



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

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.

Autor

Guillermo Enguita Sánchez

Directores

José Manuel Nicolau Ibarra

Ramón Juan Reiné Viñales

Grado en Ciencias Ambientales
Escuela Politécnica Superior de Huesca

Año 2016

Agradecimientos

Estas líneas van dedicadas a todas aquellas personas que de alguna manera pusieron de su parte para que este trabajo saliera adelante.

A mis compañeros y amigos, pues en todo momento fueron una fuente de moral e inspiración. Me gustaría dar gracias, en particular, a Antonio Edo por todas las experiencias compartidas en el campo y su ayuda.

A mis directores, José Manuel Nicolau Ibarra y Ramón Juan Reiné Viñales por su dedicación y empeño. Gracias por enseñarme una nueva forma de trabajo y compartir todo vuestro saber con ilusión.

A mis padres, cuyo esfuerzo diario forma parte de este trabajo, y a mis hermanos, por mostrarme siempre su apoyo.

A todo el personal, que en algún momento se prestó a colaborar desinteresadamente facilitando la labor realizada.

Gracias a todos.

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 order to make an ecological restoration of the municipality, the project “Plantando Agua – Revegetación de la zona de las Cuencas Mineras” was devised by Aquabona Company, in collaboration with ECODES foundation and the department of rural development and sustainability of the Government of Aragon. 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 situations through photointerpretation with GIS tools as well as using the model developed by Zhang et al. (2001). The situations have been: traditional situation in 1956, pre-fire in 2009, after fire situation in 2012 and two future scenarios in 2050, one of them with a simulated climate change situation. Finally, trend obtained 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. Furthermore, it has been observed that climate variations has more influence than changes in plant cover in water production which is cushioned by the vegetal covers’ effect.

Key words: blue and green water, water yield, land cover change, photointerpretation.

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. Con el fin de realizar la restauración ecológica del municipio, se redacta el Plan Director “Plantando Agua – Revegetación de la zonas de las Cuencas Mineras (2013)” mediante iniciativa de la empresa Aquabona en colaboración con la fundación ECODES y el departamento de desarrollo rural y sostenibilidad del Gobierno de Aragón. 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. Mediante fotointerpretación con herramientas de GIS y empleando el modelo de Zhang et al. (2001), se ha estudiado el cambio y evolución del ciclo hidrológico en La Zoma en distintos escenarios temporales: un escenario tradicional en 1956, situación pre-incendio en 2009, situación tras el incendio en 2012 y dos escenarios de futuro en 2050, uno bajo situación de cambio climático simulada. La tendencia obtenida muestra 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. Además la tendencia vista muestra que el clima influye más en la variación del balance hídrico y que se ve amortiguado por el efecto de las cubiertas vegetales.

Palabras clave: agua verde y azul, producción de agua, cambio cobertura del suelo, fotointerpretación.

Índice

1. Introducción	2
2. Antecedentes y objetivos	3
3. Materiales y métodos.....	4
3.1. Descripción del área de estudio	4
3.1.1.Ubicación y dimensiones	4
3.1.2.Morfología y geología	4
3.1.3.Vegetación	5
3.2. Desarrollo del trabajo	6
3.2.1.Fotointerpretación y digitalización	6
3.2.1.1. Descarga de información digital	6
3.2.1.2. Integración en un SIG y configuración del proyecto.....	7
3.2.1.3. Digitalización.....	8
3.2.1.3.1.Digitalización del escenario tradicional, pre-incendio y post-incendio .	8
3.2.1.3.2.Composición del escenario de futuro	9
3.2.1.3.3.Manejo de las tablas de atributos y correcciones topológicas	9
3.2.1.3.4.Resolución de dudas en campo.....	10
3.2.1.3.5.Edición de mapas finales.....	10
3.2.2.Aplicación del modelo de Zhang <i>et al.</i> (2001).....	10
3.2.2.1. Introducción al modelo de Zhang <i>et al.</i> (2001).....	10
3.2.2.2. Aplicación del modelo de Zhang <i>et al.</i> (2001) al área de estudio.....	11
3.2.3.Análisis estadístico	13
3.2.3.1. Ajuste de los datos de la serie climática del escenario tradicional	13
3.2.3.2. Tratamiento estadístico de los resultados de agua verde y agua azul	13
4. Resultados	14
4.1. Resultados por escenarios	14
4.1.1.Escenario tradicional.....	14
4.1.2.Escenario pre-incendio	16
4.1.3.Escenario post-incendio.....	19
4.1.4.Escenario proyecto “Plantando Agua”	20
4.1.5.Escenario de cambio climático en “Plantando Agua”	22
4.2. Comparación entre escenarios	25
4.2.1.Distribución de las cubiertas vegetales.....	25
4.2.2.Comparación climática de los escenarios	26
4.2.3.Evolución del balance de agua verde y azul entre escenarios (valores unitarios)....	28
4.2.4.Evolución del balance de agua verde y azul entre escenarios (valores totales).....	29
5. Discusión	32
6. Conclusiones.....	34
7. Bibliografía.....	35



8. Anexos 38

Anexo I: Resultados de la resolución de dudas en el campo

Anexo II: Mapas elaborados para la resolución de dudas en campo

Anexo III: Mapas resultantes de los cuatro escenarios digitalizados

Anexo IV: Resultados estadísticos de la prueba de Dunn-Bonferroni

1. Introducción

El papel hidrológico y meteorológico de los bosques ha suscitado interés a lo largo de la historia. A día de hoy se conservan textos y manuscritos que dan constancia al respecto desde la época romana, edad media o revolución francesa entre otros (Andréassian, 2004). El interés por el conocimiento de la relación bosque-agua perdura hoy en día habiendo confrontación de ideas entre dos paradigmas: el bosque como productor de agua y el bosque como consumidor.

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 (Calder *et al.*, 2007). Existen recopilaciones bibliográficas donde se evidencia esta idea generalizada, quizás con un bajo soporte científico aunque se trate de pensamientos arraigados en la sociedad por tradición (Andréassian, 2004). Calder (1998) recoge experiencias que han intentado explicar este paradigma, las cuales concluyen que los bosques no contribuyen al aumento de la precipitación pero retroalimentan al sistema de precipitaciones al tener mayor capacidad de evapotranspiración.

Por otra parte, la visión del bosque como consumidor de agua ha ido ganando peso, sobre todo, tras el desarrollo de modelos matemáticos que intentan estimar las relaciones entre precipitación y escorrentía en las cuencas hidrológicas. Los primeros modelos de consumo de agua no consideraban el papel de la vegetación en la evapotranspiración, 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 en las cubiertas vegetales al balance hídrico total. El 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 eficiente en el consumo de agua. La fórmula expuesta por Zhang *et al.* (2001) sirve para estudiar cómo

evoluciona el balance hídrico entre agua azul y verde (García-Estríngana *et al.*, 2014). Entendemos el término agua azul como la forma líquida de agua aprovechable por la sociedad que transcurre formando los flujos de escorrentía y, por agua verde, aquella utilizada por la vegetación (Falkenmark, 2003).

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 el paisaje. Se tratan de procesos naturales que son importantes en el mantenimiento de la biodiversidad. 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. 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. 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.

2. 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 de 7300 ha. El presente TFG 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).

Años después, mediante la iniciativa de la empresa Aquabona con la colaboración de la fundación de Ecología y Desarrollo (ECODES) y el departamento de desarrollo rural y sostenibilidad del Gobierno de Aragón se redacta el Plan Director *“Plantando Agua – Revegetación de la zonas de las Cuencas Mineras (2013)”* con el fin de llevar a cabo la restauración ecológica de los municipios mencionados anteriormente. No se trata de una reforestación convencional, sino de un proyecto enfocado a sobreponerse a los retos del siglo XXI en un escenario de cambio climático y social en la zona. Entre los objetivos del proyecto se incluye la optimización del ciclo del agua como un balance equilibrado entre producción de agua azul o agua de boca y la producción de agua verde o retenida por las cubiertas forestales (Contratas Ancar S.L., 2013).

El TFG que se presenta tiene como objetivo general estudiar el cambio y 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, 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 *“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:

- Diferenciar entre cubiertas vegetales distintas (bosque, herbácea, vegetación mixta y suelo desnudo) mediante fotointerpretación con herramientas de GIS en los cinco escenarios.
- Realizar el balance entre agua verde y agua azul en los cinco escenarios descritos utilizando el modelo de Zhang *et al.*, (2001).
- Analizar cómo influye el cambio de usos del suelo y el clima en el balance de agua verde y agua azul.

3. Material y métodos

3.1 Descripción del área de estudio

3.1.1 Ubicación y dimensiones

El lugar donde se ha desarrollado el trabajo se ubica en la parte suroriental del macizo ibérico, próxima a las sierras del Maestrazgo, y dentro de la subcuenca del río Guadalope, perteneciente a la cuenca del río Ebro (Contratas Ancar S.L., 2013).

El área de estudio engloba la totalidad de 1.234 hectáreas correspondientes a los municipios de La Zoma (1.017 ha.), Cañizar del Olivar (210 ha.) y Castel de Cabra (7 ha.) sobre los cuales está planteada la ejecución del Plan Director en la comarca de Cuencas Mineras. La superficie quemada del T.M. de la Zoma (Teruel) representa el 70% de su territorio, siendo el municipio más afectado entre aquellos que sufrieron el fuego (Contratas Ancar S.L., 2013).

La zona de trabajo está formada por fincas de titularidad privada y montes de utilidad pública. Las parcelas privadas suponen un total de 390,45 hectáreas, siendo un 38,4% del T.M. Por otra parte, la superficie de montes quemados gestionados por el departamento de Medio Ambiente en la Zoma es de 628,83 ha. Los montes afectados son: TE-84, Cabezo del hierro (334,73ha. quemadas), TE-85, Solana de la Sierra (292,1 ha) en La Zoma. El incendio arrasó prácticamente con la totalidad de la superficie de estos montes, suponiendo un 50% de la superficie afectada. 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 fueron dañadas un menor número de hectáreas pero donde también se han proyectado actuaciones. Los montes sobre los que se va a actuar quedan enmarcados en la hoja 518 de la serie 1/50.000 del I.G.N, HUSO 30T XL91. Se ubican entre las siguientes coordenadas UTM (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.

3.1.2 Morfología y geología

La cuenca del río Guadalope presenta grandes afloramientos del Cretácico, Paleógeno y Jurásico. También existen zonas de afloramientos menor extensión de los periodos Triásico, Mioceno y Cuaternario. Dicho esto, los materiales más abundantes son: calizas, margas y

areniscas del Cretácico inferior; y calizas y dolomías del Cretácico superior. También se dan zonas de conglomerados, arcillas y areniscas de mayor edad. Se dan también fondos de valle y zonas basales de arcillas y margas. Así, la mayoría de la superficie afectada se asienta sobre calizas, como tal, o como dolomías o margas. Todos ellos de carácter básico por lo general, exceptuando zonas más antiguas y ácidas, como las arcillas, areniscas y conglomerados de Cabezo del Hierro (Contratas Ancar S.L., 2013).

Podemos ver en el campo claramente morfologías plegadas en largos anticlinales y sinclinales sobre las cuales se ha asentado la red fluvial generando zonas kársticas. La red fluvial sobre los materiales terciarios produce numerosas ramblas, como el barranco de la Carbonera, que generan problemas de erosión y creación de conos de deyección en la zona. En los lugares con litologías cuarzíticas, se forman grandes cuevas, barras y crestas. Existen también zonas de materiales arcillosos los cuales están afectados por fuertes acarcavamientos (Contratas Ancar S.L., 2013).

3.1.3 Vegetación

El área de trabajo queda enmarcada dentro del piso bioclimático supramediterráneo y ombroclima seco (350-600 mm). A grandes rasgos, son típicos de este piso los quejigares, encinares, melojares y sabinares (Martínez, 1987). El paisaje tradicional es el resultado de la interacción del hombre con su entorno, el cual ha manejado el medio natural en busca de aprovechamientos de leña, carbón, cultivos y pastos modelando el paisaje. La agricultura, afectó, sobre todo, a las zonas de encinares y quejigares desarrollándose más el pastoreo por las zonas de pinar, melojo y quejigo (Contratas Ancar S.L., 2013).

A mediados del siglo XX la presión antrópica sobre el medio descendió, reduciéndose a mínimos los aprovechamientos en el monte. Este hecho junto a las políticas de reforestación del antiguo ICONA (Instituto para la Conservación de la Naturaleza) tuvo efecto en el paisaje. Las zonas forestales y arbustivas se densificaron, iniciándose además la matorralización de los pastos. De esta forma el paisaje pre-incendio presenta un claro dominio de especies coníferas sobre frondosas (Contratas Ancar S.L., 2013).

Dentro del perímetro de trabajo podemos encontrar formaciones de pinares naturales, principalmente, de *Pinus sylvestris* y *Pinus nigra*. Tras el incendio ha quedado una mancha de pinar en la umbría del alto de Majalinos y otra en la zona de la fuente de la Navarra. Además pueden aparecer especies acompañantes como *Quercus ilex*, *Quercus faginea*, *Sorbus domestica*, *Juniperus communis*, *Juniperus thurifera* o *Juniperus oxycedrus*. También hay zonas de *Pinus pinaster*, las cuales han respondido bien tras el incendio. Las manchas de *Pinus*

pinaster provienen, en gran parte, de las repoblaciones realizadas entre 1955 y 1975, como sucede en la zona de Cabezo del Hierro. Próximo a las estas zonas encontramos *Cistus laurifolius* y *Cistus populifolius*. Por otra parte, existen sabinares y enebrales en zonas pedregosas, muy afectados por el incendio. En la zona norte predominaban los encinares que sufrieron afección total prácticamente. Añadir que en algunas zonas de umbría próximas a la finca de La Mezquitilla existe *Pinus sylvestris* acompañado por pies de *Ilex aquifolium* y algunos de *Taxus baccata*, en las zonas más rocosas y altas (Contratas Ancar S.L., 2013).

3.2 Desarrollo del trabajo

La realización del presente TFG tuvo tres bloques principales para la consecución de los objetivos específicos: fotointerpretación y digitalización de los escenarios de estudio, aplicación del modelo de Zhang *et al.* (2001) y análisis estadístico. Los tres bloques se reprodujeron en distintas épocas temporales para poder abordar el estudio de la evolución histórica del balance entre agua verde y agua azul según el tipo de cubiertas vegetales existentes en distintos escenarios temporales. Las épocas seleccionadas se ajustaron a la información digital disponible y estas fueron: escenario tradicional de los años sesenta previos al éxodo rural, año 2009, justo antes del incendio, año 2012, tras el incendio y año 2050, para las situaciones simuladas de futuro bajo cambio climático y sin él.

3.2.1 Fotointerpretación y digitalización

3.2.1.1 Descarga de información digital

Se trabajó con información digital, ortofotos y fotografías aéreas de las distintas épocas a estudiar del área de trabajo. A través de la Infraestructura de Datos Espaciales de Aragón (IDEARAGON, 2016), se descargaron las ortofotos 3-1,3-2,3-3,4-2,4-3 del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) de 2009 y 2012 respectivamente. Estas imágenes corresponden a la hoja 518 (Montalbán) del Mapa Topográfico Nacional a escala 1:50000. Para la situación tradicional se utilizaron fotografías aéreas del Vuelo Americano 1956-1957 serie B, las cuales fueron obtenidas de la fototeca digital de la plataforma electrónica del Instituto Geográfico Nacional (IGN, 2016). Se descargaron fragmentos del vuelo ampliados a escala 1:15000 con los que posteriormente se hizo la composición de la imagen final. En resumen, como muestra la Tabla 1:

Escenario	Información digital
Tradicional	Vuelo Americano 1956 Serie B
Pre-incendio	PNOA 2009 0,5 m
Post-incendio	PNOA 2012 0,5 m
Futuro (Plantando Agua)	PNOA 2012 0,5 m

Tabla 1. Fuentes de información digital para cada escenario.

3.2.1.2 Integración en SIG y configuración del proyecto

El software informático empleado para montar el proyecto fue QGIS 2.10.1. (QGIS Development Team, 2016). Se definió el sistema de coordenadas de referencia (SCR) ETRS89 UTM30 como marco de referencia para el proyecto y seguidamente se añadió la información digital al proyecto. Las fotografías del Vuelo Americano tuvieron que ser georreferenciadas y para ello se empleó la herramienta de georreferenciación GDAL (Figura 1). En cada foto se introdujeron cuatro Puntos de Control sobre el Terreno (PCT) a los cuales se les adjudicaron coordenadas idénticas a cuatro puntos de las ortofotos del PNOA. Se realizó para todas las fotografías una transformación de tipo polinomial, utilizando el método de remuestreo de vecino más próximo y estableciendo el ETRS89 como SCR.

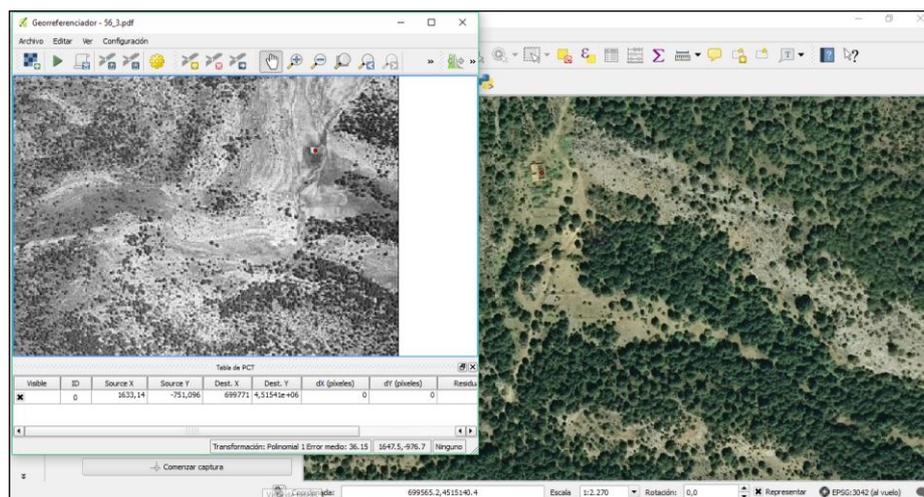


Figura 1. Georreferenciación VA56 con herramienta GDAL: marcado de PCT.

3.2.1.3 Digitalización

Se añadió al proyecto la capa vectorial “Perímetro de actuación”, proporcionada por Contratas ANCAR S.L., que sirvió para marcar el área a digitalizar. La capa fue re proyectada del SCR WSG84 al SRC definido. Añadir que la superficie de la capa es de 1.257ha, valor que fue tomado como base para los cálculos posteriores y que difiere de las 1.234ha de actuaciones establecidas en el Plan Director.

Previo al inicio de la digitalización en sí, se establecieron las cubiertas vegetales entre las que iba a discriminar. Las cubiertas que se iban a digitalizar fueron bosque, vegetación mixta, cubierta herbácea y suelo desnudo, siguiendo las categorías que realiza Zhang *et al.* (1999; 2001) en función de los coeficientes de disponibilidad de agua (w) que definen en sus investigaciones (ver valores más adelante en apartado 3.2.2.2.). Entendemos por cada cobertura lo siguiente:

- Bosque: cubierta forestal con densidad alta de pies.
- Vegetación mixta: mezcla de matorral, plantas herbáceas y bosque con baja densidad de pies.
- Herbáceo: zonas de pastos y cultivos.
- Suelo desnudo: afloramientos rocosos o extensiones de terreno sin vegetación, como las pistas forestales y otras vías de comunicación.

Añadir que la digitalización de las capas poligonales se hizo con ayuda de las herramientas de edición auto-ensamblado, crear y borrar anillo, herramienta de nodos y remodelar objeto espacial. También se incorporaron al proyecto la hoja 518 del Mapa Topográfico de Aragón (IDEARAGON, 2016) y el Modelo Digital del Terreno (IGN, 2016), generando el correspondiente mapa de sombras, ambos con el fin de facilitar la digitalización.

3.2.1.3.1 Digitalización del escenario tradicional, pre-incendio y post-incendio

Para los tres primeros escenarios se digitalizó las tres cubiertas más extensas o más sencillas de diferenciar en cada época por separado, creando una capa (*shape*) para cada una de ellas. Después se combinaron con la herramienta de gestión de datos “combinar archivos *shape* en uno”. Finalmente, se obtuvo el resultado final con las cuatro cubiertas diferenciadas ejecutando el geoproceto “unión”, entre la capa combinada y la capa “perímetro de actuación”. Para cada resultado final se hizo el geoproceto “disolver” por el campo cobertura para simplificar la tabla de atributos y así facilitar su manejo.

3.2.1.3.2 Composición del escenario de futuro

En esta ocasión, se partió de la capa “Rodales Plan Director” facilitada por Contratas ANCAR S.L. en la que figuran los rodales con las actuaciones proyectadas. Se adicionó al archivo *shape* un nuevo campo de texto en la tabla de atributos llamado “cobertura” para reclasificar los distintos tipos de cubiertas vegetales en función de las acciones planteadas. Los rodales que no van a ser objeto de intervención, como fincas particulares, o aquellos en los que todavía no se ha determinado las actuaciones a realizar, se reclasificaron según el estado actual en el que están. La reclasificación se llevó a cabo según lo descrito en el Plan Director. De esta forma, se dejaron como bosque aquellos rodales en los que se describían numerosos rebrotes y como vegetación mixta aquellos con matorral o en proceso de matorralización. Añadir que también se consideró las modificaciones al Plan Director posteriores a su publicación, en las que los rodales del 15 al 20 pasaron a dejarse como zonas de pasto.

Como ya se ha apuntado, este escenario es una combinación de lo proyectado en el Plan Director y la situación post-incendio. Se exportaron en formato *shape* por separado las cubiertas de bosque y vegetación mixta. Se ejecutó el geoproceso “unión” de la cobertura exportada “bosque Plan Director” con la capa “bosque post-incendio” obteniendo una nueva capa a la que llamamos “bosque futuro”. Este paso se reprodujo con la vegetación mixta. En ambos casos se utilizó el geoproceso “disolver” con el mismo fin que en el apartado 3.2.1.3.1.

A continuación se realizó la unión entre “bosque futuro” y “vegetación mixta futuro”, se seleccionaron los solapes producidos y se reclasificaron como bosque para después realizar de nuevo el geoproceso “disolver”. El archivo resultante se combinó mediante unión con la capa “suelo desnudo post-incendio”, digitalizada anteriormente. Se volvieron a reclasificar los polígonos formados con denominación errónea y se ejecutó de nuevo el geoproceso “disolver”. Para terminar se procesó la unión entre la capa formada y la capa “perímetro de actuación” para obtener el resultado final con vegetación mixta, realizando después la reclasificación y disolución del campo cobertura nuevamente. Este mapa resultante se empleó para las dos situaciones de futuro propuestas.

3.2.1.3.3 Manejo de las tablas de atributos y correcciones topológicas

Se depuraron las tablas de atributos obtenidas eliminando los polígonos “*silver*” formados al realizar la unión con la capa “perímetro de actuación”. Luego se añadió un campo numérico decimal en cada escenario para el cálculo de las hectáreas de cada polígono empleando la calculadora de campos. Al ver que la superficie total era mayor que la capa “perímetro de actuación” se utilizó la herramienta “comprobador de topologías”,

introduciendo las reglas “no debe superponer” y “no debe contener extremos sueltos” en busca de superposiciones y huecos en la capa para ser corregidos.

3.2.1.3.4 Resolución de dudas en campo

Se programaron cuatro salidas al campo para visitar el área de trabajo y comprobar mediante inspección visual el terreno para corregir la fotointerpretación. Una vez inmersos en el proceso de digitalización, se planteó una salida de campo específica para resolver *in situ* las dudas surgidas (Anexo I). Se elaboró un mapa de la zona compuesto por una capa de puntos (19) creada con las dudas, el perímetro de actuación y el MTA5 (Anexo II). Por otra parte, los datos se incorporaron a un GPS para su búsqueda en campo. Del mismo modo, en campo se marcaron nuevos puntos GPS interesantes para completar la cartografía del TFG.

3.2.1.3.5 Edición de mapas finales

Para la edición de los mapas finales se empleó el software ArcGIS® 10.1 (ESRI, 2012). Se utilizó la ventana de edición (*Layout view*) de este programa al resultar su manejo de mayor facilidad. Se compusieron cuatro mapas, uno por cada escenario digitalizado (Anexo III):

- 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.

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

3.2.2.1 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, teniendo usos potenciales en estudios sobre cambios de uso del suelo a escala de cuenca Zhang *et al.* (2001). 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 es la recarga de agua subterránea y con ΔS como el cambio en el almacenamiento de agua del suelo, que puede asumirse cero para periodos de tiempo entre 5 y 10 años Zhang *et al.* (2001).

La evapotranspiración real se puede expresar en función de la precipitación y la evapotranspiración potencial (ETP) según Zhang *et al.* (1999) 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 según Zhang *et al.* (1999) en función de la temperatura para distintas latitudes, y w el coeficiente que representa la disponibilidad de agua para las plantas. 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 para distintas latitudes por Zhang *et al.* (1999) de la siguiente manera:

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

De esta manera empleamos la ecuación revisada por Komatsu *et al.* (2012):

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

Se asume que la precipitación total se reparte entre evapotranspiración y escorrentía o drenaje profundo por lo que sirve para mostrar las consecuencias sobre la evapotranspiración y la escorrentía, derivadas por los cambios en el tipo de cubierta o extensión de la misma (García-Estríngana *et al.*, 2014). Dicho esto identificaremos el agua verde con la evapotranspiración y el agua azul como la escorrentía resultante de la diferencia entre ET y P.

3.2.2.2 Aplicación del modelo de Zhang *et al.* (2001) al área de estudio

Se aplicó el modelo para los cuatro escenarios digitalizados, más un nuevo escenario de futuro bajo efectos de cambio climático marcado (reducción del 20% en la precipitación esperada y aumento de 8°C en la temperatura). Para todos los casos se necesitaron los siguientes datos: temperatura media anual, precipitación total anual, coeficiente de disponibilidad de agua (w) de cada cubierta vegetal y superficie de las mismas. A modo de resumen, podemos ver en la Tabla 2 de donde se han obtenido los datos:

Escenario	Temperatura y precipitación	Superficie (ha)
Tradicional	Comparación series climáticas (periodo 2004-2013) de la estación meteorológica de Montalbán y "Aguas del Maestrazgo" + Ajuste polinomial con datos de la estación meteorológica Montalbán (periodo 1958-1967)	Digitalización Vuelo Americano
Pre-incendio	Estación meteorológica "Aguas del Maestrazgo"	Digitalización PNOA 2009
Post-incendio	Estación meteorológica "Aguas del Maestrazgo"	Digitalización PNOA 2012
Plantando Agua	Serie sintética IDAEA (García-Estríngana <i>et al.</i> , 2014)	Digitalización PNOA 2012
Plantando agua con cambio climático	Serie sintética IDAEA (García-Estríngana <i>et al.</i> , 2014)	Digitalización PNOA 2012

Tabla 2. Fuentes de datos para la aplicación de Zhang *et al.* (2001).

Para cada escenario se estudiaron periodos de diez años, seleccionando la información relativa a los cinco años anteriores y posteriores a los años de referencia establecidos en la digitalización (1956, 2009, 2012 y 2050). Se exceptuó el periodo post-incendio en el que se cogió la misma serie de diez años que en el escenario pre-incendio, al no disponerse de datos climáticos de la estación "Aguas del Maestrazgo" desde el 2013 en adelante.

Igualmente, en el escenario tradicional se cogió la serie del año 1958 al 1967 de la estación meteorológica de Montalbán al no tener registros anteriores a 1958 y no existir datos de la estación "Aguas del Maestrazgo" de La Mezquitilla, zona más próxima al lugar de estudio. Para este caso se generó una nueva serie de datos realizando un ajuste polinomial con los datos disponibles de la serie 1958-1967 de la estación meteorológica de Montalbán (véase apartado 3.2.3.1).

Los coeficientes de disponibilidad de agua (w) utilizados para todos los escenarios 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).

Finalmente, 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 (evapotranspiración) y agua azul (escorrentía) en cada uno de los cinco escenarios estudiados. Al aplicar el modelo se obtienen volúmenes en mm en cada cobertura, a los que nos referiremos como valores unitarios. Pasando los mm resultantes de cada cubierta a m^3/ha , y multiplicando por las hectáreas calculadas de cada superficie obtenemos volúmenes en m^3 , a los que nos referiremos como valores totales. Sumando los volúmenes de escorrentía (Q) se obtiene el volumen total de agua azul y sumando los volúmenes de evapotranspiración (ET) se logra el valor total de agua verde.

3.2.3 Análisis estadístico

3.2.3.1 Ajuste de los datos de la serie climática del escenario tradicional

Se compararon las series climáticas del periodo 2004-2013 de las estaciones meteorológicas de Montalbán y “Aguas del Maestrazgo” mediante el test de normalidad de Saphiro-Wilk. Tras esto, se aplicaron coeficientes de correlación de Pearson para comprobar la significancia y, después, se realizó el ajuste polinómico. Con las ecuaciones de ajuste obtenidas se generaron las nuevas series de datos. Se operó de la misma manera para precipitación y temperatura.

3.2.3.2 Tratamiento estadístico de los resultados de agua verde y agua azul

Se trataron estadísticamente los datos climáticos y los volúmenes de agua verde y azul obtenidos. Se calculó media y desviación estándar de cada serie de diez datos. Para comparar los volúmenes finales de agua azul y agua verde producidos en los cinco escenarios, se utilizó el test ANOVA no paramétrico de Kruskal-Wallis para muestras independientes. Cuando el resultado de este test fue significativo se aplicó el test de separación de medias de Dunn-Bonferroni. El mismo procedimiento se realizó para comparar dentro de cada escenario los milímetros de agua azul y agua verde producidos en cada una de las coberturas. En ambas ocasiones se utilizó el programa informático IBM SPSS Statistics versión 22.0 (IBM Corp., 2013). Añadir que este procedimiento se empleó también para tratar las series climáticas de precipitación y temperatura utilizadas.

4. Resultados

4.1 Resultados por escenarios

4.1.1 Escenario tradicional

Cobertura vegetal

La distribución de las cubiertas se puede ver en el Mapa 1, disponible en el Anexo III.

En cuanto a la extensión de las mismas, los resultados obtenidos fueron los siguientes:

- Bosque: 410,07 ha.
- Herbáceo: 683,20 ha.
- Vegetación mixta: 153,07 ha.
- Suelo desnudo: 10,65 ha.

Se trata de un escenario en el que la mayor extensión corresponde a vegetación herbácea, pastos y cultivos. La segunda mayor extensión es de bosque, seguida de la vegetación mixta y, por último, la superficie de suelo desnudo en una proporción baja.

Caracterización climática

Los resultados del ajuste de los datos del escenario tradicional fueron los visibles en la Tabla 3. Se obtuvieron resultados significativos tanto temperatura como precipitación y se generaron los datos climáticos mostrados en la Tabla 4.

Parámetro relacionado	Fórmula	R	p
Temperatura (serie de datos 2004-2013)	$y = 0,1888x^2 - 3,9676x + 30,572$	0,76	0,046
Precipitación (serie de datos 2004-2013)	$y = 0,0021x^2 - 1,0175x + 599,28$	0,457	0,001

Tabla 3. Resultados del ajuste de datos del escenario tradicional mediante la comparación de las series de precipitación y temperatura del periodo 2004-2013. R = coeficiente de regresión, p= valor de significancia. N =10 años.

La temperatura media para el periodo estudiado es de 12,2°C, siendo 1966 el año más cálido con una temperatura media anual de 12,7°C. El mínimo se da en 1959 con una media anual de 11,7°C. En cuanto a la precipitación, coincide la máxima pluviometría total anual con el año 1959 en torno a 1125 mm. El valor es prácticamente el doble que en el resto de años donde todos los valores están entre 476 y 698,9 mm.

Situación	Años	Temperatura media anual (°C)	Precipitación total anual (mm)
Tradicional	1958	12,5	528,3
	1959	11,7	1125,6
	1960	12,1	545,2
	1961	11,8	502,9
	1962	12,1	698,9
	1963	12,5	566,6
	1964	12,6	511,9
	1965	12,1	574,4
	1966	12,7	503,7
	1967	12,6	476,1

Tabla 4. Datos climáticos corregidos del escenario tradicional. Fuente: Estación meteorológica de Montalbán y "Aguas del Maestrazgo".

Valores de agua verde

Los valores unitarios de agua verde obtenidos se pueden ver en la Tabla 5:

Cubierta 100%	Valor medio unitario y desviación estándar (mm)
Bosque	491,2 ± 86,0
Suelo desnudo	359,4 ± 49,4
Vegetación mixta	448,8 ± 66,4
Herbáceo	410,5 ± 55,6

Tabla 5. Valores unitarios de agua verde en el escenario tradicional.

Vemos que, para la situación climática dada y para un solo tipo de cubierta, el bosque es la cubierta que más evapotranspira, seguido de la vegetación mixta, vegetación herbácea y el suelo desnudo.

Aplicando la extensión de cada cubierta a los valores unitarios obtenemos los valores de consumo total, visibles en la Tabla 6:

Cubierta	Valor total medio y desviación estándar (m³)
Bosque	2.014.324 ± 352.704
Suelo desnudo	38.297 ± 5.258
Vegetación mixta	686.954 ± 101.584
Herbáceo	2.804.247 ± 380.101
Total agua verde	5.543.823 ± 839.596

Tabla 6. Valores totales de agua verde en el escenario tradicional.

Si nos fijamos en los valores totales, la cubierta herbácea es la que más agua consume por delante del bosque, la vegetación mixta y el suelo desnudo respectivamente.

Valores de agua azul

Los valores unitarios de agua azul por cubierta obtenidos en el escenario tradicional se muestran a continuación (Tabla 7):

Cubierta 100%	Valor unitario medio y desviación estándar (mm)
Bosque	112,1 ± 108,8
Suelo desnudo	243,9 ± 144,8
Vegetación mixta	154,6 ± 128,3
Herbáceo	192,9 ± 138,8

Tabla 7. Valores unitarios de agua azul en el escenario tradicional.

Observamos que el suelo desnudo es la cubierta que más agua azul produce. Después encontramos la cubierta herbácea, seguida de la vegetación mixta y el bosque. Al aplicar las hectáreas de cada cubierta digitalizada obtenemos los resultados de la Tabla 8:

Cubierta	Valor total medio y desviación estándar (m ³)
Bosque	459.849 ± 446.314
Suelo desnudo	25.992 ± 15.429
Vegetación mixta	236.605 ± 196.440
Herbáceo	1.317.842 ± 948.332
Total agua azul	2.040.289 ± 1.606.238

Tabla 8. Valores totales de agua azul en el escenario tradicional.

En cuanto a valores totales de producción de agua azul se refiere, la cubierta herbácea es la que más agua azul produce, a continuación se encuentra el bosque, seguido de la vegetación mixta y, finalmente, el suelo desnudo. El valor total de la cubierta herbácea es muy superior al resto de valores obtenidos.

4.1.2 Escenario pre-incendio

Cobertura vegetal

La situación pre-incendio ha quedado según lo dispuesto en el Mapa 2, disponible en el Anexo III. La extensión de cada cubierta fue la siguiente:

- Bosque: 718,728 ha.
- Herbáceo: 146,163 ha.
- Vegetación mixta: 376,737 ha.
- Suelo desnudo: 15,37 ha.

Se ha obtenido un escenario en el que la cobertura de bosque es la más extensa con diferencia, a continuación se encuentra la vegetación mixta con la mitad de extensión

prácticamente. Después la vegetación herbácea con 146,163 hectáreas y por último, en muy poca extensión, el suelo desnudo.

Caracterización climática

Como vemos en la Tabla 9, estamos en un periodo con temperaturas suaves, con una media de 10,4°C. El máximo está en 2012 donde se alcanza una temperatura de 11,2°C y en 2010 se da el mínimo del periodo con 9,8 °C. Las temperaturas oscilan poco respecto a la media del escenario. En cuanto a precipitaciones, no hay un año desmarcado del resto como en el caso anterior. En el año 2004 se da el máximo de precipitación total anual con 787,1 mm. El año con menor registro de precipitación, 444,3 mm, coincide con el año más caluroso, 2012. La media es de 577,8 mm totales anuales de precipitación.

Situación	Años	Temperatura media anual (°C)	Precipitación total anual (mm)
Pre-incendio	2004	10,2	787,1
	2005	10	581,4
	2006	11,3	505,9
	2007	10,2	591
	2008	10,1	731,4
	2009	11,1	478,4
	2010	9,8	639
	2011	10,5	450,7
	2012	11,2	444,3
	2013	10,1	568,5

Tabla 9. Datos climáticos escenario pre-incendio. Fuente: estación meteorológica "Aguas del Maestrazgo".

Valores de agua verde

Según vemos en la Tabla 10, se vuelve a repetir la tendencia del escenario anterior. Las cubiertas leñosas evapotranspiran la mayor cantidad del agua recibida. Así pues, las cubiertas producen agua verde en distinta cantidad pero vuelven a seguir el orden: bosque, vegetación mixta, herbáceo y suelo desnudo.

Cubierta 100%	Valor unitario medio y desviación estándar (mm)
Bosque	470,2 ± 61,4
Suelo desnudo	340,4 ± 33,8
Vegetación mixta	427,4 ± 47,7
Herbáceo	389,4 ± 39,3

Tabla 10. Valores unitarios de agua verde en el escenario Pre-incendio.

Aplicando las superficies digitalizadas, obtenemos los valores totales de producción de agua verde para cada cubierta en el escenario pre-incendio (Tabla 11).

Cubierta	Valor total medio y desviación estándar (m ³)
Bosque	3.379.261 ± 440.990
Suelo desnudo	52.313 ± 5.196
Vegetación mixta	1.610.326 ± 179.573
Herbáceo	569.214 ± 57.431
Total agua verde	5.611.115 ± 683.145

Tabla 11. Valores totales de agua verde en el escenario Pre-incendio.

En esta ocasión la producción total de agua verde de las cubiertas sigue el mismo orden que para los valores unitarios. El bosque es la cubierta que más evapotranspira con diferencia.

Valores de agua azul

Los resultados que se muestran en la Tabla 12, siguen la misma línea que en el escenario anterior. En cuanto a valores unitarios se refiere, la cubierta que más agua azul produce es el suelo desnudo por delante de la cubierta herbácea, la vegetación mixta y el bosque.

Cubierta 100%	Valor unitario medio y desviación estándar (mm)
Bosque	112,1 ± 108,8
Suelo desnudo	243,9 ± 144,8
Vegetación mixta	154,6 ± 128,3
Herbáceo	192,9 ± 138,8

Tabla 12. Valores unitarios de agua azul en el escenario Pre-incendio.

Por otra parte, los valores medios de producción total de agua azul, visibles en la Tabla 13, muestran lo contrario a los valores unitarios. El bosque produce más agua azul, seguido de la vegetación mixta, herbácea y suelo desnudo, tal y como pasaba en el escenario anterior pero en otras dimensiones.

Cubierta	Valor total medio y desviación estándar (m ³)
Bosque	773.400 ± 392.799
Suelo desnudo	36.494 ± 12.608
Vegetación mixta	566.384 ± 257.342
Herbáceo	275.286 ± 111.994
Total agua azul	1.651.566 ± 774.647

Tabla 13. Valores totales de agua azul en el escenario Pre-incendio.

4.1.3 Escenario post-incendio

Cobertura vegetal

La extensión de cada cubierta tras el incendio fue la siguiente:

- Bosque: 226,956 ha.
- Herbáceo: 845,335 ha.
- Vegetación mixta: 158,116 ha.
- Suelo desnudo: 26,591 ha.

En el Mapa 3 (Anexo III) podemos ver cómo ha quedado la distribución. Sobre la extensión de las cubiertas decir que encontramos un paisaje mayoritariamente herbáceo pues de las 1257 ha trabajadas, el 67,25% corresponde a superficie herbácea. En segundo lugar encontramos la superficie boscosa no quemada con un total de 226,956 ha. A continuación está la vegetación mixta con 158,116 ha y, como en otras ocasiones, en muy baja extensión el suelo desnudo.

Caracterización climática

Para el escenario post-incendio, como se indica en el apartado de metodología, se empleó la misma serie de diez años que en el escenario pre-incendio. Por esta razón la caracterización climática coincide con la del escenario anterior, temperatura media anual suave (10,4°C) y pluviometría total anual media de 577,8 mm.

Valores de agua verde

Del mismo modo, los valores unitarios de agua verde para el escenario post-incendio coinciden con los de la tabla 10. Aplicando las hectáreas, se producen cambios en los valores totales de producción de agua verde. En esta situación, como muestra la Tabla 14, la cubierta herbácea es la que más agua verde produce, muy alejado del bosque, vegetación mixta y el suelo desnudo en ese orden.

Cubierta	Valor total medio y desviación estándar (m ³)
Bosque	1.067.085 ± 139.253
Suelo desnudo	90.504 ± 8.990
Vegetación mixta	675.853 ± 75.366
Herbáceo	3.292.050 ± 332.157
Total agua verde	5.125.493 ± 555.711

Tabla 14. Valores totales de agua verde en el escenario Post-incendio.

Valores de agua azul

Como en el apartado anterior, se producen cambios en los valores totales. La Tabla 15 muestra que las cubiertas siguen el mismo orden de producción que en el caso del agua verde pero con menor diferencia entre m^3 producidos.

Cubierta	Valor total medio y desviación estándar (m^3)
Bosque	244.220 ± 124.036
Suelo desnudo	63.136 ± 21.813
Vegetación mixta	237.711 ± 108.006
Herbáceo	1.592.119 ± 647.717
Total agua azul	2.137.188 ± 901.481

Tabla 15. Valores totales de agua azul en el escenario Post-incendio.

4.1.4 Escenario proyecto “Plantando Agua”

Cobertura vegetal

La extensión de las cubiertas de la simulación de futuro fue la siguiente:

- Bosque: 463,38 ha.
- Herbáceo: 480,606 ha.
- Vegetación mixta: 286,424 ha.
- Suelo desnudo: 26,588 ha.

Podemos ver su distribución en el Mapa 4 (Anexo III). Vemos un escenario en el que hay equilibrio entre el bosque y el pasto con 463 y 480 hectáreas respectivamente. Después se encuentra la vegetación mixta con 286 hectáreas y por último, como en los otros escenarios, el suelo desnudo con apenas 26 hectáreas.

Caracterización climática

La serie sintética empleada, como se aprecia en la Tabla 16, estima un clima suave. En esta ocasión la temperatura media anual para el periodo escogido es de 10,6 °C, más baja que en los escenarios anteriores. La media máxima anual es de 11,2°C estimada para el año 2055 y la mínima media anual de 9,1°C en el año 2046.

Situación	Años	Temperatura media anual (°C)	Precipitación total anual (mm)
Plantando agua	2046	9,1	646,1
	2047	10,5	729
	2048	10,2	462,3
	2049	10,8	760,3
	2050	10,1	607,8
	2051	11,5	448,4
	2052	10,6	728,2
	2053	10,3	535,1
	2054	11,5	623,5
	2055	11,2	553,8

Tabla 16. Datos climáticos escenario "Plantando Agua". Fuente: IDAEA (García-Estríngana *et al.*, 2014).

Las precipitaciones para el periodo están en torno a 600 milímetros de precipitación total anual. Los años con más y menos precipitación se estima que sean 2049 y 2051, con 760,3 y 448,4 milímetros de precipitación. Tenemos una caracterización climática similar a los escenarios de pre y post-incendio.

Valores de agua verde

Tras la aplicación del modelo de Zhang *et al.* (2011), se muestra en la Tabla 17 los valores unitarios de agua verde estimados.

Cubierta 100%	Valor unitario medio y desviación estándar (mm)
Bosque	490 ± 61,1
Suelo desnudo	352,1 ± 34,8
Vegetación mixta	443,7 ± 48,4
Herbáceo	403,2 ± 40,4

Tabla 17. Valores unitarios de agua verde en el escenario "Plantando Agua".

En esta situación volvemos a tener el bosque como la cubierta que más evapotranspira, seguida de la vegetación mixta, la cubierta herbácea y por último el suelo desnudo, habiendo poca diferencia entre cubiertas.

Fijándonos en la Tabla 18, vemos que el bosque sigue siendo la cubierta que más agua verde produce tras la aplicación de la extensión de cada tipo de superficie. La cubierta herbácea supera a la vegetación mixta. Las dos cubiertas que más agua verde producen presentan valores similares. Por último queda el suelo desnudo, siendo la única cubierta que no supera el millón de metros cúbicos de producción.

Cubierta	Valor total medio y desviación estándar (m ³)
Bosque	2.270.759 ± 283.061
Suelo desnudo	93.630 ± 9.244
Vegetación mixta	1.270.838 ± 138.519
Herbáceo	1.937.882 ± 194.094
Total agua verde	5.573.111 ± 624.639

Tabla 18. Valores totales de agua verde en el escenario "Plantando Agua".

Valores de agua azul

La producción de agua azul se mantiene con el suelo desnudo como mayor productor (Tabla 19) en valores unitarios. Además, continúa la tendencia de situaciones anteriores: suelo desnudo, herbáceo, vegetación mixta y bosque.

Cubierta 100%	Valor unitario medio y desviación estándar (mm)
Bosque	119,4 ± 49,6
Suelo desnudo	257,3 ± 75,9
Vegetación mixta	165,8 ± 62,5
Herbáceo	206,2 ± 70,4

Tabla 19. Valores unitarios de agua azul en el escenario "Plantando Agua".

Al calcular los valores totales se producen cambios como muestra la Tabla 20. La cubierta herbácea es la que produce mayor cantidad de agua azul, en torno a un millón de metros cúbicos. Después se encuentra el bosque y la vegetación mixta con la mitad de agua azul producida. Por último, el suelo desnudo con una aportación baja a la totalidad.

Cubierta	Valor total medio y desviación estándar (m ³)
Bosque	553.317 ± 229.914
Suelo desnudo	68.414 ± 20.184
Vegetación mixta	474.774 ± 178.940
Herbáceo	991.174 ± 338.646
Total agua azul	2.087.681 ± 767.571

Tabla 20. Valores totales de agua azul en el escenario "Plantando Agua".

4.1.5 Escenario de cambio climático en "Plantando Agua"

Cobertura vegetal

En este supuesto se trabaja con la misma distribución y extensión de cubiertas del escenario anterior.

Caracterización climática

El escenario planteado trabaja en una situación futura de cambio climático acentuado, con 20% menos de precipitación y un aumento de 8°C en la variación de temperaturas. De esta

manera se trabajó con los valores de la Tabla 21. Se trata del escenario más cálido donde la media del escenario asciende hasta los 14°C, más de tres grados superior a otros escenarios. La máxima temperatura media se da en 2054 con 15,2°C y la mínima en 2046 con 12,2°C, ambos valores superiores a las medias de los demás escenarios. Por otra parte, la precipitación total anual descende ligeramente ya que se busca trabajar en una situación de mayor sequía. A pesar de ello, la media obtenida no se diferencia mucho respecto a los otros casos trabajados (554,7 mm).

Situación	Años	Temperatura media anual (°C)	Precipitación total anual (mm)
Plantando agua con cambio climático	2046	12,2	594,4
	2047	13,6	669
	2048	13,5	423,3
	2049	14,1	694,4
	2050	13,6	553,8
	2051	15	407,5
	2052	14,2	660,3
	2053	13,9	484
	2054	15,2	562,6
	2055	15	498,4

Tabla 21. Datos climáticos escenario de cambio climático en "Plantando Agua".
Fuente: IDAEA (García-Estríngana *et al.*, 2014).

Valores de agua verde

Vemos que en la Tabla 22 se repite la tendencia dada en los demás escenarios y en cantidad parecida. Así pues, el orden de producción unitario de agua verde sigue siendo: bosque, vegetación mixta, herbáceo y suelo desnudo.

Cubierta 100%	Valor unitario medio y desviación estándar (mm)
Bosque	479,5 ± 67,9
Suelo desnudo	358,4 ± 39,5
Vegetación mixta	443,8 ± 56,1
Herbáceo	408,8 ± 47,3

Tabla 22. Valores unitarios de agua verde en el escenario "Plantando Agua" con cambio climático.

Al calcular los valores totales, visibles en la Tabla 23, vemos que se sigue el mismo orden que en el supuesto sin cambio climático pero con valores totales más bajos.

Cubierta	Valor total medio y desviación estándar (m ³)
Bosque	2.222.093 ± 314.939
Suelo desnudo	95.306 ± 10.520
Vegetación mixta	1.271.164 ± 160.832
Herbáceo	1.964.748 ± 227.318
Total agua verde	5.553.312 ± 713.294

Tabla 23. Valores totales de agua verde en el escenario "Plantando Agua" con cambio climático.

Valores de agua azul

Se sucede el mismo orden dado en situaciones anteriores pero con valores unitarios menores. El suelo desnudo sigue siendo la cubierta que más agua azul produciría, después la cubierta herbácea, la vegetación y, finalmente, el bosque como enseña la Tabla 24.

Cubierta 100%	Valor unitario medio y desviación estándar (mm)
Bosque	75,2 ± 34
Suelo desnudo	196,3 ± 62,6
Vegetación mixta	111 ± 46,1
Herbáceo	146 ± 55

Tabla 24. Valores unitarios de agua azul en el escenario "Plantando Agua" con cambio climático.

Al calcular los valores totales, como se ve en la Tabla 25, vemos como la extensión de superficie herbácea es la que mayor cantidad de agua azul produce en estas condiciones climáticas. La cubierta boscosa se encuentra en segundo lugar con la mitad de producción con valores parecidos a la vegetación mixta. Por último, se encuentra el suelo desnudo con una producción muy inferior como en los otros casos.

Cubierta	Valor total medio y desviación estándar (m ³)
Bosque	348.569 ± 157.731
Suelo desnudo	52.197 ± 16.639
Vegetación mixta	317.808 ± 131.884
Herbáceo	701.474 ± 264.231
Total agua azul	1.420.050 ± 570.390

Tabla 25. Valores totales de agua azul en el escenario "Plantando Agua" con cambio climático.

4.2 Comparación entre escenarios

4.2.1 Distribución de las cubiertas vegetales

Las extensiones calculadas a partir de la digitalización se muestran a continuación (Figura 2):

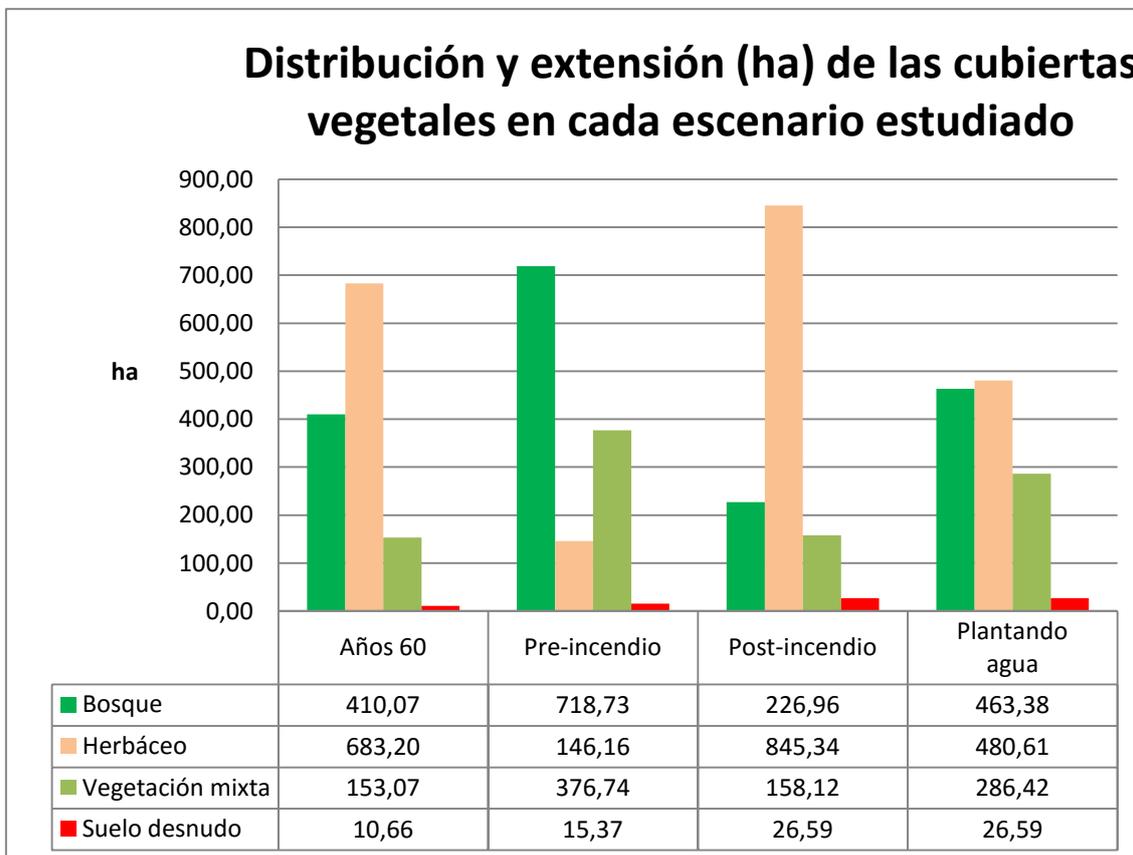


Figura 2. Distribución y extensión (ha) de las cubiertas vegetales en cada escenario estudiado.

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. Luego aumenta la superficie hasta valores ligeramente superiores a la situación en los años sesenta tras el efecto de la aplicación del Plan Director.

La superficie herbácea es la más elevada en el escenario tradicional. Disminuye alcanzando su valor más bajo en la época pre-incendio. Tras el incendio, llega a su máxima extensión, cercana a las 850 hectáreas. Después desciende tras la acción del Plan Director quedándose en valores intermedios entre la situación pre y post-incendio.

La vegetación mixta sigue un comportamiento similar al bosque aunque esta siempre es menor en extensión. Finalmente, 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.

4.2.2 Comparación climática de los escenarios

Como se aprecia en la Figura 3, la temperatura media entre los periodos pre-incendio – plantando agua se mantiene en torno a los 10°C. Por otra parte, tenemos dos periodos con una media mayor al resto. La temperatura en el escenario tradicional es de 12,3°C. La serie de datos del IDAEA con cambio climático estima una temperatura media de 14°C. Existen diferencias significativas entre los escenarios estudiados (Test Kruskal Wallis $p < 0,0001$). Los resultados del test de separación de medias indicaron que las situaciones pre-incendio, post-incendio y plantando agua no presentan diferencias significativas entre sí, pero sí con los escenarios tradicional y de cambio climático. Estos dos últimos no presentan tampoco diferencias entre sí (Figura 4).

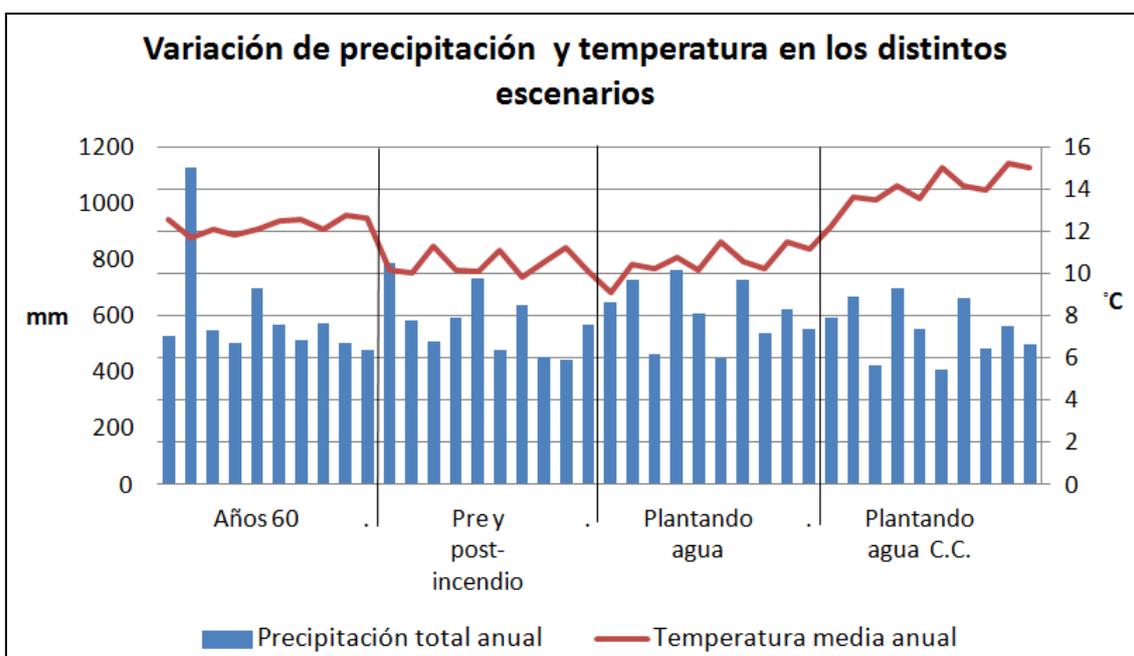


Figura 3. Variación de precipitación y temperatura en los distintos escenarios.

La precipitación se mantiene similar a lo largo de los escenarios trabajados. La media de precipitación anual es de 580 mm. El escenario más húmedo es el escenario “Plantando agua con 609,4 mm de precipitación. En el escenario tradicional existe un pico de pluviometría en 1959 donde se dobla la cantidad de precipitación dada en el resto del periodo con 1125 mm anuales totales. Esto convierte al escenario tradicional en el segundo más húmedo, con 603,3 mm. Por otra parte señalar el descenso de precipitaciones dado en la serie con cambio climático. No se trata de un descenso muy acusado pero se convierte en el periodo estudiado

más seco, con una media de 554 mm. Añadir que para las precipitaciones no se dan diferencias significativas entre escenarios (Test Kruskal Wallis $p=0,863$)

En resumen, tenemos dos escenarios que difieren del resto al ser más cálidos, pero no mucho más lluviosos. Estos son el escenario tradicional y el escenario simulado de cambio climático. A pesar de ello estamos trabajando en un área enmarcada dentro del tipo climático submediterráneo continental frío (Cuadrat *et al.*, 2007).

Muestra 1-Muestra 2	Estadístico de prueba	Estándar Error	Desv. Estadístico de prueba	Sig.	Sig. ajust.
2,000-3,000	,000	6,518	,000	1,000	1,000
2,000-4,000	-4,200	6,518	-,644	,519	1,000
2,000-1,000	21,900	6,518	3,360	,001	,008
2,000-5,000	-30,900	6,518	-4,741	,000	,000
3,000-4,000	-4,200	6,518	-,644	,519	1,000
3,000-1,000	21,900	6,518	3,360	,001	,008
3,000-5,000	-30,900	6,518	-4,741	,000	,000
4,000-1,000	17,700	6,518	2,716	,007	,066
4,000-5,000	-26,700	6,518	-4,097	,000	,000
1,000-5,000	-9,000	6,518	-1,381	,167	1,000

Cada fila prueba la hipótesis nula hipótesis nula de que las distribuciones de la muestra 1 y la muestra 2 son iguales.
Se muestran las significaciones asintóticas (pruebas bilaterales). El nivel de significancia es ,05.

Figura 4. Resultados de la comparación de las series de temperaturas entre escenarios. Prueba de Dunn-Bonferroni.

4.2.3 Evolución del balance de agua verde y azul entre escenarios (valores unitarios)

Tanto para agua verde y azul no se mostraron diferencias significativas entre escenarios. Las diferencias solo se muestran dentro de cada escenario entre tipos de coberturas. Fijándonos en los valores calculados, se ve que los resultados conseguidos no distan mucho entre ellos existiendo mayor diferencia con el escenario de cambio climático (Tablas 25 y 26).

Agua verde (mm)					
Situación	ET _b	ET _d	ET _m	ET _h	p
Tradicional	491,2 ± 86	359,4 ± 49,4	448,8 ± 66,4	410,4 ± 55,6	0,0001
Pre-Incendio	470,8 ± 61,4	340,3 ± 33,8	427,4 ± 47,7	389,4 ± 39,2	0,0001
Post-incendio	470,2 ± 61,4	340,3 ± 33,8	427,4 ± 47,6	389,4 ± 39,2	0,0001
Plantando Agua	490 ± 61,1	352,1 ± 34,7	443,7 ± 48,4	403,2 ± 40,3	0,0001
Plantando Agua C.C.	479,5 ± 68	358,4 ± 39,6	443,8 ± 56,1	408,8 ± 47,3	0,001
p	0,883	0,582	0,843	0,679	

Tabla 25. Comparación unitaria entre escenarios y cubiertas de los valores de agua verde. Valores medios, desviaciones estándar y significancia (p=0,05). ET =evapotranspiración, Q= escorrentía, b= bosque , d= suelo desnudo , m= vegetación mixta , h= herbáceo.

Agua azul (mm)					
Situación	Q _b	Q _d	Q _m	Q _h	p
Tradicional	112,1 ± 108,8	243,9 ± 144,8	154,6 ± 128,3	192,9 ± 138,8	0,0001
Pre-Incendio	107,6 ± 54,6	237,4 ± 82	150,3 ± 68,3	188,3 ± 76,6	0,002
Post-incendio	107,6 ± 54,6	237,4 ± 82	150,3 ± 68,3	188,3 ± 76,6	0,002
Plantando Agua	119,4 ± 49,6	257,3 ± 75,9	165,7 ± 62,4	206,2 ± 70,5	0,002
Plantando Agua C.C.	75,2 ± 34	196,3 ± 62,6	110,9 ± 46	146 ± 55	0,001
p	0,385	0,573	0,452	0,470	

Tabla 26. Comparación unitaria entre escenarios y cubiertas de los valores de agua verde. Valores medios, desviaciones estándar y significancia (p=0,05). ET =evapotranspiración, Q= escorrentía, b= bosque , d= suelo desnudo , m= vegetación mixta , h= herbáceo.

Para agua verde, las diferencias significativas se dieron en todos los escenarios entre las cubiertas de suelo desnudo y vegetación mixta, y, entre suelo desnudo y bosque (prueba de Dunn-Bonferroni, ver Anexo IV). Si comparamos entre escenarios la tendencia muestra que la cubierta boscosa es la que produce más agua verde en todos los escenarios, siendo esta variable en cantidad en función de las condiciones climáticas del periodo seleccionado. Se repite en todos los escenarios, de mayor a menor, el siguiente orden de evapotranspiración: bosque > vegetación mixta > herbáceo > suelo desnudo. Así mismo, los valores del escenario tradicional son más altos que los del resto de escenarios para agua verde. Se cumple también que los escenarios con mayor pluviometría obtuvieron resultados mayores de evapotranspiración, modulados con las temperaturas. Podemos ver el efecto del clima entre el escenario con cambio climático y el escenario sin cambio. Para la misma disposición de cubiertas, el resultado es distinto.

Para agua azul se obtuvieron dos resultados estadísticos. Las diferencias significativas en el escenario tradicional se dieron entre las cubiertas bosque y herbácea, bosque y suelo desnudo, y, vegetación mixta con suelo desnudo (prueba de Dunn-Bonferroni, ver Anexo IV). El resto de escenarios presentó significancia entre bosque y suelo desnudo. Por otra parte, la producción unitaria de agua azul sigue una tendencia complementaria a la mostrada por el agua verde ya que el orden de producción resultante es: suelo desnudo > herbáceo > vegetación mixta > bosque. La cubierta desnuda es la que mayor cantidad de agua azul produce por unidad de terreno. El escenario "Plantando Agua" es el que presenta los valores de producción más elevados. A continuación encontraríamos el escenario tradicional de los años sesenta seguido de los escenarios pre y post-incendio. El escenario simulado de cambio climático muestra los valores más bajos de producción de agua azul. Las diferencias entre milímetros de producción son bajas entre los escenarios dándose las mayores diferencias con el escenario "Plantando Agua" con cambio climático.

4.2.4 Evolución del balance de agua verde y agua azul entre escenarios (valores totales)

Los resultados obtenidos para los valores totales de producción de agua verde y agua azul no muestran diferencias significativas entre escenarios (agua verde: test de Kruskal Wallis $p=0,414$; agua azul: test de Kruskal Wallis $p=0,241$). En la Figura 5 se observa que en la situación post-incendio la cantidad de agua disponible es mayor. Después encontraríamos el escenario "Plantando agua" seguido del escenario tradicional, ambos en torno a los dos millones de metros cúbicos de producción. Por último, más distanciados encontramos el

escenario pre-incendio y el escenario con cambio climático donde la producción es próxima al millón y medio de metros cúbicos de agua en la superficie estudiada. Si revisamos 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 los dos millones cien mil metros cúbicos de producción. Tras la ejecución del Plan Director en el futuro, se vuelve a cantidades parecidas a las del escenario tradicional que se reducen al mínimo al simular la situación de cambio climático.

Los resultados de agua verde obtenidos están próximos a los cinco millones y medio de metros cúbicos en todos los casos, a excepción del escenario posterior al incendio en el que la producción desciende hasta los cinco millones ciento veinticinco mil metros cúbicos. En este caso podemos ver el efecto del tipo de cubierta en la producción. El valor de agua verde y azul es distinto al obtenido en la situación post-incendio habiendo sido empleada la misma serie de datos climáticos. La producción de agua verde asciende ligeramente desde los años sesenta a la situación pre-incendio. A continuación se llega al mínimo de producción tras el incendio. Finalmente, se prevé que se alcance un estado intermedio entre el escenario tradicional y el pre-incendio en el futuro, descendiendo ligeramente el valor con cambio climático respecto a la situación sin este condicionante.

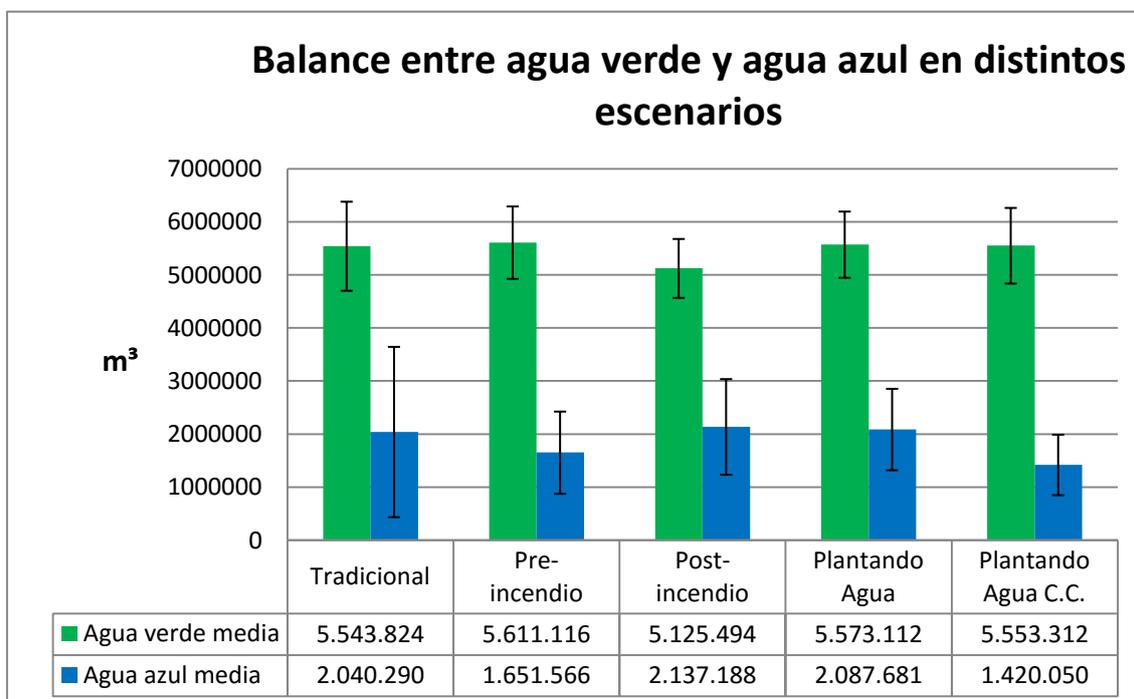


Figura 5. Balance entre agua verde y agua azul entre los distintos escenarios. Valores medios y desviación estándar.

El balance entre agua y verde y azul se mantiene alrededor del 70-30 por ciento en todos los escenarios como refleja la Figura 6. La proporción en el escenario pre-incendio y “Plantando agua” con cambio climático está más próximo a 80-20 por cien. El balance que se consigue en la situación futura es similar, en proporción, a la situación tradicional y al escenario post-incendio en menor medida. Al suponer un escenario de cambio climático la proporción se asemeja más a la situación que se da justo antes al incendio.

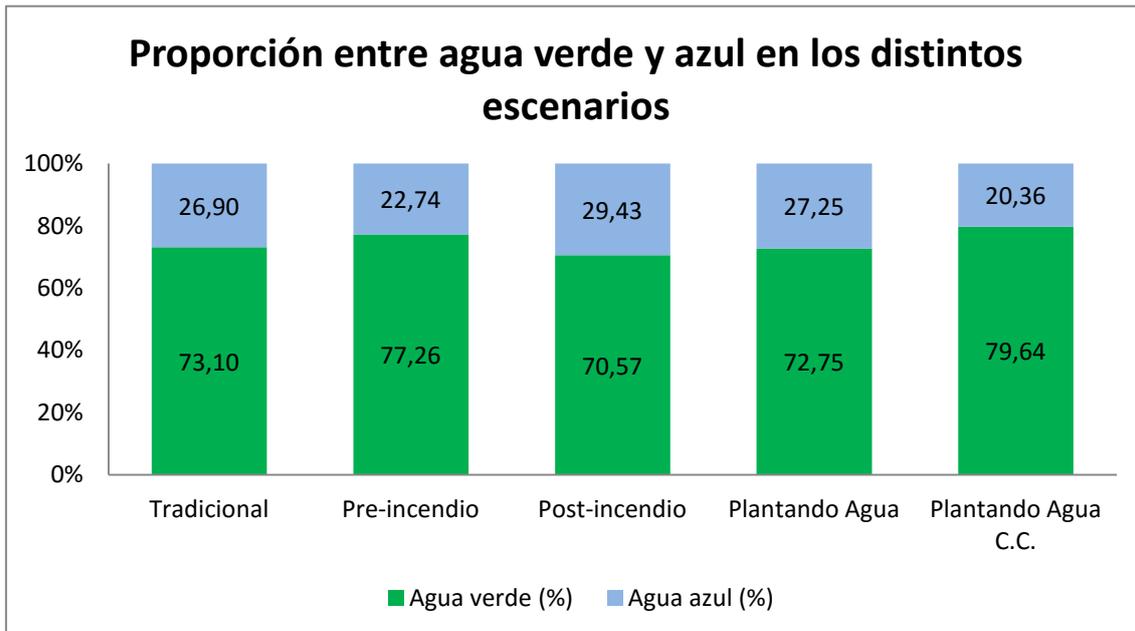


Figura 6. Proporción entre agua verde y azul en los distintos escenarios.

5. Discusión

El trabajo realizado nos revela y proyecta un paisaje cambiante en el tiempo de manera natural o antrópica por medio de las imágenes interpretadas y los mapas elaborados. Los resultados estimados entre escenarios no son significativos, probablemente debido al escaso tamaño muestral de las series, pero siguen una tendencia tal que los grandes cambios dados en las cubiertas responden a modificaciones en el balance hídrico (Calder, 1998; Gallart, 2001; Sun *et al.* 2006; García Ruiz *et al.*, 2013).

Según datos demográficos del padrón (INE, 2016), la población del municipio de La Zoma pasó de 133 habitantes, en 1950 a 22 en 2009, año del incendio. La repercusión en nuestro trabajo se ve reflejada en un aumento en la cantidad de agua verde y un descenso en la de agua azul entre ambos periodos. Este comportamiento podría tener su explicación en dos hechos. Los campos de cultivo abandonados por el despoblamiento rural van adoptando el mismo comportamiento hidrológico que las masas forestales a medida que van siendo colonizados (García Ruiz *et al.*, 2013). Además las repoblaciones forestales en España fueron muy intensas en este periodo (DGCONA, 2000).

A continuación, tras el incendio disminuye drásticamente la superficie forestal, aumentando considerablemente la superficie herbácea y, ligeramente, la desnuda con la apertura de pistas forestales en menor medida. Este cambio lleva asociado un descenso en los niveles de agua verde estimados y un aumento en los de agua azul. Más adelante, una vez ejecutado el Plan Director en su totalidad se prevé lograr una situación intermedia y resiliente a una hipotética situación de cambio climático. Para esta situación se han obtenido valores intermedios a los anteriores ya que, como explica Zhang *et al.* (2001), las cuencas con cobertura equilibrada entre bosque y herbáceo van a presentar un comportamiento intermedio en cuanto a evapotranspiración anual se refiere. Además, los resultados son parecidos a los obtenidos para los años sesenta, escenario que presenta una imagen parecida en cuanto a disposición de cubiertas y clima. Es preciso considerar que los datos climáticos del escenario tradicional provienen de un ajuste lineal realizado que puede distorsionar los resultados conseguidos a pesar de haber resultado estadísticamente aceptado. Se da una diferencia de $1,7^{\circ}\text{C}$ entre la media anual del escenario tradicional y la media de temperatura del periodo pre y post-incendio. Castro *et al.* (2005), en una recopilación sobre el clima de España, recoge los resultados de un estudio para Aragón, La Rioja y Navarra en el que se muestra que la temperatura ha tendido a incrementar desde la década de los setenta entre un $0,096$ y un $0,143^{\circ}\text{C/año}$. Este hecho fundamenta que los resultados obtenidos en el escenario

tradicional no sean los óptimos, pues la media de temperatura anual es mayor que la del siguiente periodo cuando la tendencia en España dice que debería incrementarse. Para el caso de la precipitación, es difícil predecir su comportamiento y su tendencia (Castro *et al.*, 2005) por lo que no podemos asegurar que el error principal venga de la precipitación a pesar de tener un valor en este periodo muy distinto al resto.

Dicho lo anterior, la tendencia muestra que las cubiertas con menor masa forestal son las que mayor producción de agua azul logran y, por el contrario, las que menos aportan a la evapotranspiración (Calder, 1990; Zhang *et al.*, 2001). Además, nos podemos apoyar en los valores unitarios donde se ha obtenido para todas las situaciones el siguiente orden de producción de agua azul: suelo desnudo > herbáceo > vegetación mixta > bosque. Podemos añadir que el orden resultante para agua verde ha sido el opuesto. Este comportamiento era esperable ya que el modelo de Zhang *et al.* (2001) asume que toda la precipitación se reparte entre evapotranspiración y escorrentía (García-Estríngana *et al.*, 2014). Por tanto, en coincidencia con otras experiencias, el reemplazo de las cubiertas herbáceas por las forestales lleva asociado una reducción de los recursos hídricos de la zona estudiada y viceversa (Bosch y Hewlett, 1982; Zhang *et al.*, 2001; Gallart y Llorens, 2003; Robinson *et al.*, 2003; Gallart, 2004). De esta manera, es coherente asumir también que es evidente el cambio de paradigma en el sentido en el que apuntan los autores citados anteriormente ya que hemos podido analizar, a pequeña escala, que existe un efecto sobre el balance hídrico al modificar las cubiertas vegetales.

A priori las diferencias obtenidas entre escenarios son menos marcadas de lo esperado. El incendio provoca el cambio de paisaje más brusco, por tanto, se espera el cambio más notable en los valores de agua entre los escenarios pre y post-incendio. En este caso se trabaja en las mismas condiciones climáticas, habiendo solo variación en la distribución de las cubiertas. En consecuencia, se ha estimado la diferencia más grande para agua verde, pero no para agua azul. Además tampoco se ha dado la mayor diferencia en la proporción del balance entre estos dos escenarios tan distintos (6,7%). En cambio, entre los escenarios “Plantando Agua” con y sin cambio climático, se ha previsto un descenso acusado en los valores de agua azul pero no para los de agua verde, siendo un caso en el que varía la climatología pero no el estado de la cubierta. Habrá menos agua circulante en el balance y mayor evapotranspiración en el sistema. Pausas (2012) apunta que en la mayoría de los ecosistemas disminuirá la disponibilidad de agua para las plantas, aumentando las condiciones de sequía al no poder compensarse los imprevisibles cambios en las precipitaciones con el aumento de temperaturas

estimado. En estas condiciones se justifica que el impacto sobre el agua azul sea mayor. La variabilidad climática ha causado el cambio más marcado en el agua azul (670.000 m³) y en la proporción con el agua verde en la proporción (6,9%). De este modo, la tendencia vista muestra que el clima tiene más peso en la determinación del balance de la cuenca, el cual se ve amortiguado por el efecto de las cubiertas pues su papel varía en función de las condiciones de la cuenca (Andréassian, 2004). Según estudios de Robinson *et al.* (2003) el potencial de los bosques para reducir la variación de los caudales es mucho menor de lo que ha sido ampliamente reivindicado por otros autores. Por tanto, es importante tener en cuenta la proyección climática junto a los cambios en la cubierta para estimar los recursos hídricos disponibles en el futuro (Gallart, 2001), tal y como marcan el objeto del proyecto “Plantando Agua”.

6. Conclusiones

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

- La modificación de la cubierta forestal lleva asociada cambios en el balance de agua verde y azul.
- Las cubiertas forestales consumen más agua que las cubiertas herbáceas, aportando las primeras más al aumento de los niveles de agua verde y las segundas a la producción de agua azul.
- El clima es el factor que más incide en la variación del balance hídrico, cuyo impacto se ve amortiguado por el efecto de las cubiertas vegetales.
- Alrededor de las tres cuartas partes del agua disponible es evapotranspirada en todos los escenarios.

7. Bibliografía

Se han consultado los siguientes documentos o plataformas para la realización de este trabajo:

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

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

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* (Vol. 3). Iwmi.

Calder, I., Hofer, T., Vermont, S. y Warren, P. (2007). Hacia una nueva comprensión de los bosques y el agua. *Unasylva: revista internacional de silvicultura e industrias forestales*, 58(229), 3-11.

Castro, M. D., Martín-Vide, J. y Alonso, S. (2005). El clima de España: pasado, presente y escenarios de clima para el siglo XXI.

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

Cuadrat, J. M., Saz, M. A., & Vicente-Serrano, S. M. (2007). *Atlas Climático de Aragón*. Gobierno de Aragón. Zaragoza.

D.G.CO.NA.; 2000. *Tercer Inventario Forestal Nacional*. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid.

Dooge, J. C. I., 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.

Falkenmark, M. (2003). Freshwater as shared between society and ecosystems: from divided approaches to integrated challenges. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 2037-2049.

- 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*. Universidad de La Rioja. 27,7-16.
- Gallart, F. y Llorens, P. (2003). Catchment Management under Environmental Change: Impact of Lland Cover Change on Water Resources. *Water International*. (28)3, 334-340.
- 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 Ruíz, J.M.; López Moreno, J.I.; Sanjuán, Y. et al. (2013). Cambios en el piso subalpino de las montañas mediterráneas. *Quercus*.327,45-50.
- IBM Corp. (2013). IBM SPSS Statistics for Windows, Version 22.0. Armonk, NY: IBM Corp.
- IDEARAGON. (2016). Instituto Geografico de Aragón. Obtenido de Infraestructura de Datos Espaciales de Aragón: <http://idearagon.aragon.es/>
- IGN. (2016). Instituto Geográfico Nacional. Fototeca digital. Obtenido de <http://www.ign.es/ign/main/index.do>
- Instituto Nacional de Estadística (2016). Evolución intercensal de la población desde 1900. Obtenido de: <http://www.ine.es>
- 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., Otsuki K. (2012). Simple modeling of the global variation in anual forest evapotranspiration. *Journal of Hydrology* 420–421 380–390
- Martínez, S. (1987). *Mapa de series de vegetación de España 1:400.000 y memoria*. I.C.O.N.A.
- Milly, P. C. D. (1994). Climate, soil water storage, and the average annual water balance. *Water Resources Research*, 30(7), 2143-2156
- Pausas, J.G. (2012). *Incendios forestales*. Madrid.119 pp. Editorial Catarata y CSIC.
- Pike, J.G. (1964). The estimation of annual runoff from meteorological data in a tropical climate. *Journal of Hydrology*, 2,116-123.
- QGIS Development Team. (2016). *QGIS Geographic Information System*. (O. S. Project, Editor) Obtenido de <http://www.qgis.org/>

Robinson, M., Cognard-Plancq, A. L., Cosandey, C., David, J., et al.(2003). Studies of the impact of forests on peak flows and baseflows: a European perspective.*Forest Ecology and Management*, 186(1), 85-97.

Sun, G., Zhang, Zhou, G. et al. (2006). Potential water yield reduction due to forestation across China. *Journal os Hydrology*. 328, 548-558.

Zhang, L., Dawes, W., & Walker, G. (1999). Predicting the effect of vegetation changes on catchment average water balance, Technical Report. 99/12. Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology. Canberra.

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

8. Anexos

Anexo I: resultados de la resolución de dudas en el campo

Tabla resumen de resolución de dudas en campo y nuevas observaciones realizadas.

Nombre	W	N	Resolución
1	0 -37 -50,642	40 46 32,94778	Bosque abierto
2	0 -37 -42,5432	40 46 37,5805	Pasto
3	0 -37 -27,2993	40 46 39,21238	Bosque abierto
4	0 -37 -35,9476	40 46 59,88415	Carrascal con rebrotes
5	0 -37 -43,4962	40 47 8,340668	Carrascal con pinar
6	0 -37 -44,7992	40 47 14,88523	
7	0 -38 -7,14337	40 47 20,01342	Carrascal con rebrotes
8	0 -38 -23,5728	40 47 7,865651	
9	0 -37 -43,2372	40 46 19,27362	Zarzas
10	0 -37 -46,2116	40 46 15,78006	Madera muerta sin retirar
11	0 -37 -46,2116	40 46 9,995841	
12	0 -37 -7,3145	40 47 26,83407	
13	0 -36 -32,3882	40 45 56,37624	
14	0 -36 -39,2448	40 46 5,339018	
15	0 -36 -33,8562	40 46 9,313139	
16	0 -36 -13,3154	40 46 10,02182	
17	0 -35 -27,4248	40 45 56,97069	Pasto pedregoso
18	0 -35 -27,4248	40 45 58,265	Pasto
19	0 -34 -47,0255	40 46 1,961729	Encinar
Otras observaciones			
1'	Afloramiento rocoso (zona clara sin fajinas en foto)		
5'	Zona del rodal 6, dominio de jaras sobre pies de pino		
13'	Zona de rodal 21, madera muerta sin retirar		

A continuación se enseñan algunas fotografías tomadas en campo para clarificar las dudas:



Puntos 8 y 12: carrascal con rebrotes y vegetación muerta sin retirar respectivamente.



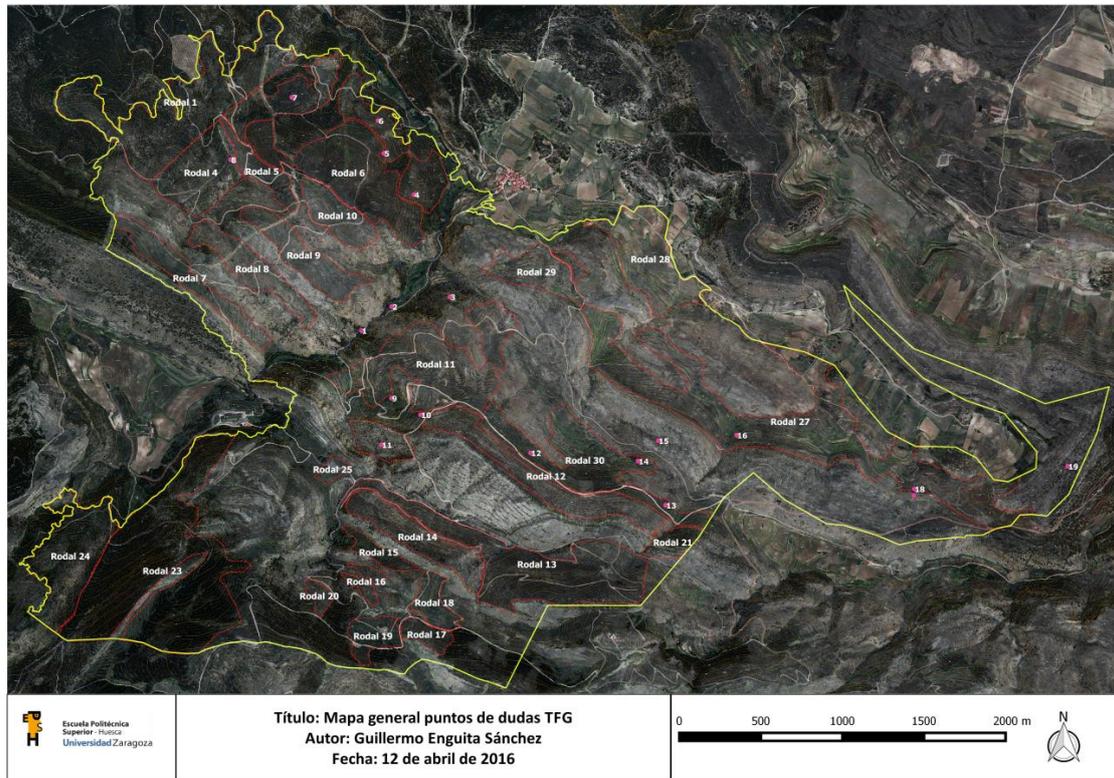
Punto 1': afloramiento rocoso.



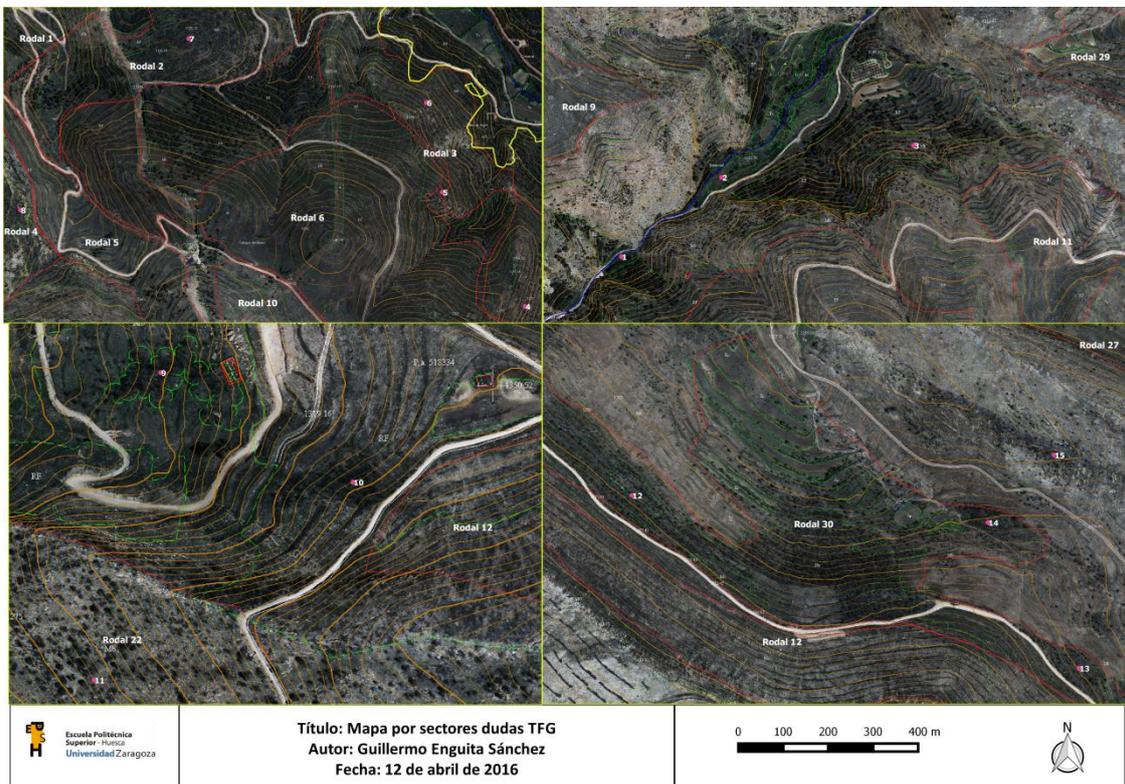
Puntos 17 y 18: diferencia entre pastos por pedregosidad.

Anexo II: Mapas elaborados para la resolución de dudas en campo

A continuación se muestran los mapas empleados en la resolución de dudas:



Mapa general con puntos de dudas.

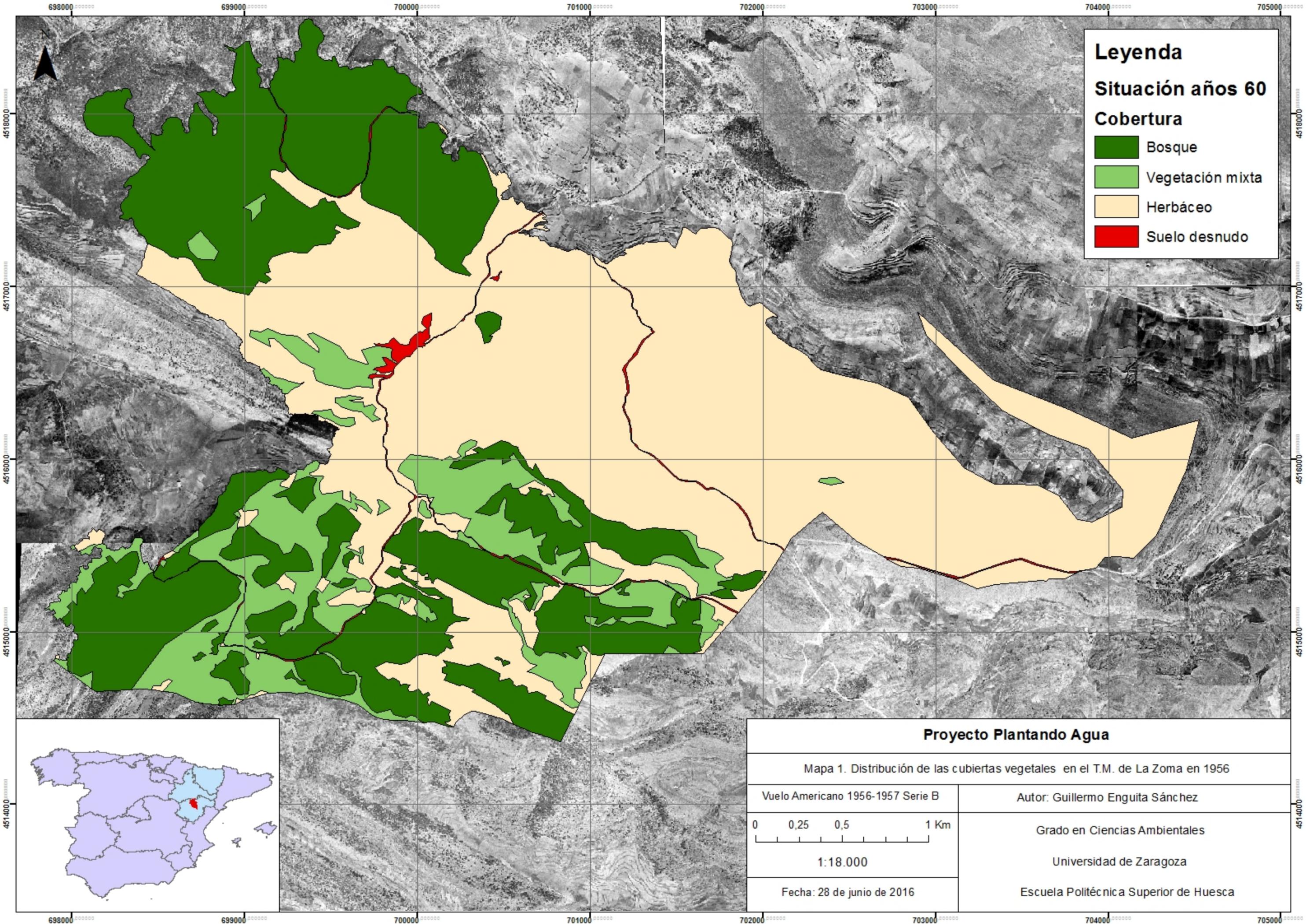


Mapa de dudas por sectores.

Anexo III: Mapas resultantes de los cuatro escenarios digitalizados

Los mapas obtenidos tras el proceso de fotointerpretación y digitalización son los siguientes:

- 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 años 60

Cobertura

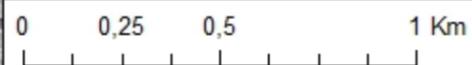
- Bosque
- Vegetación mixta
- Herbáceo
- Suelo desnudo

Proyecto Plantando Agua

Mapa 1. Distribución de las cubiertas vegetales en el T.M. de La Zoma en 1956

Vuelo Americano 1956-1957 Serie B

Autor: Guillermo Enguita Sánchez



Grado en Ciencias Ambientales

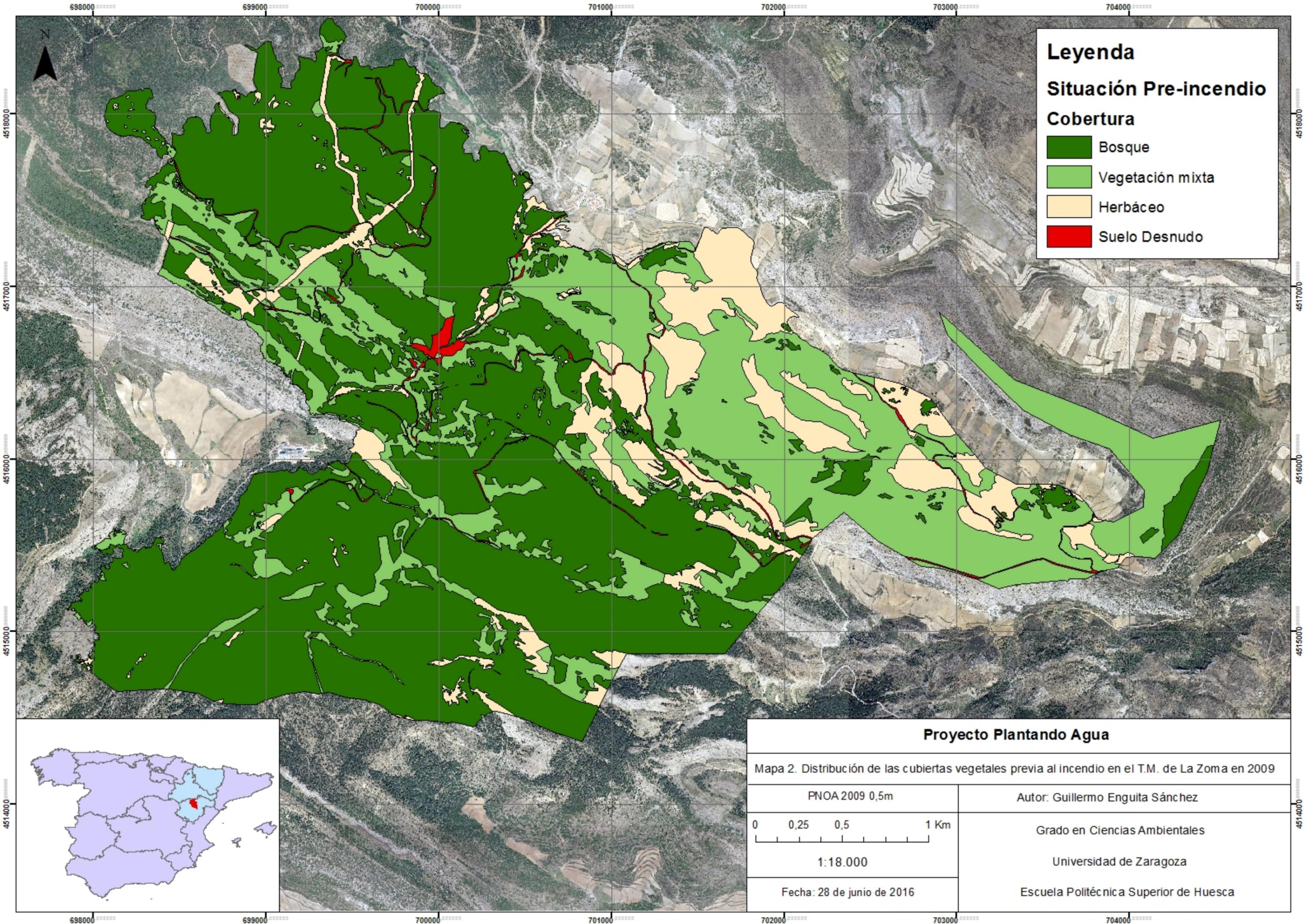
1:18.000

Universidad de Zaragoza

Fecha: 28 de junio de 2016

Escuela Politécnica Superior de Huesca





Leyenda

Situación Pre-incendio

Cobertura

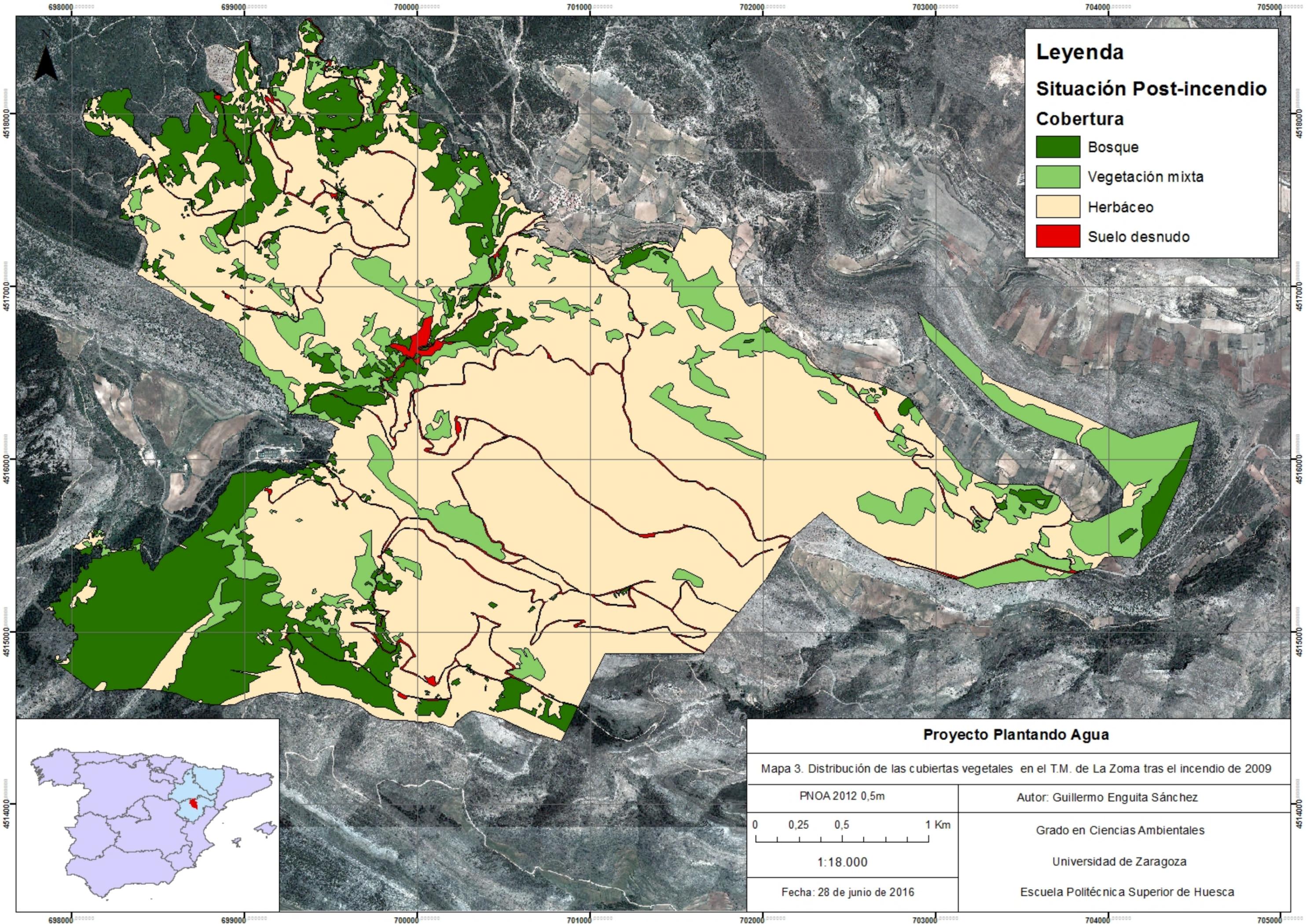
- Bosque
- Vegetación mixta
- Herbáceo
- Suelo Desnudo



Proyecto Plantando Agua

Mapa 2. Distribución de las cubiertas vegetales previa al incendio en el T.M. de La Zoma en 2009

PNOA 2009 0,5m	Autor: Guillermo Enguita Sánchez
0 0,25 0,5 1 Km	Grado en Ciencias Ambientales
1:18.000	Universidad de Zaragoza
Fecha: 28 de junio de 2016	Escuela Politécnica Superior de Huesca



Leyenda

Situación Post-incendio

Cobertura

- Bosque
- Vegetación mixta
- Herbáceo
- Suelo desnudo

Proyecto Plantando Agua

Mapa 3. Distribución de las cubiertas vegetales en el T.M. de La Zoma tras el incendio de 2009

PNOA 2012 0,5m

0 0,25 0,5 1 Km

1:18.000

Fecha: 28 de junio de 2016

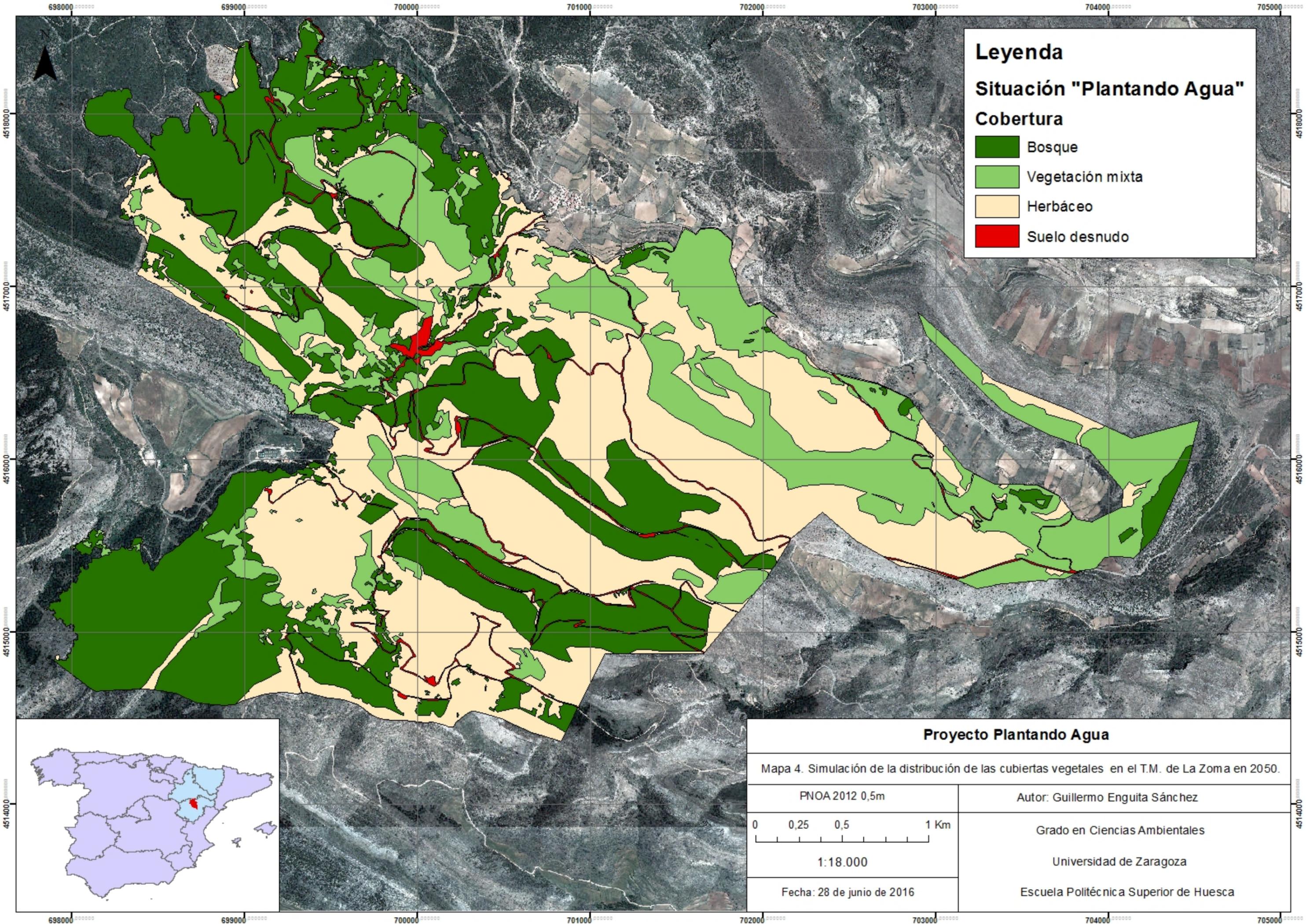
Autor: Guillermo Enguita Sánchez

Grado en Ciencias Ambientales

Universidad de Zaragoza

Escuela Politécnica Superior de Huesca





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

Autor: Guillermo Enguita Sánchez

Grado en Ciencias Ambientales

Universidad de Zaragoza

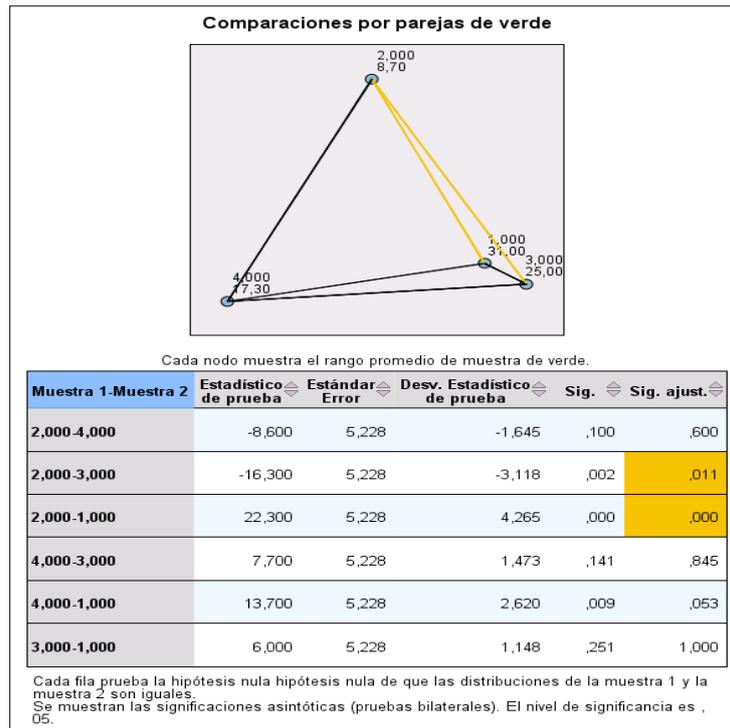
Escuela Politécnica Superior de Huesca

0 0,25 0,5 1 Km

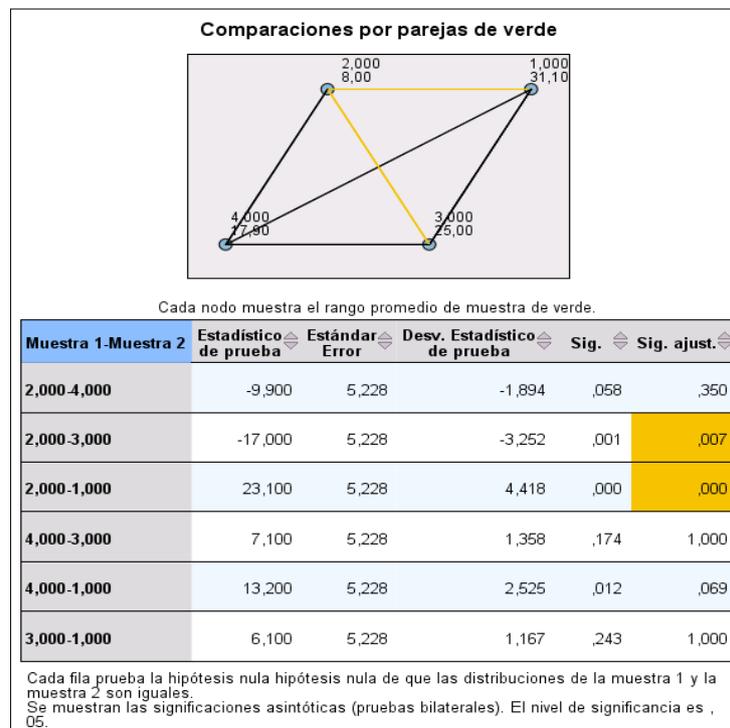
1:18.000

Fecha: 28 de junio de 2016

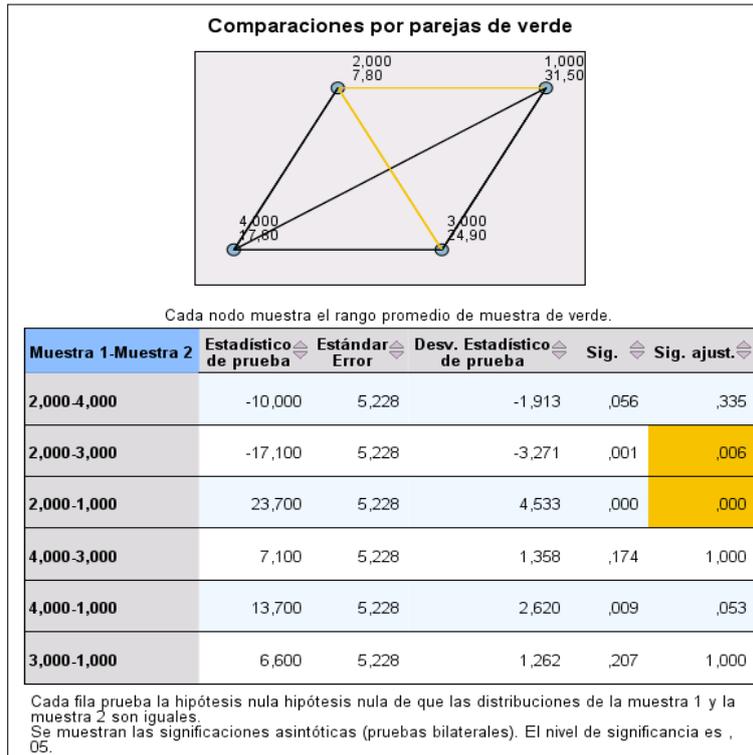
Anexo IV: Resultados estadísticos de la prueba de Dunn-Bonferroni



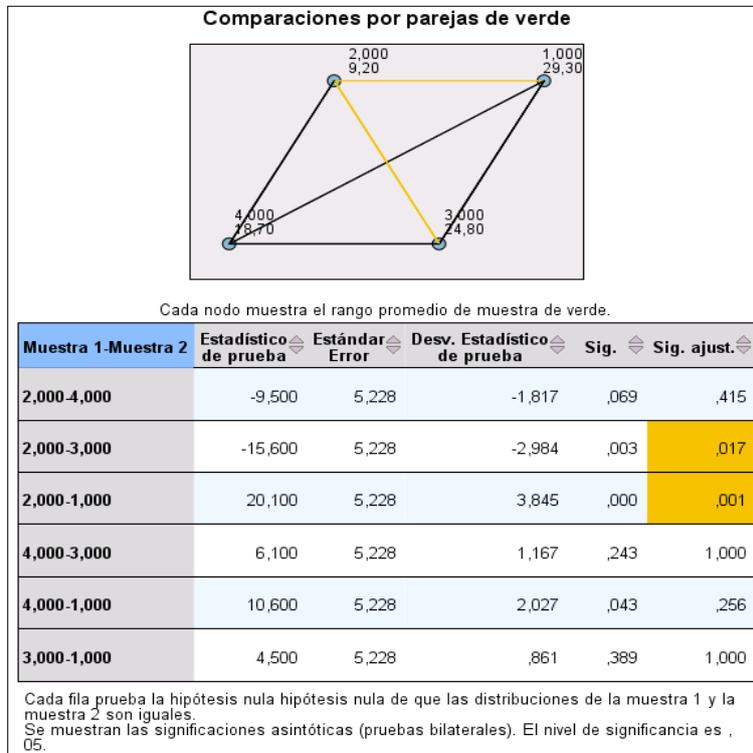
Resultados de la prueba de Dunn-Bonferroni para los valores (mm) de agua verde en el escenario tradicional.



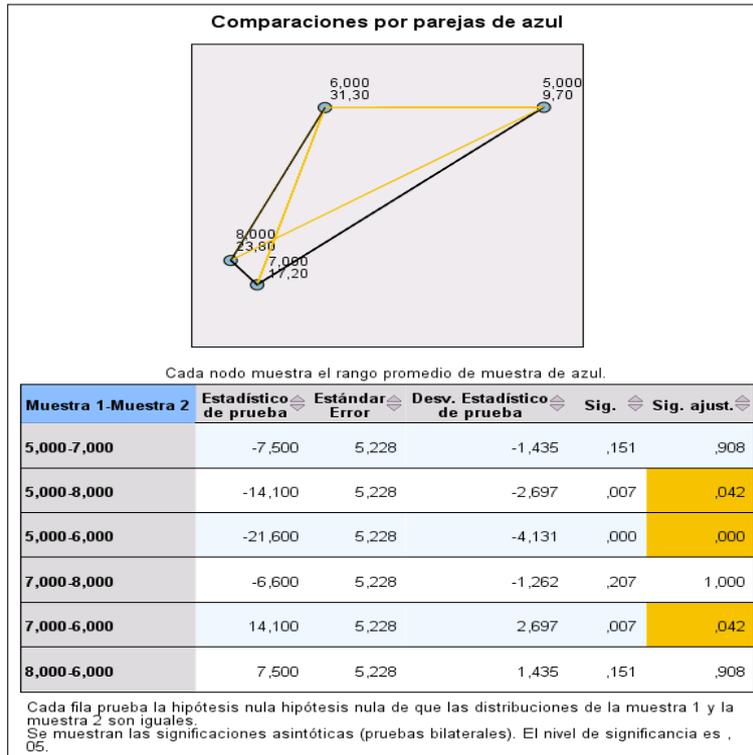
Resultados de la prueba de Dunn-Bonferroni para los valores (mm) de agua verde en los escenarios pre y post-incendio.



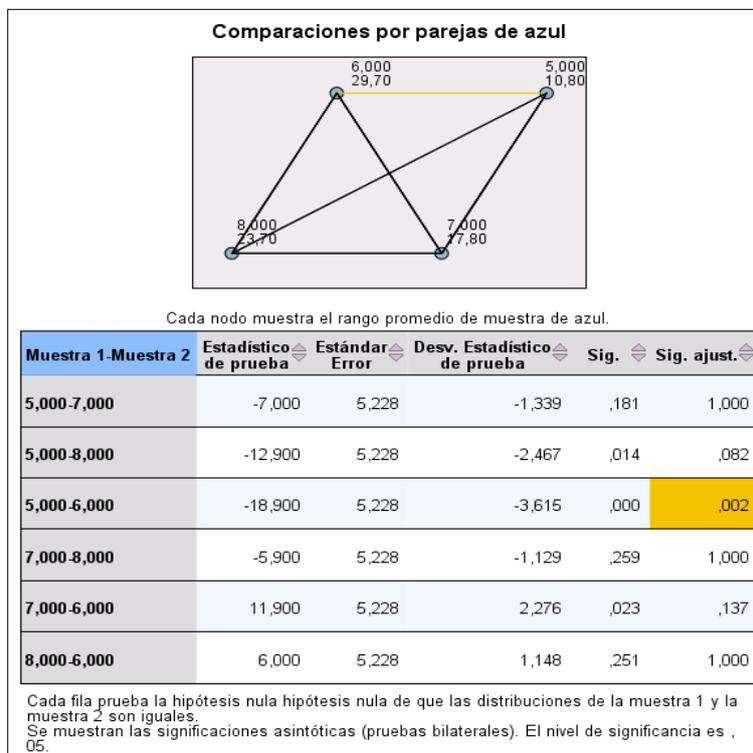
Resultados de la prueba de Dunn-Bonferroni para los valores (mm) de agua verde en el escenario "Plantando Agua".



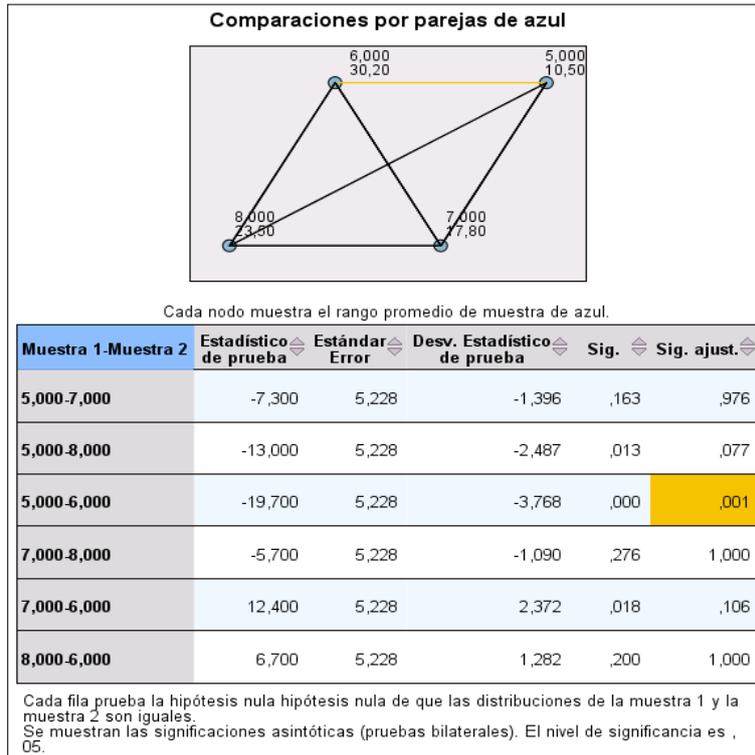
Resultados de la prueba de Dunn-Bonferroni para los valores (mm) de agua verde en el escenario "Plantando Agua" con cambio climático.



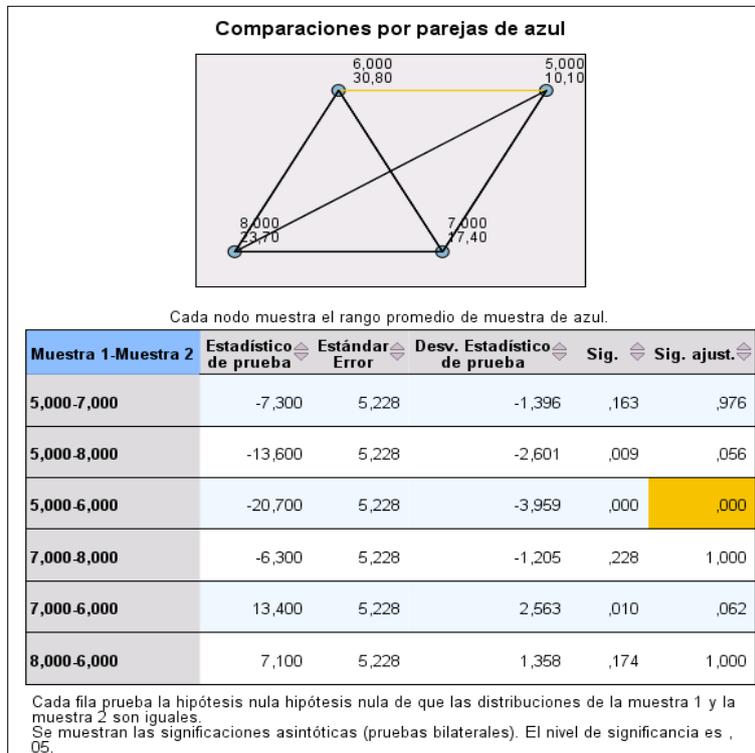
Resultados de la prueba de Dunn-Bonferroni para los valores (mm) de agua azul en el escenario tradicional.



Resultados de la prueba de Dunn-Bonferroni para los valores (mm) de agua azul en los escenarios pre y post-incendio.



Resultados de la prueba de Dunn-Bonferroni para los valores (mm) de agua azul en el escenario "Plantando Agua".



Resultados de la prueba de Dunn-Bonferroni para los valores (mm) de agua azul en el escenario "Plantando Agua" con cambio climático.