

Metodología de determinación de estrés hídrico en zonas semiáridas como ayuda a la toma de decisiones

Damián Córdoba¹, Juan F. Gallardo² y Sonia Amaro¹

¹ Centro de Investigación y Desarrollo en Recursos Hídricos (CIDERH), Calle Vivar 493, 3^{er} Piso, Iquique, Chile.

² Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Salamanca, Consejo Superior de Investigaciones Científicas de España, Calle Cordel de Merinas, 40-52 (37008), Salamanca, España.

Mail de contacto: damian.cordoba@ciderh.cl

RESUMEN

El estrés hídrico es un tema de gran importancia y desarrollo en la gestión del recurso hídrico de una región, ya que el mismo incide en las características biológicas de los ecosistemas, así como en la disponibilidad del recurso hídrico bien sea en términos de cantidad o de calidad. El desarrollo de metodologías para la determinación de estrés hídrico se basa en la recopilación y elaboración de estudios básicos sobre la caracterización de una región a partir de los componentes físicos (geográficos, geológicos, climáticos, bióticos e hidrológicos) y antrópicos (usos del suelo, actividad socioeconómica y demografía). En zonas semiáridas y áridas los componentes físicos y antrópicos están condicionados por las características climáticas de cada región, por tal razón la metodología aquí propuesta se fundamenta en expresar los diversos componentes del análisis de series temporales para la definición de afecciones en un panorama existente de estrés hídrico. tomando como ejemplo una región de la Cuenca Hidrográfica del Duero en España.

Palabras clave: Estrés Hídrico, Semiárida, Series temporales.

ABSTRACT

The water Stress is an important topic in the water resource management for some region, since it affects the biological characteristics of ecosystems specially water resource availability (quantity and quality). The development of methodologies for determination of water stress is based in the recompilation and making of basic studies about the characterization of one region, taking into account the physic (geographic, geologic, climatic, biotic and hydrogeologic) and human (land use, socioeconomic activity and demography) factors. In semiarid and arid zones, the physic and human factors can be influenced by the climatic characteristics of each region, for this reason the methodology presented in the study is based on the analysis of temporal series for the definition of consequences of water stress taking as an example a region from the Duero Watershed in Spain.

Keywords: Water stress, Semiarid, Temporal Series.

Introducción

Según el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) el estrés hídrico se produce cuando la demanda de agua excede la cantidad disponible durante un periodo determinado de tiempo, o cuando la mala calidad limita su uso, provocando un deterioro de los recursos hídricos en términos de cantidad (sobreexplotación del acuífero, ríos secos, etc.) y calidad (eutrofización, contaminación por materia orgánica, intrusión salina, etc.). Dicha diferencia entre la demanda y la disponibilidad depende de factores antrópicos y factores naturales, entre los cuáles el cambio climático se considera como el principal de estos factores al incidir en los restantes. Este factor se incluye como un fenómeno desencadenante del estrés hídrico

en los informes del IPCC (Panel Intergubernamental del Cambio Climático) emitido por el PNUMA.

Normalmente, en ciertos estudios, el análisis del impacto del cambio climático junto con otros cambios causados por el hombre (constituyendo el llamado cambio global) en la disponibilidad de los recursos hídricos se basan en la aplicación de técnicas de "downscaling" (técnicas de reducción de escala) sobre modelos de circulación global fundamentados en series futuras de precipitación y temperatura (Sahuquillo et al, 2008). La aplicabilidad de estos estudios puede ser limitada al no tener en cuenta aspectos físicos, bióticos incluso hidrogeológicos que condicionan la distribución de la precipitación, la temperatura y por lo tanto, la disponibilidad de los recursos hídricos.

Un Sistema de Ayuda a la Decisión (DSS por sus siglas en inglés) se refiere a un modelo de datos que posibilita obtener respuestas a preguntas que requieren de un gran número de variables a analizar. Desde este punto de vista, la incorporación del análisis de series temporales en un DSS, permite no solo obtener respuestas inmediatas sino su evolución futura en base a condicionantes temporales.

Las zonas áridas y semiáridas, por lo general tienen un potencial natural (biodiversidad, biomasa, agua, suelo, etc.) y cultural que permiten el desarrollo sostenible. Sin embargo, en las últimas décadas han sido sometidos a un acelerado proceso de degradación de sus recursos naturales y a un cambios en los regímenes hidrológico en estos ecosistemas (ASPAN, 1992).

Zona de Estudio

Para entender el proceso de aplicación de un sistema de apoyo a la toma de decisiones, se ha seleccionado una zona en la Cuenca Hidrográfica del Duero al Noroste de España (Fig.1). la cual fue producto de una división en cinco zonas (A, B, C, D, E), y a su vez, en 12 subzonas de la Demarcación Hidrográfica española. Por lo tanto, el área de estudio corresponde a la Zona D – 11 Bajo Duero.

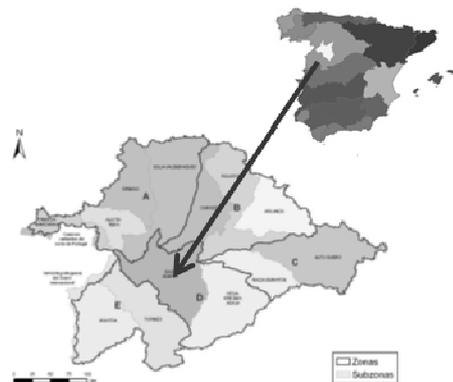


Figura 1. Localización de la zona D - 11 Bajo Duero en la Demarcación Hidrográfica del Duero.

La zona D – 11 Bajo Duero queda definida con 7.599 km² los cuales representan el 9,6% de la Demarcación española, incluyendo a las provincias de Zamora, Salamanca, Valladolid, Ávila y Palencia.

Desde el punto de vista físico, la zona D – 11 Bajo Duero presenta una topografía

caracterizada por la presencia de picos y cerros, llanuras y laderas, y un valle escarpado con laderas de pendientes fuertes y muy fuertes (Fig.2). La climatología de la zona está representada por un clima mediterráneo (templado húmedo de verano seco) caracterizado por ser un clima continental de zona templada entre los 30° y 45° de latitud Norte, con una marcada sequía estival motivada por la permanencia del anticiclón subtropical. Asimismo se distinguen inviernos muy fríos con temperaturas medias por debajo de los 6 °C en los meses más fríos (Fig.3).



Figura 2. Modelo Digital de Elevaciones de la zona de estudio. Los valores van desde los 700 m s.n.m. (colores grises claros) hasta los 1200 m s.n.m. (colores oscuros).

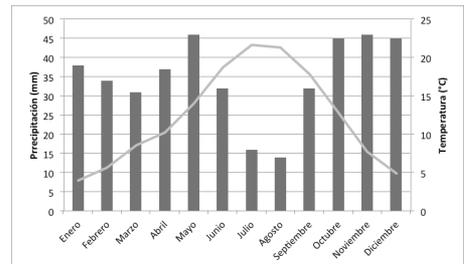


Figura 3. Climograma de la zona D-11 Bajo Duero

Por otro lado, la zona D – 11 Bajo Duero al pertenecer a una cuenca intraplaca de evolución compleja desde el Cretácico hasta el presente, se diferencia de otras regiones debido a las características tectosedimentarias determinadas por una cuenca sedimentaria compuesta de materiales productos de la erosión del Macizo Ibérico y el Sistema Central (Vera, 2004).

Desde el punto de vista hidrológico, el río Duero discurre por el sector central-Norte de la zona de estudio (de E a O; Fig.2), con una longitud de 160 km que representan el 28% de su longitud total. De esta forma (y siguiendo la configuración característica de la cuenca del Duero) el río Duero diferencia un margen septentrional y un margen meridional. Dentro de cada uno de estos márgenes se reconocen

subredes tributarias y un gran número de lagos y lagunas, lavajos y charcas asociados, siendo de gran interés aquellas que configuran el Complejo lagunar de Villafáfila.

En cuanto a las características forestales la serie dominante de la zona de estudio corresponde a los encinares supramediterráneos con la especie *Quercus rotundifolia* en casi un 90% de su extensión, seguido por la especie *Quercus pyrenaica*.

Asimismo hacia el sector O se encuentran zonas forestales con vegetación natural y espacios abiertos que se corresponden con la zona de las Arribes del Duero (con un alto valor paisajístico y, por lo tanto, conservacionista).

La ocupación y uso del suelo está representado por los usos agrícolas, en especial los relacionados con los cultivos de secano y en menor proporción, los cultivos de regadío.

Metodología

La metodología propuesta se basa en la recopilación y elaboración de estudios básicos sobre la caracterización de una región a partir de los componentes físicos (geográficos, geológicos, climáticos, bióticos e hidrológicos) y antrópicos (usos del suelo, actividad socioeconómica y demografía). Como se ha citado la importancia de los estudios históricos de las variables del ciclo hidrológico para la comprensión de su dinámica en una región, la metodología aquí propuesta se fundamenta en expresar los diversos componentes del análisis de series temporales para la definición de afecciones en un panorama existente de estrés hídrico.

Estudio Temporal

En lo que tiene que ver con algunas evidencias de cambio climático en la zona D – 11 Bajo Duero se han generado indicadores en tres estaciones ubicadas las provincias de Salamanca, Zamora y Valladolid. El estudio se ha realizado en base al análisis de las series diarias de 66 años (01/01/1945 a 31/12/2010) con el fin de cubrir el tiempo recomendable para el estudio de las normales climáticas tanto de temperatura como de precipitación. Las variables empleadas fueron la precipitación acumulada diaria y los valores diarios de temperatura (mínima y máxima del día) utilizando el programa RClimdex 1.0.

En todas las estaciones se garantizó la disponibilidad de los datos por encima del 80%

del total de la serie considerada según lo determinado por la Organización Meteorológica Mundial (W.M.O, 2010).

Para la determinación de los cambios temporales en las series de caudales del Río Duero se emplean las series de caudales de tres estaciones de aforo en el río Duero; dos en el río Guadaña y una en el río Valderaduey. Estas series se someten a pruebas estadísticas para detectar tendencias temporales. Estas pruebas estadísticas consisten en estimar la probabilidad de la hipótesis nula (no hay tendencia) que se rechaza cuando tal probabilidad es inferior a un umbral.

La probabilidad de la hipótesis nula disminuye al aumentar la tendencia (positiva o negativa) de la serie, pero aumenta con su variabilidad; de manera que tendencias relevantes desde el punto de vista de los recursos implicados pueden no ser significativas en términos estadísticos si la variabilidad es elevada. Para eludir este problema los resultados de las pruebas estadísticas pueden expresarse de una manera menos estricta que los que se emplean en la refutación científica de hipótesis (Gallart, 2009), pero más adecuada a la toma de decisiones utilizando la escala semicuantitativa de verosimilitud.

Aplicando el mismo criterio de los informes internacionales sobre el cambio climático (IPCC, 2007), se asigna una escala semicuantitativa para indicar los diversos niveles de confianza de las conclusiones y de las predicciones, basados en las observaciones y en los modelos empleados:

- Virtualmente cierto (confianza superior al 99% en la certeza de un resultado)
- Muy verosímil (90-99% de confianza)
- Verosímil (66-90% de confianza)
- Medianamente verosímil (33 – 66% de confianza)
- Inverosímil (10 – 33% de confianza)
- Extremadamente inverosímil (menos del 10% de confianza)

Posteriormente es necesario estudiar posibles tendencias en los residuales, ya que la existencia de una tendencia indica que existen otros factores, además del tiempo, que contribuyen al cambio de los recursos de la cuenca (o que los datos o el modelo son incorrectos; Gallart, 2009)

Para los dos casos (estudio climático e hidrológico) se ha empleado un nivel de confianza del 90%.

De esta manera, se han determinado 29 indicadores de cambio climático los cuales se generan automáticamente utilizando el programa RCLimdex 1.0.

Resultados

Se puede apreciar que los resultados obtenidos presentan (en la mayoría de los casos) una significación estadística admisible que aumentan de esta forma la fiabilidad de los resultados. Sin embargo hay que considerar dos factores: El nivel de confianza empleado (90%) no es el usualmente adoptado en la mayoría de estos estudios (95%); aun así la falta de más puntos de control (estaciones meteorológicas y de aforo) con datos completos y continuos, conllevan a que se obtengan datos con una fiabilidad admisible aunque de baja valoración; por otro lado, los valores de significación no tienen el mismo comportamiento entre las estaciones consideradas.

A partir del estudio temporal, se han obtenido los resultados señalados en la tabla 1. En el caso de la precipitación las conclusiones son muy limitadas debido a la calidad de la información y a la homogeneidad de las precipitaciones en las tres estaciones analizadas. En relación al rango entre la Temperatura máxima y la mínima, los resultados obtenidos implica que las estaciones registren con más frecuencia valores extremos tanto de temperatura mínima como de temperatura máxima, aunque el comportamiento de estas variables respecto a los valores actuales, deben analizarse de acuerdo a los eventos anómalos en la zona de estudio.

Por otro lado, para los valores de temperatura mínima (temperatura en la noche) el comportamiento en la zona de estudio no es tan homogéneo, mientras que para la temperatura máxima en el día el comportamiento es el opuesto.

Discusiones

En el informe del 2007 del IPCC expone que “con un grado de confianza alto las proyecciones indican que, hacia mediados del siglo, la escorrentía fluvial anual y la disponibilidad de agua disminuirán en algunas regiones secas en latitudes medias (correspondiente a las zona de estudio) y en

los trópicos. También con un grado de confianza alto, numerosas áreas semiáridas experimentarán una disminución de sus recursos hídricos por efecto del cambio climático” (IPCC, 2007).

Por otro lado, las sequías han afectado el ciclo hidrológico limitando el rendimiento hidrológico de ríos y acuíferos (Martínez Gil, 2006). Dicho comportamiento se explica si se considera que el aumento de la temperatura conlleva a su vez al aumento exponencial (Martínez Gil, 2006) de la evapotranspiración del conjunto suelo/planta limitándose el agua disponible para las escorrentías directas y para la recarga de los acuíferos del subsuelo (Aguilera y Murillo, 2006). En el caso de las precipitaciones el comportamiento es más discutido debido a la irregularidad tanto espacial como temporal en su distribución (Aguilera y Murillo, 2006) con la incertidumbre si dicho comportamiento responde al cambio climático o se trata simplemente de una crisis cíclica (Martínez Gil, 2006) relacionada por algunos científicos a las manchas solares.

A escala regional, se aprecia un mayor aumento en la temperatura mínima que en la máxima. Salvo en casos concretos como en Salamanca, las tendencias son negativas aunque su nivel de significación es muy bajo en comparación a las otras dos estaciones.

Por otro lado el aumento de la temperatura media ha conlucido al aumento de días y/o noches calientes, no siendo muy clara la tendencia regional en cuanto a las heladas se refiere.

Esta anomalía en la frecuencia de heladas se debe a que la atmósfera no se comporta en forma lineal, de manera que no se pueden extrapolar tan fácilmente los resultados. Por esta razón muchos científicos han estudiado los cambios producidos en los regímenes de las heladas, lo que deja claro que explicar el comportamiento de las heladas en la zona de estudio requiere otro tipo de estudios a comparar con los resultados obtenidos en este proyecto.

Dicha tendencia al aumento de las temperaturas se complementa con la disminución de las precipitaciones. Esta disminución en los valores de precipitación se relaciona con lo expuesto por el IPCC respecto a la distribución de dicha anomalía. Este organismo establece que para aquellas latitudes medias es de esperar una disminución de la precipitación en comparación

Tabla 1. Resultados del procesos de análisis de series temporales (Tmax: Temperatura máxima; Tmin: Temperatura mínima)

PARAMETROS	ESCALA DE VEROSIMILITUD	ESTACIÓN (ES)
Disminución de la Precipitación	Muy verosímil (90-99%)	Valladolid
	Medianamente verosímil (33-66%)	Zamora y Salamanca
Aumento del Rango térmico (Tmax-Tmin)	Muy verosímil (90-99%)	Valladolid, Zamora y Salamanca
Aumento de la temperatura mínima nocturna	Muy verosímil (90-99%)	Valladolid, Zamora y Salamanca
Aumento de la temperatura máxima nocturna	Muy verosímil (90-99%)	Zamora y Salamanca
	Medianamente verosímil (33-66%)	Valladolid
Aumento de noches calientes	Muy verosímil (90-99%)	Zamora
	Verosímil (66-90%)	Valladolid
Aumento de días calientes	Virtualmente cierto (>99%)	Zamora
	Muy verosímil (90-99%)	Valladolid y Salamanca
Aumento de periodos fríos	Verosímil (66-90%)	Salamanca
Disminución de periodos fríos	Muy verosímil (90-99%)	Zamora
	Inverosímil (10-33%)	Valladolid
Aumento de periodos calientes	Muy verosímil (90-99%)	Zamora
	Verosímil (66-90%)	Valladolid
Aumento de la temperatura máxima y mínima en el día	Virtualmente cierto (>99%)	Valladolid y Salamanca
	Muy verosímil (90-99%)	Zamora
Aumento de los días con temperaturas máximas mayores de 25°C	Virtualmente cierto (>99%)	Valladolid y Zamora
	Medianamente verosímil (33-66%)	Salamanca

a zonas tropicales y de altas latitudes donde es de esperar un aumento en su intensidad.

De seguir este aumento en la temperatura y en la disminución de la precipitación, la tendencia sería a tener:

a) Mayor número de heladas si se continúa experimentando la tendencia regional expuesta.

b) La intensidad de la variación térmica y pluviométrica será más evidente en el valle central de la zona de estudio por presentar los valores más altos de temperatura mensual, y los más bajos de precipitación; mientras que en los extremos de la zona de estudio la intensidad será importante pero menos evidente a lo que térmica y pluviométricamente se refiere.

Aun así esto se intensificará más debido a las variación que experimentarán la vegetación y la hidrografía debido al aumento de la temperatura (IPCC, 2007) y la disminución de las precipitaciones (Feinstein, 2008). Asimismo

y de forma más específica, esta variación térmica y pluviométrica modificará la dinámica de los vientos y por lo tanto la estabilidad ecosistémica e hidrológica de las zonas de mayor altitud (en especial de la pequeña porción de la Sierra de Ávila) limitando la supervivencia de la biodiversidad actualmente existente y de los recursos hídricos que nacen en estas zonas y alimentan al río Duero.

c) La distribución de la intensidad de estas afecciones en cuanto a la temperatura y precipitación se refiere, determinará la distribución de otras variables como la ETP, la ETR y el coeficiente de humedad.

d) El aumento de la temperatura suavizará los periodos de invierno e intensificará los meses de verano.

e) Los meses secos (aquellos donde la precipitación es escasa) es decir, Julio y Agosto serían más intensos llegando incluso a prolongarse la temporada seca.

f) Una tendencia prolongada a la aridez permanente producto de la disminución de la precipitación y la ETR, y del aumento de la ETP ocasionando déficit hídricos muy por encima del valor actual y reservas de agua muy bajas o inexistentes. Esto conllevaría a un aumento de los meses donde predomina totalmente una precipitación escasa produciendo un cambio en el tiempo de las características semiáridas de la zona de estudio a condiciones áridas; aspecto que se corresponde con lo expuesto en el cuarto informe del IPCC (2007).

g) Modificación de las características climáticas asumiendo condiciones de zonas subtropicales e incluso tropicales áridas.

Teniendo en cuenta lo anterior, se puede apreciar que para la zona de estudio se puede encontrar un descenso generalizado de 2,7 Hm³ anuales en las aportaciones, siendo el mes de Marzo el que registra mayores pérdidas y julio como el mes de menores pérdidas, considerando a su vez la significación estadística de los resultados.

Este comportamiento se identifica como una consecuencia de los cambios observados en el clima con un "grado de confianza alto", produciendo no solo una reducción en las aportaciones sino en la anticipación de los caudales máximos primaverales en numerosos ríos así como en los efectos sobre la estructura térmica y la calidad del agua de los ríos y lagos cuya temperatura aumenta al aumentar la temperatura atmosférica (IPCC, 2007).

Con un "grado de confianza alto", numerosas áreas semiáridas (como es el caso de la zona de estudio) experimentarán una disminución de sus recursos hídricos por efecto del cambio climático (IPCC, 2007), una tendencia que se observa con los resultados obtenidos en este estudio.

Considerando lo expuesto por Gallart (2009), los otros factores que pueden influir en la variación de las aportaciones pueden estar relacionados directamente con los usos del agua en la región, en especial aquellos asociados a los cultivos en regadío.

Asimismo, si se tiene en cuenta que la demanda hídrica en la demarcación supone más del 90% de las demandas consuntivas totales (aunque puede variar a futuro si se considera la pérdida de importancia que las actividades primarias están experimentando en los últimos tiempos), la disminución de las aportaciones hídricas amenazaría la estabilidad de la economía de la región sobre todo en la rentabilidad y el empleo, ya que el

regadío mejora la capacidad de generar empleo en el medio rural de la región.

Esta posible afección se puede considerar grave si se tiene en cuenta que el 63% de la demarcación tiene vocación agrícola, amenazando la producción de alimentos tales como la cebada, el trigo, la remolacha, la alfalfa, las hortalizas, el girasol, las patatas, la avena y otros cultivos menos representativos como el maíz forrajero y las judías.

En el caso de los cultivos de secano, estos fenómenos no tienen una relación biunívoca simple con la cantidad de lluvia anual caída porque dependen también de otros factores, como la distribución estacional no solo de las lluvias, sino también de las temperaturas en relación con los diferentes momentos del ciclo vegetativo de los cultivos (Martínez Gil, 2006). Algo similar ocurre con la vegetación natural.

Estos efectos combinados y percibidos en la zona de estudio coinciden con los "impactos regionales proyectados" por el IPCC en su cuarto informe, donde se especifica que para la región de Europa del Sur las proyecciones indican un empeoramiento de las condiciones (altas temperaturas y sequías) en una región que es ya vulnerable a la variabilidad del clima, así como una menor disponibilidad de agua y una disminución del potencial hidroeléctrico, del turismo estival y, en general, de la productividad de los cultivos.

Existiendo dudas razonables sobre la posibilidad de una tendencia hacia el incremento de la frecuencia y la intensidad de los episodios de sequía, el aumento de la temperatura, el descenso de los caudales de los ríos, incluso la disminución de las precipitaciones es muy probable que estemos experimentando un estrés hídrico cuya intensidad aumentará de seguir la tendencia estimada.

Afección en la Vegetación

Las especies *Quercus rotundifolia* y *pirenaica* ocupan una posición intermedia entre los territorios del bosque caducifolio Atlántico centro-europeo y las formaciones mediterráneas xerófilas del sur de la Península Ibérica. La región favorable para su difusión y dominancia corresponde a ambientes submediterráneos caracterizado por cadenas montañosas que benefician la precipitación (Carvalho, 2005).

Las especies *Quercus* representan la quinta especie forestal española con 660.000 ha (Inventario Nacional Forestal 1986-1996). Se distribuye de Norte a Sur de la península

especialmente en el sector centro-occidental. Se ubican en zonas con una pluviometría de 400 a 600 mm y con alguna sequía estival, una elevada continentalidad y una dependencia de la luz solar. Es bien sabido que la pluviometría constituye un factor decisivo en la dinámica de los ecosistemas mediterráneos. En el caso de la *Quercus rotundifolia* y *pyrenaica* ocurre lo siguiente: gran parte del agua (85%) atraviesa el estrato arbóreo, un 1% desciende por las ramas y troncos hasta el suelo y el 15% restante de agua se evapora (Carvalho, 2005) por el calentamiento de la superficie edáfica o bien, la absorben las raíces y se evapora una vez alcanza las hojas (evapotranspiración; Gallardo et al, 2000)

Asimismo, dichas especies se asientan en suelos ácidos, pobres y de baja profundidad de la textura ligera y con baja retención de agua. Pertenecen especialmente a suelos limo-arcillosos que favorecen y conservan más la humedad. Observando las características geológicas de la zona de estudio se puede concluir que se extiende por casi toda el área de estudio, salvo en las litologías carbonatadas (Carvalho, 2005).

Las variaciones del contenido de humedad del suelo a lo largo del periodo vegetativo son un aspecto determinante en el desarrollo de esta especie. Gran parte del periodo de actividad vegetativa coincide con una estación estival seca que ocasiona un déficit estival, variable de año por año, más en relación con la distribución de la lluvia que con la intensidad de estas (Gallardo et al, 2000). El agua invernal es aprovechada como reserva hídrica lo que implica por lo tanto una gran lixiviación del suelo y como consecuencia una disminución de la fertilidad que se manifiesta especialmente en una disminución de las bases, el grado de saturación y el pH (Gallardo et al, 1996). Se puede establecer que en el área de los robles se debe considerar buen año aquellos en el que las lluvias son abundantes antes y durante las primeras fases del ciclo vegetativo (Gallardo, 2005).

La retranslocación es un fenómeno que permite la conservación de un cierto nutriente en una planta, reduciendo sus pérdidas por lavado foliar desde la hojarasca desprendida del dosel. Una retirada prematura de los nutrientes que cada hoja posee tendría un efecto negativo sobre la eficiencia fotosintética de las hojas durante el periodo que les resta de vida (Martín et al, 1996).

Sin embargo, Martín et al. (1996) argumentan que este fenómeno ha experimentado una caída gradual en esta

especie debida posiblemente al estrés hídrico en regiones de clima árido y semiárido y, por lo tanto, las especies propias de lugares xéricos muestran índices de retranslocación más bajos, y como consecuencia, la influencia del agua sobre la eficiencia de la retranslocación sería indirecta ejerciendo su efecto sobre la duración del periodo de abscisión (Martín et al, 1996). Por lo tanto un déficit hídrico implicaría un escaso crecimiento de los árboles y una caída temprana de las hojas en respuesta a la sequía (Gallardo et al, 2000). De esta forma se evidencia que en los ecosistemas mediterráneos semiáridos resulta, probablemente, más apremiante dar respuesta a los factores derivados del estrés hídrico que a los derivados del estrés nutricional (Martín et al, 1996).

Esta manifestación se corresponde a las variaciones en la precipitación y en la temperatura (que a su vez incide en el resto de los factores como la humedad y la evapotranspiración) cuya tendencia positiva (aumento) implica una anomalía climática cuyas consecuencias, por ejemplo, se evidencian en la alteración de procesos naturales que tienen lugar en estos ecosistemas. Esto implica que de seguir una tendencia negativa (disminución) en las precipitaciones, la pluviometría sería cada vez más baja o insuficiente para mojar totalmente un suelo profundo configurando un subsistema edáfico denominado "cerrado" ó "exudativo" (Gallardo et al., 2000) sometiendo a esta especie a un estrés hídrico permanente.

Conclusiones

Teniendo en cuenta la definición de estrés hídrico (water stress en inglés) definida por el PNUMA, para la zona D-11 Bajo Duero se ha observado con una alta probabilidad (90%) un deterioro de los recursos de agua dulce en términos de cantidad. Esto se manifiesta por un descenso de 2,7 Hm³ anuales en las aportaciones del río Duero y posiblemente influenciado (con un 80% de probabilidad) por un aumento de la temperatura media de 1,3 °C y una disminución aparente de las precipitaciones (en el periodo 1945-2010).

Asumiendo la existencia de estrés hídrico a partir de los resultados obtenidos de este estudio, se aprecia que de persistir estas condiciones anómalas la riqueza forestal característica de la zona de estudio representada por las especies *Quercus pyrenaica* y *Quercus rotundifolia* cuya dinámica depende de la precipitación, la humedad y la

temperatura, se verían amenazadas por alteración de sus procesos naturales al llevar forzosamente el subsistema edáfico de un régimen “percolativo” a uno “exudativo” crítico, que se manifestaría por un escaso crecimiento de los árboles y una caída temprana de las hojas.

Asimismo el estrés hídrico se intensificaría por la demanda de los usos consuntivos en Zamora donde se manifiesta un aumento de la población en los próximos años (mientras que en el resto de poblaciones de la zona de estudio se evidencia una disminución). Esto perjudicaría, entre muchas cosas, la economía y el bienestar de la región al ser una zona dependiente del sector primario (teniendo en cuenta que la principal vocación de la demarcación es para uso agrícola) y este a su vez, dependiente de la disponibilidad del recurso hídrico.

Por otro lado realizar una estimación del deterioro de los recursos de agua dulce en términos de cantidad relacionada con el cambio climático implica un ejercicio parcial a una apreciación absoluta, ya que sería necesario relacionar otros factores como los antrópicos para determinar si la disminución de las aportaciones se relaciona a su vez con la demanda y el consumo de la población; o bien por las eventuales pérdidas que experimente el río Duero por la heterogeneidad litológica de la zona de estudio. Asimismo el estrés hídrico hasta ahora evidenciado debe comprobarse con datos de campo que certifiquen fielmente la existencia de este fenómeno en la zona de estudio. Aun así, el presente trabajo significa un punto de partida para un estudio más exhaustivo y detallado del estrés hídrico en la zona D-11 Bajo Duero, cuyo éxito se refleja en los resultados obtenidos y coincidentes con los modelos oficialmente elaborados y aceptados.

Referencias

Aguilera, H., Murillo, J.M. 2006. “Estimación de la recarga natural en cuatro acuíferos kársticos del alto Vinalopó (Alicante) y relación con el cambio climático”. Boletín Geológico y Minero, Madrid, 117 (Núm. Monográfico especial) ISBN: 0366-0176

ASPAN (Associação Pernambucana de Defesa da Natureza) 1992. Tratado Sobre as zonas áridas e semi-áridas. Aprovado no Fórum Internacional de Organizações Não Governamentais e Movimentos Sociais, no âmbito do Fórum Global ECO 92, Rio de Janeiro.

Carvalho, J. 2005, O Carvalhonegral. Universidade de Tras-os-montes e Alto Douro. Bragança, ed. I, p. 20-41

Feinstein International Center 2008. The Humanitarian Costs of Climate Change. Medford, USA: Tufts University, ed. I.

Gallardo, J.F, Vicente, M.A., Moreno, G. (2000). “Lluvia y bosque mediterráneo”. En: Investigación y Ciencia” Nº 286, Prensa científica S.A, P. 70-76.

Gallardo, J.F. 2005. “Ciclo biogeoquímico”. En: O Carvalho negral. Edita: J. Carvalho)-Universidade de Tras-os-montes e Alto Douro. Bragança, ed. I, p. 46-52

Gallart, F. 2009. Cambios temporales observados en las series de caudales. Agua y cambio climático, diagnosis de los impactos previstos en Cataluña, Agència Catalana de l'Agua, Generalitat de Catalunya, 1ª edición,

IPCC, 2007: Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Ginebra, Suiza, ISBN 92-9169-322-7

Martín, A., Santa Regina, I., Gallardo, J.F. 1996. “Eficiencia, retraslocación y balance de nutrientes en bosques de Quercus Pyrenaicabaja diferente pluviometría en la Sierra de Gata (Centro-Oeste Español). En: Revista Ecología, Nº.10, p. 79-93

Martínez Gil, F.J. “Las sequias en España, un fenómeno recurrente”. En: Memorias del Congreso homenaje al Douro/Duero y sus ríos: Memoria, cultura y provenir- Fundación Nueva cultura del agua (Zamora 27 – 29 de abril de 2006), p. 1-14.

Sahuquillo, A., Custodio, E., Escaler, I. 2008. *Efectos hidrológicos del Cambio climático y adaptación a los cambios con medidas de gestión*. En: Memorias del Simposio sobre la Evaluación crítica de las previsiones sobre el cambio climático: una perspectiva científica. (Madrid, 2-3 de abril de 2008), p. 33.

Vera J.A. 2004. Geología de España. Edita: Sociedad Geológica de España, Instituto Geológico y Minero de España. ISBN: 84-7840-546-1. Madrid, p. 550-554.

World Meteorological Organization 2010. Guide to Climatological Practice. WMO-No. 100, Third Edition, Chapter 2 – 5, 182 pp.