



Universidad
Rey Juan Carlos



POLITÉCNICA

Trabajo Fin de Máster

Efectos sobre el balance de agua azul y agua verde de la restauración post-incendio en los montes del T.M. de La Zoma (Te).

Máster Universitario en Restauración de Ecosistemas

Presentado por:

D./D^a Guillermo Enguita Sánchez

Tutor director:

Dr./Dra. D./D^a José Manuel Nicolau Ibarra

Dr./Dra. D./D^a Ramón Juan Reiné Viñales

Tutor Académico:

Dr./Dra. D./D^a José María Rey Benayas

Alcalá de Henares, a 25 de septiembre de 2017

D./D^a José Manuel Nicolau Ibarra
D./D^a Ramón Juan Reiné Viñales

CERTIFICA:

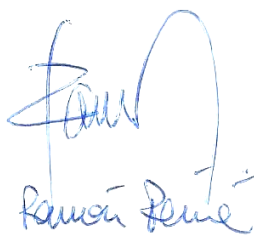
Que el trabajo titulado: Efectos sobre el balance de agua azul y agua verde de la restauración post-incendio en los montes del T.M. de La Zoma (Te), ha sido realizado bajo mi dirección por el alumno/a D./D^a Guillermo Enguita Sánchez

En Huesca, a 5 de septiembre de 2017

Firmado:

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'J.M. Nicolau', enclosed within a hand-drawn oval.

J.M. NICOLAU

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Ramón Reiné', with a large, stylized loop at the top.

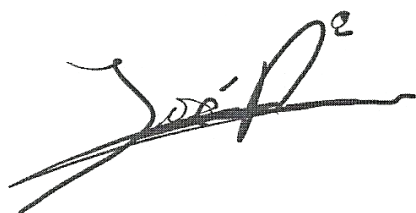
Ramón Reiné

D. José M^a Rey Benayas, Catedrático de Ecología de la Universidad de Alcalá

CERTIFICA:

Que el Trabajo Fin de Máster del Máster U. en Restauración de Ecosistemas, titulado "Efectos sobre el balance de agua azul y agua verde de la restauración post-incendio en los montes del T.M. de La Zoma (Teruel)", ha sido realizado bajo mi tutorización académica por el alumno D. Guillermo Enguita Sánchez.

En Alcalá de Henares, a 5 de septiembre de 2017



Firmado: José M^a Rey Benayas

**FORMULARIO DE AUTORIZACIÓN PARA LA INCLUSIÓN DEL TRABAJO DE FIN DE MASTER EN
LOS ARCHIVO ABIERTOS INSTITUCIONALES DE LAS UNIVERSIDADES QUE IMPARTEN LA TITULACIÓN**

TÍTULO DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER:

Efectos sobre el balance de agua azul y agua verde de la restauración post-incendio en los montes del T.M. de La Zoma (Te)

1.- ESTUDIANTE (AUTOR)

APELLIDOS Y NOMBRE:

ENGUITA SÁNCHEZ, GUILLERMO

DNI:

73159338 H

TITULACIÓN:

Máster Universitario en Restauración de Ecosistemas

2.- TUTOR DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER

APELLIDOS Y NOMBRE:

NICOLAU IBARRA, JOSÉ MANUEL
REINÉ VIÑALES, RAMÓN JUAN

DNI: 17 205 431 M

18162933P

DEPARTAMENTO O INSTITUCIÓN:

Universidad de Zaragoza

Los abajo firmantes:

☒ **AUTORIZAN**

☐ **NO AUTORIZAN**

El depósito y puesta a disposición del Trabajo Fin de Máster en los Repositorios Institucionales de las Universidades que imparten la titulación, de acceso libre y gratuito a través de Internet, y otorgando las condiciones de uso de la licencia Creative Commons *reconocimiento-uso no comercial-sin obra derivada*.

Más información en: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/deed.es>

Firmado: El Autor

Firmado: El Tutor del Trabajo Fin de Máster

**FORMULARIO DE AUTORIZACIÓN PARA LA INCLUSIÓN DEL TRABAJO DE FIN DE MASTER EN
LOS ARCHIVO ABIERTOS INSTITUCIONALES DE LAS UNIVERSIDADES QUE IMPARTEN LA TITULACIÓN**

TÍTULO DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER:

Efectos sobre el balance de agua azul y agua verde de la restauración post-incendio en los montes del T.M. de La Zoma (Teruel)

1.- ESTUDIANTE (AUTOR)

APELLIDOS Y NOMBRE: ENGUITA SANCHEZ, GUILLERMO	DNI: 73159338 H
TITULACIÓN: Máster Universitario en Restauración de Ecosistemas	

2.- TUTOR DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER



APELLIDOS Y NOMBRE: JOSÉ M. REY BENAYAS	DNI: 05386936Z
DEPARTAMENTO O INSTITUCIÓN: Dpto. de Ciencias de la Vida de la Universidad de Alcalá	

Los abajo firmantes:

- ☒ AUTORIZAN
☐ NO AUTORIZAN

El depósito y puesta a disposición del Trabajo Fin de Máster en los Repositorios Institucionales de las Universidades que imparten la titulación, de acceso libre y gratuito a través de Internet, y otorgando las condiciones de uso de la licencia Creative Commons *reconocimiento-uso no comercial-sin obra derivada*.

Más información en: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/deed.es>

Firmado: El Autor 	Firmado: El Tutor del Trabajo Fin de Máster 
---	--

Índice

1. Abstract y resumen.....	1
2. Introducción.....	3
3. Antecedentes y objetivos.....	6
4. Material y método	8
4.1. Caracterización de la zona de estudio	8
4.1.1.Localización.....	8
4.1.2.Geología y morfología	9
4.1.3.Vegetación	10
4.2. Desarrollo del trabajo	11
4.2.1.Aplicación del modelo de Zhang <i>et al.</i> , (2001).....	11
4.2.1.1. Introducción al modelo de Zhang <i>et al.</i> , (2001).....	11
4.2.1.2. Aplicación del modelo de Zhang <i>et al.</i> , (2001) en el área de estudio	12
4.3. Generación de las series sintéticas de futuro.....	15
4.4. Análisis estadístico.....	15
5. Resultados	17
5.1. Aplicación del modelo de Zhang <i>et al.</i> , (2001) bajo la misma serie climática	17
5.1.1.Caracterización de los escenarios	17
5.1.2.Comparación entre cubiertas.....	18
5.1.3.Comparación entre escenarios	19
5.1.4.Diferencias de agua azul	21
5.2. Aplicación del modelo de Zhang <i>et al.</i> , (2001) bajo distinta serie climática	23
5.2.1.Caracterización de los escenarios	23
5.2.2.Comparación entre cubiertas.....	24
5.2.3.Comparación entre escenarios	25
5.2.3.1. Comparación sin la situación post-incendio.....	26
5.2.3.2. Comparación sin la situación plantación forestal.....	27
5.2.3.3. Comparación de los escenarios plantación forestal y post-incendio.....	28
5.2.3.4. Comparación entre todos los escenarios	29
6. Discusión.....	30
7. Conclusiones	35
8. Agradecimientos.....	36
9. Bibliografía.....	37

10. Anexos..... 44

Anexo I: Mapas de distribución de cubiertas en el área de estudio

1. Abstract y resumen

Abstract: On the 22nd of July of 2009, the regions of Andorra Sierra de Arcos, Cuencas Mineras and Maestrazgo (Teruel) were affected by a wildfire. The burnt area covered 7300 hectares approximately. The municipality of La Zoma was the most affected area with 70% of its territory burnt. In these circumstances a project of ecological restoration was developed in La Zoma. This project includes the optimization of the hydrologic cycle by means of creating a balance between the production of blue and green water. Recent studies have shown a connection between the changes in forest covers and changes in water yield. In this paper, the change and evolution of La Zoma's hydrologic cycle has been studied in five different temporal scenarios using the model developed by Zhang *et al.*, (2001). The situations have been: traditional situation in 1956, a pre-fire situation in 2009 resulting from the forest plantations of the sixties, after fire situation in 2012 and two future scenarios in 2064 after the restoration project ("*Plantando agua*"), one of them contemplating a climate change scenario. Finally, results shows that the water balance varies by changing the vegetation cover, the forest covers constituting the ones that use the highest amount of water, and the herbaceous, the least (13% less approx.). In addition, it has been observed that the climate has more influence than changes in plant cover in water production. Precipitation determines the limits of green and blue water production and temperature and plant cover determine in what proportion it is distributed.

Key words: Evapotranspiration, wildfires, forest management, Zhang model, land use, ecological restoration.

Resumen: El 22 de julio de 2009 se produjo un incendio forestal en las comarcas turolenses de Andorra Sierra de Arcos, Cuencas Mineras y Maestrazgo afectando a una superficie de 7300ha. El T.M. de la Zoma fue el municipio más afectado al calcinarse el 70% de su territorio. En estas circunstancias se desarrolló un proyecto de restauración ecológica del municipio. El proyecto incluye la optimización del ciclo del agua como un balance equilibrado entre producción de agua azul y verde. Recientes estudios manifiestan que los cambios en las cubiertas forestales producen cambios hídricos en las cuencas. Se ha empleado el modelo de Zhang *et al.*, (2001) para estudiar el cambio y evolución del ciclo hidrológico en La Zoma en distintos escenarios temporales: un escenario tradicional correspondiente al año 1956, una situación de pre-incendio del año 2009 resultado de las plantaciones forestales de los años sesenta, una situación de post-incendio en el año 2012, dos situaciones de futuro tras la restauración del proyecto “*Plantando Agua*” en 2064, y de ellas contemplando el escenario anterior un escenario de cambio climático simulado. Los resultados muestran que el balance hídrico varía al modificar la cubierta vegetal, siendo las cubiertas forestales las que más agua consumen y las herbáceas las que menos (13% menos aprox). Además se ha observado que el clima tiene más influencia en la variación del balance hídrico que las cubiertas vegetales, donde la precipitación determina los límites de producción de agua verde y azul, mientras que la temperatura y el tipo de cubierta determinan en qué proporción se reparte esta.

Palabras clave: Evapotranspiración, incendios forestales, gestión forestal, modelo de Zhang, usos del suelo, restauración ecológica.

2. Introducción

El papel de los bosques en el ciclo hidrológico ha suscitado interés a lo largo de la historia. Desde la época romana, pasando por la Edad Media o la Revolución Francesa se conservan textos y manuscritos que dan constancia al respecto de esta preocupación (Mc Culloch y Robinson, 1933; Andréassian, 2004). En nuestros días, el interés por el conocimiento de la relación bosque-agua perdura en debate entre dos paradigmas enfrentados a priori: el bosque como productor de agua y el bosque como consumidor (Ellison *et al.*, 2012).

Las antiguas políticas forestales se basaban en que el bosque era la mejor cubierta vegetal para incrementar el rendimiento hídrico de las cuencas y regular los flujos en la misma, favoreciendo además el aumento de precipitación (Calder, 2002; Calder *et al.*, 2007). Existen recopilaciones bibliográficas donde se quiere evidenciar el papel del bosque como productor de agua, aunque como señala Andréassian (2004), suelen tratarse más bien de conclusiones con bajo soporte científico y con alto arraigo en la sociedad por tradición. Por tanto, dicha concepción ha sufrido una renovación centrándose en una cuestión de escala para ser explicada. Tal y como se recoge en Gallart y Llorens (2003), se considera que los aumentos de evapotranspiración a causa de la cubierta forestal son compensados por aumentos de la precipitación a escala regional. Demostrar este hecho es complicado por cuestiones de escala (Gallart y Llorens, 2003; Ellison *et al.*, 2012). Aún así, existen experiencias en esta línea que han tratado explicar esta percepción concluyendo que los bosques no contribuyen al aumento local de la precipitación pero retroalimentan al sistema de precipitaciones, pudiendo aumentar la precipitación en otras regiones (Savenije, 1995; Calder, 1998, Ellison *et al.*, 2012). De esta manera puede haber una coexistencia entre paradigmas en función de la escala.

Por otra parte, la visión del bosque como consumidor de agua comenzó a ganar peso en la primera época del siglo XX tras las primeras grandes experiencias realizadas por Engler (1919), en Suiza, y Bates y Henry (1928), en Estados Unidos. Estos estudios evidenciaron que las cuencas con cubiertas boscosas producían menos escorrentía (Gallart y Llorens, 2003; Andréassian, 2004). Años más tarde, una recapitulación de más de 90 estudios de cuencas pareadas realizada por Hibbert (1967), y actualizada por

Bosch y Hewlett (1982), afianzan el papel de la vegetación en la respuesta hidrológica de las cuencas (Zhang *et al.*, 2001; Gallart y Llorens, 2003; Andréassian, 2004). A partir de entonces son numerosos los trabajos publicados en esta línea (Greenwood *et al.*, 2011; García-Ruiz y Lana-Renault, 2011; Zhao *et al.*, 2010; Li *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2017).

Paralelamente a estos estudios, tuvo lugar el desarrollo de modelos matemáticos que intentan estimar las relaciones entre precipitación y escorrentía en las cuencas hidrológicas. Los primeros de ellos no consideraban el papel de la vegetación en la evapotranspiración, y el consumo de agua quedaba determinado por la relación entre precipitación y la radiación neta que determina la evapotranspiración (Zhang *et al.*, 2001). Estos primeros modelos fueron los propuestos por Budyko (1958) y Pike (1964). Años más tarde Milly (1994) propone un modelo en el que ya se incluye a la vegetación como factor en el cálculo de la evapotranspiración en función de la capacidad radicular. Dooge *et al.* (1999) desarrollan otro modelo que no considera el papel de la vegetación pero introduce la idea del cambio de clima y como afecta a la precipitación y la escorrentía.

A raíz de estas herramientas desarrolladas, Zhang *et al.* (2001) proponen un modelo útil para estimar el efecto de la vegetación en la evapotranspiración, el cual permite cuantificar de una manera aproximada como afectan los cambios de cubiertas vegetales en el balance hídrico total (Komatsu *et al.*, 2012). Dicho modelo discrimina entre tipos genéricos de cubiertas vegetales en el cálculo de la evapotranspiración, partiendo de la base de que no toda la vegetación es igual de exigente en la demanda hídrica. La fórmula expuesta por Zhang *et al.* (2001) sirve para estudiar cómo evoluciona el balance hídrico entre agua azul y verde (Amatya & Trettin, 2007; Gao *et al.*, 2009; Li *et al.*, 2012; García-Estríngana *et al.*, 2014). Entendiendo el término agua azul como la aprovechable por la sociedad que transcurre formando los flujos de escorrentía y, por agua verde, aquella utilizada por la vegetación correspondiente a la fracción de agua que es evapotranspirada (Falkenmark, 2003; Ellison *et al.*, 2012).

Una posible aplicación del modelo de Zhang *et al.* (2001) tendría cabida en el campo de los incendios forestales al ser acontecimientos que perturban los ecosistemas produciendo grandes cambios en la composición de cubiertas del paisaje. Se tratan de

procesos naturales que son importantes en el mantenimiento de la biodiversidad (Bodí *et al.*, 2012). Así pues, los ecosistemas se rigen por sus propios regímenes de incendios. En muchas ocasiones el fuego ha tenido un papel negativo en la sociedad al afectar al ámbito socio-económico de la misma, relegando la concepción beneficiosa y ecológica del fuego. Por tanto, el verdadero problema reside en los procesos que llevan asociados cambios en los regímenes de incendios, y no en estos, ya que conducen al medio natural hacia un estado insostenible (Pausas, 2012). Los cambios de uso dados en la región mediterránea en el último siglo han producido el cambio en el régimen de incendios. Esto se debe al despoblamiento rural, el abandono de los campos y su matorralización o, entre otros factores, el interés por maximizar la producción forestal (Pausas, 2012; Herrero y Zavala, 2015). Por consiguiente, los incendios que se dan en este tipo de ecosistemas, que están fuera del régimen natural, son intensos y violentos, por lo que estos sí ponen en amenaza la estructura de los ecosistemas y la biodiversidad (Keeley *et al.*, 2012).

De esta manera, la restauración ecológica, ámbito en el que se desarrolla este trabajo, es una forma de gestionar estos ecosistemas que han sido degradados por fenómenos naturales o antrópicos (SER, 2004). Los paisajes generados a partir de proyectos de restauración ecológica deberían alcanzar regímenes sostenibles de incendios desde la perspectiva ecológica y social (Pausas, 2012). En definitiva, el modelo de Zhang *et al.*, (2001) puede ser de ayuda, entre otros, para analizar cómo afectan a nivel hidrológico los incendios forestales y las medidas de restauración adoptadas en consecuencia. De esta manera la relación bosque-agua adopta un papel importante en la consecución de una gestión integrada y sostenible de los recursos naturales con vistas al futuro (Gallart y Llorens, 2003; Ellison *et al.*, 2012; Ellison *et al.*, 2017).

3. Antecedentes y objetivos

El 22 de julio de 2009 se produjo un incendio forestal en las comarcas turolenses de Andorra Sierra de Arcos, Cuencas Mineras y Maestrazgo afectando a una superficie en torno a 7300 ha. El presente Trabajo Fin de Máster (TFM) se desarrolla en la superficie afectada por este incendio, en concreto, en los municipios de La Zoma (1.017 ha.), Cañizar del Olivar (210 ha.) y Castel de Cabra (7 ha.), (Contratas Ancar S.L., 2013).

En 2012, la Fundación Ecología y Desarrollo por encargo de la compañía Coca-Cola, que explota el manantial de Fuenmayor situado dentro del perímetro del incendio, pone en marcha un programa participativo entre los agentes de la comarca para identificar sus necesidades para la mejora de su territorio. La restauración de los montes quemados es elegida como la actuación más necesaria y se pone en marcha mediante la celebración de un Taller de Expertos organizado por la universidad de Zaragoza. A partir de las directrices básicas consensuadas en el Taller, la empresa Contratas ANCAR elaboró un Plan Director (*“Plantando Agua”*) con el visto bueno de la universidad de Zaragoza y la aprobación de la administración ambiental de la DGA.

No se trata de una reforestación convencional, sino de un proyecto de restauración forestal enfocado a diseñar montes capaces de hacer frente a los retos que éstos tienen en el siglo XXI: cambio climático, incendios forestales e incremento de la presión de los ungulados silvestres. Y, adicionalmente, un elemento original y novedoso: considerar el efecto de la revegetación sobre el balance agua azul –la que está disponible para el uso humano en acuíferos y cursos de agua superficiales- y agua verde –la transferida a la atmósfera por la vegetación. Sobre este último aspecto se desarrolla el presente TFM.

El contacto personal con el proyecto *“Plantando Agua”* comenzó en el año 2015, año desde el cual se viene colaborando en distintas tareas del proyecto y donde se realizó el Trabajo Fin de Grado de la titulación de Ciencias Ambientales titulado “Análisis histórico del balance de agua azul y agua verde en los montes del T.M. de La Zoma (Te) afectados por el incendio del año 2009” (Enguita, 2016). Se realizó bajo la dirección de los profesores José Manuel Nicolau Ibarra y Ramón Juan Reiné Viñales de la Escuela Politécnica Superior de Huesca. Dicho trabajo sienta las bases de este TFM

al haberse realizado una cartografía detallada del área de trabajo y al haber tenido las primeras experiencias con el modelo de Zhang *et al.*, (2001), empleado para el estudio del balance hídrico en la zona, cuyos resultados han sido el punto de partida en el diseño de este trabajo.

Por tanto, el TFM que se presenta a continuación parte del trabajo previo realizado compartiendo el mismo objetivo general: Estudiar la evolución del ciclo hidrológico en el área afectada por el incendio, según el tipo de cubiertas vegetales existentes en cinco escenarios temporales; un escenario tradicional correspondiente al año 1956, una situación de pre-incendio del año 2009 resultado de las plantaciones forestales de los años sesenta, una situación de post-incendio en el año 2012, un escenario de futuro una vez alcanzada la madurez en las repoblaciones contempladas en el proyecto de restauración “*Plantando Agua*” y, una última situación contemplando el escenario anterior con una hipótesis de cambio climático (reducción del 20% en la precipitación esperada y aumento de 8°C en la temperatura).

Del mismo modo, se persigue conseguir los siguientes objetivos específicos:

- Realizar estimaciones cuantitativas del balance hídrico agua azul-agua verde mediante la aplicación del modelo de Zhang *et al.*, (2001).
- Analizar cómo afecta la distribución de cubiertas vegetales y el clima sobre el balance de agua verde y agua azul.
- Comparar la influencia de ambos factores sobre el balance de agua verde y agua azul.

4. Material y método

4.1 Caracterización de la zona de estudio

4.1.1 Localización

El municipio de La Zoma ocupa la mayor extensión del área de trabajo. Se encuentra ubicado en la rama suroriental del macizo ibérico. En concreto el área de estudio corresponde a una umbría –ampliamente conocida como la umbría de Majalinos- ubicada en un accidente geológico de gran relevancia: el salto de falla entre la Superficie de Erosión Fundamental (1.400-1.600 m) y las sierras y parameras que descienden hacia la Depresión del Ebro. Hidrológicamente se localiza en la cabecera del río Estercuel, afluente del río Martín, que a su vez vierte sus aguas en el Ebro.

La ejecución del proyecto “Plantando Agua” se extiende a 1.234 hectáreas de la comarca de Cuencas Mineras, repartidas entre los municipios de La Zoma (1.017 ha), Cañizar del Olivar (210 ha) y Castel de Cabra (7 ha). El T.M de La Zoma fue el municipio más afectado entre aquellos que sufrieron el fuego, siendo el 70% de la superficie quemada parte de su territorio (Contratas Ancar S.L., 2013).

La zona de trabajo se compone de fincas de titularidad privada y montes de utilidad pública (M.U.P). Las parcelas privadas suponen un total de 390,5 ha, siendo un 38,4% del T.M. Por otra parte, los montes públicos afectados son: TE-84, Cabezo del hierro (334,7ha quemadas); y TE-85, Solana de la Sierra (292,1 ha); ambos gestionados por el departamento de Medio Ambiente en La Zoma. El 50% de la superficie afectada por el incendio corresponde con las hectáreas arrasadas de estos montes públicos. Además se encuentran los montes TE-3138, La Corona; y TE-3144, pertenecientes a los municipios de Castel de Cabra y Cañizar del Olivar donde se dañaron un número de hectáreas menor pero donde se han proyectado actuaciones también. El área de trabajo queda enmarcada en la hoja 518 de la serie 1/50.000 del I.G.N, HUSO 30T XL91. Se sitúa entre las siguientes coordenadas UTM (Figura 1) (Contratas Ancar S.L., 2013):

- Norte: X, 699466; Y, 4518766.
- Sur: X, 700920; Y, 4514560.
- Este: X, 704631; Y, 4516432.
- Oeste: X, 697940; Y, 4515334.

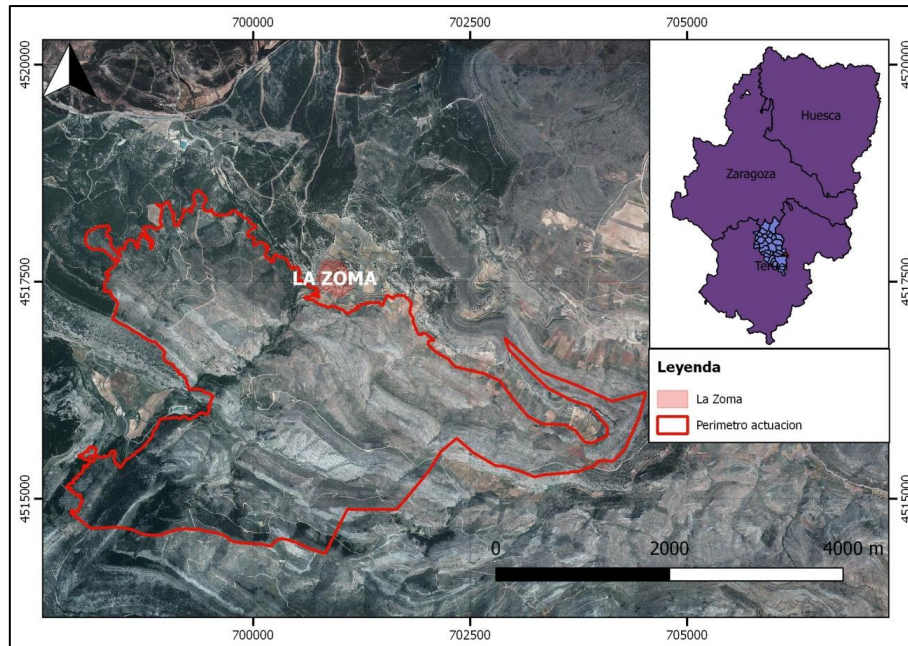


Figura 1. Localización del área de trabajo en el municipio de La Zoma (Teruel). Fuente: PNOA 2012. Elaboración propia.

4.1.2 Geología y geomorfología

La cuenca del río Martín presenta abundantes afloramientos de los periodos Jurásico y Cretácico. Dicho esto, los materiales más abundantes son calizas, margas y areniscas del Cretácico inferior; y calizas y dolomías del Cretácico superior. También se pueden encontrar zonas dominadas por conglomerados, arcillas y areniscas de edades mayores. En algunos fondos de valle del lugar, se dan acumulaciones basales de arcillas y margas. Así, el área de estudio se asienta sobre calizas, dolomías y margas principalmente. Por tanto, el área afectada por el incendio tiene carácter básico general, a excepción de algunas zonas ácidas de edad más antigua dominadas por arcillas, areniscas y conglomerados, como sucede en M.U.P. de Cabezo del Hierro (IGME, 2017).

En cuanto a la geomorfología, se puede ver fácilmente en el campo relieves plegados conformando largos anticlinales y sinclinales sobre los cuales se ha formado la red fluvial kárstica en parte de la zona de trabajo. Existen numerosas barrancos, como el de la Carbonera, a causa de la red fluvial que causan problemas de erosión y formaciones derivadas como conos de deyección en el lugar. En las áreas donde predominan las litologías cuarzíticas, hay formaciones de grandes cuevas, barras y

crestas. Además, existen zonas afectadas por fuertes acarcavamientos sobre los materiales arcillosos (San Román et al., 2009; Contratas Ancar S.L., 2013).

4.1.3 Vegetación

El emplazamiento del proyecto se clasifica dentro del piso bioclimático supramediterráneo y ombroclima seco (350-600 mm), donde de manera general son típicos los quejigares, encinares, melojares y sabinares (Rivas-Martínez, 1987). El paisaje tradicional previo al incendio es el resultado del manejo del medio natural por parte del hombre en busca de aprovechamientos de leña, carbón, cultivos y pastos. La agricultura se desarrolló más sobre las zonas de encinares y quejigares quedando las zonas elevadas de pinar, melojo y quejigo para el pastoreo principalmente (Contratas Ancar S.L., 2013).

Los aprovechamientos del monte se redujeron al mínimo a mediados del siglo. Este hecho junto a las políticas de reforestación desarrolladas la comarca, entre 1955 y 1975, por el del antiguo Instituto para la Conservación de la Naturaleza (ICONA) fue el mayor modelador del paisaje previo al incendio de 2009 (Lerma, 2012). Se densificaron las zonas forestales y arbustivas, iniciándose además la matorralización de los pastos. Por tanto, las especies coníferas predominan sobre frondosas en los montes afectados.

En cuanto a especies arbóreas, principalmente se daban formaciones de pinares naturales de *Pinus sylvestris* y *Pinus nigra*. Tras el incendio, han quedado reducidas a dos manchas de pinar, una en la umbría del alto de Majalinos y otra en la zona de la fuente de la Navarra. Aparecen también especies acompañantes como *Quercus ilex*, *Quercus faginea*, *Sorbus domestica*, *Juniperus communis*, *Juniperus thurifera* o *Juniperus oxycedrus*. A causa de las repoblaciones mencionadas anteriormente, existen manchas de *Pinus pinaster* y *Pinus nigra*, las cuales se están regenerando tras el fuego (ej. zona de Cabezo del Hierro). Por otra parte, en las zonas pedregosas existen sabinares y enebrales muy afectados por el incendio. Las laderas de solana sobre cuevas calizas poseían comunidades de encinar muy intervenido, que se vio muy afectado por el incendio. Actualmente se encuentran en proceso de recuperación por rebrote. La comunidad de mayor valor ecológico de la zona era la acebeda de la finca de La Mezquitilla, bosque de pino silvestre con numerosos pies de acebo (*Ilex aquifolium*) y algunos de tejo (*Taxus baccata*).

4.2 Desarrollo del trabajo

El presente trabajo tuvo dos bloques principales para la consecución de los objetivos específicos: aplicación del modelo de Zhang *et al.*, (2001) y análisis estadístico. Ambos bloques se reprodujeron en las distintas situaciones para abordar el estudio de la evolución del balance entre agua verde y agua azul según el tipo de cubiertas vegetales existentes a lo largo del tiempo. Las épocas seleccionadas se ajustaron a la información digital disponible, empleada en la elaboración previa de cartografía (Anexo I), y estas fueron: un escenario tradicional previo al éxodo rural de los años sesenta; año 2009, justo antes del incendio resultado de las plantaciones forestales; año 2012, tras el incendio y año 2064, para las situaciones post-restauración simuladas en el futuro bajo cambio climático y sin él.

4.2.1 Aplicación del modelo de Zhang *et al.*, (2001)

4.2.1.1 Introducción al modelo de Zhang *et al.*, (2001)

El modelo de Zhang *et al.*, (2001) consiste en una herramienta práctica para predecir las consecuencias a largo plazo de las reforestaciones, la cual se desarrolló teniendo en cuenta estudios sobre cambios de uso del suelo a escala de cuenca (Zhang *et al.*, 2001; Li *et al.*, 2012; Komatsu *et al.*, 2012; García-Estríngana *et al.*, 2014). El modelo está basado en la ecuación del balance hidrológico:

$$P = ET + Q + D + \Delta S$$

Siendo P la precipitación, ET la evapotranspiración real, Q la escorrentía superficial, D la recarga de agua subterránea y ΔS el cambio en el almacenamiento de agua del suelo, que puede asumirse cero para periodos de tiempo anuales años (Zhang *et al.*, 2001; García-Estríngana *et al.*, 2014).

Según Zhang *et al.*, (1999), la evapotranspiración real se puede expresar en función de la precipitación y la evapotranspiración potencial (ETP) del siguiente modo:

$$ET = \frac{P \left(1 + \frac{wETP}{P} \right)}{1 + \frac{wETP}{P} + \frac{P}{ETP}}$$

Donde ETP es la evapotranspiración potencial, calculada en función de la temperatura para distintas latitudes, y w el coeficiente que representa la disponibilidad

de agua para las plantas (Zhang *et al.*, 1999). Años más tarde, Komatsu *et al.*, (2012), demuestran que el modelo de Zhang *et al.*, (2001) sobrestima el factor ETP en las regiones templadas y boreales. Proponen la corrección de las ETP calculadas por Zhang *et al.*, (1999) para distintas latitudes de la siguiente manera:

$$E_0 = 0.488T^2 + 27.5T + 412 \quad (R^2 > 0.99)$$

Con T como la temperatura media anual del lugar en cuestión. De esta manera se emplea la ecuación revisada por Komatsu *et al.* (2012):

$$ET = \frac{P \left(1 + \frac{wE_0}{P} \right)}{1 + \frac{wE_0}{P} + \frac{P}{E_0}}$$

El modelo asume el reparto de la precipitación total entre evapotranspiración y escorrentía o drenaje profundo, por lo que sirve para mostrar las consecuencias derivadas de los cambios de uso de suelo sobre ambos factores de la ecuación (García-Estríngana *et al.*, 2014). Dicho esto se ha identificado el agua verde con la evapotranspiración (ET) y el agua azul como el agua libre en escorrentía o drenaje profundo (Q), resultante de la diferencia entre ET y P. Por tanto:

$$P = ET + Q$$

4.2.1.2 Aplicación del modelo de Zhang *et al.*, (2001) en el área de estudio

El modelo se aplicó para las situaciones establecidas de dos maneras diferentes, siendo necesario en todos los casos los siguientes datos: temperatura media anual, precipitación total anual, coeficiente de disponibilidad de agua (w) de cada cubierta vegetal y superficie de las mismas en cada escenario.

Las dos aproximaciones que se abordaron fueron:

- a) Aplicación del modelo de Zhang *et al.*, (2001) bajo una misma serie climática continua: Se empleó la misma serie ininterrumpida de 60 años en cada escenario (1957-2016). La serie climática utilizada corresponde a la localidad de Montalbán, al ser el emplazamiento más cercano del que se pudo obtener una serie climática larga y continua que permitiera tener un n

de muestras adecuado. El planteamiento pretende estudiar la importancia de la distribución de cubiertas sobre el balance hídrico al estudiarse todos los escenarios bajo el mismo clima. Se emplearon en las 4 situaciones principales. En este caso, los datos climáticos se obtuvieron de dos fuentes para formar la serie continua, estas fueron las siguientes (Tabla 1):

Tabla 1. Fuentes de los datos de P y T de la serie continua de 60 años para la aplicación del modelo de Zhang et al., (2001).

Escenario	Temperatura y precipitación	Periodo
Todos	Estudio de Recursos de la cuenca del Ebro (CHE, 1993)	1957-1991
	Estación meteorológica Montalbán (DGA)	1992-2016

- b) Aplicación del modelo bajo distintas series climáticas: Se empleó para cada escenario una serie climática de 15 años. Se seleccionó la información relativa a los siete años anteriores y posteriores a los años de referencia establecidos en cada escenario para que el clima fuera acorde a la vegetación existente en ese periodo. Se exceptuó el periodo post-incendio en el que se utilizó la misma serie que en el escenario pre-incendio, al ser dos escenarios cuyos años de referencia eran muy próximos. Se emplearon los 4 escenarios anteriores, más un escenario de cambio climático marcado donde se simuló una reducción del 20% en la precipitación y aumento de 8°C en la temperatura (escenario de emisión medio alto (A2), según IPCC (2007)). Las series climáticas de futuro se elaboraron según lo dispuesto en el apartado 4.3. El planteamiento pretende evaluar el efecto del clima en el balance hídrico. La Tabla 2 sintetiza las fuentes de los datos climáticos utilizados en este caso:

Tabla 2. Fuentes de los datos de P y T de la serie discontinua para la aplicación del modelo de Zhang et al., (2001).

Escenario	Temperatura y precipitación	Periodo
Tradicional	Estudio de Recursos de la cuenca del Ebro (CHE, 1993)	1957-1971
Plantaciones forestales	Estación meteorológica Montalbán (DGA)	2002-2016
Post-incendio	Estación meteorológica Montalbán (DGA)	2002-2016
Restauración	Elaboración serie sintética	2064-2078
Restauración (cambio climático)	Elaboración serie sintética con supuesto de cambio climático	2064-2078

Por otra parte, los coeficientes de disponibilidad de agua (w) utilizados en la aplicación del modelo fueron 0,1 para suelo desnudo, 0,5 para herbáceo y cultivos, 1 para vegetación mixta y 2 para bosque (Zhang *et al.*, 1999; 2001). Entendemos por bosque como la cubierta forestal con una alta densidad de pies; herbáceo, como zonas de pastos y cultivos; vegetación mixta, como la mezcla de matorral-herbáceos y bosque de baja densidad de pies; y suelo desnudo, como las extensiones de terreno sin vegetación (ej. pista forestal) o afloramientos rocosos.

Las superficies de cada cubierta vegetal para cada situación se obtuvieron de los datos extraídos en la digitalización de los escenarios realizada en el Trabajo Fin de Grado mencionado (Enguita, 2016).

Con posterioridad, toda la información se incorporó a una hoja Excel donde se programó la formulación descrita anteriormente para estimar el modelo de Zhang et al. (2001) y así obtener los valores de agua verde y agua azul para cada uno de los años de cada escenario estudiado.

Al aplicar el modelo se obtienen volúmenes en mm por cada cobertura, los que se identifican como valores unitarios. Finalmente se expresaron en m^3/ha . A continuación, realizando el cambio de unidades oportuno, y multiplicando por las hectáreas calculadas de cada superficie, se obtienen volúmenes totales en m^3 . Sumando

los volúmenes de escorrentía (Q) y evapotranspiración (ET) de cada cubierta se obtienen los volúmenes totales de agua azul y verde.

Una vez obtenidos los valores, se calcularon los resultados del balance de agua en tanto por uno. También se calcularon diferencias para los valores de agua azul y verde entre los distintos escenarios, lo que se denominó ahorros. Sobre estos valores y los totales se realizaron análisis estadísticos (véase 5.4).

4.3 Generación de las series sintéticas de futuro

Para aplicar el modelo de Zhang *et al.*, (2001) en las situaciones de futuro se generó una serie sintética a partir de la serie completa de 60 años del periodo 1957-2016. Posteriormente se trabajó sobre esta para obtener la serie bajo efecto de cambio climático marcado. Ambas series se obtuvieron siguiendo la metodología empleada por García-Estríngana *et al.*, (2014), basada en la regionalización de escenarios de cambio climático para España por Brunet *et al.*, (2009).

De esta manera se obtuvo la serie del periodo 2017-2100 mediante la generación de una serie datos aleatorios de distribución normal con la media y desviación típica de la serie 1957-2016. Después se generó la serie sintética bajo condiciones de cambio climático marcado según (reducción del 20% en la precipitación y aumento de 8°C en la temperatura, (IPCC, 2007)). Según la metodología seguida, se calcula la variación anual para que en 2100, desde el año tomado de referencia, la temperatura media anual haya aumentado en torno a 8°C y la precipitación total anual se haya reducido un 20%. Este valor de variación se multiplica por la diferencia entre el año de cálculo y el año tomado de referencia y por el valor de precipitación o temperatura de ese año. Después esa cuantía se suma al valor de temperatura o precipitación, según corresponda. La operación se repite año a año hasta completar la serie.

4.4 Análisis estadístico

Se trataron estadísticamente los volúmenes de agua verde y azul obtenidos. Se realizaron comparaciones estadísticas entre escenarios, cubiertas y entre las diferencias de agua azul calculadas. Se operó de forma similar en ambos planteamientos de aplicación del modelo de Zhang *et al.*, (2001).

Se calculó media y desviación estándar para cada serie de datos. De forma general, para comparar los volúmenes finales de agua azul y agua verde producidos en los cuatro o cinco escenarios, según el caso, se utilizó el test no paramétrico de Kruskal-Wallis para muestras independientes. Cuando el resultado de este test fue significativo para la separación de medias, se realizó la prueba de U de Mann-Whitney realizando comparaciones pareadas entre resultados. El mismo procedimiento se llevó a cabo para comparar los valores unitarios de agua azul y agua verde producido en cada una de las coberturas dentro de cada escenario y para comparar las diferencias de agua verde y azul entre escenarios. En todos los casos se utilizó el programa informático R versión 3.4.1 (R Core Team, 2017).

5. Resultados

5.1 Aplicación del modelo de Zhang *et al.*, (2001) bajo la misma serie climática

5.1.1 Caracterización de los escenarios

Como se muestra en la Figura 2, la serie de 60 años que se conformó presenta un valor medio de temperatura anual de 13,5°C. El máximo valor y el mínimo de la serie se dieron en los años 1990 y 1993, donde se registraron 15,1°C y 11,5°C de media anual respectivamente.

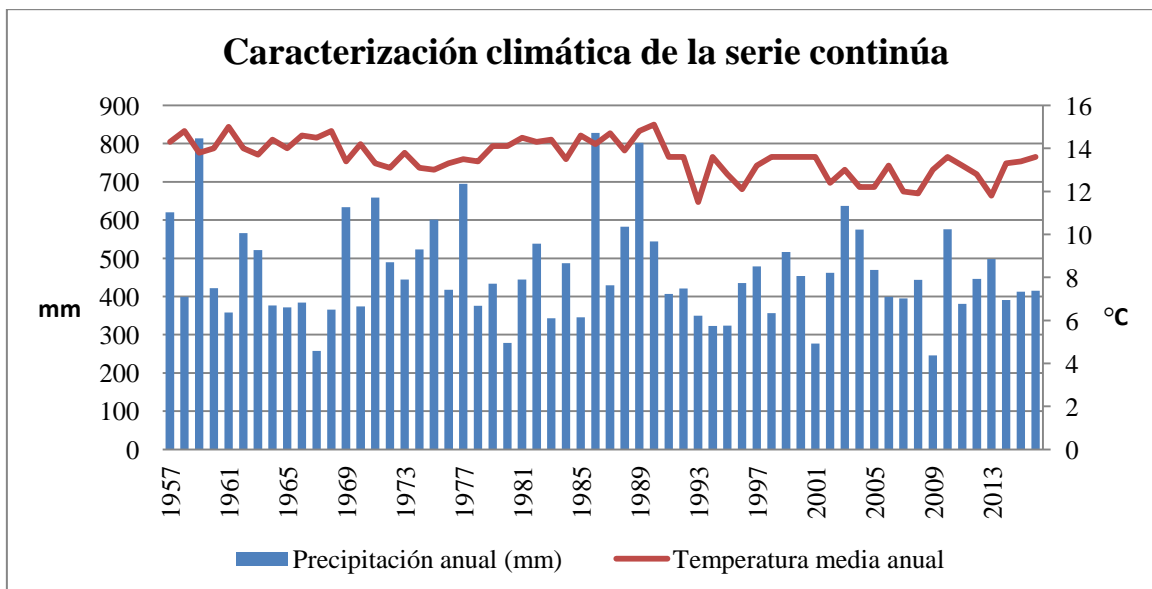


Figura 2. Precipitación total anual (mm) y temperatura media anual de la serie continua de 60 años (1957-2016) empleada para cada escenario de aplicación del modelo de Zhang *et al.*, (2001)

Por otra parte, la media de la precipitación total anual fue de 460 mm, registrándose varios años en los que se alcanzaron los 800 mm anuales (1959, 1986 y 1989). La precipitación mínima está en torno a los 200 mm y 300 mm anuales siendo los años 1967, y 2009 donde se registró menos precipitación.

En cuanto a la disposición de cubiertas vegetales, se muestran en la Figura 3 los resultados obtenidos en el trabajo de digitalización y fotointerpretación previo (Enguita, 2016). La suma total de hectáreas afectadas es de 1257, valor ligeramente mayor a lo dispuesto en el Plan Director por causas técnicas. Se puede observar como la superficie de bosque aumenta entre el escenario tradicional y la situación previa al incendio, donde alcanza su valor máximo. A continuación disminuye considerablemente en la situación

post-incendio y, finalmente, aumentaría hasta alcanzar valores ligeramente superiores a la situación tradicional tras el efecto de la restauración especificada según el Plan Director.

La superficie herbácea es la mayoritaria en el escenario tradicional. Disminuye alcanzando su valor más bajo en la época pre-incendio tras las plantaciones forestales. Después del incendio, llega a su máxima extensión, cercana a las 850 hectáreas. A continuación descendería con la restauración quedándose en valores intermedios entre la situación anterior y posterior al incendio.

La vegetación mixta sigue un comportamiento similar al bosque aunque esta siempre es menor en extensión. Por último, la superficie de suelo desnudo es la más baja en todos los escenarios, queda reservada a los afloramientos rocosos y pistas forestales. La cubierta asciende ligeramente tras el incendio de 2009 pasando de 15 a 26,5 hectáreas.

La distribución espacial de las cubiertas en cada situación se puede ver en el Anexo I.

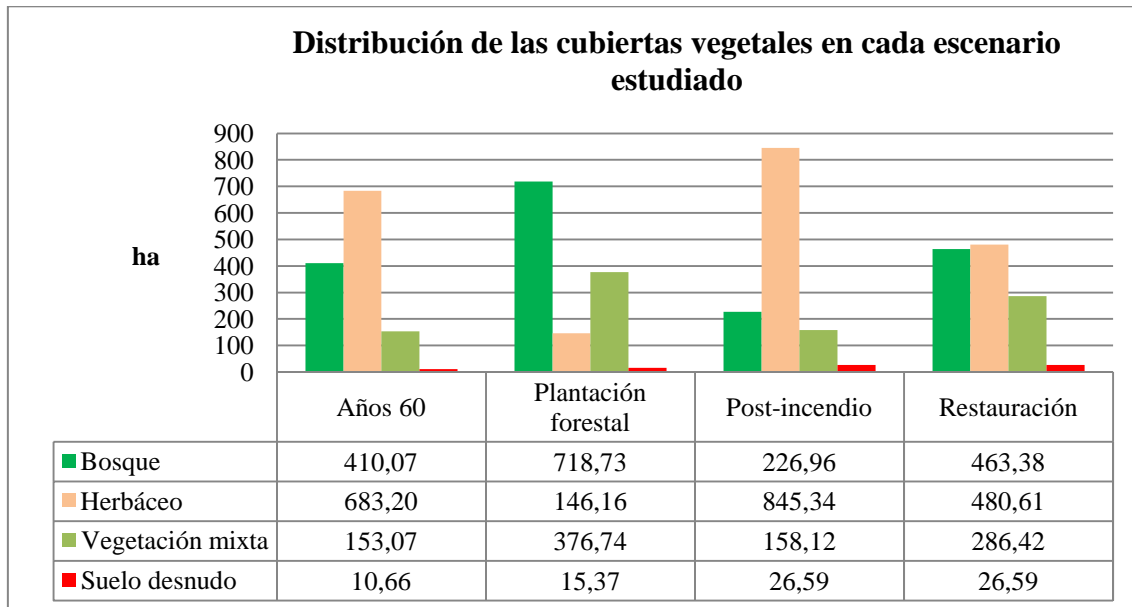


Figura 3. Distribución y extensión (ha) de las cubiertas vegetales en cada escenario estudiado. Fuente: (Enguita, 2016)

5.1.2 Comparación entre cubiertas

Los resultados obtenidos muestran que la cubierta boscosa es la que más evapotranspira, seguido de la cubierta mixta, herbácea y por último la cubierta desnuda.

Los valores unitarios de agua azul tienen un comportamiento complementario siendo la cubierta desnuda la que produce más escorrentía, seguido de la cubierta herbácea, mixta y boscosa en dicho orden (Figura 4).

Para agua verde se han dado diferencias significativas entre las cubiertas bosque, desnudo y herbácea, y, además entre la cubierta desnuda y herbácea (test de Kruskal Wallis $p < 0,0001$). En el caso de agua azul, se ha obtenido el mismo resultado a excepción de no haberse dado diferencias significativas entre la cubierta mixta y herbácea (test de Kruskal Wallis $p < 0,0001$).

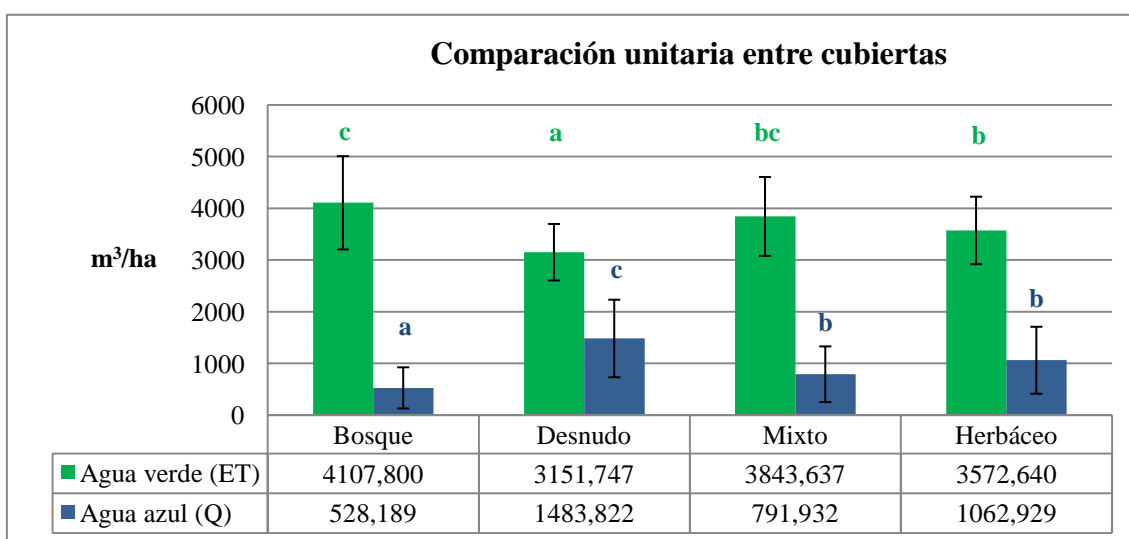


Figura 4. Comparación entre cubiertas bajo una misma serie climática. Valor medio y desviación estándar. ET= Evapotranspiración, Q=escorrentía. Test de Kruskal Wallis ($n=240$; $p < 0,0001$). Las letras iguales entre tipo de cubierta marcan que no hay diferencias significativas según la prueba de U de Mann Whitney para $p < 0,05$.

5.1.3 Comparación entre escenarios

Los resultados obtenidos para los valores de agua verde y azul totales muestran diferencias significativas únicamente para agua azul como se muestra en la Figura 5 (agua verde: test de Kruskal Wallis $p=0,29$; agua azul: test de Kruskal Wallis $p=0,015$). Las diferencias se obtuvieron entre la situación de plantación forestal y del escenario post-incendio.

En cuanto a agua verde se refiere, la evapotranspiración está en torno a cinco millones en todos los escenarios siendo la situación de plantación forestal donde se obtuvo el valor más alto. Por el contrario, en la situación post-incendio se obtuvo el

valor más bajo en torno a los $4,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ de agua verde. Por último, la situación tras la restauración y tradicional tuvieron resultados bastante similares.

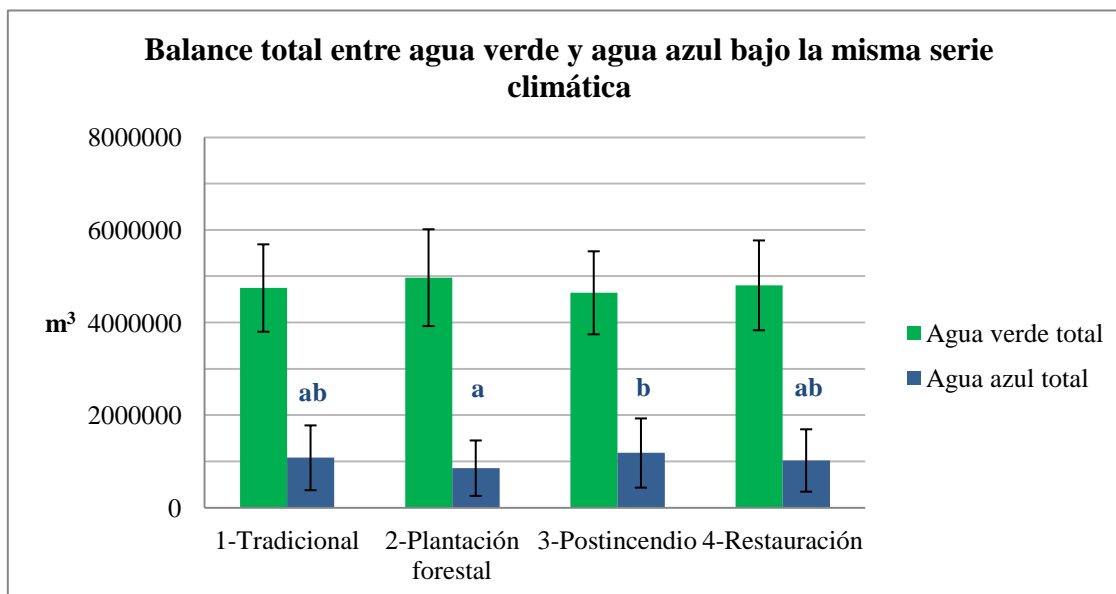


Figura 5. Comparación entre escenarios bajo una misma serie climática. Valor medio y desviación estándar. Test de Kruskal Wallis ($n=240$; agua verde: $p=0,29$; agua azul: $p=0,015$). Las letras iguales marcan que no hay diferencias significativas según la prueba de U de Mann Whitney para $p<0,05$.

Respecto al agua azul, en la situación post-incendio la cantidad de agua disponible es mayor. Después el escenario tradicional y restauración vuelven a mostrar valores similares siendo el del primero ligeramente mayor. Por último, más distanciado se encuentra la situación resultado de la plantación forestal próxima al millón y medio de metros cúbicos de agua en la superficie estudiada. Al revisar el comportamiento a lo largo del tiempo, vemos que se reduce la producción entre el escenario tradicional y el previo al incendio, tras éste se alcanza el máximo en torno a $1,2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ de producción, mostrando diferencias significativas entre ambos escenarios. Por último después de la ejecución de la restauración en el futuro, se vuelve a cantidades parecidas a las del escenario tradicional.

En la línea de lo anterior, al realizar las comparaciones de los valores de agua verde y azul en tanto por uno, se ha obtenido el mismo comportamiento. En esta ocasión se dan diferencias significativas tanto para agua verde como para agua azul (Figura 6). Las diferencias se han dado entre los escenarios tradicional y post-incendio con plantación forestal (agua verde: test de Kruskal Wallis $p<0,0001$; agua azul: test de Kruskal Wallis $p<0,0001$).

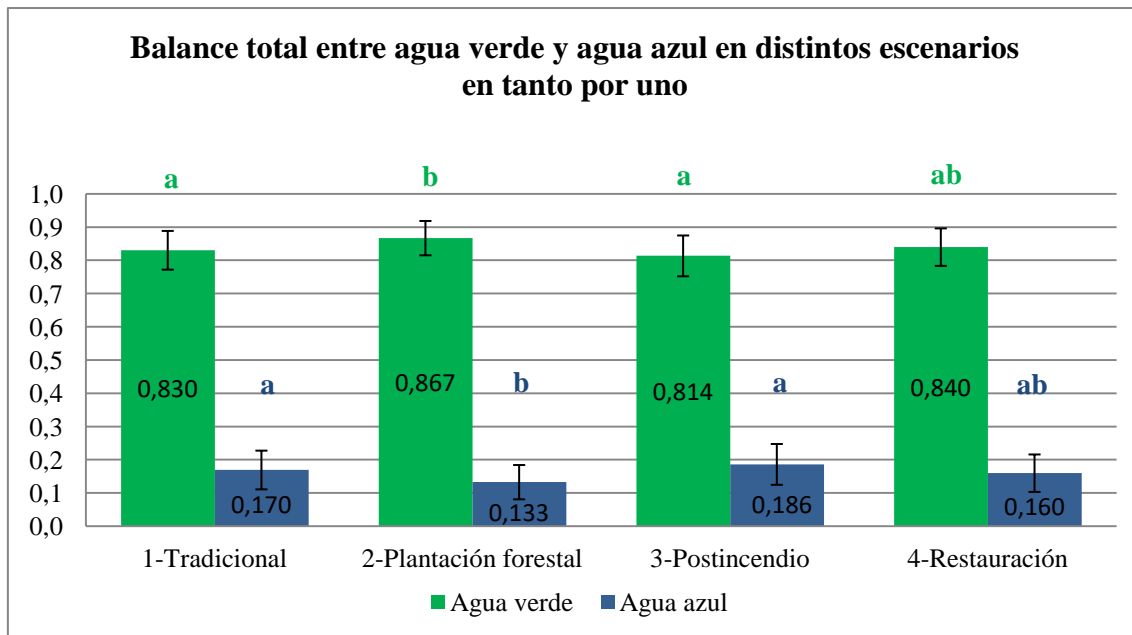


Figura 6. Comparación en tanto por uno de agua verde y azul entre escenarios bajo una misma serie climática. Valor medio y desviación estándar. Test de Kruskal Wallis (n=240; agua verde: $p<0,0001$; agua azul: $p<0,0001$). Las letras iguales entre escenarios marcan que no hay diferencias significativas según la prueba de U de Mann Whitney para $p<0,05$.

5.1.4 Diferencias de agua azul

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 3. Señalar que solo se presentan las diferencias obtenidas para los valores de agua azul entre escenarios al ser complementarias a las de agua verde. Las diferencias representan la ganancia o pérdida de agua azul en m^3 entre escenarios asociado a las cubiertas para una misma precipitación. Como se puede observar en la Figura 7, la diferencia más grande se obtuvo entre los escenarios plantación forestal y post-incendio, es decir, entre ambas situaciones el cambio producido en el balance de agua azul es mayor. Este valor se encuentra en torno a los $326.000 m^3$. A continuación se encuentra la diferencia entre la situación tradicional con plantación forestal. Por el contrario, la diferencia entre los escenarios tradicional y futuro (restauración “Plantando Agua”) ha sido la menor, próxima a los sesenta mil metros cúbicos de ahorro. Entre ambas se encuentra la diferencia entre el escenario tradicional y post-incendio, seguidos de los escenarios plantación forestal y post-incendio con el escenario de futuro presentando valores muy parecidos alrededor de ciento sesenta mil metros cúbicos. Los valores obtenidos reflejan cambios producidos en la disposición de cubiertas.

Tabla 3. Ahorros medios en m³ de agua azul obtenidos entre escenarios. Media y desviación estándar.

Diferencias		Ahorro (m ³)
Tradicional	Plantación forestal	223.680,3 ± 102682,25
	Post-incendio	-103.266,9 ± 47568
	Restauración	57.935,7 ± 26683
Plantación forestal	Tradicional	-223.680,3 ± 102.682,25
	Post-incendio	-326.947,2 ± 150.249,5
	Restauración	-165.744,6 ± 76.000,2
Post-incendio	Tradicional	103.266,9 ± 47.568
	Plantación forestal	326.947,2 ± 150.249,5
	Restauración	161.202,6 ± 74.249,3
Restauración	Tradicional	-57.935,7 ± 26.683
	Pre-incendio	165.744,6 ± 76.000,2
	Post-incendio	-161.202,6 ± 74.249,3

Como se muestra en la Figura 7, se dieron diferencias significativas entre varios casos (test de Kruskal Wallis $p < 0,0001$). Los menores ahorros se dieron entre las diferencias post-incendio – tradicional y tradicional – restauración, entre el resto y ambas se han dado diferencias significativas, además de ser diferentes entre sí. El ahorro post-incendio con plantación forestal ha mostrado diferencias respecto a los ahorros de los escenarios plantación forestal y post-incendio con el escenario de la restauración. Estos tres casos, en cambio, no han presentado diferencias respecto el ahorro entre tradicional y plantación forestal, el cual tiene un valor intermedio a estos casos.

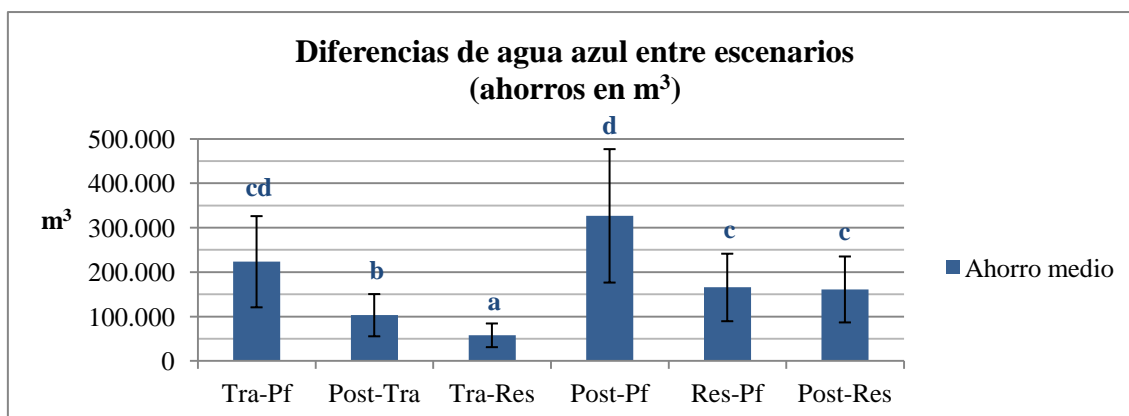


Figura 4. Comparación entre las diferencias de agua azul entre los escenarios (ahorro) bajo una misma serie climática. Diferencias: Tra-Pf= Tradicional-Plantación forestal, Post-Tra= Tradicional-Post-incendio, Tra-Restauración= Tradicional-Restauración, Post-Pf= Post-incendio-Plantación forestal, Res-Pf= Restauración-Plantación forestal, Post-Res= Post-incendio – Restauración. Media y desviación típica. Test de Kruskal Wallis (n=240; p<0,0001). Las letras iguales marcan que no hay diferencias significativas según la prueba de U de Mann Whitney para p<0,05.

5.2 Aplicación del modelo de Zhang *et al.*, (2001) bajo distinta serie climática

5.2.1 Caracterización de los escenarios

En la segunda aproximación del trabajo, se empleó una serie de 15 años de precipitación y temperatura para cada escenario (Tabla 4). La temperatura media anual para la situación tradicional es de 14,2°C, siendo similar a la generada para el escenario de futuro, restauración Plantando Agua, cuya media es de 14°C. En la Figura 8 se aprecia la simulación de cambio climático donde la temperatura media asciende a los 19.2°C. Por otra parte, el periodo plantación forestal y post-incendio registran la misma media anual al proceder de la misma serie climática, siendo la menor con 12,8°C.

Tabla 4. Temperatura media anual y precipitación total anual media de las series de 15 años para cada uno de los escenarios empleados.

Escenario	Periodo	T _m anual (°C)	P _{total} anual (mm)
Tradicional	1957-1971	14,2	474,8
Plantación forestal/Post-incendio	2002-2016	12,8	449,8
Restauración	2064-2078	14	486,3
Restauración C.C	2064-2078	19,2	420,2

En cuanto a la precipitación, ha tenido un comportamiento parecido a la temperatura ya que los escenarios tradicional y restauración han obtenido medias parecidas en torno a 480 mm, siendo este último el más húmedo con una media de 486 mm de precipitación total. Por el contrario, la situación bajo cambio climático ha

registrado la media más baja, cercana a los 420 mm. Finalmente, los escenarios plantación forestal y post-incendio han registrado una media de 450 mm quedando entre ambos escenarios (Figura 8).

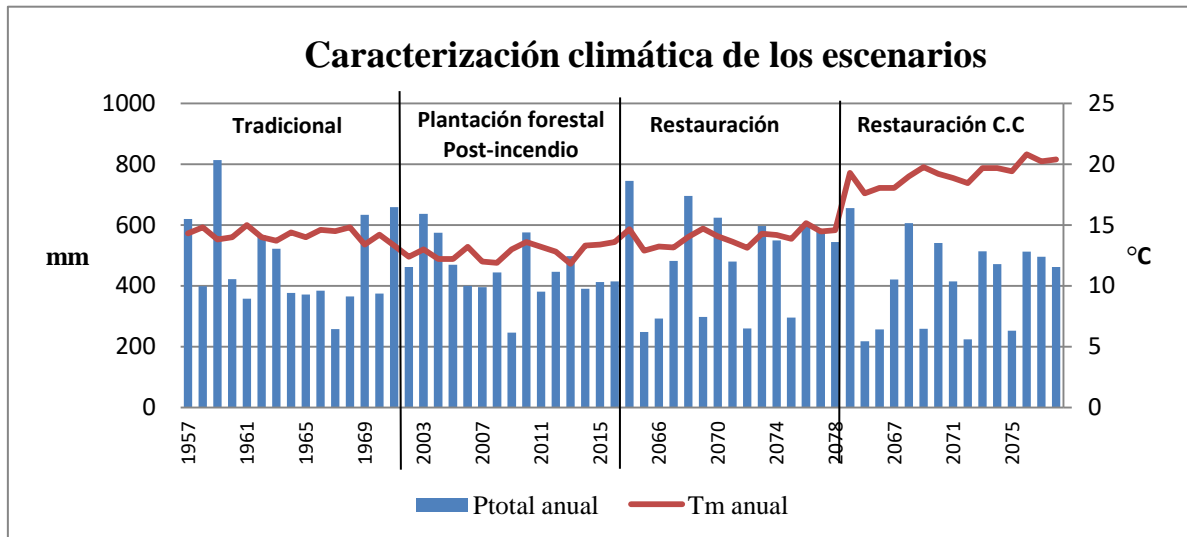


Figura 5. Precipitación total anual (mm) y temperatura media anual (°C) empleada para cada escenario para la aplicación del modelo de Zhang et al., (2001).

En cuanto a distribución de las cubiertas, las hectáreas de cada tipo vegetal son iguales a los valores mostrados en el apartado 5.1.1 al cambiar únicamente las series climáticas de cada escenario en este planteamiento.

5.2.2 Comparación entre cubiertas

En esta ocasión se realizaron comparaciones entre escenarios, dentro del mismo tipo de cubierta, y, dentro de los propios escenarios, entre tipos de cubierta. Tanto para agua verde y azul solo se dieron diferencias significativas dentro de los escenarios entre tipos de cubierta (Tablas 5 y 6).

Para agua verde, al comparar entre el mismo tipo de cubierta en distinto escenario se han obtenido valores más altos de evapotranspiración en los escenarios donde hubo más precipitación, lo cual no coincide con los escenarios más cálidos.

Cuando se comparó entre cubiertas dentro del mismo escenario, se dieron diferencias significativas entre la cubierta boscosa y desnuda para los escenarios tradicional, Plantando Agua y Pre/Post-incendio. Además para este último también se encontraron diferencias significativas con la cubierta mixta (Tabla 5).

Tabla 5. Comparación unitaria (m^3/ha) entre escenarios y cubiertas de los valores de agua verde. Valores medios, desviaciones estándar y significancia ($p=0,05$). ET =evapotranspiración, b= bosque, d= suelo desnudo, m= vegetación mixta, h= herbáceo.

Situación	Agua verde (m^3/ha)				
	ET _b	ET _d	ET _m	ET _h	p
Tradicional	4.184,1 \pm 1050	3.213 \pm 624	3.912 \pm 881	3.636 \pm 749	0,01461
Plantación forestal/Post-incendio	4.006 \pm 700	3.070 \pm 428	3.751 \pm 598	3.485 \pm 514	7,40E ⁻⁰⁵
Restauración	4.264 \pm 1253	3.248 \pm 787	3.973 \pm 1084	3.683 \pm 940	0,01702
Restauración C.C	3.916 \pm 1233	3.173 \pm 844	3.743 \pm 1121	3.543 \pm 1005	0,07161
p	0,8183	0,7781	0,8306	0,8081	

Por otra parte, en los valores unitarios de agua azul, se obtuvieron valores más altos de agua azul en aquellos escenarios donde la precipitación fue mayor. Al comparar entre cubiertas dentro de cada escenario, se mostraron diferencias significativas en todos los escenarios entre las cubiertas boscosa y desnuda únicamente (Tabla 6).

Tabla 6. Comparación unitaria (m^3/ha) entre escenarios y cubiertas de los valores de agua azul. Valores medios, desviaciones estándar y significancia ($p=0,05$). Q= escorrentía, b= bosque, d= suelo desnudo, m= vegetación mixta, h= herbáceo.

Situación	Agua azul (m^3/ha)				
	Q _b	Q _d	Q _m	Q _h	p
Tradicional	564 \pm 48,6	1537 \pm 90,8	836 \pm 65,7	1112 \pm 78,7	0,001804
Plantación forestal/Post-incendio	492 \pm 26,1	1428 \pm 53,3	747 \pm 36,5	1013 \pm 44,9	7,63E ⁻⁰⁶
Restauración	599 \pm 42,4	1616 \pm 88,6	890 \pm 59,4	1180 \pm 73,61	0,004079
Restauración C.C	287 \pm 22	1030 \pm 60,9	459 \pm 33,5	660 \pm 45,1	0,001092
p	0,08113	0,2026	0,1114	0,128	

Cabe destacar que en la comparación entre cubiertas realizada bajo la misma serie climática se dieron diferencias significativas entre todas las cubiertas, lo cual no ha sucedido en esta ocasión.

5.2.3 Comparación entre escenarios

Según indica la Tabla 7, el agua verde fluctúa entre los 4,5 y 5 millones de metros cúbicos. Al inicio, aumenta ligeramente la cantidad de evapotranspiración entre la situación tradicional y escenario de plantación forestal alcanzando los cuatro millones y medio de metros cúbicos aproximadamente. A continuación se produce el mayor descenso en la situación post-incendio donde se registra el valor más bajo. Después

vuelve a aumentar la evapotranspiración hasta su valor más alto donde luego, bajo efectos de cambio climático vuelve a descender acusadamente.

En cuanto a agua azul, se han obtenido valores en torno a un millón ciento cuarenta mil metros cúbicos para las situaciones de la restauración Plantando Agua, tradicional y post-incendio. Las variaciones más marcadas se vuelven a mostrar entre la situación previa al incendio y la época post-incendio, y entre, la restauración con y sin cambio climático. Cabe destacar que en comparación con lo obtenido en el apartado 6.1.3, el comportamiento a lo largo del tiempo para agua verde no sigue el orden opuesto que para agua azul. Se ordenan de más volumen a menor de la siguiente manera: agua verde; Restauración > Plantación forestal > Tradicional > Restauración C.C > Post-incendio y, agua azul; Restauración > Tradicional > Post-incendio > Plantación forestal > Restauración C.C.

Tabla 7. Volúmenes en m³ de agua verde y azul obtenidos entre escenarios con distinta serie climática. Media y desviación estándar.

Escenario	Agua verde total (m ³)	Agua azul total (m ³)
Tradicional	4.833.242 ± 1.083.858	1.135.161 ± 847.064
Plantación forestal	4.849.146 ± 810.126	804.755 ± 399.213
Post-incendio	4.529.821 ± 699.351	1.124.125 ± 510.678
Restauración	4.970.367 ± 1.363.518	1.142.632 ± 743.652
Restauración C.C	4.673.238 ± 1.397.707	608.896 ± 430.603

Se realizaron las comparaciones sin los escenarios post-incendio, en un caso y plantación forestal en otro, y luego se comparó entre ambas al tener el mismo clima. Al haberse mostrado el comportamiento del agua verde y no haberse obtenido diferencias en ninguno de los casos, solo se muestran los resultados para agua azul.

5.2.3.1 Comparación sin la situación post-incendio

En este caso, no se han obtenido diferencias significativas entre los escenarios al excluir del análisis la situación post-incendio (agua verde: test de Kruskal Wallis p=0,885; agua azul: test de Kruskal Wallis p=0,14). En la figura 9 se aprecian los grandes cambios en el agua azul comentados anteriormente

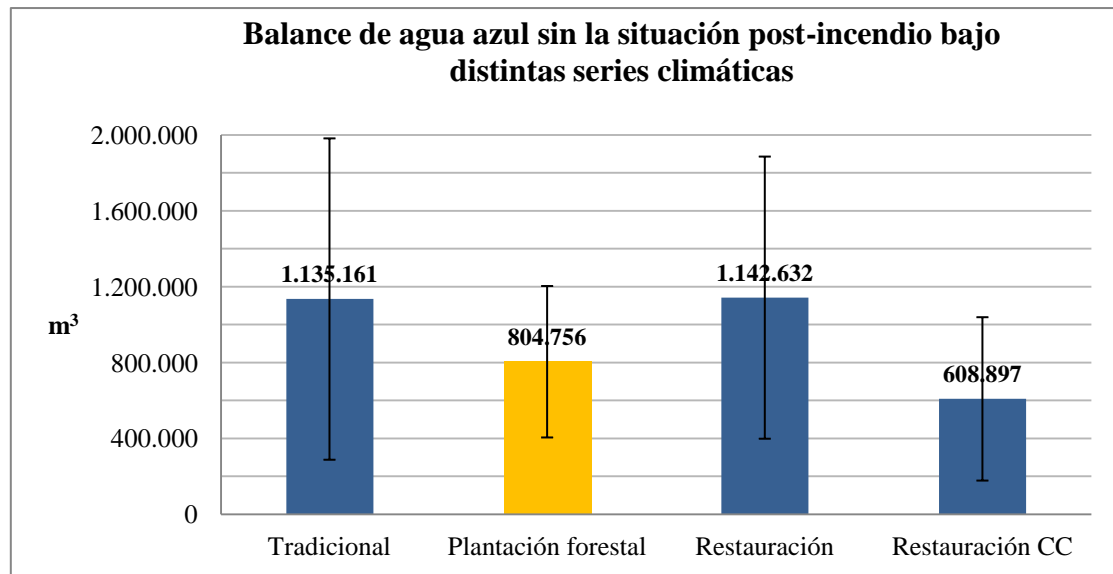


Figura 6. Comparación de agua azul entre escenarios bajo distinta serie climática sin la situación post-incendio. Valor medio y desviación estándar. Test de Kruskal Wallis (n=60; p=0,15).

5.2.3.2 Comparación sin la situación plantación forestal

Al excluir la situación plantación forestal se han dado diferencias significativas para agua azul (test de Kruskal Wallis $p=0,037$), estas se dan entre post-incendio y restauración con la situación de cambio climático. El escenario tradicional no ha presentado diferencias respecto al escenario bajo cambio climático a pesar de tener volúmenes similares a los obtenidos en los otros dos escenarios (Figura 10).

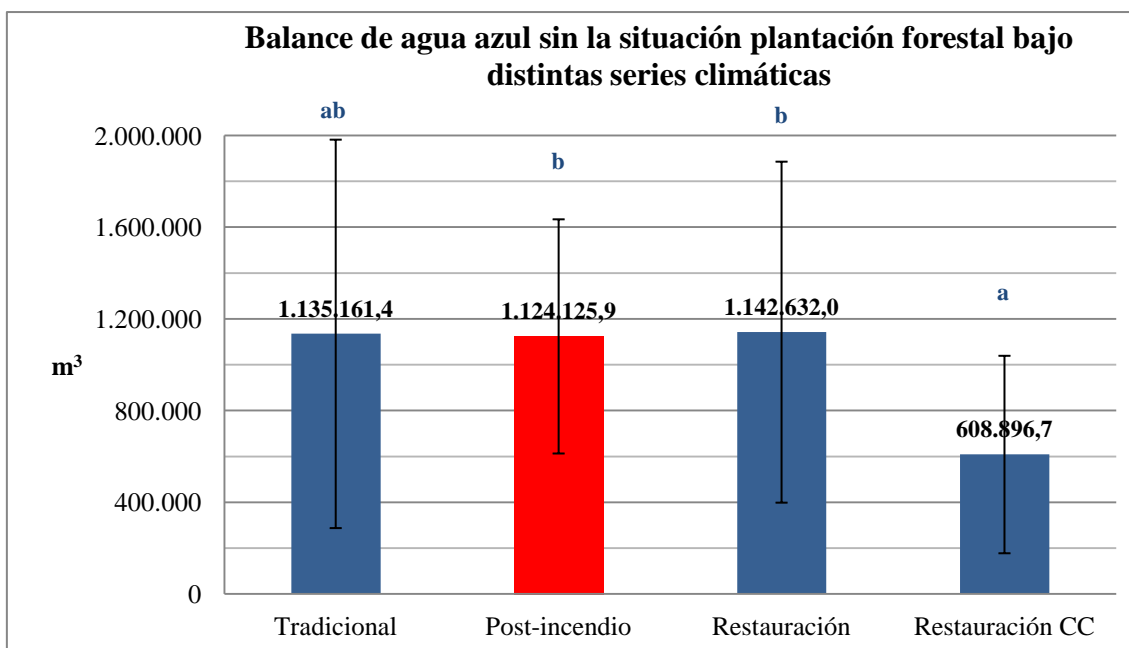


Figura 7. Comparación de agua azul entre escenarios bajo distinta serie climática sin la situación plantación forestal. Valor medio y desviación estándar. Test de Kruskal Wallis ($n=60$; $p=0,037$). Las letras iguales marcan que no hay diferencias significativas según la prueba de U de Mann Whitney para $p<0,05$.

5.2.3.3 Comparación de los escenarios plantación forestal y post-incendio

En esta ocasión, se realizó la comparación entre ambos escenarios obteniendo un p valor de 0,04 en la prueba de U de Mann-Whitney (Figura 11). Hay que recordar que se trata de dos situaciones que por cuestiones de proximidad temporal poseen la misma serie de datos.

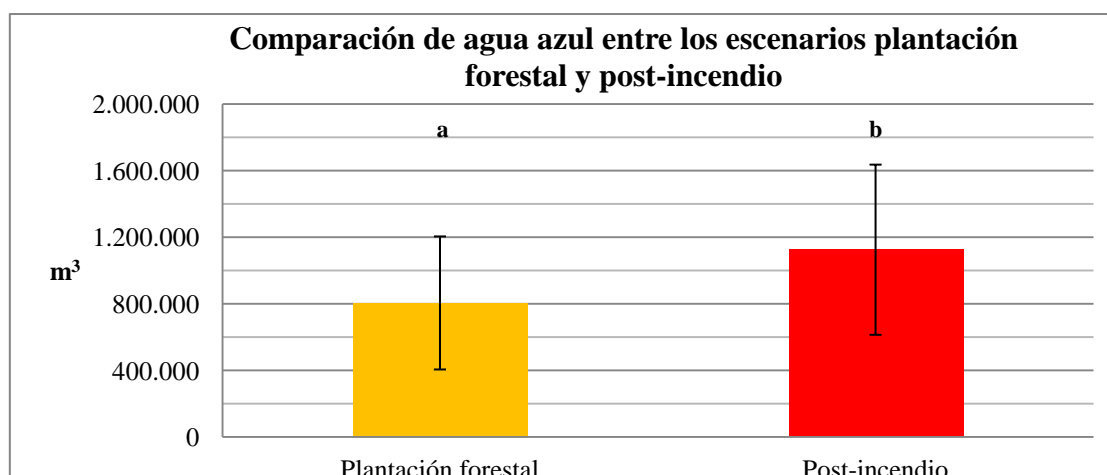


Figura 8. Comparación entre escenarios plantación forestal y post-incendio bajo distinta serie climática. Valor medio y desviación estándar. Prueba de U de Mann Whitney ($n=30$; $p=0,04$). Las letras distintas marcan diferencias significativas para $p<0,05$.

5.2.3.4 Comparación entre todos los escenarios

Por último se realizó el balance hídrico de agua verde y azul en tanto por uno. Se obtuvieron diferencias significativas entre los mismos escenarios tanto para agua verde como para agua azul (agua verde: test de Kruskal Wallis $p < 0,001$; agua azul: test de Kruskal Wallis $p < 0,001$).

Las diferencias se dieron entre el escenario tradicional, post-incendio y restauración con la situación bajo cambio climático simulado (Figura 12). Por el contrario, la situación plantación forestal no fue significativamente distinta a ningún escenario.

La situación restauración y tradicional han tenido un reparto en el balance de agua similar (83-17%). La situación de plantación forestal respecto a la situación post-incendio difieren en un 6% siendo las mismas condiciones climáticas. El escenario con cambio climático, respecto del escenario de restauración también ha obtenido una diferencia del 6% teniendo la misma distribución de cubiertas. Para las condiciones en que se ha trabajado el máximo porcentaje de evapotranspiración respecto a la precipitación caída se da para el escenario de cambio climático (90%) y el menor para el escenario post-incendio, siendo el máximo y mínimo de agua azul complementario (Figura 12).

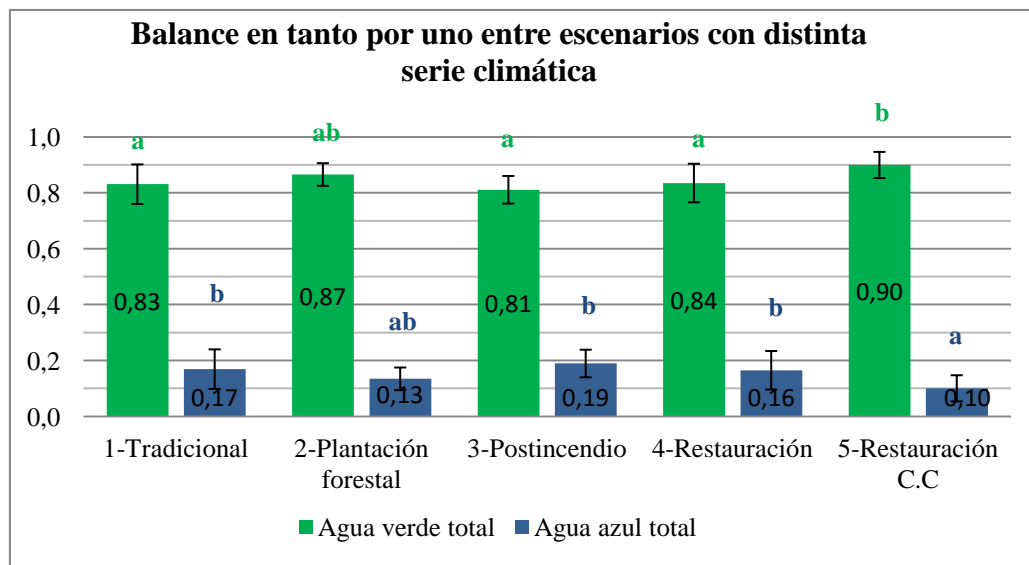


Figura 9. Comparación en tanto por uno de agua verde y azul entre escenarios bajo distinta serie climática. Valor medio y desviación estándar. Test de Kruskal Wallis ($n=240$; agua verde: $p < 0,001$; agua azul: $p < 0,001$). Las letras iguales marcan que no hay diferencias significativas según la prueba de U de Mann Whitney para $p < 0,05$.

6. Discusión

La realización del trabajo ha empleado cuatro escenarios distintos con diferente distribución de cubiertas vegetales. Cada situación representa una realidad vivida, o por vivir una vez prospere la restauración, en los montes del municipio de La Zoma. El paso de un momento temporal fue determinado por grandes cambios en la distribución de las cubiertas vegetales que conforman el paisaje en cuestión.

Los dos principales cambios de cubiertas se dan entre la situación tradicional y la situación previa al incendio, y entre esta y el escenario post-incendio. La primera supone un aumento brusco de la vegetación leñosa, el cual se puede atribuir principalmente a dos acontecimientos. En primer lugar, a las plantaciones forestales realizadas en el área a principios de los años sesenta (Villanueva, 2005; Lerma, 2012) y, en segundo lugar, al éxodo rural acentuado sufrido en la década de los sesenta. El abandono de la gestión de los montes y de algunas parcelas agrícolas propició que los campos de cultivo fueran adoptando una composición leñosa a medida que iban siendo colonizados o reforestados (Pausas, 2012; García Ruiz *et al.*, 2013). En concreto, la población de La Zoma pasó de 133 habitantes, en 1950 a 22 en 2009, año del incendio (INE, 2017). Este descenso poblacional va acompañado de un incremento de la cubierta vegetal leñosa (bosque + vegetación mixta) de 532,33 hectáreas lo que ocasiona un cambio en el comportamiento hidrológico de la zona a medida que avanza la colonización espontánea y prosperan las plantaciones forestales (García-Ruiz y Lana-Renault, 2011; García Ruiz *et al.*, 2013). El segundo cambio marcado es la perturbación provocada por el incendio en el ecosistema, que eliminó 710 hectáreas de vegetación leñosa. Por otra parte, se dan cambios de menor intensidad que los anteriores. Estos son el incremento de 364,7 hectáreas a causa de la restauración y las diferencias entre esta con la situación previa al incendio (345,67 ha) y con el escenario tradicional restauración (186,66 ha).

Dicho esto, los resultados muestran cambios en la magnitud estimada de agua azul y agua verde ligados a los cambios en la cubierta vegetal, tal y como ha sido ampliamente recogido (Calder, 1998; Gallart y Llorens, 2001; Sun *et al.* 2005; García Ruiz *et al.*, 2013). Este comportamiento se ha observado en ambas aproximaciones realizadas en el trabajo. Entonces, cabe discutir qué papel tienen los dos factores

principales que rigen el modelo de Zhang *et al.*, (2001) al no haberse obtenido resultados idénticos en sendas aproximaciones.

La primera parte del trabajo estudió la importancia de las cubiertas vegetales en el balance hídrico. Se trabajó bajo una misma serie climática para poder eliminar la influencia del clima. Por el contrario, en la segunda aproximación se trabajó con una serie climática distinta para cada periodo, incluyendo el supuesto de cambio climático para evaluar el clima. Al comparar los valores unitarios (m^3/ha) en ambos métodos, se determinó que las cubiertas forestales producen menos agua azul que las herbáceas y aportan más m^3/ha a la evapotranspiración (Calder, 1990; Zhang *et al.*, 2001). Para agua verde, el bosque evapotranspira más que la cubierta mixta, herbácea y desnuda, mostrando diferencias significativas entre estas. Para agua azul, sigue el comportamiento opuesto al ser un modelo que asume el reparto de toda la precipitación entre evapotranspiración y escorrentía (Zhang *et al.*, 2001; García-Estríngana *et al.*, 2014). Por tanto, el consumo o producción de agua por unidad de superficie queda determinado por el rango del coeficiente de disponibilidad de agua, w , lo que es igual a la capacidad fisiológica de la planta para consumir agua (Zhang *et al.*, 2001; Greenwood *et al.*, 2011; Komatsu *et al.*, 2012). Por otra parte, al trabajar con los valores totales se obtuvieron resultados diferentes entre aproximaciones.

En la primera parte, los valores totales obtenidos bajo la misma serie climática se ordenaron del siguiente modo: Plantación forestal > Restauración > Tradicional > Post-incendio para agua verde y, para agua azul, se siguió el orden opuesto. Únicamente se dieron diferencias significativas para agua azul entre la situación previa y posterior al incendio. Probablemente no se dieron en agua verde por una cuestión de magnitud de las unidades ya que al realizar las comparaciones en tanto por uno no sucedió esto. De todos modos, las diferencias se han mostrado asociadas a los cambios más bruscos de cubierta. En la línea de lo anterior, las diferencias más grandes de agua azul calculadas entre escenarios se han mostrado entre aquellos con distribución cubiertas más desigual (Figura 7). Así pues, en la situación post-incendio hay un 5,6% más de precipitación formando parte del agua azul en escorrentía que en la situación de plantación forestal, o lo que es igual, en el escenario de plantación forestal se evapotranspira un 5,6% más de la precipitación caída que en el post-incendio. Del mismo modo, la restauración

supondría casi un tres por ciento más de agua azul respecto a la situación previa al incendio, lo es aproximadamente 165.000 m³ más de agua que proporcionaría el ecosistema restaurado si se mantuvieran esas condiciones climáticas o similares. Por tanto, en concordancia con otros autores, la reducción o aumento de los recursos hídricos de la zona estudiada está asociada a la sustitución de las cubiertas herbáceas por las forestales y viceversa (Bosch y Hewlett, 1982; Zhang *et al.*, 2001; Gallart y Llorens, 2003; Robinson *et al.*, 2003).

En la segunda parte, los valores medios totales quedan distribuidos de la siguiente manera: Restauración > Plantación forestal > Tradicional > Restauración cambio climático > Post-incendio, para agua verde; y Restauración > Tradicional > Post-incendio > Plantación forestal > Restauración cambio climático, para agua azul. Como se observa, la producción de agua verde y azul no se ordena de forma complementaria como en el caso anterior. Para agua azul, los escenarios se han ordenado de más húmedo a más seco y no por número hectáreas herbáceas o forestales. Las situaciones con y sin cambio climático marcan los extremos. Se obtuvieron resultados significativos al excluir la situación plantación forestal de la comparación entre la situación post-incendio y restauración con la realidad supuesta de cambio climático

Algo similar ocurre para el agua verde a pesar de no darse diferencias significativas. La situación de plantación forestal no genera el máximo valor medio de evapotranspiración a pesar de tener mayor número de hectáreas forestales. El escenario tradicional es ligeramente más húmedo que el de plantación forestal pero este genera quince mil metros cúbicos más de evapotranspiración aproximadamente. Un ejemplo más clarificador sería comparar entre las realidades post-incendio y cambio climático al darse la menor diferencia de evapotranspiración entre ambos pero siendo el segundo cambio de cubierta más brusco. A pesar de haber aproximadamente un 7% menos de precipitación y 6°C más de media entre ambos escenarios, la evapotranspiración es más alta en el escenario post-incendio.

Por otra parte, al realizar la comparación de los valores totales en tanto por uno se dieron resultados parecidos para agua verde y azul en ambos planteamientos. El balance está en torno a una relación 83% para agua verde y 17% para agua azul,

ordenándose en función de la cantidad de cubierta forestal. En cambio, la situación con cambio climático sigue una proporción 90-10% respectivamente. Esta realidad es significativamente distinta al resto de escenarios, a excepción del escenario de plantación forestal (87-13%). Así pues, se puede atribuir la diferencia del 6% en los valores de agua verde y azul entre la situación de restauración con y sin cambio climático al efecto del clima. Algo parecido sucede entre el escenario previo y posterior al incendio (6%) que con el mismo clima, el cambio se asocia a la distribución de cubiertas. En este caso, al variar el clima de manera fuerte se produce el mismo efecto en el balance que el que se daría con una gran perturbación. Además, las situaciones restauración y tradicional, con una composición similar, han obtenido valores intermedios. Algunos autores explican que las cuencas con cobertura equilibrada entre bosque y herbáceo presentan comportamientos intermedios en cuanto a evapotranspiración anual se refiere Zhang *et al.*, 2001, Ilstedt *et al.*, 2016).

Por último, se ha observado que los límites de producción de agua azul y verde vienen determinados por el año más húmedo y seco de la serie climática, y no por los años más cálidos o fríos. Como en la primera aproximación todos los escenarios parten de la misma serie climática, el límite superior está marcado por el año más húmedo y la composición con más fracción herbácea (post-incendio para 1986 con 828mm), y el inferior por el año más seco y con más cubierta leñosa (plantación forestal para 2009 con 246mm). Los límites en la segunda aproximación se dan independientemente del escenario. Estos se dan en 1959, con 813 mm de precipitación total anuales y 13,8 °C de media anual, y en 2065, con una precipitación supuesta de 217 mm y 17,6 °C (escenario de cambio climático).

Según las estimaciones realizadas, la respuesta en el balance hídrico es mayor cuanto más grande es el cambio en el uso del suelo. Además en estos supuestos se muestra que el clima tiene más peso en la determinación del balance hidrológico en la cuenca, siendo el papel de los bosques mucho menor de lo que ha sido reivindicado por otros autores (Robinson *et al.*, 2003; Andréassian, 2004). El efecto de las cubiertas queda compensado por la climatología, es decir, a no ser que exista un caso excepcional (ej. post-incendio) la producción de agua verde o azul dependerá más del clima que la situación de cubiertas en el escenario. La precipitación determina el agua

total que entra en el sistema, mientras que la temperatura y el tipo de cubierta son los factores que determinan la proporción del reparto entre agua verde y azul. Esto se debe a la propia naturaleza del modelo desarrollado por que el modelo de Zhang *et al.*, (2001).

Finalmente cabe añadir que las realidades con las que se ha trabajado en el municipio de La Zoma pueden ser extendidas a otras zonas de la península ibérica. Por consiguiente, es preciso tener en cuenta la proyección climática a la hora de diseñar proyectos de restauración ecológica en nuestro ambiente visto su impacto sobre la provisión de agua a escala local, y más aún en un escenario de cambio climático. Adaptar la gestión de los montes a las realidades a las que se van a enfrentar en un futuro es una prioridad para seguir disfrutando de los beneficios ambientales que estos brindan de una manera sostenible (Gallart y Llorens, 2001; Ellison *et al.*, 2012, 2017).

7. Conclusiones

Tras analizar los resultados se ha llegado a las siguientes conclusiones:

- Los cambios en la cubierta vegetal llevan asociados cambios en el balance de agua verde y azul.
- Las cubiertas forestales producen un 50 % menos agua azul y aportan un 15% más aproximadamente a la producción de agua verde que las cubiertas y viceversa.
- El clima es un factor más influyente en la producción de agua verde y azul que la situación de cubiertas en cada escenario a no ser que exista un escenario con una modificación considerable de la cubierta.
- La precipitación determina los límites de agua verde y azul, mientras que la temperatura y el tipo de cubierta determinan en qué proporción se reparte esta.
- El diseño de las restauraciones puede jugar un papel muy importante en la gestión hidrológica de las cuencas.

8. Agradecimientos

La consecución de los objetivos que requiere este trabajo no hubiera sido posible sin la colaboración desinteresada de muchas personas. Por tanto me gustaría dedicar unas palabras a todo el mundo que ha ayudado a materializar con éxito el trabajo desempeñado.

En primer lugar, gracias a mis directores José Manuel Nicolau Ibarra y Ramón Juan Reiné Viñales por volver a confiar en mí y seguir enseñándome como el primer día.

En segundo lugar, a todos mis amigos y compañeros que de una manera u otra siempre me han ayudado a continuar adelante.

En tercer lugar, a mi familia por el esfuerzo que puede suponer lejos de casa y apoyarme en las decisiones tomadas.

Finalmente a las personas que se prestaron a colaborar con el trabajo previo a este Trabajo Fin de Máster sin su ayuda en el pasado este trabajo no hubiera sido posible.

Gracias a todos.

9. Bibliografía

Amatya, D. M., y Trettin, C. C. (2007). Annual evapotranspiration of a forested wetland watershed, SC. Paper presented at the *2007 ASAE Annual Meeting*, 1.

Andréassian, V. (2004). Waters and forests: From historical controversy to scientific debate. *Journal of Hydrology*, 291(1), 1-27.

Bates, C. G., y Henry, A. J. (1928). Second phase of streamflow experiment at wagon wheel gap, colo. *Monthly Weather Review*, 56(3), 79-80.

Bodí, M. B., Cerdà, A., Mataix-Solera, J., y Doerr, S. H. (2012). Efectos de los incendios forestales en la vegetación y el suelo en la cuenca mediterránea: Revisión bibliográfica. *Boletín De La Asociación De Geógrafos Españoles*, 58, 33-55.

Bosch, J. M., y Hewlett, J. (1982). A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, 55(1-4), 3-23.

Brunet, M., Casado, M., De Castro, M., Galán, P., López, J., Martín, J., Pastor A., Petisco E., Ramos P., Ribalaygua, J. (2009). Generación de escenarios regionalizados de cambio climático para España. Agencia Estatal De Meteorología (AEMET), Ministerio De Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, Madrid.

Budyko, M. I. (1958). The heat balance of the Earth's surface, translated from russian by N.A. stepanova, 259pp. U.S. dep. of commer. washintong, D.C.

Calder, I. R.(1990). Evaporation in the uplands. wiley, chichester,148 pp.

Calder, I. R. (1998). Water-resource and land-use issues Iwmi.

Calder, I. R. (2002). Forests and hydrological services: Reconciling public and science perceptions. Land use and Water Resources Research, 2(2), 1-12.

Calder, I., Hofer, T., Vermont, S. y Warren, P. (2007). Hacia una nueva comprensión de los bosques y el agua. Unasylva, 58(229), 3-10.

Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE). (1993). Estudio de recursos hidráulicos de la cuenca del ebro. Oficina de planificación hidrológica de la CHE, Zaragoza.

Contratas Ancar S.L. (2013). Plan Director “Plantando Agua - Construyendo los montes del SXXI para un nuevo escenario de cambio climático y de cambios sociales en la comarca de las Cuencas Mineras (Teruel)”.

Dooge, J., Bruen, M., y Parmentier, B. (1999). A simple model for estimating the sensitivity of runoff to long-term changes in precipitation without a change in vegetation. Advances in Water Resources, 23(2), 153-163.

Ellison, D., Morris, C. E., Locatelli, B., Sheil, D., Cohen, J., Murdiyarso, D., Gutierrezk, V., Van Noordwijkl, M., Creed, I., Pokorny, J, Gaveau, D., Spracklenp, D.V., Bargués, A., Ilstedta, U., Teuling, A., GebreyohanniS, S., Sands, D.C., Muys, B., Verbist, B., Springgay, E., Sugandi, Y., Sullivan, C.A., (2017). Trees, forests and water: Cool insights for a hot world. Global Environmental Change, 43, 51-61.

Ellison, D., N Futter, M., y Bishop, K. (2012). On the forest cover–water yield debate:

From demand-to supply-side thinking. *Global Change Biology*, 18(3), 806-820.

Engler, A. (1919). Untersuchungen uber den einfluss des waldes auf den stand der gewasser [Investigations about the influence of the forest on the water status].

Enguita, G. (2016). Análisis histórico del balance de agua azul y agua verde en los montes del T.M. de La Zoma (Te) afectados por el incendio del año 2009. Trabajo Fin de Grado. Universidad de Zaragoza.

Falkenmark, M. (2003). Freshwater as shared between society and ecosystems: From divided approaches to integrated challenges. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 358(1440), 2037-2049. doi:10.1098/rstb.2003.1386 [doi]

Gallart, F., y Llorens, P. (2003). Catchment management under environmental change: Impact of land cover change on water resources. *Water International*, 28(3), 334-340.

Gallart, F., y Llorens, P. (2001). Water resources and environmental change in Spain. A key issue for sustainable integrated catchment management. *Cuadernos De Investigación Geográfica*, 27, 7-16.

Gao, Z., Zhang, Z., y Zhang, X. (2009). Responses of water yield to changes in vegetation at a temporal scale. *Frontiers of Forestry in China*, 4(1), 53-59.

García Ruíz, J. M., López Moreno, J. I., y Sanjuán, Y. (2013). Cambios en el piso subalpino de las montañas mediterráneas. *Revista Quercus*. 327, 45-50.

García-Estríngana, P., Gallart, F., y Llorens, P. (2014). Estimación del papel de los cambios en la cubierta vegetal en la repartición de la precipitación entre agua verde y agua azul. Instituto de diagnóstico ambiental y estudios del agua (IDAEA-CSIC).

García-Ruiz, J. M., y Lana-Renault, N. (2011). Hydrological and erosive consequences of farmland abandonment in europe, with special reference to the mediterranean region—a review. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 140(3), 317-338.

Greenwood, A. J., Benyon, R. G., y Lane, P. N. (2011). A method for assessing the hydrological impact of afforestation using regional mean annual data and empirical rainfall–runoff curves. *Journal of Hydrology*, 411(1), 49-65.

Herrero, A., y Zavala, M. (2015). Los bosques y la biodiversidad frente al cambio climático: Impactos, vulnerabilidad y adaptación en España. Ministerio De Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Madrid.

Hibbert, A. R. (1967). "Forest treatment effects on water yield". in: Sopper, W.E., lull, H.W. (eds.), *forest hydrology, proceedings of a national science foundation advanced science seminar*, pergamon press, oxford, pp. 527–543.

Iltedt, U., Tobella, A. B., Bazié, H., Bayala, J., Verbeeten, E., Nyberg, G., Sanou, J., Benegas, L., Murdiyarso, D., Laudon, H., Sheil, D. y Malmer, A. (2016). Intermediate tree cover can maximize groundwater recharge in the seasonally dry tropics. *Scientific Reports*, 6, 21930.

Instituto Nacional de Estadística (INE). (2017). Evolución intercensal de la población desde 1900. Recuperado el 17 de septiembre de 2017 de <http://www.ine.es> .

IPCC. (2007). Climate change 200. The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press.

Keeley, J., Bond, W., Bradstock, R., Pausas, J., y Rundel, P. (2012). Fire in mediterranean ecosystems. ecology, evolution and mangement. Cambridge University Press.

Komatsu, H., Cho, J., Matsumoto, K., y Otsuki, K. (2012). Simple modeling of the global variation in annual forest evapotranspiration. Journal of Hydrology, 420, 380-390.

Lerma, J. (2012). El vivero forestal público de alloza “el calvario” (1955- 1961) y otras referencias a la repoblación forestal de la comarca andorra-sierra de arcos, provincia de teruel. Revista De Andorra, 12.

Li, H., Liu, G., y Fu, B. (2012). Estimation of regional evapotranspiration in alpine area and its response to land use change: A case study in three-river headwaters region of qinghai-tibet plateau, china. Chinese Geographical Science, 22(4), 437-449.

McCulloch, J. S., y Robinson, M. (1993).History of forest hydrology. Journal of Hydrology, 150(2-4), 189-216.

Milly, P. (1994). Climate, soil water storage, and the average annual water balance. *Water Resources Research*, 30(7), 2143-2156.

Pausas, J. G. (2012). Incendios forestales. Editorial catarata y CSIC, Madrid, 119 pp.

Pike, J. (1964). The estimation of annual run-off from meteorological data in a tropical climate. *Journal of Hydrology*, 2(2), 116-123.

R Core Team. (2017). R: A language and environment for statistical computing. R foundation for statistical computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

Rivas-Martínez, S. (1987). Memoria del mapa de series de vegetación de españa, 1: 400.000, ICONA, Madrid.

Robinson, M., Cognard-Plancq, A., Cosandey, C., David, J., Durand, P., Führer, H., McCarthy, R. (2003). Studies of the impact of forests on peak flows and baseflows: A european perspective. *Forest Ecology and Management*, 186(1), 85-97.

Savenije, H. H. (1995). New definitions for moisture recycling and the relationship with land-use changes in the sahel. *Journal of Hydrology*, 167(1-4), 57-78.

Society for Ecological Restoration (SER) International (2004). Principios de SER Internacional sobre restauración ecológica. www.ser.org y Tucson: Society for Ecological Restoration Internacional. Recuperado el 17 de septiembre de 2017 de <http://www.ser.org/docs/default-document-library/spanish.pdf>

Sun, G., McNulty, S. G., Lu, J., Amatya, D. M., Liang, Y., y Kolka, R. (2005). Regional annual water yield from forest lands and its response to potential deforestation across the southeastern united states. *Journal of Hydrology*, 308(1), 258-268.

Villanueva, J. (2005). Tercer inventario forestal nacional (1997–2007). Ministerio De Medio Ambiente, Madrid.

Zhang, L., Dawes, W., y Walker, G. (2001). Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resources Research*, 37(3), 701-708.

Zhang, L., Walker, G. R., y Dawes, W. (1999). Predicting the effect of vegetation changes on catchment average water balance.

Zhang, M., Liu, N., Harper, R., Li, Q., Liu, K., Wei, X., Liu, S. (2017). A global review on hydrological responses to forest change across multiple spatial scales: Importance of scale, climate, forest type and hydrological regime. *Journal of Hydrology*, 546, 44-59.

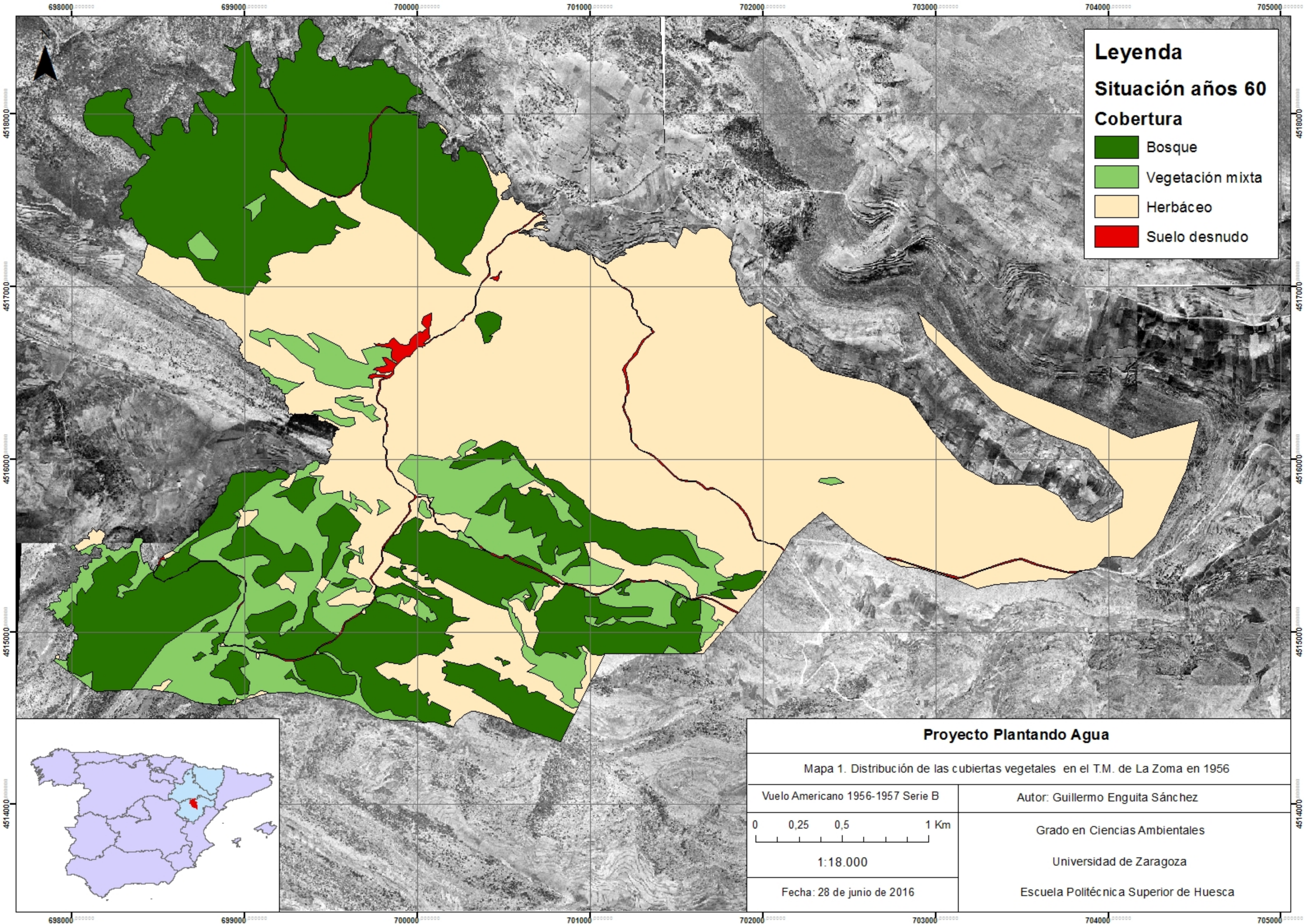
Zhao, F., Zhang, L., Xu, Z., y Scott, D. F. (2010). Evaluation of methods for estimating the effects of vegetation change and climate variability on streamflow. *Water Resources Research*, 46(3)

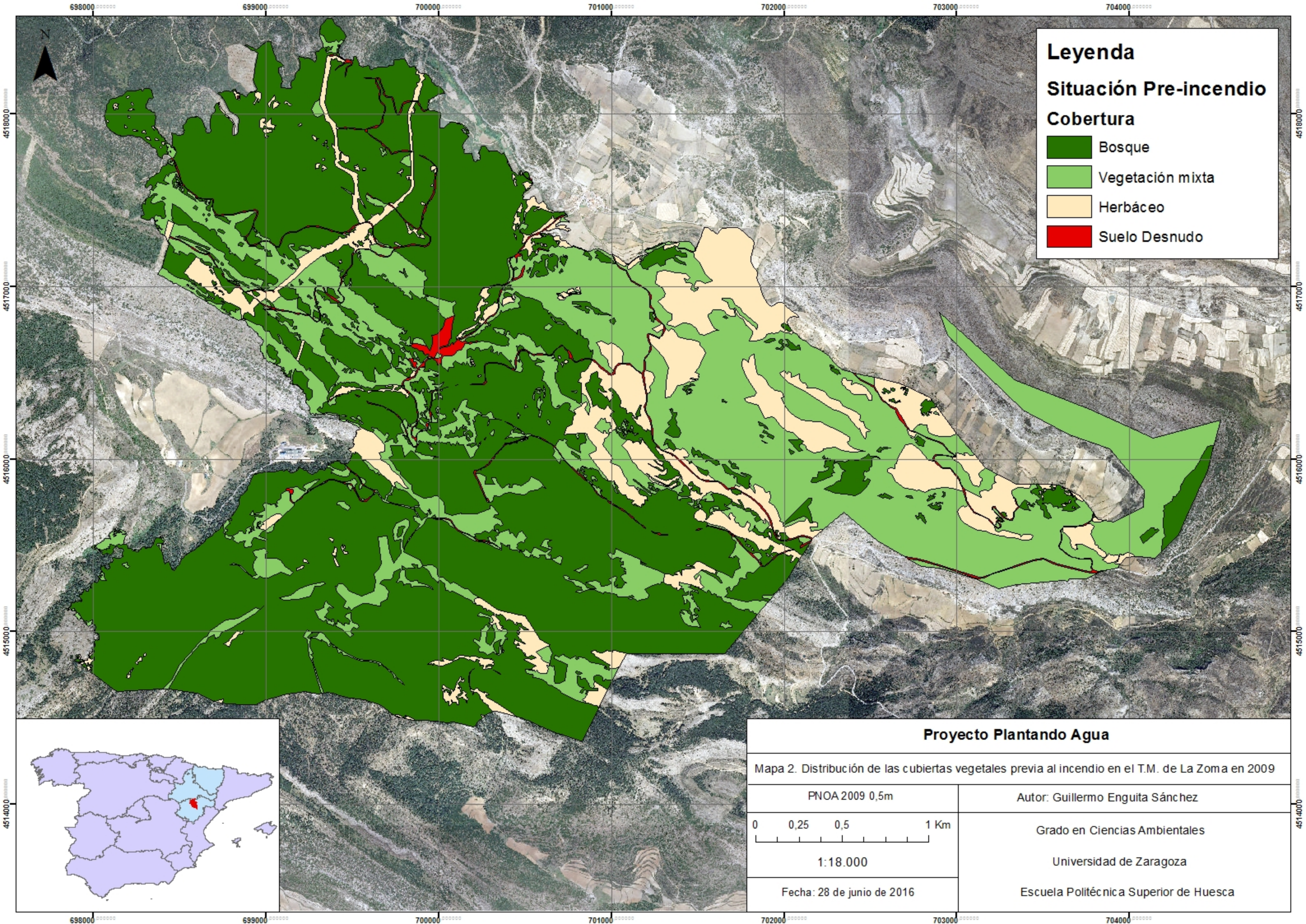
10. Anexos

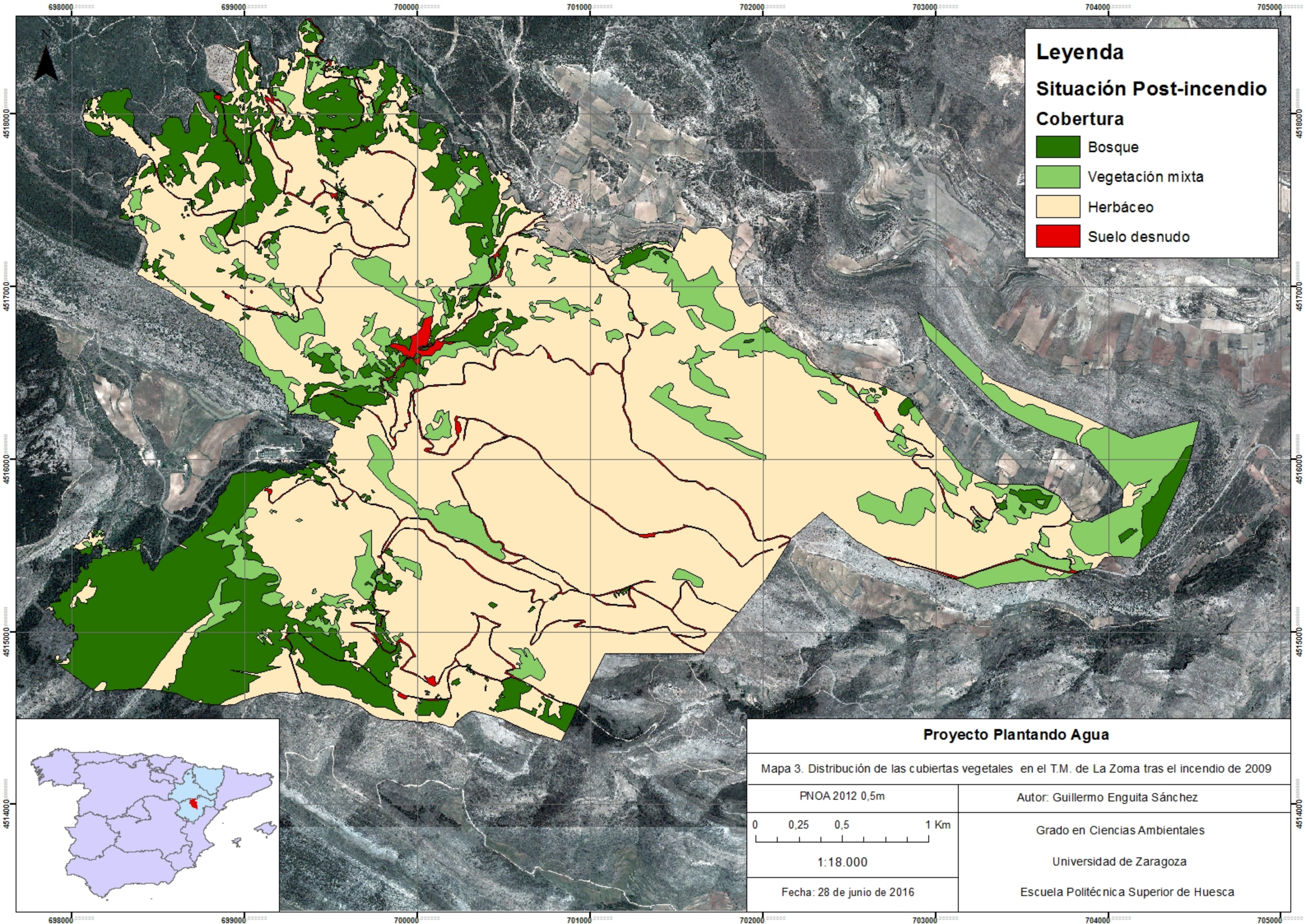
Anexo I: Mapas de distribución de cubiertas en el área de estudio

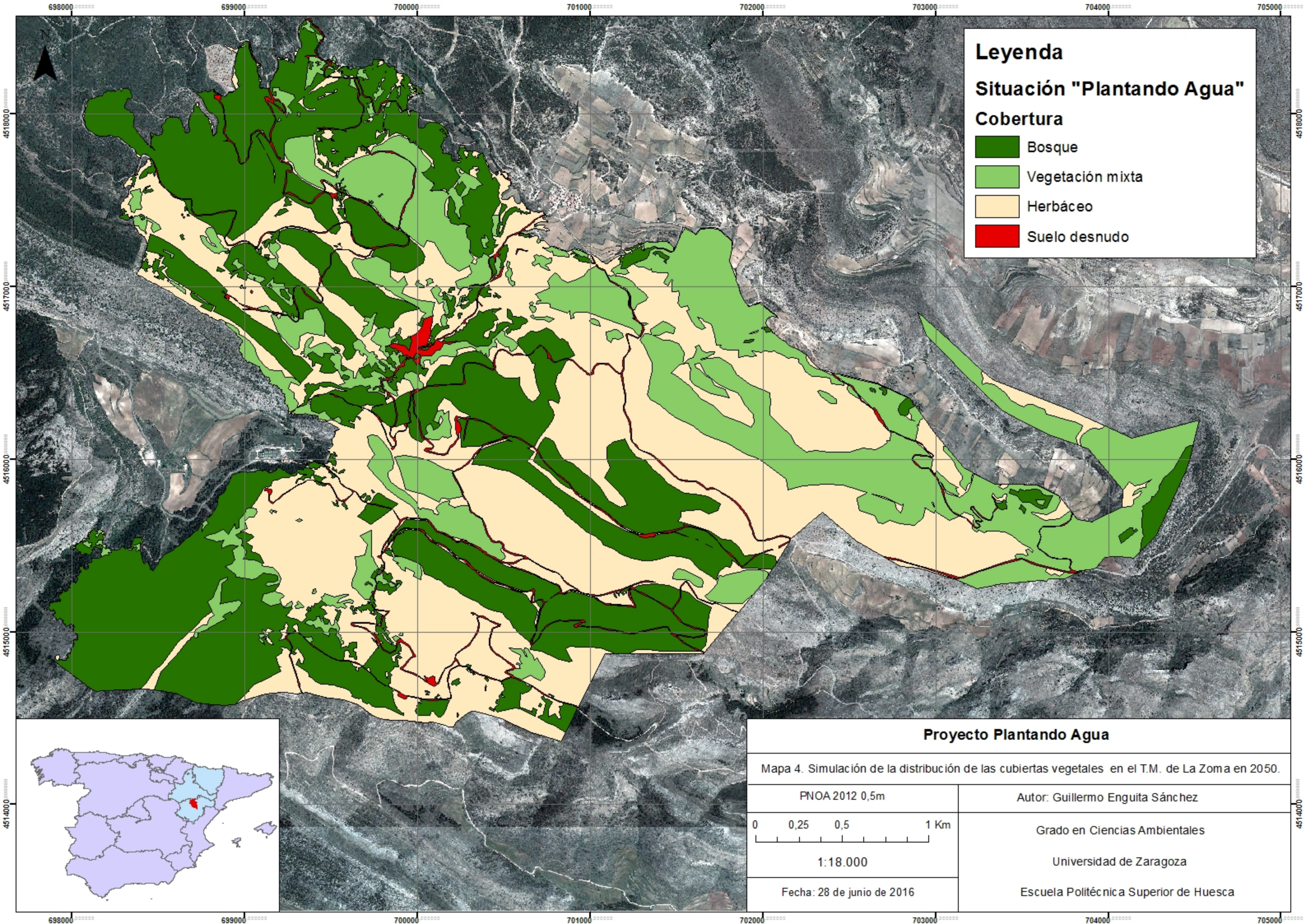
Mapas con la distribución de las cubiertas según cada escenario. Fuente: Enguita, 2016.

- Mapa 1. Distribución de las cubiertas vegetales en el T.M. de La Zoma en 1956.
- Mapa 2. Distribución de las cubiertas vegetales previa al incendio en el T.M. de La Zoma en 2009.
- Mapa 3. Distribución de las cubiertas vegetales en el T.M. de La Zoma tras el incendio de 2009.
- Mapa 4. Simulación de la distribución de las cubiertas vegetales en el T.M. de La Zoma en 2050.









Leyenda

Situación "Plantando Agua"

Cobertura

Bosque

Vegetación mixta

Herbáceo

Suelo desnudo



Proyecto Plantando Agua

Mapa 4. Simulación de la distribución de las cubiertas vegetales en el T.M. de La Zoma en 2050.

PNOA 2012 0,5m

00,250,51 Km

1:18.000

Fecha: 28 de junio de 2016

Autor: Guillermo Enguita Sánchez

Grado en Ciencias Ambientales

Universidad de Zaragoza

Escuela Politécnica Superior de Huesca