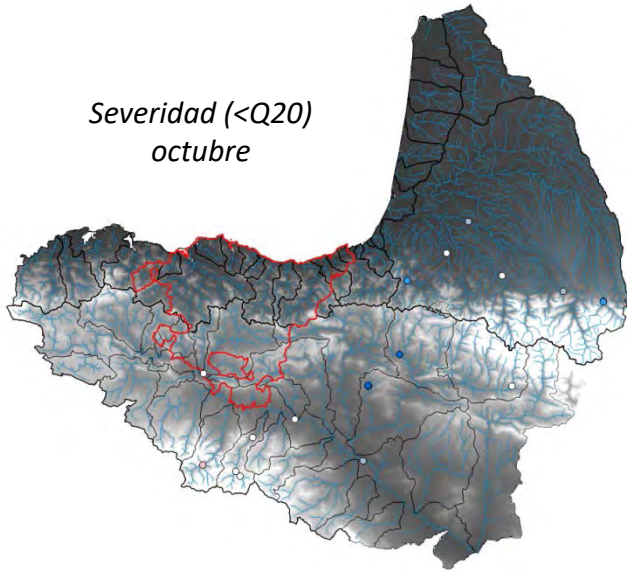
*Duración (<Q20)
septiembre*



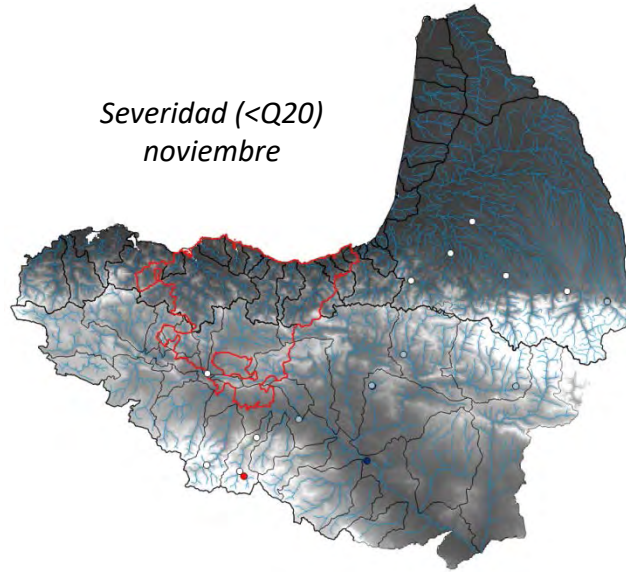
- | | | | | |
|------------------------------------|-------------------------|--------------|-------------------------|------------------------------------|
| ● negativo virtualmente cierto | ● negativo muy probable | ○ improbable | ● positivo probable | ● positivo extremadamente probable |
| ● negativo extremadamente probable | ● negativo probable | | ● positivo muy probable | ● positivo virtualmente cierto |

Series de 60 años (1995/1996-2014-2015)

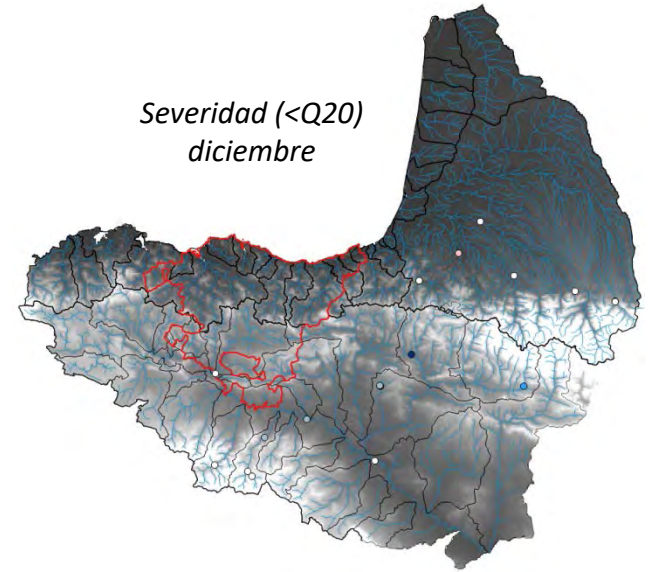
*Severidad (<Q20)
octubre*



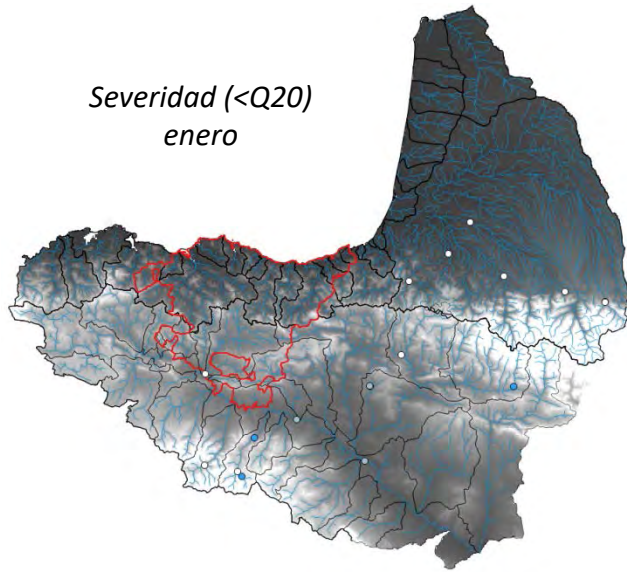
*Severidad (<Q20)
noviembre*



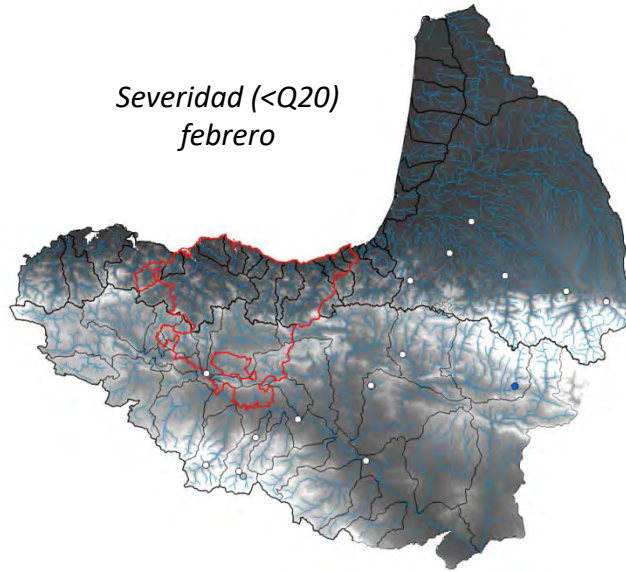
*Severidad (<Q20)
diciembre*



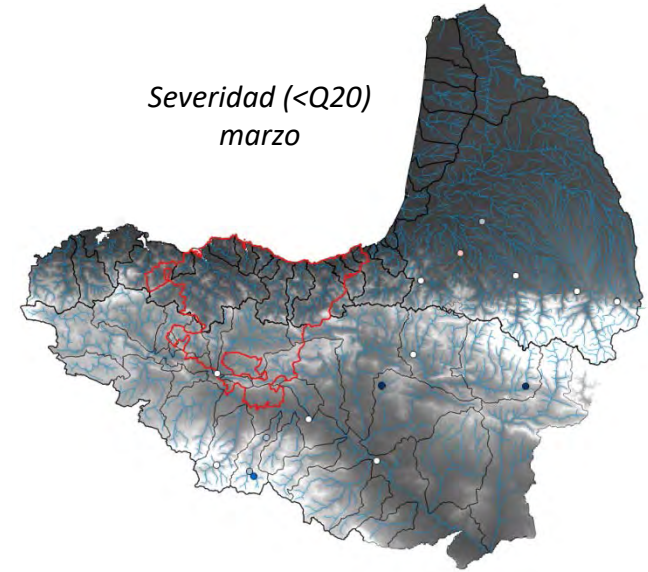
*Severidad (<Q20)
enero*



*Severidad (<Q20)
febrero*



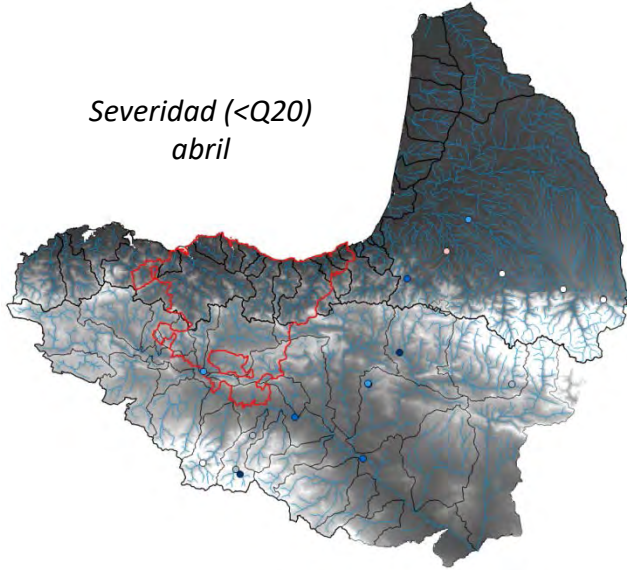
*Severidad (<Q20)
marzo*



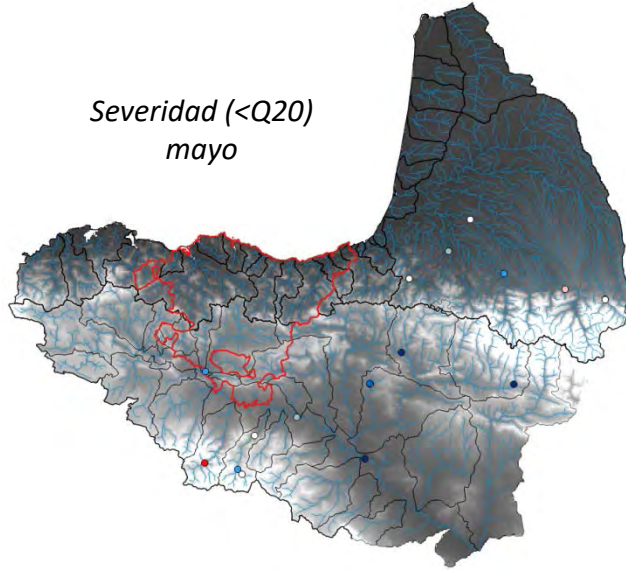
- | | | | | |
|------------------------------------|-------------------------|--------------|-------------------------|------------------------------------|
| ● negativo virtualmente cierto | ● negativo muy probable | ○ improbable | ● positivo probable | ● positivo extremadamente probable |
| ● negativo extremadamente probable | ● negativo probable | | ● positivo muy probable | ● positivo virtualmente cierto |

Series de 60 años (1995/1996-2014-2015)

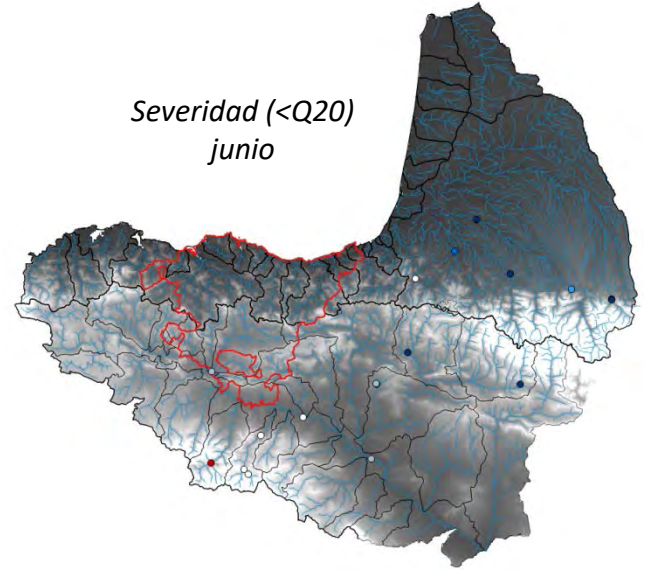
Severidad (<Q20)
abril



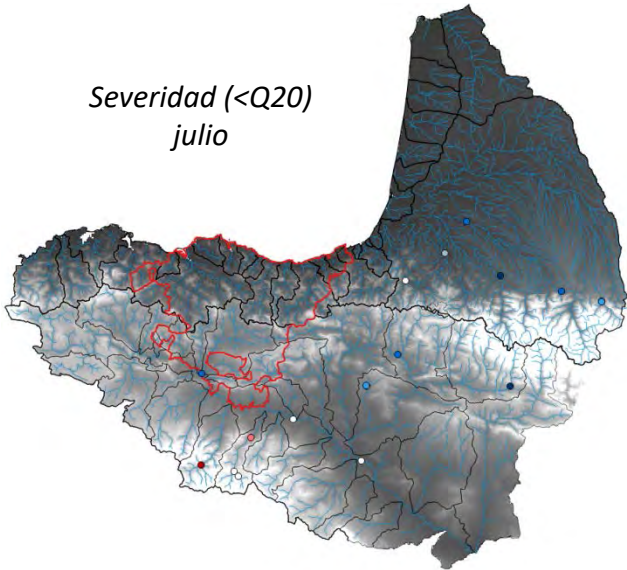
Severidad (<Q20)
mayo



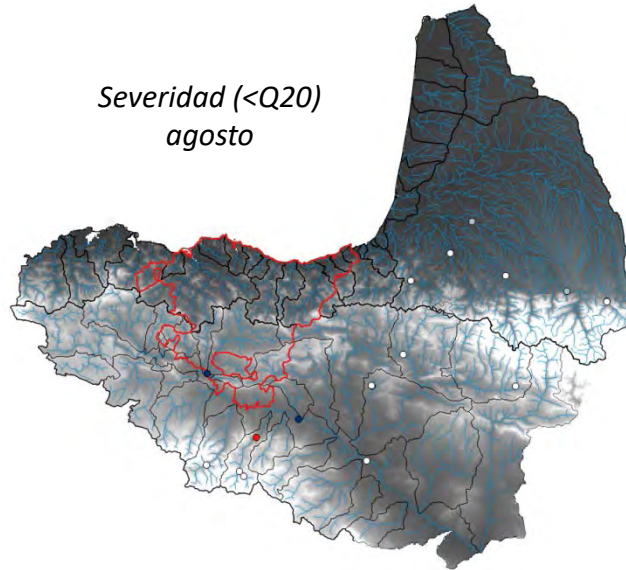
Severidad (<Q20)
junio



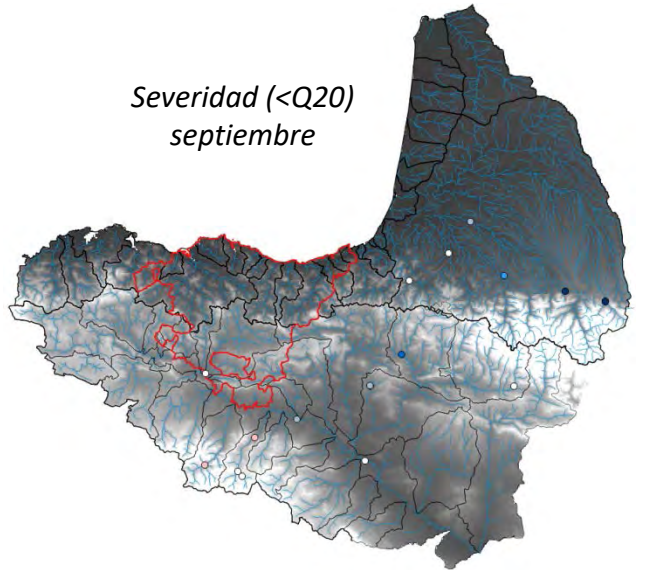
Severidad (<Q20)
julio



Severidad (<Q20)
agosto



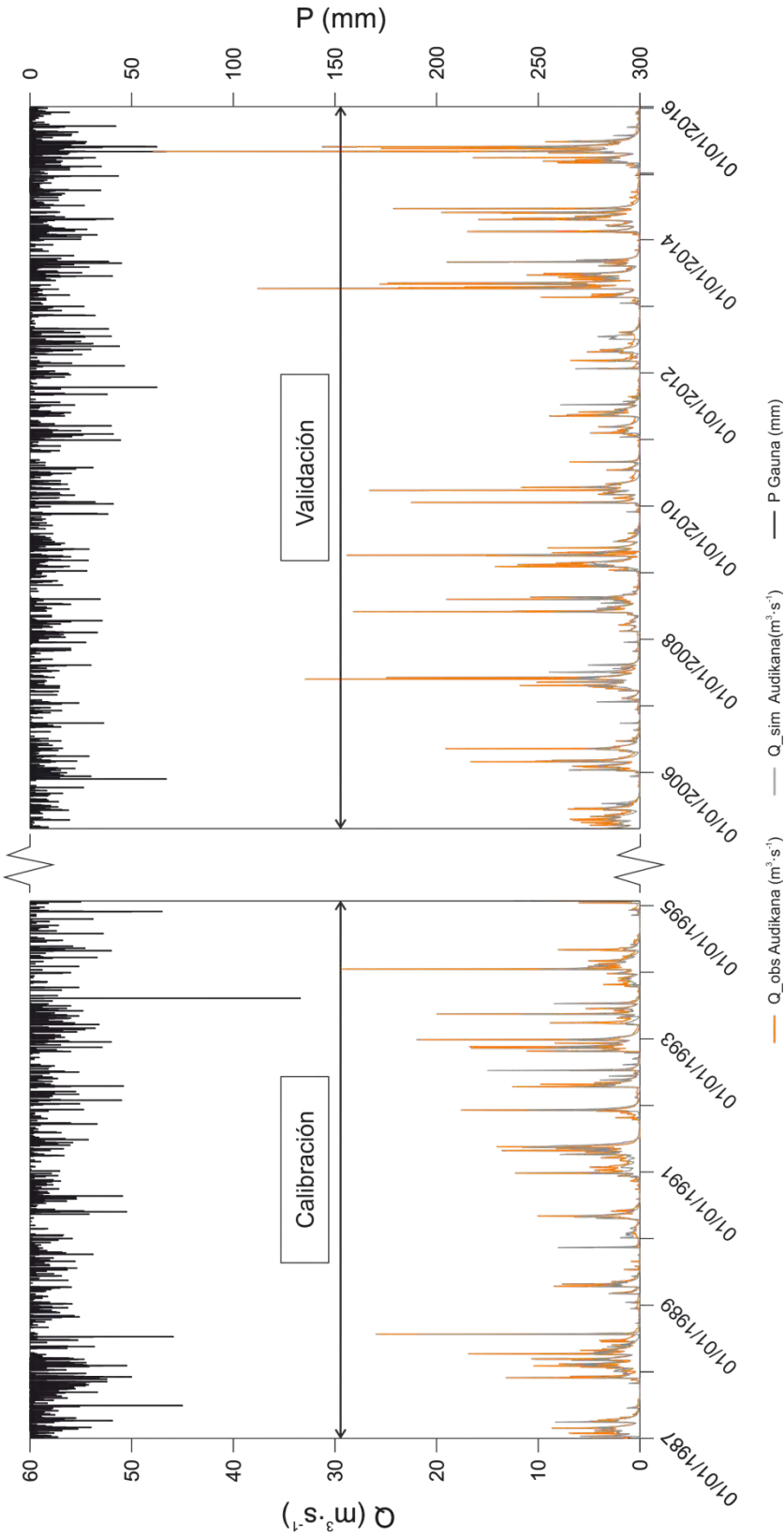
Severidad (<Q20)
septiembre



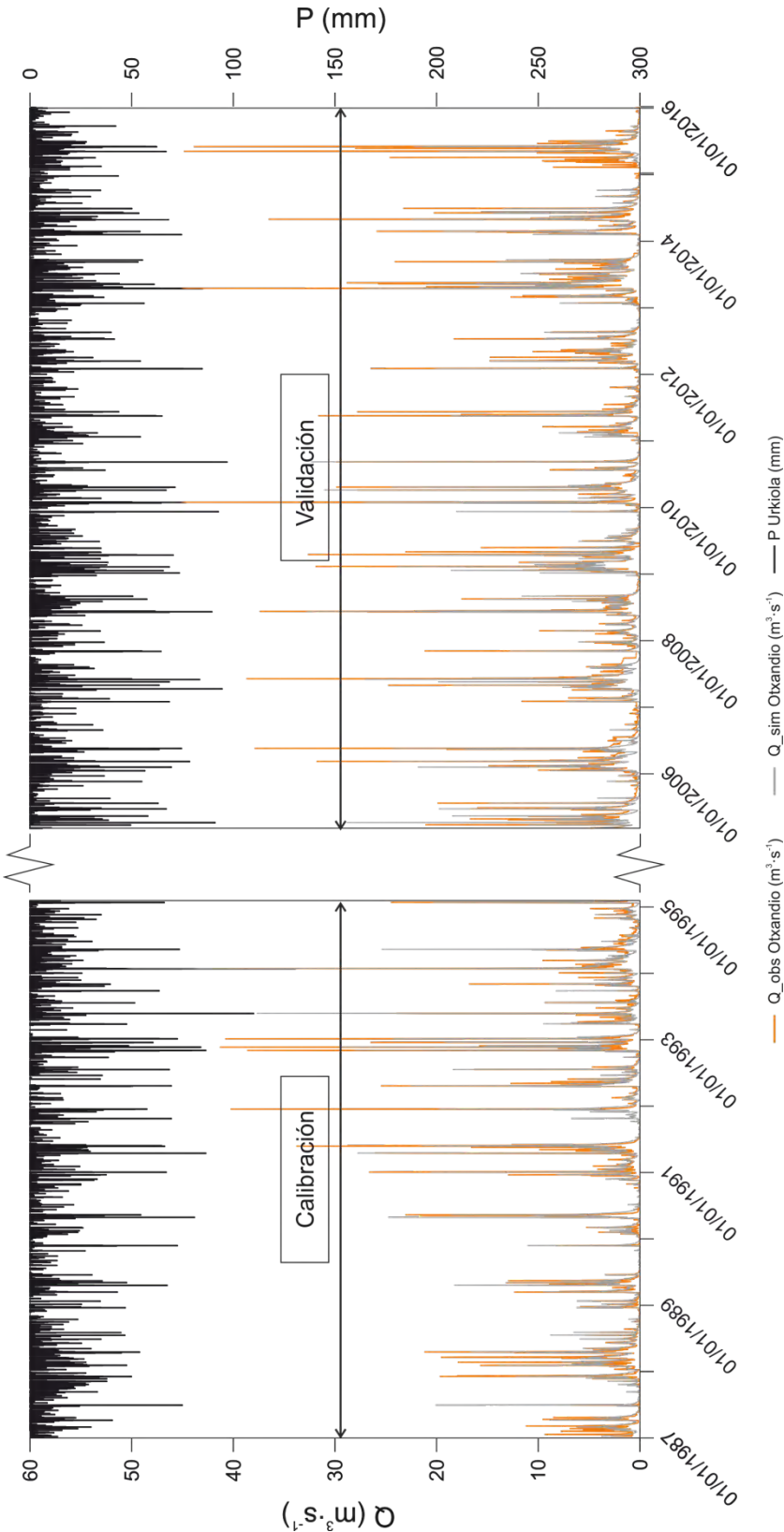
- | | | | | |
|------------------------------------|-------------------------|--------------|-------------------------|------------------------------------|
| ● negativo virtualmente cierto | ● negativo muy probable | ○ improbable | ● positivo probable | ● positivo extremadamente probable |
| ● negativo extremadamente probable | ● negativo probable | | ● positivo muy probable | ● positivo virtualmente cierto |

ANEXO 2
GRÁFICOS DE CALIBRACIÓN/VALIDACIÓN DE LOS
SUB-MODELOS DE AUDIKANA Y OTXANDIO

Gráficos de las series de caudal observadas y simuladas para los períodos de calibración (1987-1994) y validación (2005-2015) en la estación de aforos de Audikana. Se ha incluido la precipitación de Gauna utilizada como entrada al modelo.

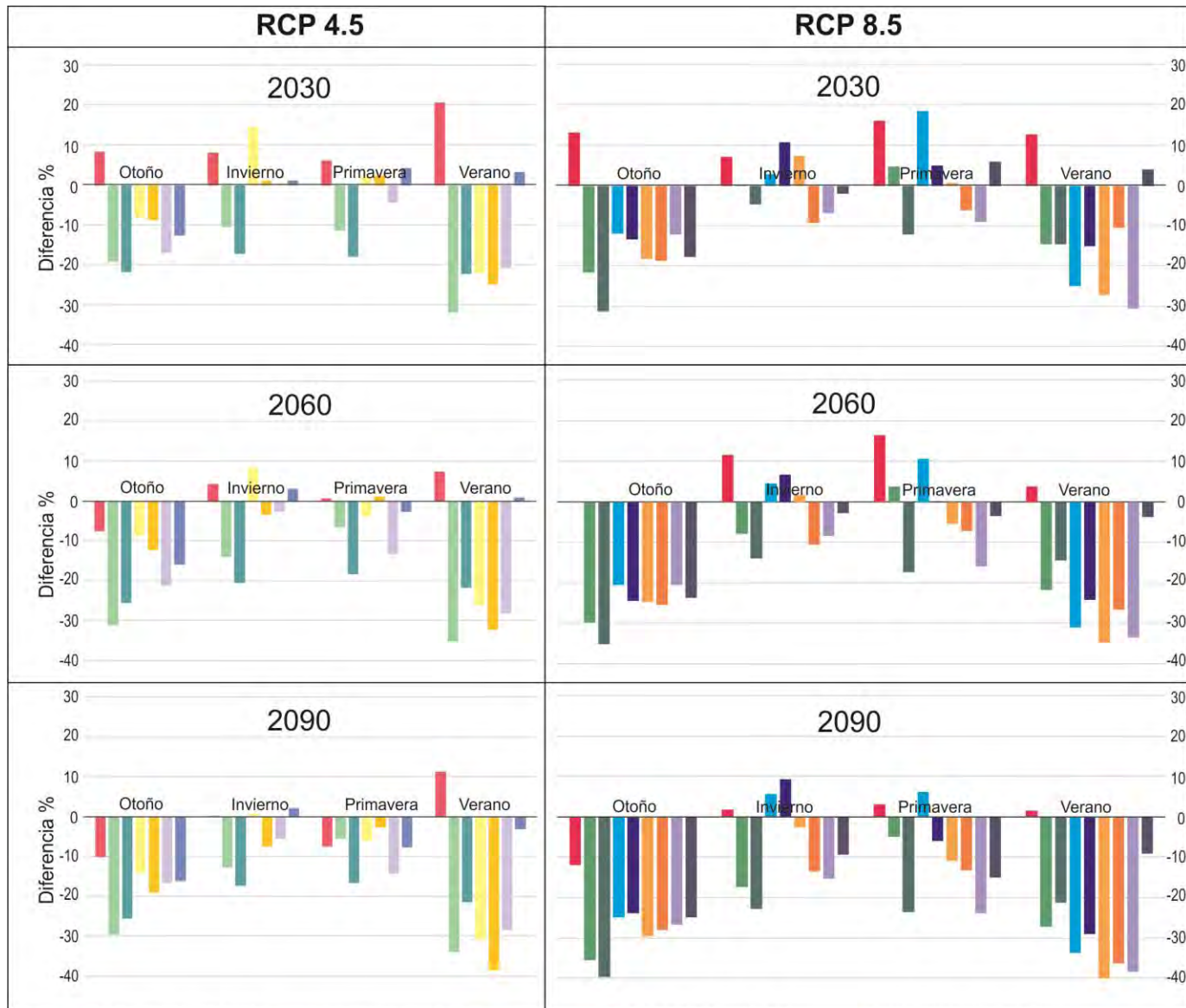


Gráficos de las series de caudal observadas y simuladas para los períodos de calibración (1987-1994) y validación (2005-2015) en la estación de aforos de Otxandio. Se ha incluido la precipitación de Urkiola utilizada como entrada al modelo.



ANEXO 3
DIFERENCIAS (%) DE LAS PROYECCIONES
HIDROLOGICAS RESPECTO A SU BASELINE

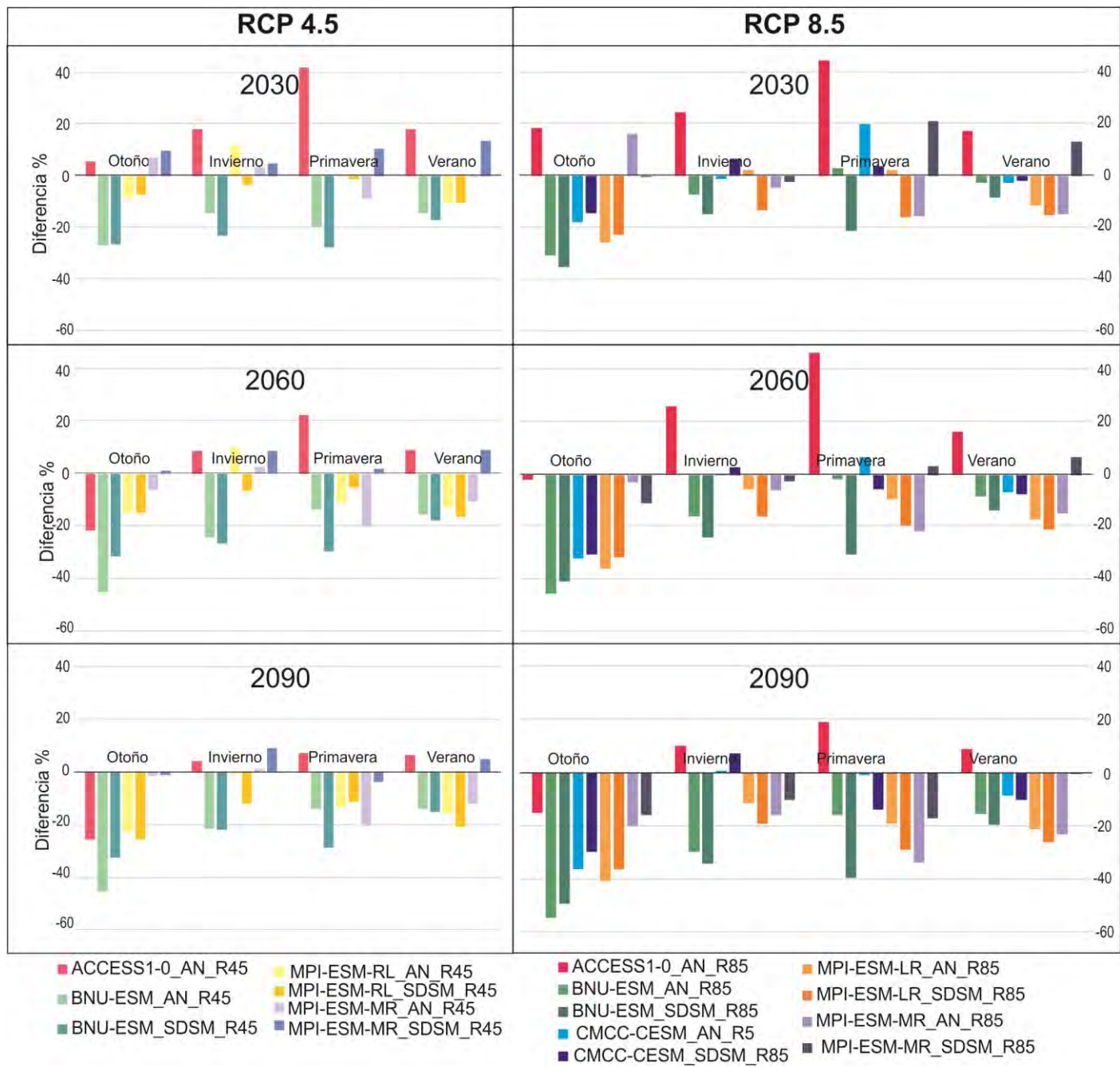
Diferencias medias anuales de caudal (%) para la cuenca de Otxandio entre cada una de las 16 proyecciones hidrológicas y sus respectivas simulaciones para el baseline. Los resultados han sido divididos en tres horizontes (2030, 2060, 2090).



- ACCESS1-0_AN_R45
- BNU-ESM_AN_R45
- BNU-ESM_SDSM_R45
- MPI-ESM-RL_AN_R45
- MPI-ESM-RL_SDSM_R45
- MPI-ESM-MR_AN_R45
- MPI-ESM-MR_SDSM_R45

- ACCESS1-0_AN_R85
- BNU-ESM_AN_R85
- BNU-ESM_SDSM_R85
- CMCC-CESM_AN_R5
- CMCC-CESM_SDSM_R85
- MPI-ESM-LR_AN_R85
- MPI-ESM-LR_SDSM_R85
- MPI-ESM-MR_AN_R85
- MPI-ESM-MR_SDSM_R85

Diferencias medias anuales de caudal (%) para la cuenca de Audikana entre cada una de las 16 proyecciones hidrológicas y sus respectivas simulaciones para el baseline. Los resultados han sido divididos en tres horizontes (2030, 2060, 2090).





Herri-baltzua

Sociedad Pública del

EUSKO JAURLARITZA



GOBIERNO VASCO

INGURUMEN, LURRALDE PLANGINTZA
ETA ETXEBIZITZA SAILA

DEPARTAMENTO DE MEDIO AMBIENTE,
PLANIFICACIÓN TERRITORIAL Y VIVIENDA

www.ihobe.eus

www.ingurumena.eus