

# Trabajo Fin de Máster

## CARACTERIZACIÓN ECO-HIDROLÓGICA DE UNA MASA DE ENCINA (*QUERCUS ILEX* SSP. *BALLOTA* (DESF.) SAMP.): EFECTOS DE LOS TRATAMIENTOS SILVÍCOLAS

Intensificación: ORDENACIÓN, RESTAURACIÓN Y GESTIÓN DE CUENCAS

**Autor:**

ING. ANDRÉS PESÁNTEZ PELÁEZ

**Tutor:**

DR. ANTONIO DÁMASO DEL CAMPO GARCÍA

<FEBRERO, 2019>



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería  
hidráulica y medio ambiente  
**mihma**

## Datos del proyecto

**Título del TFM en español:** Caracterización eco-hidrológica de una masa de encina (*Quercus ilex* ssp. *Ballota* (desf.) Samp.): Efectos de los tratamientos silvícolas

**Título del TFM en inglés:** Hydrological characterization of a mass of holm oak (*Quercus ilex* ssp. *Ballota* (desf.) Samp.) Effects of silviculture treatment

**Título del TFM en Valenciano:** Caracterització eco-hidrológica d'una massa d'alzina (*Quercus ilex* ssp. *Ballota* (desf.) Samp.): Efectes dels tractaments silvícoles

**Alumno:** ING. ANDRÉS PESÁNTEZ PELÁEZ

**Tutor:** DR. ANTONIO DÁMASO DEL CAMPO GARCÍA

**Cotutor/es:**

**Fecha de Lectura:** <FEBRERO, 2019>

## Resumen

### En español

Los bosques semiáridos marginales actualmente se encuentran afectados por el cambio climático, por condiciones de extrema sequía. Lo que se traduce en el aumento de riesgos de incendios, el deterioro de la relación entre agua azul y verde, estrés por sequía y mortalidad de las especies. Por lo tanto, el manejo forestal orientado al agua es una necesidad urgente en las cuencas semiáridas. En el presente trabajo, se intenta sentar las bases para una gestión forestal orientada al agua, mediante la cuantificación de los componentes del ciclo hidrológico, en un bosque marginal de encinas tratado (reducción de la competencia y la densidad) y sin tratar. También se evalúa la efectividad en el corto y mediano plazo de estos tratamientos silvícolas. Para ello, se han estudiado los flujos de agua, que tienen lugar en un bosque de encina de baja biomasa, ubicada en el bosque público de La Hude, dentro de la Comunidad Valenciana, durante un periodo de 4 años (2012-2016), donde se ha dado un seguimiento de los distintos componentes de la partición de la lluvia bruta (intercepción, trascolación y escorrentía cortical), la distribución de la lluvia neta en el suelo (reposición de agua del suelo, drenaje, escorrentía superficial y subsuperficial) y de los componentes de la

evapotranspiración (Evaporación del suelo y la transpiración).

En el estudio, se establecieron dos parcelas experimentales, una con tratamiento (T) donde se realizó en el 2012 un aclareo y desbroce de matorrales, eliminando un 42% del área basal y otra parcela contigua a ésta de control (C). En el sitio de estudio se realizaron mediciones automatizadas de la meteorología e hidrología de las parcelas, mediante el uso de sensores, estaciones y registradores de datos, que fueron analizados estadísticamente mediante ANCOVA para determinar el nivel de significancia de las variables eco-hidrológicas. De los resultados obtenidos, la interceptación ( $I_t$ ) se vio reducida notablemente en el tratamiento, lo que generó un incremento en la trascolación ( $T_r$ ) y en consecuencia una mayor entrada de agua al sistema. De igual manera, la transpiración ( $E_t$ ) fue aumentada significativamente por el tratamiento, lo que demuestra que el tratamiento fue acertado desde el punto de vista de generación de biomasa, brindándole una mayor vigorosidad y vitalidad a la encina. Por otro lado, los componentes de escorrentía cortical, la escorrentía superficial y subsuperficial mostraron valores inferiores al 1% de la precipitación bruta ( $P_g$ ) en ambas parcelas y no se vieron afectados significativamente por el tratamiento.

Además, en este trabajo se realizó un balance hídrico con la finalidad de aunar todos los componentes eco-hidrológicos registrados. Del cual obtuvimos que para el año más húmedo (2012-2013) con una precipitación anual de 534 mm se consiguió una recarga importante de los acuíferos por acción del tratamiento, mientras que para los demás años de análisis no se consiguió dicha recarga. Debido a ello se recomienda realizar un estudio con mayor detalle de la recarga de los acuíferos mediante el uso de piezómetros.

#### **En valenciano**

Els boscos semiàrids marginals actualment es troben afectats pel canvi climàtic, per condicions d'extrema sequera. El que es tradueix en l'augment de riscos d'incendis, el deteriorament de la relació entre aigua blava i verd, estrès per sequera i mortalitat de les espècies. Per tant, el maneig forestal orientat a l'aigua és una necessitat urgent en les conques semiàrides. En el present treball, s'intenta assentar les bases per a una gestió forestal orientada a l'aigua, per mitjà de la quantificació dels components del cicle

hidrològic, en un bosc marginal d'alzines tractat (reducció de la competència i la densitat) i sense tractar. També s'avalua l'efectivitat en el curt i mitjà termini d'estos tractaments selvícoles. Per a això, s'han estudiat els fluxos d'aigua, que tenen lloc en un bosc d'alzina de baixa biomassa, ubicada en el bosc públic de L'Afona, dins de la Comunitat Valenciana, durant un període de 4 anys (2012-2016), on s'ha donat un seguiment dels distints components de la partició de la pluja bruta (intercepció, trascolación i escolament cortical), la distribució de la pluja neta en el sòl (reposició d'aigua del sòl, drenatge, escolament superficial i subsuperficial) i els components de l'evapotranspiració (Evaporació del sòl i la transpiració).

En l'estudi, es van establir dos parcel·les experimentals, una amb tractament (T) on es va realitzar en el 2012 un aclarida i desbrossament de matolls, eliminant un 42% de l'àrea basal i una altra parcel·la contigua a esta de control (C). En el lloc d'estudi es van realitzar mesuraments automatitzades de la meteorologia i hidrologia de les parcel·les, per mitjà de l'ús de sensors, estacions i registradors de dades, que van a ser analitzats estadísticament per mitjà d'ANCOVA per a determinar el nivell de significancia de les variables eco-hidrològiques. Dels resultats obtinguts, la intercepció ( $I_t$ ) es va veure reduïda notablement en el tractament, la qual cosa va generar un increment en la trascolación ( $T_r$ ) i en conseqüència una major entrada d'aigua al sistema. De la mateixa manera, la transpiració ( $E_t$ ) va ser augmentada significativament pel tractament, la qual cosa demostra que el tractament va ser encertat des del punt de vista de generació de biomassa, brindant-li un major vigor i vitalitat a l'alzina. D'altra banda, els components d'escolament cortical, l'escolament superficial i subsuperficial van a mostrar valors inferiors al 1% de la precipitació bruta ( $P_g$ ) en ambdós parcel·les i no es van veure afectats significativament pel tractament.

A més, en aquest treball es va realitzar un balanç hídric amb la finalitat de conjuminar tots els components eco-hidrològics registrats. Del qual vam obtindre que, per a l'any més humit (2012-2013) amb una precipitació anual de 534 mm, es va aconseguir una recàrrega important dels aqüífers per acció del tractament, mentre que per als altres anys d'anàlisi no es va aconseguir aquesta recàrrega. A causa d'això es recomana realitzar un estudi amb major detall de la recàrrega dels aqüífers mitjançant l'ús de piezòmetre.

## En inglés

The marginal semi-arid forests are currently affected by climate change, due to conditions of extreme drought. This is translated into an increased of fire risks, the deterioration of the relationship between blue and green water, and stress because of the drought and mortality of the species. Therefore, water-oriented forest management is an urgent need in semi-arid basins. In this paper, we try to lay the foundations for a water-oriented forest management, by quantifying the components of the hydrological cycle, in a treated marginal holm oaks forest (reduction of competition and density) and an untreated one. The effectiveness in the short and medium term of these forestry treatments is also being evaluated. To this aim, water flows have been studied, which are taking place in a holm oak forest of low biomass, located in the public forest of La Hude, within the Valencian Community, for a period of 4 years (2012-2016), where the different components of the partition of the gross rain (interception, throughfall and stemflow), the distribution of net rain in the soil (replacement of soil water, drainage, surface runoff and subsurface) and the components of evapotranspiration (soil evaporation and transpiration) have been followed up.

In the study, two experimental plots were established, one with treatment (T), where brush thinning and clearing were carried out in 2012, eliminating 42% of the basal area and another monitoring plot (C) contiguous to the previous one. In the study site, automated measurements of the meteorology and hydrology of the plots were made, using sensors, stations and data loggers, which were analyzed statistically by ANCOVA to determine the level of significance of the eco-hydrological variables. From the outcomes achieved, the interception ( $I_t$ ) was reduced remarkably in the treatment, which generated an increase in the throughfall ( $T_r$ ) and consequently a greater water entry to the system. Likewise, the transpiration ( $E_t$ ) was significantly increased by the treatment, which shows that the treatment was successful from the point of view of biomass generation, giving greater vigor and vitality to the holm oak. On the other hand, the components of stemflow and runoff showed values lower than 1% of the gross precipitation ( $P_g$ ) in both plots and were not significantly affected by the treatment.

Additionally, during this work, a water balance was carried out in order to combine all the

registered eco-hydrological components. From which we came to the conclusion that for the wettest year (2012-2013) with an annual precipitation of 534 mm, an important recharge of the aquifers was achieved by treatment action, while for the other years of analysis this recharge was not achieved. Due to this, it is recommended to carry out a more detailed study of aquifer recharge by using piezometers.

**Palabras clave español:** Eco-hidrología, gestión forestal, Encina *Quercus ilex*, parcela experimental

**Palabras clave valenciano:** Eco-hidrologia, gestió forestal, alzina *Quercus ilex*, parcel·la experimental.

**Palabras clave inglés:** Eco-hydrology, forest management, oak *Quercus ilex*, experimental plot

## **Expresiones de gratitud**

La gratitud es el sentimiento que más ennoblece al ser humano, quiero hoy empezar agradeciendo a mi familia, mis padres Washington Pesántez y Azucena Peláez, mi hermana Karem, a mis familiares, por haberme dado el impulso, amor y la fuerza para que me forme como un buen ser humano, y tenga la fortaleza para estar lejos de ellos, preparándome académicamente con esta maestría, que me sirve para mi desarrollo profesional.

Agradezco a mis maestros de la Universidad Politécnica de Valencia, que me han guiado no sólo en el aspecto académico, sino también han contribuido a mi formación como ser humano, a mis compañeros de aula, por la amistad compartida, por las noches de insomnio en la preparación de nuestras tareas, por los juegos y bromas que nos hermanaron mucho más, quiero decirles que desde hoy y para siempre son la nueva familia que estará en mi corazón, los hermanos del alma.

Agradezco a los investigadores de la Universidad Politécnica de Valencia Antonio D. del Campo García y María González Sanchis, por los datos proporcionados en el seno de los proyectos de investigación: HYDRASIL CGL2011-28776-C02-02; SILWAMED “CGL2014-58127-C3-2” y CEHYRFO-MED “CGL2017-86839-C3-2-R”, todos ellos financiados por el Ministerio de Ciencia e Innovación y los fondos europeos FEDER. Y al Gobierno de la Comunidad Valenciana (CMAAUV, Generalitat Valenciana), el municipio de Serra, VAERSA y ACCIONA por su apoyo para permitir el uso del bosque experimental y por su asistencia en la realización del trabajo de campo.

## ÍNDICE GENERAL

1.	INTRODUCCIÓN .....	6
1.1	Definición de la eco-hidrología: Componentes del ciclo hidrológico .....	6
1.2	El encinar mediterráneo continental .....	8
1.3	Tratamientos de silvicultura.....	11
1.4	Influencia de la gestión forestal en el ciclo hidrológico en los climas semiáridos.....	12
1.5	Justificación del trabajo fin de máster .....	15
2.	OBJETIVOS .....	16
2.1	Objetivo general.....	16
2.1	Objetivos específicos.....	17
3.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	18
3.1	Descripción general del área de estudio.....	18
3.2	Caracterización de la parcela experimental.....	19
3.3	Contexto experimental (diseño). .....	21
3.4	Situación de la estructura forestal en el control y el tratamiento.....	23
3.5	Caracterización de la meteorología. ....	25
3.6	Caracterización la hidrología.....	27
3.7	Estadística empleada para la obtención de resultados. ....	34
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	35
4.1	Características de la lluvia.....	35
4.2	Características de temperatura.....	36
4.3	Partición de la lluvia bruta: Trascalación, escorrentía cortical e interceptación.....	37
4.4	Redistribución de la precipitación neta en el suelo: Reposición de agua del suelo, Drenaje y escorrentía. ....	42

4.5	Evapotranspiración: Evaporación del suelo, evaporación residual y transpiración. ....	48
4.6	Balance del ciclo hidrológico anual de la lluvia bruta. ....	53
5.	CONCLUSIONES. ....	55
5.1	Conclusiones del trabajo. ....	55
5.2	Líneas de investigación futura.....	56
6.	REFERENCIAS.....	57

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1- El ciclo hidrológico de un ecosistema forestal (adaptado de FAO 2009). .....	8
Figura 2- Bosque encinar de La Hude .....	10
Figura 3- Localización de las parcelas experimentales. ....	18
Figura 4- Foto aérea de la zona de estudio de la parcela de control y tratamiento.....	20
Figura 5- Zanjas excavadas al pie de las laderas de las parcelas experimentales. ....	22
Figura 6- Canaletas de aluminio.....	22
Figura 7- Densitómetro vertical GRS.....	23
Figura 8- Analizador de dosel de plantas LAI-2000.....	24
Figura 9- Pluviómetro de balancín. ....	25
Figura 10- Registrador de datos CR1000.....	26
Figura 11- registradores de datos EM50.....	27
Figura 12- Pluviómetro ECRN-50.....	28
Figura 13- Pluviómetro basculante. ....	28
Figura 14- Canaletas de acero galvanizado.....	29
Figura 15- Contador Volumétrico de agua ALTAIR V4. ....	30
Figura 16- Sistema implementado para la medición de la trascolación.....	30
Figura 17- Sensores de flujo de savia instalado en el sitio de estudio.....	32
Figura 18- Sensor de Humedad de Suelo. ....	34
Figura 19- Valores anuales de la precipitación bruta acumulada en los años de estudio.....	36
Figura 20- Distribución de la temperaturas de la zona de investigación dentro del periodo de estudio.....	37
Figura 21- Valores anuales de la trascolación en las parcelas de control y tratamiento. ....	38
Figura 22- Valores anuales de la escorrentía cortical en las parcelas de control y tratamiento. ....	40
Figura 23- Valores anuales de la interceptación en las parcelas de control y tratamiento. ...	41
Figura 24- Valores anuales de la precipitación neta en las parcelas de control y tratamiento. ....	43

Figura 25- Valores anuales de la reposición del suelo en las parcelas de control y tratamiento. ....	44
Figura 26- Valores anuales del drenaje en las parcelas de control y tratamiento.....	45
Figura 27- Valores anuales de las escorrentías (Es y Ess) en las parcelas de control y tratamiento. ....	47
Figura 28- Valores anuales de la evapotranspiración en las parcelas de control y tratamiento. ....	49
Figura 29- Valores anuales de la evaporación del suelo en las parcelas de control y tratamiento. ....	50
Figura 30- Valores anuales de la transpiración en las parcelas de control y tratamiento.....	51
Figura 31- Valores anuales de la evaporación residual las parcelas de control y tratamiento. ....	52

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características fisiográficas, climáticas y edáficas del sitio experimental La Hunde (HU) y sus respectivas parcelas de control (C) y de tratamiento (T)..	19
Tabla 2. Resumen de las métricas de la estructura forestal en las parcelas de control y tratamiento (C, T) para La Hunde.	24
Tabla 3: Valores totales acumulados de las variables de la partición de la lluvia bruta, en magnitud (mm) y tasas (%), del periodo total de estudio, del año más húmedo y del año seco.	42
Tabla 4. Valores totales acumulados de las variables de la distribución de la lluvia neta, en magnitud (mm) y tasas (%), del periodo total de estudio, del año más húmedo y del año seco.	48
Tabla 5. Valores totales acumulados de las variables de la distribución de la lluvia neta, en magnitud (mm) y tasas (%), del periodo total de estudio, del año más húmedo y del año seco.	53
Tabla 6. Valores de RA por año hidrológico y porcentajes de lluvia bruta de RA.	55

## **1. INTRODUCCIÓN**

### **1.1 Definición de la eco-hidrología: Componentes del ciclo hidrológico**

La eco-hidrología es un enfoque innovador que estudia las interrelaciones entre la ecología y la hidrología, con la finalidad de conseguir la restauración y la gestión sostenible de los recursos hídricos, analizando la respuesta de los componentes del ciclo hidrológico, generalmente a una escala de cuenca; estos procesos se pueden dar dentro de un sistema acuático, tierra o la vegetación (Zalewski et al., 1997).

Con la nueva tendencia “verde”, la eco-hidrología es la vía ideal para aplicar metodologías con soluciones medioambientales, para la restauración de bosques y la gestión sustentable del recurso hídrico (Gouder de Beauregard et al., 2002).

El ciclo hidrológico como se puede ver en la Figura 1, es el movimiento continuo de circulación y transformación de las masas de agua en sus tres estados sólido, líquido y gaseoso entre la atmósfera, el mar y la tierra. A través de movimientos ascendentes por la evapotranspiración y descendentes por la precipitación, el motor energético de estas transferencias es el sol (Ministerio del Medio Ambiente, 2000).

### **Componentes del ciclo hidrológico**

#### **Precipitación (P)**

La precipitación, según Heras (1972), es un fenómeno meteorológico en el cual el vapor de agua condensado en la atmósfera cae sobre la superficie de la tierra, generalmente en forma líquida (lluvia o llovizna) o en forma sólida (nieve o granizo).

#### **Precipitación neta ( $P_n$ )**

Es el agua total que llega a la superficie del suelo de un bosque, mediante dos formas principalmente: el escurrimiento cortical que descarga alrededor del cuello radical del vegetal y la trascolación, que descarga de forma distribuida por todo el terreno (Lopez Árias, 2002).

### **Evapotranspiración (ET)**

Es la suma de la evaporación y la transpiración. La primera se origina por la acción de calentamiento del sol sobre las masas de agua y/o el suelo, y la segunda generada por la vegetación a través de las hojas (Heras, 1972).

### **Escorrentía superficial (Es)**

Es la porción de lluvia que llega al suelo y fluye sobre las laderas hacia una masa de agua (Heras, 1972).

### **Escorrentía subsuperficial (Ess)**

Es la porción de agua que se infiltró en el suelo, pero no llegó a los almacenamientos subterráneos tales como los acuíferos (Heras, 1972).

### **Infiltración (I)**

Es el movimiento descendente del agua acumulada en la superficie del suelo producto de la precipitación, la cual penetra en el suelo debido a la acción de los efectos de la gravedad y la capilaridad (Heras, 1972).

### **Escorrentía cortical (Ec)**

Es el agua retenida por los fustes que ha caído directamente sobre ellos y recorre las hojas y ramas hasta llegar al tronco principal y descender por el mismo hasta llegar al suelo (Lopez Árias, 2002).

### **Trascolación (Tr)**

Es la fracción de precipitación que se da paso entre los espacios existentes en la cobertura vegetal o sobre la superficie descubierta sin entrar en contacto con la vegetación hasta llegar al suelo (Lopez Árias, 2002).

## Interceptación (It)

Es la cantidad de agua retenida de las precipitaciones por las cubiertas vegetales, la cual se almacena temporalmente sobre las hojas y ramas en la copa de los árboles, dependiendo directamente de la densificación de la masa forestal. El agua almacenada que no llega a la superficie del suelo posteriormente se evaporará de las copas de los árboles por acción del calentamiento producido por el sol (Lopez Árias, 2002).

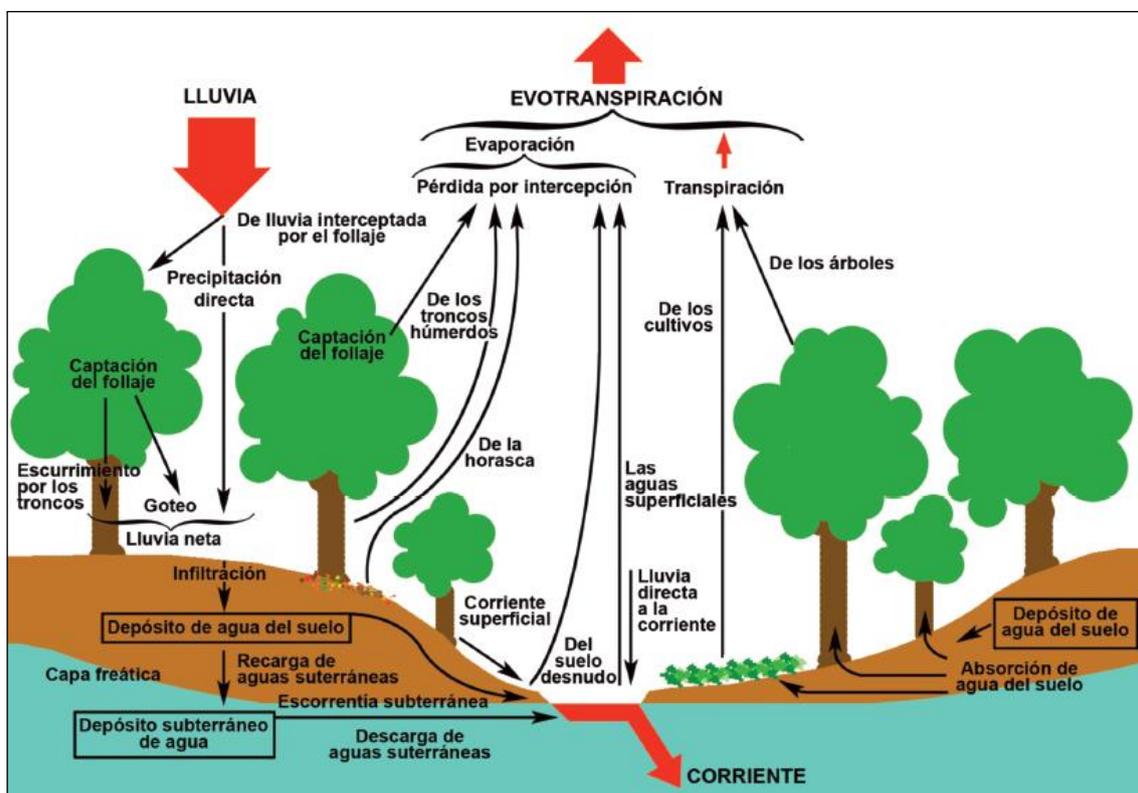


Figura 1- El ciclo hidrológico de un ecosistema forestal (adaptado de FAO 2009) (Blanco, 2017).

### 1.2 El encinar mediterráneo continental

Los encinares son los bosques de mayor extensión y distribución del territorio español, llegando a ocupar las tres cuartas partes de la superficie forestal ibérica; es decir, unos 300.000 km<sup>2</sup>. De ellos solo se conservan en buen estado un 10%. Debido a la reiterada intervención del hombre durante el último siglo, en la actualidad solo contemplamos

mosaicos de bosques intercalados entre matorrales. Es innegable que la alteración producida en los encinares nace del gran interés del hombre por los recursos que las encinas pueden ofrecer, tales como: fuentes de alimento para la ganadería (bellota), material constructivo (madera y corcho en el caso del alcornoque) y sobre todo combustible (leña). A consecuencia de esta intensa sobreexplotación es muy difícil encontrar en la actualidad encinares en estado natural prístino (Blanco et al., 2001).

La estructura del encinar es la de un bosque plano-esclerófilo de hojas planas y persistentes, de pequeñas a medianas, duras o muy duras, en parte espinosas en los bordes (Ver, Figura 2). Otra característica de sus hojas es que son perennes, permaneciendo en el árbol entre 2 y 4 años, mientras no se exponga éste a sequías extraordinarias superiores al año y medio.

Indiferente a la textura de suelos, vive tanto en sustrato calizo como arenoso suelto; evita los terrenos con prolongados encharcamientos y presenta poca tolerancia a los suelos arcillosos altamente compactados y suelos con salinidad. La humedad del suelo es conservada por la densidad y protección de las copas de los árboles; mejora el suelo, funcionando como especie descalcificadora en terrenos básicos. Prefiere suelos sustanciosos, profundos y poco compactados, pero se adapta a sustratos pobres.

Presenta una gran resistencia a la sequía y a la continentalidad, tolerando una gran sequedad del aire. Posee una alta resistencia a la variación térmica, siendo las mínimas térmicas las que ponen tope a su expansión longitudinal. Prefiere planicies y lomas poco elevadas; en el territorio peninsular, se extiende en altitud entre el nivel del mar y los 2000 m; aunque el óptimo se halla entre 200 y 1200 m, variando con latitud, continentalidad y aridez. Cabe resaltar, que sobre los 1500 m no suele pasar de arbusto.

Los encinares se reproducen fácilmente de la bellota y puede dar retoños y brotes adventicios abundantes hasta los 200 o más años. Las raíces continúan desarrollándose durante toda la vida de la planta siendo una freatófito facultativo, es decir que posee un poderoso y profundo sistema radical capaz de aprovechar los recursos hídricos profundos. Una de las mayores perturbaciones que sufren los encinares es el fuego, que puede darse en cualquier estación de año, pero ocurre con mayor frecuencia y peores consecuencias en verano. La exposición a incendios recurrentes en un intervalo de pocos años merma

considerablemente la recuperación del encinar, siendo reemplazado por los pinares xerófilos y otra vegetación arbustiva.

En gran parte de España, bien por efecto de los tratamientos culturales al vuelo, bien por la altitud o el frío, la encina no suele pasar los 12-15 m de altura. En edad muy avanzada su tronco alcanza 1 m de diámetro, siendo uno de los árboles que alcanzan mayor longevidad, pudiendo vivir alrededor de 5-7 siglos.

El valor protector de la encina es considerable, por su función regeneradora de suelos óptimos, la densidad de su cubierta forestal, la consistencia de su mantillo o cubierta muerta, la potencia de su sistema radical y su capacidad de largos periodos de cierre de estomas, para reducir al mínimo la transpiración. En los encinares se suele presentar una óptima regulación de escorrentías acompañada de una recarga de acuíferos subterráneos (Ruiz de la Torre, 2006).



**Figura 2- Bosque encinar de La Hunda (UPV, 2018) .**

### 1.3 Tratamientos de silvicultura

La silvicultura es el conjunto de técnicas relacionadas a la gestión, crecimiento y desarrollo de los ecosistemas forestales, con la finalidad de obtener una producción de bienes y servicios que la sociedad demanda de los bosques, buscando garantizar el aumento de su calidad y continuidad en el tiempo (Blanco, 2017).

Mediante el empleo de los tratamientos de silvicultura se busca disminuir la competencia entre o intra-especie, influyendo en el aumento del crecimiento y la supervivencia de los árboles de interés. La utilidad que se le puede encontrar a la aplicación de tratamientos de silvicultura son muy diversos tales como la protección para el suelo, una mejor producción de la fauna silvestre, mayor producción de madera, un mejoramiento en la biodiversidad de los bosques, la prevención de incendios forestales, una mejora paisajista del bosque y la regulación del ciclo del agua (Louman et al., 2001).

La competencia tiene lugar cuando en un ecosistema la disponibilidad de un determinado recurso es limitada y no logra cubrir todas las necesidades de las especies. Esta competencia puede ser intraespecífica, que se da entre individuos de una misma especie, o interespecífica, que se da entre individuos de diferentes especies. La competencia generalmente es asimétrica por lo que las especies mejor adaptadas terminan afectando diferentes etapas de su desarrollo o incluso desplazando a su competidor (Louman et al., 2001).

Entre los tratamientos silvícolas más habituales se tienen las podas, desbroces, clareos, claras y resalveos, cuyas definiciones se obtuvieron del Diccionario Forestal Español (Sociedad Española de Ciencias Forestales, 2019).

Las podas forestales consisten en la remoción mecánica y sistemática de las ramas vivas y muertas en los árboles en pie, con el fin de mejorar la calidad de la madera de los fustes otorgándole un mayor valor comercial.

Los desbroces tienen la finalidad de reducir sobre un rodal los estratos de vegetación como matas y arbustos, cuya acción sobre la especie puede ser selectiva o total y su modo de ejecución manual, mecánico o químico. La trituración es el método más habitual, y se puede

realizar tanto manualmente con el uso de sierras, como mecanizadamente con el empleo de retro-arañas y desbrozadoras. El método mecanizado es el más recomendado por su rapidez y rendimiento. Finalmente, el método químico consiste en el empleo de biocidas mediante la aplicación de herbicidas sobre la vegetación que se desea eliminar.

Los clareos y claras consisten en la remoción de árboles en un rodal regular, en estado de monte o repoblado, reduciendo su densidad y mejorando la estabilidad de la masa, lo cual permite que las especies tengan menos competencia para adquirir sus recursos (nutrientes y agua) y, por lo tanto, favorecer el crecimiento de los pies remanentes de forma más eficientemente. La diferencia entre ambos métodos radica en que los clareos no buscan obtener productos maderables, mientras que las claras tienen fines comerciales.

Los resalvos son un tratamiento de monte bajo como la encina, centrándose en la eliminación selectiva de los brotes, conservando los mejores pies de la masa tras el corte, consiguiendo de esta manera una reducción de la espesura, además de favorecer el crecimiento diametral y longitudinal de la especie.

#### **1.4 Influencia de la gestión forestal en el ciclo hidrológico en los climas semiáridos**

La gestión forestal busca aprovechar y modificar los procesos ecológicos naturales de un determinado bosque, mediante las técnicas de silvicultura descritas en el apartado anterior. Sin embargo, no siempre está claro en qué sentido la gestión forestal altera al ciclo hidrológico. Se asume generalmente que se genera un mayor flujo hídrico en la cuenca al realizarse un tratamiento de eliminación de cobertura arbórea, al reducir por este medio la evapotranspiración e interceptación; mientras que al aumentarse la densidad de los bosques con la plantación de nuevas especies se reduce el agua disponible por el bosque (Committee on Hydrologic Impacts of Forest Manageme, 2008).

Los ecosistemas áridos y semiáridos forestales son zonas caracterizadas por poseer un alto número de especies arbóreas en un paisaje que se encuentra en constante cambio, debido a la desertificación, los cambios climáticos y la erosión causada por la actividad humana, como por ejemplo el cambio del uso del suelo, la agricultura y la sobreexplotación. Estos hechos se convierten en una amenaza para ciertos hábitats y fauna silvestre, cuyas características

ambientales vienen ya muy limitadas por la escasez de agua; siendo este el principal factor limitante para la producción primaria. A su vez presentan altas tasas de evaporación por efecto de radiación solar, la velocidad del viento y la presión de vapor. También se caracterizan por ser bastante heterogéneos en su régimen de precipitaciones, que es bastante irregular tanto espacial como temporalmente, con variaciones amplias de temperatura durante el día y la noche (Villagra et al., 2013). Todos estos hechos justificarían la implementación de una selvicultura de base hidrológica para estos sistemas forestales.

Dentro de las características edáficas de los bosques en las zonas áridas y semiáridas, éstos cuentan con una profundidad, pH y fertilidad muy variable, al igual que texturas de suelo que pueden variar desde arenosas hasta arcillosas. Con respecto a la productividad de estos suelos, se sabe que dependen del contenido de materia orgánica y de su capacidad de retención de agua, el cual se encuentra directamente relacionado con la profundidad. Sin embargo, con el aumento de la aridez disminuye la estabilidad de los agregados del suelo y el contenido de materia orgánica es prácticamente inexistente, lo que resulta en la pérdida de la capacidad de infiltración del suelo generando un aumento de la escorrentía superficial (Fernández, 2010).

La interacción entre el ciclo hidrológico y la vegetación de los ecosistemas forestales se puede observar cuando el agua lluvia que ingresa al suelo puede seguir varios caminos según las condiciones atmosféricas y la edafología del sitio. Una parte de esta agua se convierte en escorrentía superficial, la cual sirve de abastecimiento a los ríos; otra parte regresa a la atmósfera mediante la evaporación directa desde suelo o como transpiración de la vegetación; y una parte final se infiltra en el suelo donde llena los depósitos subterráneos; el agua que no llega a estos almacenamientos se convierte en escorrentía subsuperficial (Shaxson & Barber, 2005).

Es innegable la influencia que tienen los bosques sobre el ciclo hidrológico y se ha comprobado que, en zonas tropicales donde la vegetación es abundante, el aire que pasa a través de las zonas arboladas genera el doble de precipitación que el aire que pasa a través de zonas áridas (Spracklen et al., 2012). Por otro lado, en las zonas áridas con presencia de estaciones secas, para mantener las actividades agrícolas e industriales de una comunidad y

a su vez sostener los sistemas acuáticos del ecosistema, resulta más determinante el régimen de flujo del agua, que la cantidad de agua disponible anualmente (Brujinzeel, 1990).

En las épocas secas es de vital importancia conservar un flujo constante de agua en los cauces de los ríos para la navegación, fauna, ganado, pesca, comunidades rurales y sistemas de regadío que carecen de la tecnología para bombear agua subterránea (Aylward, 2005). Debido a que muchas de estas zonas áridas se encuentran sometidas a la sobreexplotación del uso de los suelos, se ha generado una pérdida importante de la cobertura forestal a causa de repetidos incendios en estos bosques, acarreando problemas de erosión y desertificación. En cuanto al papel hidrológico de los bosques áridos, puede ser más significativo el mantenimiento de los principales flujos hídricos de una determinada cuenca fluvial durante la época seca, con respecto a la producción anual total de agua disponible aguas abajo (Sandström, 1998).

Pero a pesar de todos los beneficios que puedan generar la presencia de los árboles para el ciclo hidrológico, existe el riesgo que una alta densidad de árboles en zonas áridas, generen un incremento de las presiones en el consumo de los recursos hídricos, creando un desequilibrio entre el agua azul y agua verde, al igual que una posible reducción del flujo superficial y de la recarga de agua subterránea; poniendo en peligro los escasos recursos hídricos de zonas áridas y semiáridas (Jackson et al., 2005). Por ello, es importante recobrar el funcionamiento hidrológico de las cuencas semiáridas, mediante la restauración de la cobertura vegetal y la reforestación. Es aquí cuando el uso de técnicas de silvicultura juega un rol indispensable, regulando la cobertura vegetal y facilitando la recarga de agua subterránea, y en consecuencia un flujo constante en la estación seca (Bargués Tobella, 2016).

### **1.5 Justificación del trabajo fin de máster**

Los cambios socioeconómicos y culturales que afectaron a la sociedad rural a partir de los años 60 han supuesto una merma demográfica importante y con ello un abandono de las actividades rurales (ganadería, agricultura, aprovechamientos del monte, etc.). Una consecuencia a nivel de ecosistemas del paisaje de este hecho es el cambio de su estructura de mosaico de grano fino por otra de grano grueso debido a la expansión del bosque y el matorral. Esto, pese a sus beneficios en la conservación del suelo, puede suponer dos efectos colaterales, como son el incremento en la ocurrencia de grandes incendios forestales y la disminución de la aportación específica de las cuencas hidrográficas (Gallart & Llorens, 2004). En el primer caso, el aumento de la superficie anual quemada entre los años del 60 (< 50000 ha anuales de media) y las décadas posteriores al siglo XX (con medias anuales > 120000 ha y máximos próximos al medio millón de ha anuales) es dato suficiente (MMARM, 2006). Asociada a esta expansión natural del bosque está también la pérdida de ecotonos y biodiversidad, que se ve disminuida a medida que la intervención humana va perdiéndose.

Lo expuesto lleva a plantear la complementación de los actuales criterios de gestión silvícola, con fuerte base en la conservación del suelo, con otros objetivos hidrológicos de ahorro y/o producción de agua. Ello supone que el manejo y gestión de las áreas forestales se haga manteniendo una estructura espacial de la vegetación que permita un equilibrio entre los aspectos asociados a mayores densidades, como la conservación del suelo y la regulación de caudales, y los aspectos relacionados con la presencia de claros, como la disminución de la evapotranspiración y el correspondiente aumento del agua infiltrada y escurrida; una ausencia excesiva de vegetación en cabecera puede llevar a efectos indeseados de torrencialidad aguas abajo. Cualquier actuación en masas forestales ubicadas en cabecera de cuenca que afecte a su densidad, estructura o superficie tendrá efectos en los regímenes de caudales, el transporte de sedimentos por las corrientes y la calidad del agua que pueden ser adversos en los tramos medio y bajos de los ríos donde generalmente se hallan los asentamientos humanos. La cuestión se centra por tanto en manejar con criterios hidrológicos el monte mediterráneo de acuerdo a la posibilidad de producir el mayor rango posible de beneficios deseados (recarga de acuíferos, mejora del estado vegetativo de las masas, mayores aportaciones a embalses y aumento de su vida útil y capacidad, protección

frente riadas, protección del bosque frente a incendios, etc.). Para ello, es preciso clarificar y aplicar un óptimo de cobertura vegetal o cubierta que minimiza la interceptación y las pérdidas de suelo por erosión.

En este tipo de selvicultura, el agua es el elemento central de la gestión, pues es el principal factor de estrés que afecta a los bosques semiáridos (Linder et al., 2014; Allen, et al., 2010). Las intensas sequías se traducen en el aumento del riesgo de incendios (García-Prats et al., 2015), el deterioro de la relación agua azul / agua verde (González-Sanchis et al., 2015; Grant et al., 2013), el estancamiento del crecimiento de las especies arbóreas, una mayor sensibilidad árbol-clima, estrés por sequía y mortalidad (García de la Serrana et al., 2015; Fernandes et al., 2016; López et al., 2003). Las estrategias de gestión forestal orientadas a aumentar la disponibilidad del agua y disminuir la componente de la escorrentía superficial para el sistema ya se han implementado con éxito en los últimos años (del Campo et al., 2014; Ungar et al., 2013; Grant et al., 2013; Klein et al., 2013). Estos autores han reportado un aumento en el almacenamiento de agua del suelo y la recarga de los acuíferos, y un mejor desarrollo de los bosques, consiguiendo de esta manera una mayor resiliencia del ecosistema forestal (García-Prats et al., 2016; Ilstedt et al., 2016).

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo general**

El objetivo principal del trabajo es realizar una descripción cuantitativa de la eco-hidrología de una masa de encina (*Quercus ilex*) y determinar los posibles efectos de los tratamientos silvícolas en este bosque mediterráneo de baja biomasa. Para ello, se ha realizado una integración y síntesis de datos previos a fin de presentarlos de una manera más directa y didáctica en un formato más orientado a personal técnico u otros interesados no doctos en la temática. Estos datos han sido obtenidos de los proyectos de investigación: HYDRASIL; SILWAMED y CEHYRFO-MED, los cuales han sido previamente publicados en revistas científicas en un formato científico y en inglés (del Campo et al., 2018, 2019 a, b). Así, se ha integrado y sintetizado toda la información relativa a la partición de la lluvia ("Rainfall partitioning after thinning in two low-biomass semiarid forests: Impact of meteorological

variables and forest structure on the effectiveness of water-oriented treatments”), de los componentes relativos a la redistribución de la lluvia neta en el suelo (“Effectiveness of water-oriented thinning in two semiarid forests: the redistribution of increased net rainfall into soil water, drainage and runoff”) y finalmente a las variables involucradas en la evapotranspiración del ecosistema (“The impact of adaptive forest management on water fluxes and growth dynamics in a water-limited low-biomass oak coppice”). En este sentido, este trabajo elabora un balance hídrico que busca aunar todos los componentes eco-hidrológicos registrados, procesados y validados previamente.

En el seno de este trabajo, se realizaron mediciones en campo con la finalidad de prolongar las series temporales y comprender de una manera más didáctica y directa la metodología de obtención de los resultados. Finalmente, dado que el principal usuario práctico de esta investigación es el personal técnico de la Administración autonómica, con una formación amplia pero no específica en eco-hidrología forestal, se consideró que la traducción de los resultados publicados al idioma español y en un formato de fácil entendimiento es fundamental. Con ello se consigue también el propósito de que este personal técnico se pueda implicar más en la continuidad y aplicación de los resultados de los proyectos anteriormente mencionados.

### **2.1 Objetivos específicos**

- Describir y cuantificar la partición de los flujos de agua que tienen lugar en un bosque de encinas de baja biomasa.
- Identificar las diferencias entre las parcelas de control y tratamiento, a partir de la implementación de un tratamiento silvícola en una masa de encina, durante todo el periodo de estudio.
- Cuantificar la durabilidad de los efectos de los tratamientos silvícolas en la eco-hidrología de una masa de encinar a corto y mediano plazo.

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 Descripción general del área de estudio

El estudio se llevó a cabo en un bosque de baja biomasa, caracterizado por una alta densidad de árboles, una baja productividad y limitaciones de agua; ocasionando una alta competencia entre árboles (del Campo et al., 2019 b). El bosque se encuentra ubicado en España dentro de la región suroeste de la provincia de Valencia.

El sitio de las parcelas de investigación presenta un clima mediterráneo con una influencia continental pronunciada y se encuentra situado dentro del monte público “La Hunde (HU)” (Ayora, Valencia), específicamente en las coordenadas geográficas 39°04' N, 1°14' O, a una altitud entre 1080-1100 msnm, el cual podemos identificar en la Figura 3. Estas parcelas están pobladas por un encinar, cuya especie predominante es la encina (*Quercus ilex* subsp. *ballota* (Desf.) Samp.), que entra dentro de la categoría de un monte bajo marginal y las especies acompañantes son *Q. faginea*, *Pinus halapensis*, *Juniperus* y *J. oxycedrus* (del Campo et al., 2019 a).



Figura 3- Localización de las parcelas experimentales (Instituto Geográfico Nacional, 2018).

El sitio de estudio ha sido definido previamente en términos de vegetación, clima, suelos y otros rasgos biogeográficos (del Campo et al., 2019 a). Los suelos son poco profundos (10-40 cm), con una textura franco-limosa arenosa (44% arena, 33% limo, 23% arcilla) y un pH básico ( $8 \pm 0.1$ ) (di Prima et al., 2017). En la **Tabla 1** se resume la información mencionada. Además, los estudios previos determinaron que la roca madre, es una piedra caliza karstificada y no existen cursos de agua regulares, pero hay numerosos manantiales que pueden secarse en los meses de verano.

**Tabla 1.** Características fisiográficas, climáticas y edáficas del sitio experimental La Hunde (HU) y sus respectivas parcelas de control (C) y de tratamiento (T). Donde: (a) Los números romanos (I, II, III) corresponden a los bloques experimentales en sentido descendente desde la cima de la pendiente, (b) Los intervalos son para la profundidad del suelo (cm) y las fracciones van en el siguiente orden: arena (2–0.02mm), limo (0.02–0.002mm), arcilla (<0.002mm) y (c) Los valores son media  $\pm$  desviación estándar. Fechas de muestreo: mayo-2012 y mayo-2016.

<b>Características del sitio</b>	<b>Unidades</b>	<b>Control</b>	<b>Tratamiento</b>
Coordenadas	Geográficas	39°4'29-30" N 1°14'25-26" W	39°4'48-49" N 1°14'46-48" W
Altitud	m a.s.l.	1080-1100	
Pendiente	%	30.8 $\pm$ 6.0	33.1 $\pm$ 7.9
Orientación	°(0°: este)	327 + 28.1	311.62 + 18.3
Precipitación (mm)	mm	466	
Temperatura (mm)	°C	12.8	
Evapotranspiración potencial	mm	749	
Profundidad del suelo <sup>a</sup>	cm	I:15; II:30; III:40	
Textura <sup>b,c</sup>	%	0-10: 44; 33; 23 10-30: 57; 23; 20 30-40: 48; 32; 19	
PH	(Agua)	7.9 $\pm$ 0.2	8.0 $\pm$ 0.1
Carbonatos	(g g <sup>-1</sup> suelo seco)	0.215 $\pm$ 0.096	0.260 $\pm$ 0.042

### 3.2 Caracterización de la parcela experimental.

En las parcelas experimentales de La Hunde, debido a su papel de bosques marginales y/o protectores, no se ha realizado un manejo forestal en las últimas décadas. Se presentan zonas de arbustos forestales y un monte bajo de encinas, como resultado del uso tradicional de la leña, que cayó en desuso en la década de 1970. Este bosque presenta altas densidades de árboles y una alta competencia intraespecífica que podría ser la responsable del

deterioro de la copa del árbol observada después de años secos severos (del Campo et al., 2018).

En mayo del 2012 un contratista del servicio forestal de la Comunidad Valenciana ejecutó un raleo con aclareo de arbustos y encinas, en una parcela rectangular de aproximadamente 1800 m<sup>2</sup> y junto al área tratada se estableció una parcela de control de tamaño similar. En la parcela tratada, se cortaron los arboles con diámetros más pequeños y árboles de troncos múltiples, tratando de conseguir una distribución homogénea de la cubierta forestal, basada en la cobertura del suelo (del Campo et al., 2018) (Ver, Figura 4).

Entre las dos parcelas experimentales, el clima, el estado inicial del suelo, la topografía y la biota se consideraron constantes, mientras que el manejo forestal se consideró variable (tratamiento de aclareo frente a control) (del Campo et al., 2019 b).

Se caracterizó la estructura del bosque antes y después de los tratamientos de aclareo. Para ello, se llevó un registro y medición de variables como el área basal (BA), cubierta forestal (FC), densidad de árboles (De), índice de área foliar (LAI) y diámetros de los troncos a la altura basal (DB) y a la altura del pecho (DBH) (del Campo et al., 2018 ).

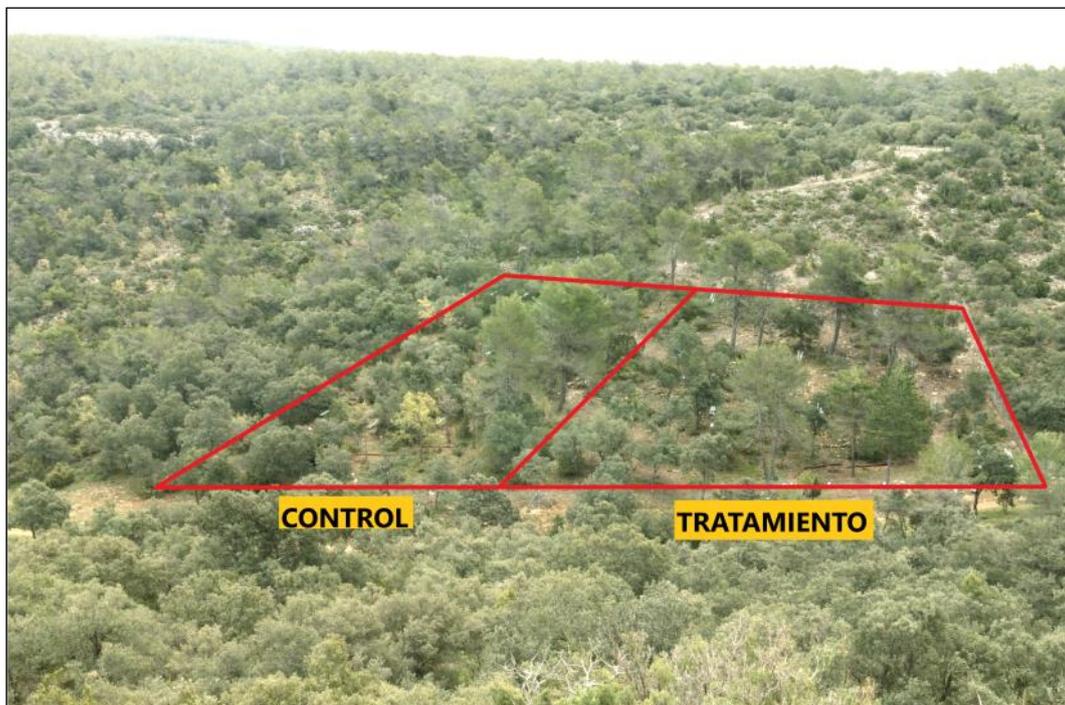


Figura 4- Foto aérea de la zona de estudio de la parcela de control y tratamiento (UPV, 2018).

### **3.3 Contexto experimental (diseño).**

Este estudio se llevó a cabo en una escala de parcelas como una unidad de territorio básica (píxel), útil como punto de partida para ampliarse a mayores escalas, tales como: escala de ladera, bosque o cuenca.

Dentro del área de estudio se implantó una parcela de control (C) representativa sin tratamiento y contigua a esta una parcela tratada (T), en la que se realizó un aclareo con remoción de arbustos como se explicó en el punto anterior, dejando en pie alrededor de 1/3 de los árboles iniciales (aproximadamente 315 árboles/ha). Las parcelas experimentales tienen un área de forma rectangular de aproximadamente 1800 m<sup>2</sup> cada una, orientadas hacia el Noroeste, con una longitud de pendiente de 42 m y pendientes alrededor del 31%. Cada parcela fue dividida en tres bloques de tamaño similar en sentido descendente de la pendiente.

Los flujos laterales de agua del suelo se recogieron mediante zanjas de 30-40 cm de profundidad, excavadas al pie de la ladera de cada parcela experimental, en donde se instalaron unas canaletas de aluminio (Ver, Figura 5 y Figura 6). Debido a que para recoger la escorrentía no era factible tener un bloque de control arriba y otro de tratamiento abajo, resultó necesario realizar un diseño de 3 bloques completos consecutivamente (I, II y III) en sentido de la pendiente.

Los flujos superficiales y subsuperficiales recolectados (considerados como escorrentías "E"), fueron desviados a depósitos que fluyen a través de contadores de agua (Altair V4, Diehl Metering, caudal mínimo 5 l/h), equipados con sistema automático de contadores de pulso. Se excavaron dos zanjas de 6 m de largo por parcela experimental, donde el intervalo del tiempo de medición se ajustó a 5 s (en presencia de lluvia) o 10 minutos (sin lluvia). Del mismo modo, se excavaron zanjas similares en el límite superior de las parcelas, con el fin de desviar la escorrentía superficial y subsuperficial en las parcelas.



**Figura 5- Zanjas excavadas al pie de las laderas de las parcelas experimentales (UPV, 2018).**



**Figura 6- Canaletas de aluminio (UPV, 2018).**

### 3.4 Situación de la estructura forestal en el control y el tratamiento.

Las parcelas experimentales muestran bosques de baja biomasa, con una biomasa aérea calculada a partir de ecuaciones alométricas de 49.7 Mg/ha (23,1 Mg C/ha), valores muy por debajo de otros bosques en el Mediterráneo (Pan et al., 2013). El área basal total eliminada en el clareo fue del 41% y la reducción de la densidad arbórea fue del 73%. Los desechos leñosos gruesos se eliminaron fuera de las parcelas debido a su lenta degradación además de poder convertirse en un foco bacteriano, mientras que los desechos finos se amontonaron y molieron en mantillo sobre las parcelas para que sirvan como nutrientes para las encinas.

Para realizar las lecturas de la **cubierta forestal (FC, %)** se empleó un densitómetro vertical (GRS, Arcata, CA, EE.UU) (Ver, Figura 7), con el cual se realizaron un total de 300 lecturas en ambas parcelas, distribuidas proporcionalmente en los 6 bloques, en una cuadrícula de 3 x3 m y considerando solo a los arbustos por encima de los 1.7 m, los resultados se muestran en la Tabla 2.



Figura 7- Densitómetro vertical GRS.

El **índice de área foliar (LAI, m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup>)** se estimó estacionalmente en cada bloque, utilizando un sensor LAI-2000 ( LI-Cor, 1991 , LI-Cor Inc., Lincoln, NE, EE.UU.), a 1 m sobre el nivel del suelo, bajo radiación solar directa, de preferencia cerca del mediodía y con un cielo despejado para evitar variaciones en las lecturas, debido a la variabilidad de las condiciones climáticas (Molina & del Campo, 2011; Leblanc & Chen, 2001). Todas las mediciones mencionadas con este apartado (Ver, Figura 8), se realizaron dentro de las parcelas a una distancia mínima de 2 m de sus límites, para evitar los efectos de borde.



Figura 8- Analizador de dosel de plantas LAI-2000 (HiWET, 2014).

**Tabla 2. Resumen de las métricas de la estructura forestal en las parcelas de control y tratamiento (C, T) para La Hunte. Ver texto para las abreviaturas. Los valores entre paréntesis representan el promedio para cada bloque experimental dispuesto de I a III (pendiente ascendente a descendente). §Representa valores en 2016, † representa valores en el año de tratamiento, § † representa valores promediados**

Parcela	DB (cm) <sup>§</sup>	DBH (cm) <sup>§</sup>	BA (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> ) <sup>†</sup>	Densidad (árbol ha <sup>-1</sup> ) <sup>†</sup>	Cobertura (%) <sup>§</sup>	LAI (m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> ) <sup>†§</sup>
C	11.87 (12.1; 11.6; 11.9)	8.62 (8.4; 8.1; 9)	8.5 (5.1; 7.1; 12.4)	1155 (875; 1000; 1460)	62.70 (60; 64; 64)	1.1 (1.24; 0.83; 1.18)
T	18.09 (18.5; 14.3; 17.3)	14.18 (14.2; 10.8; 13.6)	4.98 (3.7; 5; 6.2)	310 (267; 317; 333)	39.3 (36; 44; 48)	0.6 (0.53; 0.58; 0.69)

### 3.5 Caracterización de la meteorología.

En las parcelas experimentales se llevó un registro de datos meteorológicos desde octubre del 2012 hasta septiembre del 2016, con un total de 4 años hidrológicos. Se almacenaron las mediciones tomadas en campo de variables como la precipitación, temperatura, radiación, velocidad del viento y humedad relativa (del Campo et al., 2018 ).

La **precipitación bruta (Pg)** se midió continuamente en cada parcela, a una altura de 6 m sobre el nivel del suelo, por medio de un pluviómetro de cubeta basculante ubicado en un espacio abierto (Ver, Figura 9), con un sensor que cuenta con las siguientes especificaciones: un área de recolección de 200 cm<sup>2</sup>, una resolución de 0.2 mm y una precisión de  $\pm 4\%$  (7852, Davis Instruments Corp., Hayward, CA, EUA), programado para medir a intervalos de 10 minutos y conectado a un registrador de datos CR1000 (Campbell Sci., UT, EE. UU.) (Ver, Figura 10). Los datos faltantes se complementaron con una estación de pluviómetro estándar ubicada a una distancia de 1.5 km, que fueron registrados en un calendario diario (red SAIH, Ayora-La Hunde).



Figura 9- Pluviómetro de balancín (Davis instrument Corp., 2019).



Figura 10- Registrador de datos CR1000 (Campbell Sci., 2019).

La **temperatura del aire** ( $T$ , °C) y la **humedad relativa** (**HR**, %) se midieron dentro de las parcelas experimentales a 2 m sobre el nivel del suelo y por encima del dosel a 6.5 m sobre el nivel del suelo, en la zona de transición de ambas parcelas. Los datos tomados por los sensores (sensor RH / T, Decagon Devices, Pullman, WA, EE. UU.), fueron programados para medir a intervalos de 10 minutos y se conectaron a los registradores de datos EM50 (Decagon) (Ver, Figura 11). Estos valores fueron utilizados para calcular el déficit de la presión de vapor ( $D$ , kPa) (del Campo et al., 2018).

La **radiación solar** ( $R_{s,a}$ ,  $Wm^{-2}$ ) fue medida con un piranómetro (Campbell Sci., UT, EE. UU.), conectado a un registrador de datos CR1000 con intervalos de registro de 5 segundos (lluvia) y un promedio de 1-10 minutos (sin lluvia), este sensor fue instalado en el mismo mástil del medidor de lluvia, por encima de los 6.5 m de altura (del Campo et al., 2019 b).



Figura 11- registradores de datos EM50 (Decagon, 2019).

### 3.6 Caracterización la hidrología.

La **escorrentía cortical (Ec, mm)** se midió sellando collares al tronco de 4 árboles por clase de diámetro de cada parcela. La corteza de cada árbol seleccionado como muestra, se raspó para preparar la superficie y realizar la respectiva colocación de un collar de plástico con sellador de poliuretano, a una altura variable entre 0.3 y 1.2 m (Ver, Figura 12). Luego se insertaron tubos de plástico en pequeños orificios, ubicados en la parte más baja de los collares, para recoger el agua y desviarla a un pluviómetro basculantes (Pronamic, ítem 100.054, resolución de 1 mm y una precisión del  $\pm 5\%$ ) ( Ver, Figura 13), programados para registrarlos datos en un intervalo de tiempo de 10 min (sin lluvia) y de 5 segundos (con lluvia), y finalmente se almacenan en depósitos de 25 litros, en intervalos de 10 a 15 días, para la validación.



Figura 12- Pluviómetro ECRN-50 (UPV, 2018).



Figura 13- Pluviómetro basculante (Pronamic, 2019).

La **trascolución ( $T_r$ , mm)** se midió mediante el uso de 9 canaletas de acero galvanizado por parcela (3 por bloque) (Ver, Figura 14). Las cuales fueron dispuestas en puntos estratégicos, siguiendo las curvas de nivel y mantenidas en las mismas posiciones a lo largo del estudio (Llorens et al., 1997). Las dimensiones geométricas de las canaletas mencionadas son de 250 cm de largo y 40 cm de ancho, colocadas a 50 cm sobre el nivel del suelo e inclinadas hacia contadores volumétricos de agua equipados con un emisor de pulso (ALTAIR V4, Diehl

Metering, caudal mínimo de 5 l/h) (Ver, Figura 15). Para calibrar todo el sistema se añadieron depósitos de 25 litros calibrados a intervalos de 10 a 15 días (Ver, Figura 16).

El área de recolección total por canaleta fue de 0.8 m<sup>2</sup>, considerada como una muestra adecuada para obtener una estimación de la media, con un intervalo de confianza del 95% de probabilidad (Rodrigo & Avila, 2001). Aunque debido a la variabilidad espacial, el uso de pluviómetros fijos puede provocar errores sistemáticos (Lloyd & De Marques, 1988). En nuestro estudio la incertidumbre es <6% en la trascolación, con un área total de muestra que está entre los 7.3 y 9.2 m<sup>2</sup> por parcela, o aproximadamente 0.27 pluviómetros de 200 cm<sup>2</sup> por m<sup>2</sup> (CR Lloyd & De Marques, 1988). Esto se debe a que los colectores grandes integran la trascolación desde un área más amplia del dosel, disminuyendo la variabilidad espacial. El intervalo de tiempo para los contadores fue de 5 segundos cuando llueve o de 10 minutos en períodos sin lluvia (del Campo et al, 2018).



**Figura 14- Canaletas de acero galvanizado (UPV, 2018).**



**Figura 15- Contador Volumétrico de agua ALTAIR V4 (Metering, 2019).**



**Figura 16- Sistema implementado para la medición de la trascolación (UPV, 2018).**

Para la **interceptación (It, mm)** se calculó a partir de la lluvia bruta menos la suma de la trascolación y el flujo de la escorrentía cortical. Cuando el promedio de un bloque en una parcela reflejó valores negativos, se estableció convertirlos a cero, debido a que en algunas canaletas los puntos de goteo deberían compensarse con menos trascolación que en otros (del Campo et al, 2018).

Para determinar la **transpiración (Et, mm)** se midió la **velocidad del flujo de savia (Vs, cm día<sup>-1</sup>)** utilizando el método del cociente calórico (Heat Ratio Method, "HRM") (Burgess et al., 2001), mediante el uso de 14 sensores de flujo de savia (Ver, Figura 17), programados para registrar datos en intervalos de 1 hora. Los sensores están conectados a una batería de 12 V y a un panel solar. Los valores medidos fueron almacenados en un registrador de datos (Smart Logger, ICT International, Armidale, NSW, Australia). Los sensores se distribuyeron en ambas parcelas proporcionalmente en las diferentes clases de diámetros, los cuales fueron instalados en la superficie de los troncos, a una altura variable entre 0.3 m y 1 m, según la forma de los troncos. El tamaño de muestra utilizada en nuestra parcela se encuentra dentro del rango considerado normal, con respecto a los estudios de relaciones hídricas de los árboles (Granier, 1987; Klein et al., 2013; Martínez-Vilalta et al., 2003).

Los valores diarios del **flujo de savia (Sf, l árbol<sup>-1</sup>)**, se calcularon mediante el producto de la sección del tronco (cm<sup>2</sup>) y la velocidad de la savia medida por los sensores (Vs, cm día<sup>-1</sup>). Finalmente, se obtuvo la transpiración (Et) por medio del producto entre, los valores diarios del flujo de savia (sf, l árbol<sup>-1</sup>), el número de los árboles (De, árbol m<sup>-2</sup>) y un coeficiente de corrección (cf).

Los datos fueron controlados para su calidad y se eliminaron picos y brechas. En algunos casos, los datos de flujo se perdieron durante más de 15 días, debido al mal funcionamiento del Datalogger/sensor, el fallo de la batería y/o la actividad de los roedores. En estos casos, se utilizó un modelo de red neuronal artificial para estimar Et, como se describe en Fernandes et al. (2015).



Figura 17- Sensores de flujo de savia instalado en el sitio de estudio (UPV, 2018).

Para la caracterización del particionamiento de la **evapotranspiración (ET)**, se consideró inicialmente utilizar el modelo de una capa de Penman-Monteith (Monteith & Unsworth, 1990), el cual se ha utilizado y probado ampliamente. Sin embargo, este modelo presenta limitaciones para bosques con un dosel arbóreo con poca vegetación (Zhang et al., 2008), como en nuestro caso experimental, donde se reflejaron valores bajos de LAI y FC sobre todo en la parcela T, y sumándole a esto la necesidad de separar la **evaporación del suelo (Es)** de la transpiración. Por lo tanto, se recomendó el uso del modelo de dos capas (SW), para calcular la evaporación del suelo por separado (Shuttleworth & Wallace, 1985).

En el modelo SW, el flujo de calor latente de la cubierta completa ( $\lambda ET$ ) se expresa como la suma simple de dos componentes: el flujo de calor latente del follaje ( $\lambda Et$ ) y el flujo de calor latente del área sin vegetación ( $\lambda Es$ ) (Lhomme et al., 2012). Para mayor detalle de la metodología de cálculo consultar las referencias en del Campo et al. (2019 a). Donde la diferencia entre (ET) y la suma de  $E_t$  (datos de flujo de savia) y  $E_s$  (modelo SW) se consideró como un término residual diverso ( $E_r$ ) que incluye la evapotranspiración de arbustos, la evaporación de basura húmeda y los errores de los cálculos.

El **contenido de agua en el suelo ( $\theta$ ,  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ )** se midió constantemente cada 10 minutos en caso de ausencia de precipitación o cada 5 segundos ante una precipitación, mediante el uso de sondas FDR (EC-5, Decagon Devices Inc., Pullman, WA) (Ver, Figura 18), conectadas a un registrador de datos CR 1000. Los sensores mencionados se instalaron cavando 3 hoyos por bloque (9 en cada parcela), siguiendo las curvas de nivel, en el pozo central de cada bloque se insertaron horizontalmente 3 sensores 5TE a las profundidades de 5, 15, 30 cm; mientras que en los otros dos hoyos del bloque se insertó solo un sensor EC-5 a una profundidad de 15 cm. Obteniéndose una muestra por parcela experimental de 12 sensores en una malla de 10m x 10m, considerada suficiente para obtener una buena estimación del contenido promedio del suelo (Molina et al., 2014). Después de la instalación de todos los sensores se procedió a rellenar los hoyos con el mismo suelo de la excavación y se realizó una leve compactación hasta alcanzar una densidad aparente a la del suelo inalterado (del Campo et al., 2019 b).

Para la medición del **incremento de agua en el suelo ( $\Delta\theta$ )**, se consideró la profundidad de la columna del suelo. Al observar el proceso de humectación del perfil del suelo, se constató que en el conjunto de datos las diferencias de  $\Delta\theta$  eran irrelevantes según profundidad, mostrando un comportamiento no uniforme, debido a la posible presencia de canales verticales preferenciales a través de macroporos (Calvo-Cases et al., 2003; Lin & Zhou, 2008). Por lo tanto, se decidió utilizar la profundidad ponderada de los sensores de humedad (187.5 mm) para calcular el reabastecimiento de agua del suelo para cada sensor y, posteriormente, promediar a través de las 12 sondas para así obtener la  $\Delta\theta$  para cada parcela experimental (del Campo et al., 2019 b).

El **drenaje (D, mm)** se estimó en base a las observaciones del contenido de agua del suelo ( $\theta$ ) y la precipitación bruta ( $P_g$ ). Donde se consideró drenaje para cada sonda, aquella  $P_g$  recolectada cuando la sonda está por encima de la capacidad de campo ( $\theta_{fc}$ ). Esta medida es por sonda y el drenaje en la parcela se promedia para las 12 sondas. En este sentido, se estableció un umbral para diferenciar un drenaje generalizado ( $D_{gen}$ , mm), cuando un mínimo de 2/3 de los 12 sensores FDR mostraban valores por encima de  $\theta_{fc}$ . Dado que diferentes sensores entran en capacidad de campo en diferentes momentos, se consideró la

media de  $P_g$  individualizada para cada uno de estos sensores activos para los cálculos. El drenaje calculado de esta manera es independiente de la incertidumbre asociada al cálculo de  $\Delta\theta$  por profundidad y sólo depende de la capacidad de campo y  $P_g$ , ambos con una estimación más robusta. Además, la diferencia  $D-D_{gen}$  se puede considerar como una aproximación del almacenamiento de agua del suelo por debajo de 18.75 cm (del Campo et al., 2019 b).



Figura 18- Sensor de Humedad de Suelo (Decagon, 2019).

### 3.7 Estadística empleada para la obtención de resultados.

Para el análisis estadístico de las diferencias encontradas entre el tratamiento y el control, se utilizó una serie de datos diarios, los cuales fueron procesados por el software IBM SPSS Statistics 25, en el cual se empleó un análisis de ANCOVA, donde los valores “p” por debajo de 0.05 se consideran variables significativas y los valores por debajo de 0.01 altamente significativos. La magnitud (mm) de las variables relacionadas con la partición de la lluvia bruta ( $T_r$ ,  $I_t$ ,  $E_c$ ) y la redistribución de la lluvia neta ( $\Delta\theta$ ,  $E$ ,  $D$ ) fueron consideradas en el ANCOVA como variables dependientes, las parcelas como factor y la lluvia bruta como covariable. Por otro lado, para las variables relacionadas con la evapotranspiración ( $E_t$ ,  $E_r$ ,  $E_s$ ) también se consideraron como variables dependientes, las parcelas como factor y la radiación como covariable.

#### **4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.**

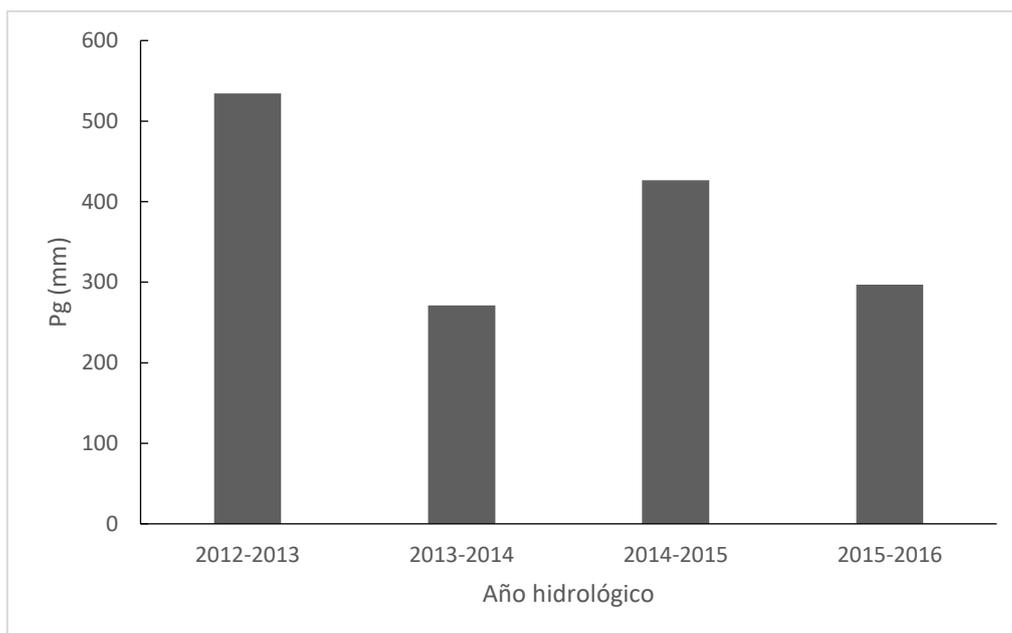
##### **4.1 Características de la lluvia.**

La lluvia bruta acumulada (Pg) medida en las parcelas de investigación durante los 4 años del periodo de estudio, fue clasificada por años hidrológicos, reflejando un total de 534 mm (2012-2013), 271 mm (2013-2014), 426 mm (2014-2015) y 297 mm (2015-2016), sumando un total de lluvia bruta acumulada de 1529 mm para todo el periodo de análisis. El primer año hidrológico fue el más húmedo y el segundo año fue el más seco, tal y como se puede observar en la Figura 19.

Al observar la serie diaria de la Pg, se puede considerar que el régimen de precipitación es muy regular con un período húmedo y seco muy marcados. Además, durante el periodo de estudio alrededor del 72% de las precipitaciones anuales se originan durante los meses de septiembre - marzo (periodo húmedo).

En el año seco (2013-2014), de los registros diarios de precipitación, solo se presentaron 15 días que superaron el umbral de los 5 mm, cabe mencionar que las precipitaciones inferiores a este umbral se consideran de muy poca trascendencia, debido a que generalmente no llegan a humedecer el suelo, ni a cambiar su régimen de humedad.

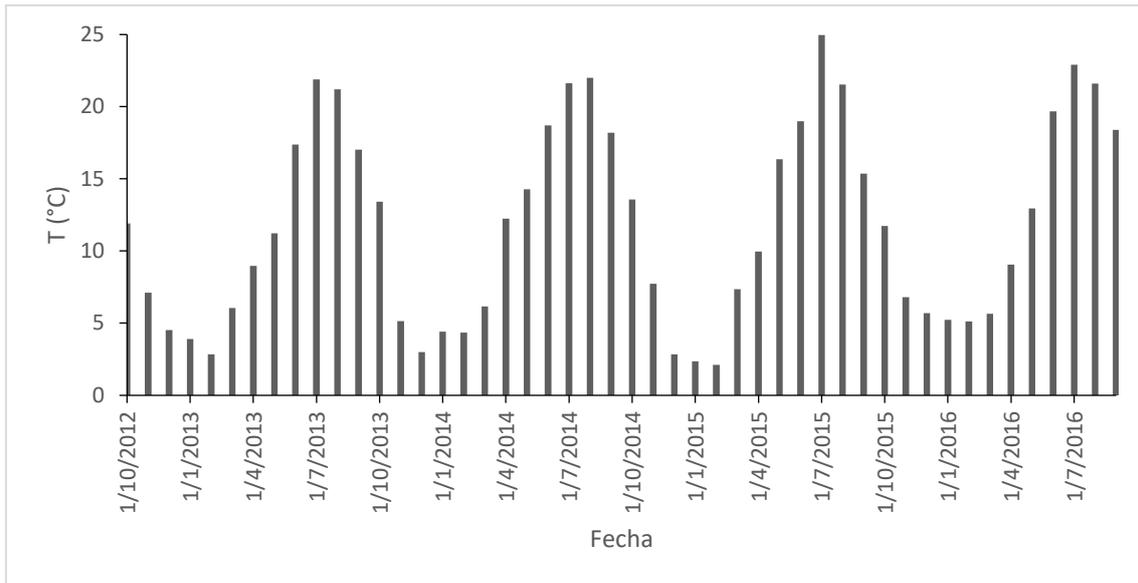
Las precipitaciones durante los 4 años hidrológicos muestran una predominancia de las lluvias no convectivas, mostrando una media de 5 mm por evento y una duración de promedio de 240 min. Por otro lado, solo se registraron 10 lluvias tormentosas o convectivas, con una media de 13.4 mm y una duración promedio de 98 min.



**Figura 19- Valores anuales de la precipitación bruta acumulada en los años de estudio (2012-2016).**

#### **4.2 Características de temperatura.**

Las tendencias temporales de las temperaturas estuvieron estrechamente relacionadas con la variación estacional. El periodo más caluroso se dio en el verano; a finales de junio y principios de agosto del 2015, el promedio diario y máximo diario de la temperatura (T) estuvieron por encima de los 26°C y 37°C, respectivamente. Por el contrario, el periodo más frío se registró para el mismo año entre finales de enero y principios de febrero con un valor promedio diario de -2.3°C y un mínimo de -10.4°C, respectivamente. Los valores medios en T fueron de 11.1 °C (2013), que contrastan con los siguientes años con 12.2 °C (2014), 12.0 (2015) y 12.5°C (2016). Sin embargo, se puede observar en la Figura 20, una clara tendencia periódica de las temperaturas durante el tiempo de análisis.



**Figura 20- Distribución de la temperatura de la zona de investigación dentro del periodo de estudio.**

#### **4.3 Partición de la lluvia bruta: Trascolución, escorrentía cortical e interceptación.**

Para el estudio de las variables eco-hidrológicas dentro de nuestras parcelas de control (C) y tratamiento (T) se las clasificó en tres grupos: partición de la lluvia bruta, redistribución de la precipitación neta en el suelo y la evapotranspiración; las mismas que fueron analizadas dentro un período de estudio de 4 años hidrológicos (2012-2013 al 2015-2016). En las parcelas mencionadas se realizaron mediciones, con un registro de datos diarios y mensuales. Estos datos fueron examinados a través de una metodología explicada en el apartado anterior, y finalmente se aplicó un análisis estadístico de ANCOVA.

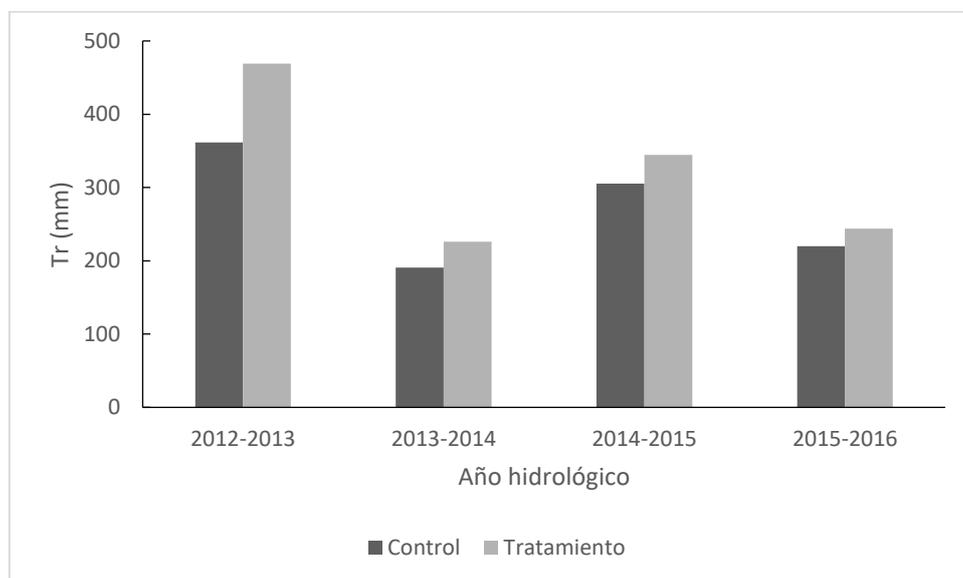
En el estudio de la **trascolución (Tr)** se presentaron valores menores en la parcela de control con respecto a la parcela de tratamiento durante todo el período de estudio, tal y como se puede ver en la Figura 2121. Por otro lado, de un total de lluvia bruta acumulada de 1529 mm para el mismo período de estudio, se trascolaron en las parcelas C y T un total acumulado de 1078 mm y 1284 mm respectivamente.

Del mismo modo, para el año hidrológico más húmedo (2012-2013), se obtuvo un total acumulado de 159 mm y 60 mm de It para las parcelas C y T respectivamente, donde C presenta un 62% más de It con respecto a T; mientras que para el año más seco (2013-2014),

se registraron valores totales de 68 mm y 43 mm para C y T respectivamente, donde C presentó un 36% más de It con relación a T, los valores se pueden ver en la Tabla 3.

Sin embargo, se puede observar que los efectos de Tr para el tratamiento están disminuyendo con el transcurso del tiempo, donde T muestra un descenso en las tasas de Pg trascolado desde un 88% (2013) hasta un 82% (2016), mientras que la misma tasa presenta en C un aumento desde un 67% hasta un 74%; el total acumulado anual de Tr en magnitud (mm) está directamente relacionado con la cantidad de precipitación anual.

Finalmente, se utilizó una serie diaria de Tr para realizar el análisis estadístico, donde el ANCOVA (covariable Pg) mostró una diferencia altamente significativa entre ambos tratamientos durante todo el período de estudio. Cabe resaltar, que estas diferencias pueden variar dependiendo de que estemos en un años húmedo o seco. Sin embargo, para el caso de Tr se reflejaron diferencias altamente significativas para ambos años.



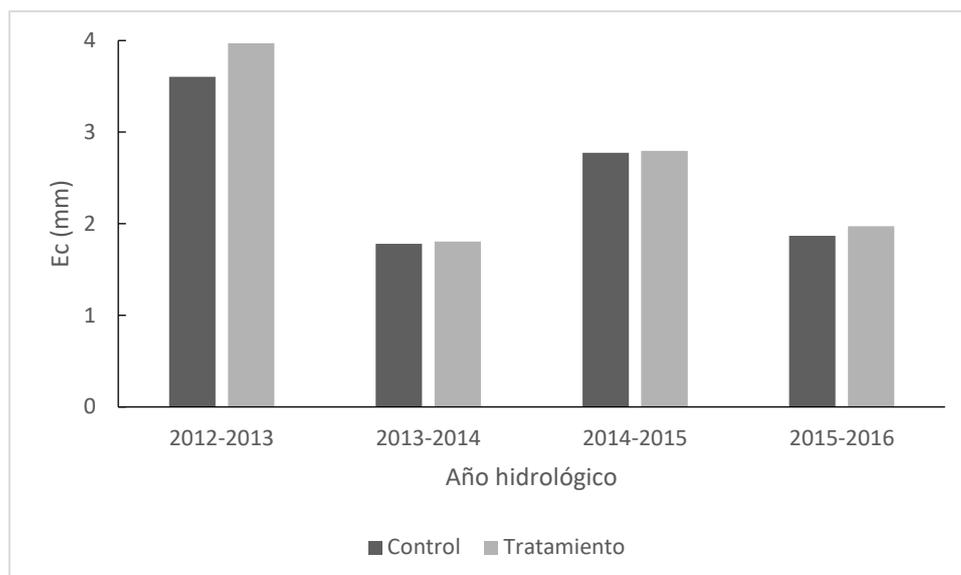
**Figura 21- Valores anuales de la trascolación en las parcelas de control y tratamiento.**

En el análisis de la **escorrentía cortical (Ec)** no se presentaron diferencias de las magnitudes entre ambas parcelas durante todo el período de estudio, tal y como se puede ver en la Figura 22. Por otro lado, del total de lluvia bruta acumulada para el mismo período de estudio, se escurrió en las parcelas C y T un total acumulado de 10 mm y 11 mm respectivamente, reflejando rendimientos muy bajos de escorrentía cortical inferiores al 1% de Pg, que contrastan con las cantidades reportadas anteriormente para la misma especie en el mediterráneo con valores superiores al 6% Pg (Bellot & Escarré, 1998; Llorens & Domingo, 2007; Limousin et al., 2008).

Del mismo modo, para el año hidrológico más húmedo (2012-2013), se obtuvo un total acumulado de 3.6 mm y 4 mm de Ec en las parcelas C y T respectivamente, mientras que para el año más seco (2013-2014), se registró un total acumulado aproximado de 1.8 mm de Ec para ambas parcelas, ver Tabla 3.

Sin embargo, se puede observar que el tratamiento no tuvo ninguna influencia en la variable Ec. El crecimiento de tallo plagiotrópico (crece en forma paralela al suelo), la rugosidad de la corteza o la capacidad de almacenamiento del tronco (Zabret et al., 2018) probablemente sean responsables de los bajos valores de Ec en la encina.

Finalmente, el ANCOVA (covariable Pg) no mostró una diferencia significativa entre ambos tratamientos durante todo el período de estudio. Cabe resaltar, que estas diferencias pueden variar dependiendo de que estemos en un año húmedo o seco, sin embargo, para el caso de Ec tampoco se reflejaron diferencias significativas para ambos años.



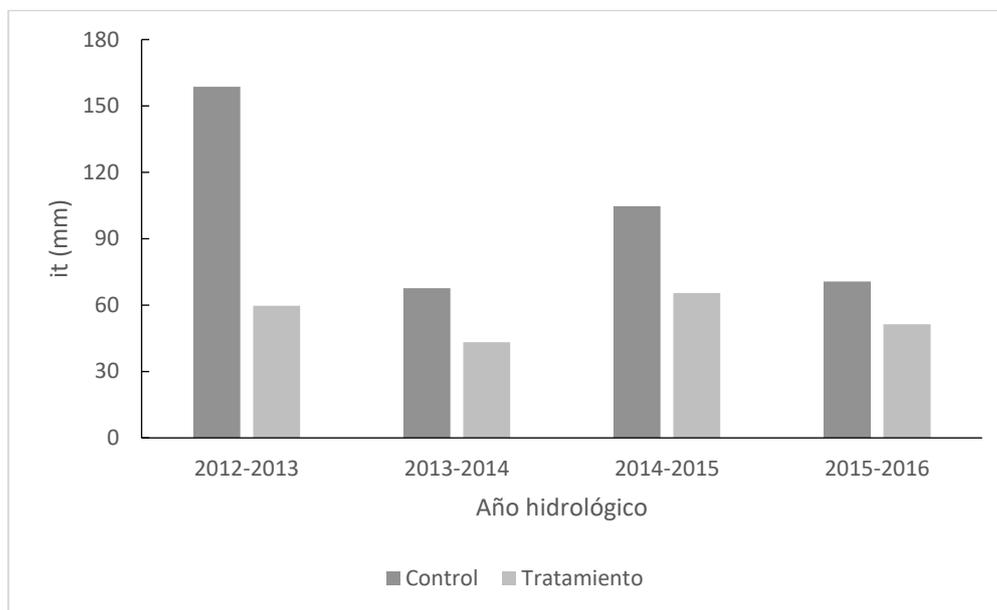
**Figura 22- Valores anuales de la escorrentía cortical en las parcelas de control y tratamiento.**

En el estudio de la **intercepción (It)** se presentaron valores mayores en la parcela de control (C) con respecto a la parcela de tratamiento (T) durante todo el periodo de estudio, tal y como se puede ver en la Figura 233. Por otro lado, del total de lluvia bruta acumulada para el mismo período de estudio, se interceptaron en las parcelas C y T un total acumulado de 402 mm y 221 mm respectivamente.

Del mismo modo, para el año hidrológico más húmedo (2012-2013), se obtuvo un total acumulado de 159 mm y 60 mm de It para las parcelas C y T respectivamente, donde C presenta un 62% más de It con respecto a T; mientras que para el año más seco (2013-2014), se registraron valores totales de 68 mm y 43 mm para C y T respectivamente, donde C presentó un 36% más de It con relación a T, los valores se pueden ver en la Tabla 3.

Sin embargo, se puede observar que los efectos de It en el tratamiento a partir de la intervención están disminuyendo con el transcurso del tiempo, donde T muestra un incremento en las tasas de Pg interceptado desde un 11% (2013) hasta un 17% (2016), mientras que la misma tasa presenta en C un descenso desde un 30% hasta un 24%; el total acumulado anual de It en magnitud (mm) está directamente relacionado con la cantidad de precipitación anual.

Finalmente, el ANCOVA (covariable Pg) mostró una diferencia altamente significativa entre ambos tratamientos durante todo el período de estudio. De igual manera se reflejó una diferencia altamente significativa para el año húmedo y seco.



**Figura 23- Valores anuales de la interceptación en las parcelas de control y tratamiento.**

Para la encina en la parcela de control las fracciones de Tr fueron del 70% y las de It del 26% de precipitación bruta, valores que se encuentran dentro del rango compilado para esta especie (57-72% y 18-31% de Pg para Tr e It respectivamente), ver Limousin et al. (2008) y sus referencias. La estructura forestal de la parcela en nuestro estudio es bastante simple (LAI, cubierta y BA son muy bajos con respecto a los otros estudios) y esto hace pensar que los valores It de nuestra parcela control son altos cuando se comparan con estructuras con mayores capacidades de almacenamiento. Mientras que en la parcela de tratamiento las fracciones de Tr fueron del 84% y las de It del 14% de precipitación bruta (Ver, Tabla 3). Estos valores demuestran que el tratamiento aplicado presentó un aumento de Tr y una disminución de It, permitiendo que haya un mayor volumen de agua disponible en el suelo.

A lo largo del tiempo los efectos del tratamiento de silvicultura están disminuyendo a causa del crecimiento de las copas de los arboles tratados (del Campo et al., 2014), consecuencia lógica del tratamiento aplicado. Una mayor precipitación neta, la temperatura del suelo y el contenido de nutrientes del suelo mejoran el crecimiento del árbol (López et al., 2003).

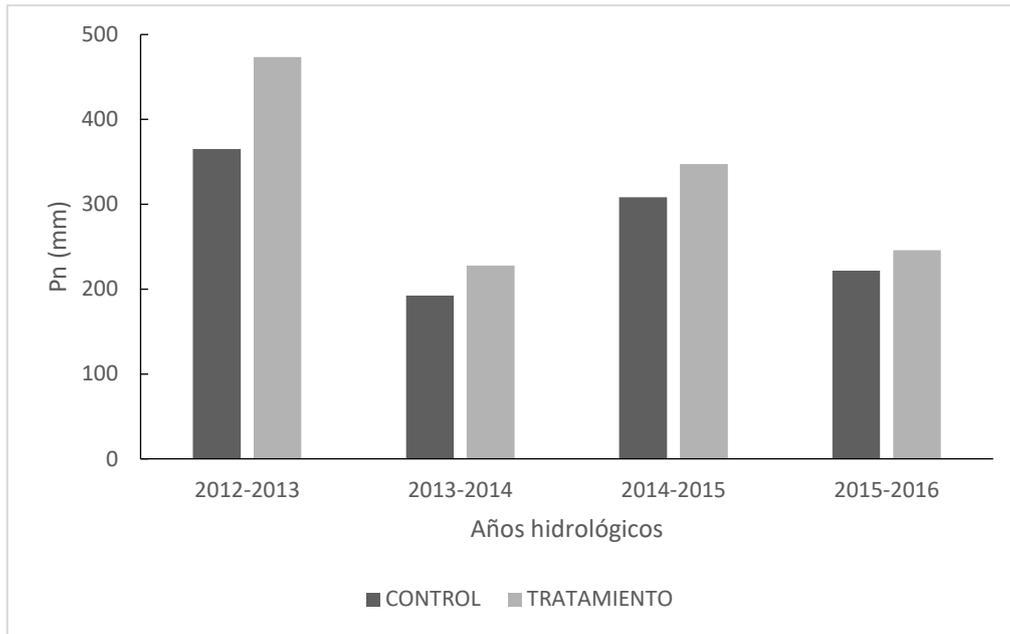
Esto resalta la importancia de estos tratamientos adaptativos orientados al agua y promueve el monitoreo futuro de esa tendencia temporal.

**Tabla 3: Valores totales acumulados de las variables de la partición de la lluvia bruta, en magnitud (mm) y tasas (%), del periodo total de estudio, del año más húmedo y del año seco. Con la representación de los análisis estadísticos (ANCOVA) realizados para la comparación de la influencia del tratamiento de las variables mencionadas; donde \*, \*\* significación en p-niveles  $\leq 0.05$  y  $0.001$  respectivamente.**

AÑO HIDROLÓGICO		CONTROL		TRATAMIENTO	
		Magnitud (mm)	tasa (%)	Magnitud (mm)	tasa (%)
2012-2013	Tr	361**	68%	469**	88%
	Ec	3.6	-	4.0	-
	It	159**	30%	60**	11%
2013-2014	Tr	191**	70%	226**	83%
	Ec	1.8	-	1.8	-
	It	68*	25%	43*	16%
2012-2016	Tr	1078**	70%	1284**	84%
	Ec	10	-	10.5	-
	It	402**	26%	221**	14%

#### **4.4 Redistribución de la precipitación neta en el suelo: Reposición de agua del suelo, Drenaje y escorrentía.**

Para el estudio de la distribución de la lluvia neta en el suelo, se han analizado los siguientes componentes del agua: Reposición de agua del suelo, drenaje y la escorrentía. Como se ha visto el tratamiento ha tenido un efecto significativo sobre la precipitación neta, aumentando sus valores acumulados de 1088 mm a 1294 mm en las parcelas C y T respectivamente, es decir, un aumento del 19% de la Pn de T con respecto a C, en el mismo periodo de estudio, donde la Pg acumulada fue de 1528 m (Ver Figura 24).



**Figura 24- Valores anuales de la precipitación neta en las parcelas de control y tratamiento.**

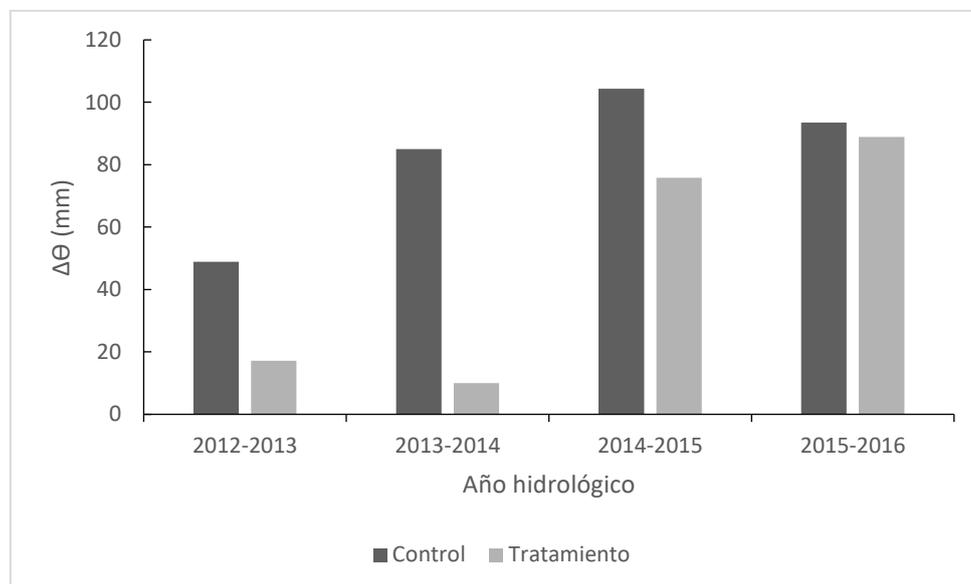
La **reposición de agua del suelo ( $\Delta\theta$ )** presentó valores mayores en la parcela de control (C) con respecto a la parcela de tratamiento (T) durante todo el periodo de estudio, tal y como se puede ver en la Figura 25. Por otro lado, del total de lluvia bruta acumulada para el mismo período de estudio, se produjo una recarga de agua del suelo en las parcelas C y T con un total acumulado de 332 mm y 192 mm respectivamente.

Del mismo modo, para el año hidrológico más húmedo (2012-2013), se produjo una lluvia neta acumulada de 365 mm y 473 mm en C y T respectivamente, donde se generó un  $\Delta\theta$  de 49 mm y 17 mm para las parcelas C y T respectivamente; mientras que para el año más seco (2013-2014) se produjo una lluvia neta acumulada de 193 mm y 228 mm en C y T respectivamente, en el cual se registraron valores  $\Delta\theta$  de 85 mm y 10 mm para C y T respectivamente, los valores se muestran en la tabla 4.

Por otro lado, se puede observar que los valores  $\Delta\theta$  en C fueron notablemente mayores que T durante los dos primeros años del estudio, aumentando esta diferencia de magnitudes en el periodo seco. Sin embargo, se produce una convergencia de los valores de valores  $\Delta\theta$  entre ambas parcelas para el final del periodo de estudio, donde T muestra un incremento en las tasas de  $P_g$  como recarga del suelo desde un 3% (2013) hasta un 30% (2016), de igual

manera se presenta en C un aumento de la misma tasa desde un 9% hasta un 31%; el valor en magnitudes de  $\Delta\theta$  está directamente relacionado con la humedad del suelo antecedente ( $\theta_{fs}$ ), por lo que podemos asumir que el tratamiento favoreció el aumento de la humedad del suelo en T, haciendo que quedara menos volumen disponible para incremento de agua del suelo y por tanto este componente registre valores menores.

Finalmente, se utilizó una serie diaria de ( $\Delta\theta$ ) para realizar el análisis estadístico; el ANCOVA (covariable Pg) mostró una diferencia altamente significativa entre ambos tratamientos durante todo el período de estudio. De igual manera se reflejó una diferencia altamente significativa para el año húmedo y seco.



**Figura 25- Valores anuales de la reposición del suelo en las parcelas de control y tratamiento.**

En el análisis del **drenaje** en el suelo se presentaron valores menores en C con respecto a T durante todo el periodo de estudio, tal y como se puede ver en la Figura 266. Por otro lado, del total de lluvia bruta acumulada para el mismo período de estudio, generó un drenaje (D) acumulado en las parcelas C y T de 528 mm y 736 mm respectivamente.

Del mismo modo, para el año hidrológico más húmedo (2012-2013), de la lluvia neta producida en cada una de las parcelas de investigación, se generó un drenaje acumulado de 264 mm y 307 mm para las parcelas C y T respectivamente; mientras que para el año más

seco (2013-2014), se registraron valores de 52 mm y 156 mm de D para C y T respectivamente, resultados que pueden observarse en la Tabla 4.

Sin embargo, se puede observar que los efectos en D a partir de la ejecución del tratamiento en T están perdiéndose con el transcurso del tiempo, donde T muestra un descenso en las tasas de Pg drenado desde un 57% (2013) hasta un 22% (2016), de igual manera se presenta en C una disminución de la misma tasa desde un 49% hasta un 15%; el valor en magnitudes de  $\Delta\theta$  está directamente relacionado con la capacidad de infiltración de los macroporos del suelo.

Finalmente, se utilizó una serie diaria de D para realizar el análisis estadístico, donde el ANCOVA (covariable Pg) mostró una diferencia significativa entre ambos tratamientos durante todo el período de estudio. Mientras que durante el periodo húmedo no presentó una diferencia significativa; sin embargo, para el periodo seco mostró una diferencia altamente significativa.

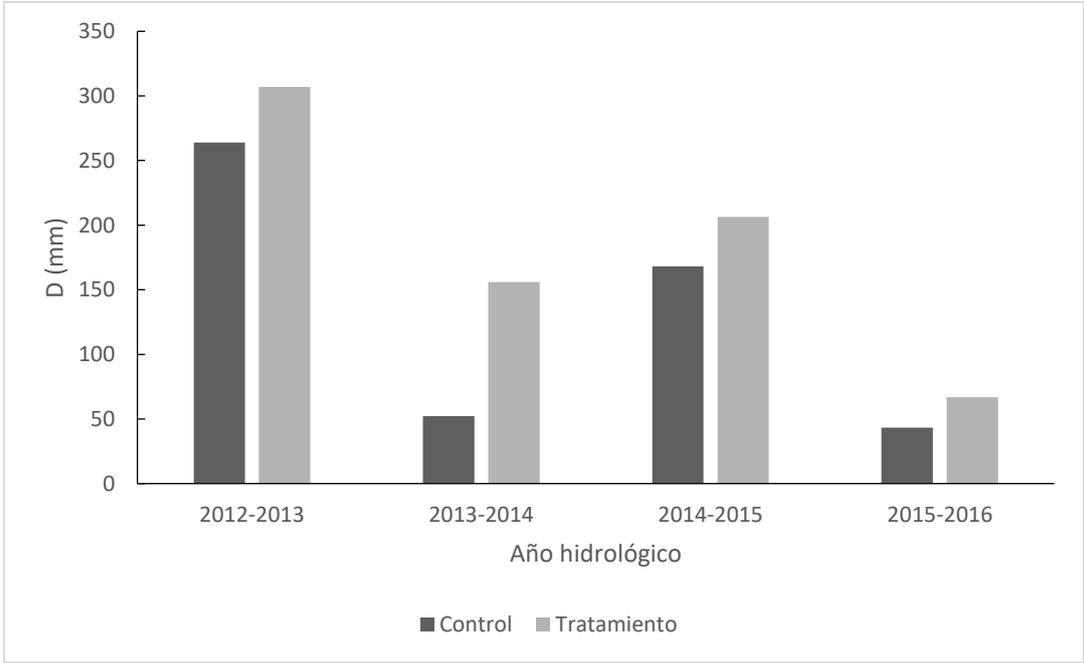


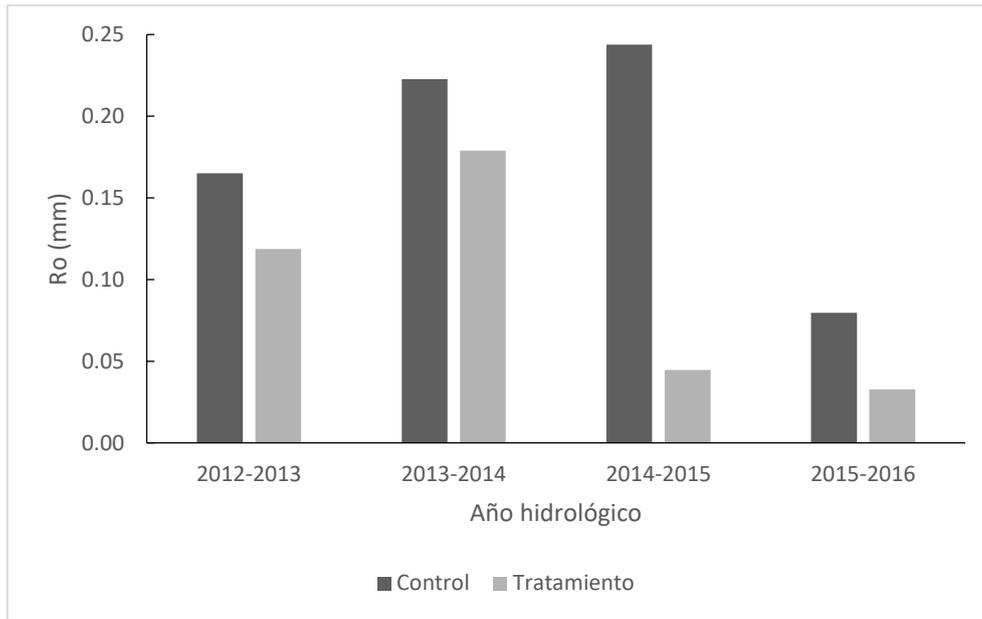
Figura 26- Valores anuales del drenaje en las parcelas de control y tratamiento.

En el análisis de la **escorrentía superficial y subsuperficial (E)** no se presentaron diferencias de las magnitudes entre ambas parcelas durante todo el período de estudio, tal y como se puede ver en la Figura 27. Por otro lado, del total de lluvia bruta acumulada para el mismo período de estudio, se generó una escorrentía acumulada en las parcelas C y T de 0.71 mm y 0.38 mm respectivamente, cuyos valores se mantuvieron por debajo del 1% de  $P_g$ , y representaron no solo la escorrentía superficial ( $E_s$ ), sino también los flujos subsuperficiales ( $E_{ss}$ ), se observó una dependencia en el contenido de la humedad del suelo antecedente ( $\Theta_{st}$ ).

Además, para el año hidrológico más húmedo (2012-2013), se obtuvo un total acumulado de 0.17 mm y 0.14 mm de E en las parcelas C y T respectivamente, mientras que para el año más seco (2013-2014) se registró un total acumulado de 0.22 mm y 0.18 mm de E en las parcelas C y T respectivamente, como se puede ver en la Tabla 4.

Se puede observar el tratamiento no afectó las características del suelo en las capas superiores que controlan los flujos de agua superficial y subsuperficial, debido a que la escorrentía generada localmente se infiltra más hacia abajo dependiendo de la naturaleza del suelo, la microtopografía y las condiciones de lluvia, y se espera que los mismos factores junto con la estructura de macroporosidad controlen los flujos subsuperficiales (Lin & Zhou, 2008).

Finalmente, se utilizó una serie diaria de E para realizar el análisis estadístico, donde el ANCOVA (covariable  $P_g$ ) no mostró una diferencia significativa entre ambos tratamientos durante todo el período de estudio. De igual manera tampoco presentó valores significativos para los años húmedo y seco.



**Figura 27- Valores anuales de las escorrentías (Es y Ess) en las parcelas de control y tratamiento.**

La implementación de tratamientos silvícolas que se realizó en la parcela T mostró un aumento de las precipitaciones netas, que se tradujo de manera diferente en la reposición de agua del suelo y el drenaje, dependiendo del año, mientras que la escorrentía fue insignificante en todos los casos. En contraste la percolación siempre fue mayor en la parcela T, mientras que la reposición de agua en el suelo fue mayor en la parcela C.

En condiciones normales el incremento de agua en el suelo sería mayor en el tratamiento que en el control, porque le llega más precipitación neta. Pero para nuestro caso de estudio se presenta un estado de humedad antecedente del suelo ( $\theta_{st}$ ) alto, motivo por el cual se alcanza en la parcela T la capacidad de campo ( $\theta_{fc}$ ) con una menor cantidad de agua infiltrada en el suelo y se genera antes el drenaje. Esto implica que incluso en los años más secos, la humedad del suelo en los estratos más profundos se mejora con el tratamiento.

Al sumar los valores anuales acumulados de las variables  $\Delta\theta$ , D, E no se igualaron al valor de la precipitación neta acumulada anual, motivo por el cual se vio necesario implementar un término inexplicado (U). Los sensores de medición de humedad del suelo se instalaron a profundidades de 15 y 30 cm, por lo que la interceptación de la hojarasca que es importante en ambientes semiáridos (Tsiko et al., 2012) y la reposición de agua en las capas superficiales

del suelo no se midieron directamente y es probable que estos sean los dos los factores que más contribuyen a este término inexplicado. Por lo tanto, se requieren mediciones adicionales para tener en cuenta esta variación del contenido superficial de agua del suelo.

En la Hunde se presentó una temporada lluviosa marcada con bajas condiciones de evaporación, lo que condujo a una mayor  $\Theta_{st}$  y el aumento de  $P_n$  por el tratamiento desplazándose hacia abajo como drenaje, ya que la capacidad de campo se superó en más días de lluvia.

**Tabla 4. Valores totales acumulados de las variables de la distribución de la lluvia neta, en magnitud (mm) y tasas (%), del periodo total de estudio, del año más húmedo y del año seco. Con la representación de los análisis estadísticos (ANCOVA) realizados para la comparación de la influencia del tratamiento de las variables mencionadas; donde: (\*, \*\*) significación en p-niveles  $\leq 0.05$  y  $0.001$  respectivamente.**

AÑO HIDROLÓGICO		CONTROL		TRATAMIENTO	
		Magnitud (mm)	tasa (%)	Magnitud (mm)	tasa (%)
2012-2013	$\Delta\Theta$	49**	9%	17**	3%
	D	264	49	307	57
	E	0.17	-	0.12	-
2013-2014	$\Delta\Theta$	85**	31%	10**	4%
	D	52**	19	156**	58
	E	0.22	-	0.18	-
2012-2016	$\Delta\Theta$	332**	22%	192**	13%
	D	528*	35%	736*	48%
	E	0.71	-	0.38	-

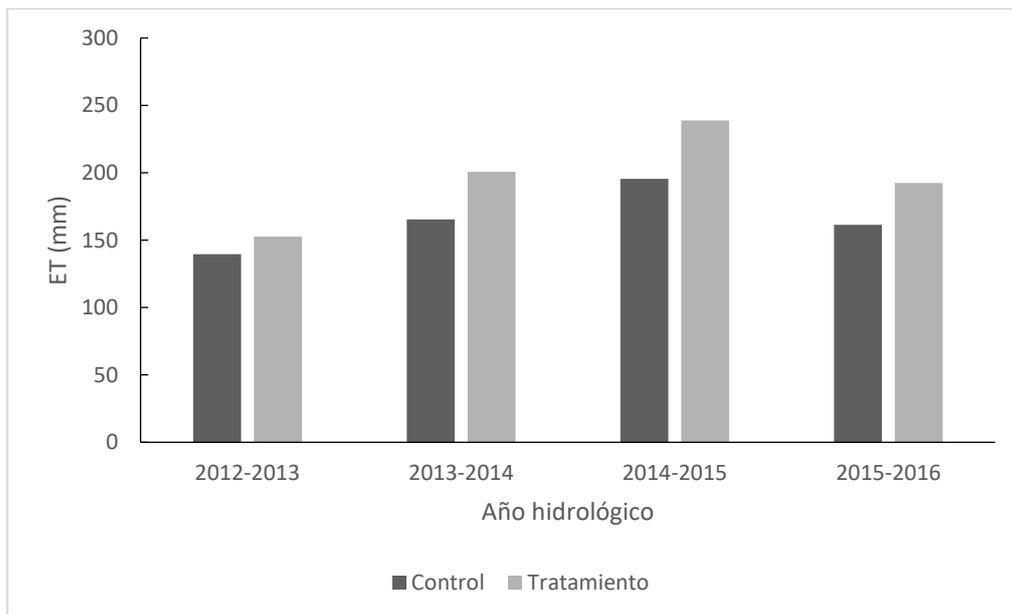
#### 4.5 Evapotranspiración: Evaporación del suelo, evaporación residual y transpiración.

En el estudio de la **evapotranspiración (ET)** se presentaron valores menores en la parcela de control (C) con respecto a la parcela de tratamiento (T) durante todo el período de estudio, tal y como se puede observar en la Figura 28. Por otro lado, del total lluvia bruta acumulada para el mismo período de estudio, se evapotranspiró en las parcelas C y T un total acumulado de 662 mm y 784 mm respectivamente.

Del mismo modo, para el año hidrológico más húmedo (2012-2013), se obtuvo un total acumulado de 140 mm y 153 mm de ET para las parcelas C y T respectivamente, donde T presenta un 9% más de ET con respecto a C; mientras que para el año más seco (2013-2014), se registraron valores totales de 165 mm y 201 mm para C y T respectivamente, donde T presentó un 21% más de ET con respecto a C, ver Tabla 5.

Se puede observar que T muestra un aumento en las tasas de  $P_g$  evapotranspirada desde un 29% (2013) hasta un 65% (2016), de igual modo, para la misma tasa se presenta en C un aumento desde un 26% hasta un 54%.

Finalmente, se utilizó una serie diaria de ET para realizar el análisis estadístico, donde el ANCOVA (covariable  $R_{s,a}$ ) mostró una diferencia altamente significativa entre ambos tratamientos durante todo el período de estudio. Del mismo modo se presentaron diferencias altamente significativas para el año húmedo y seco.



**Figura 28-** Valores anuales de la evapotranspiración en las parcelas de control y tratamiento.

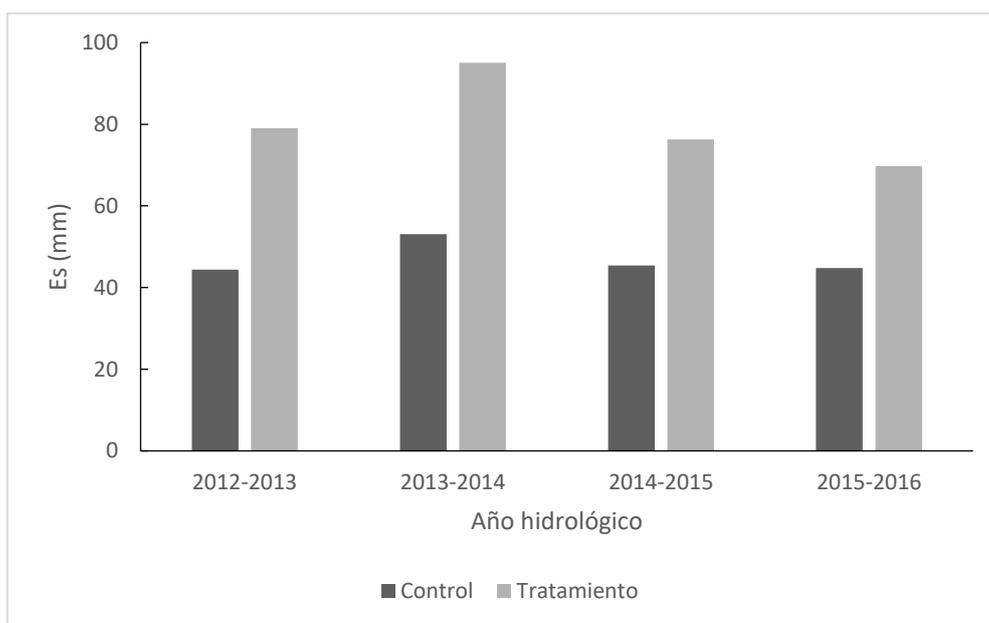
En el estudio de la **evaporación del suelo ( $E_s$ )** se presentaron valores menores en la parcela de control con respecto a la parcela de tratamiento durante todo el período de estudio, tal y como se puede ver en la Figura 29. Por otro lado, del total de lluvia bruta acumulada para el mismo período de estudio, se evaporó de la superficie de suelo de las parcelas C y T un total acumulado de 188 mm y 320 mm respectivamente.

Del mismo modo, para el año hidrológico más húmedo (2012-2013), se obtuvo un total acumulado de 44 mm y 79 mm de ET para las parcelas C y T respectivamente, donde T presenta un 78% más de  $E_s$  con respecto a C; mientras que para el año más seco (2013-

2014), se registraron valores totales de 165 mm y 201 mm para C y T respectivamente, donde T presentó un 79% más de Es con respecto a C (Ver, Tabla 5).

Se puede observar que T muestra un aumento en las tasas de Pg evaporada desde un 29% (2013) hasta un 65% (2016), de igual modo, para la misma tasa se presenta en C un aumento desde un 26% hasta un 54%.

Finalmente, se utilizó una serie diaria de Es para realizar el análisis estadístico, donde el ANCOVA (covariable  $R_{s,a}$ ) mostró una diferencia altamente significativa entre ambos tratamientos durante todo el período de estudio. Del mismo modo se presentaron diferencias altamente significativas para el año húmedo y seco).



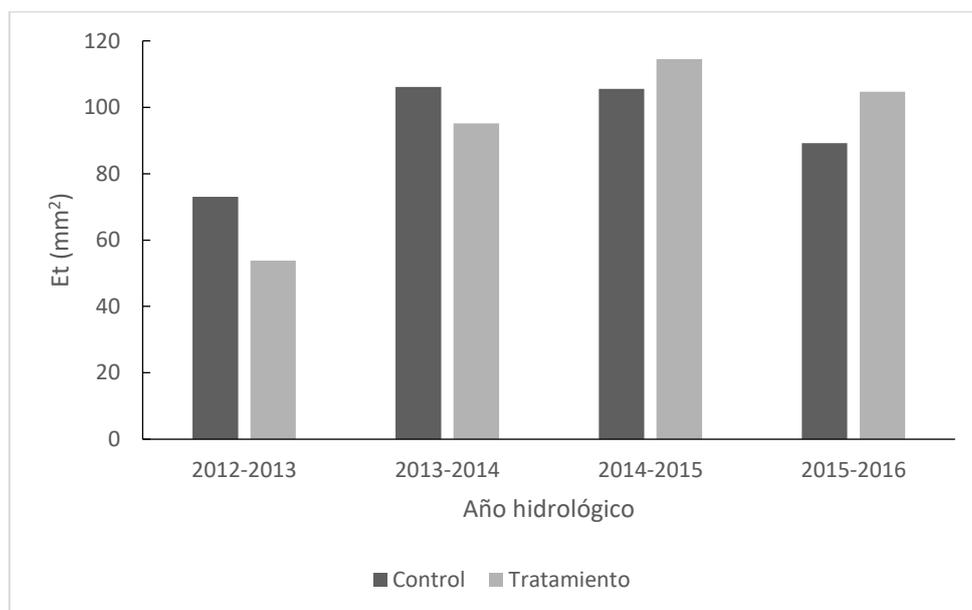
**Figura 29- Valores anuales de la evaporación del suelo en las parcelas de control y tratamiento.**

En el estudio de la **transpiración (Et)** se presentaron valores mayores en la parcela de control (C) con respecto a la parcela de tratamiento (T) durante los dos primeros años, y tras ello, los mayores valores se presentaron en T hasta el final del periodo de estudio, tal y como se puede ver en la Figura 30. Por otro lado, del total de lluvia bruta acumulada para el mismo período de estudio, la vegetación en C y T transpiró un total acumulado de 374 mm y 368 mm respectivamente.

Del mismo modo, para el año hidrológico más húmedo (2012-2013), se obtuvo un total acumulado de 73 mm y 54 mm de ET para las parcelas C y T respectivamente, donde C presenta un 26% más de Et con respecto a C; mientras que para el año más seco (2013-2014), se registraron valores totales de 106 mm y 95 mm para C y T respectivamente, donde C presentó un 10% más de Es con respecto a T.

Se puede observar que T muestra un aumento en las tasas de Pg transpirada desde un 10% (2013) hasta un 35% (2016), de igual modo, para la misma tasa se presenta en C un aumento desde un 14% hasta un 30% (Ver, Tabla 5).

Finalmente, se utilizó una serie diaria de Et para realizar el análisis estadístico, donde el ANCOVA (covariable  $R_{s,a}$ ) no mostró una diferencia significativa entre ambos tratamientos durante todo el período de estudio. Sin embargo, tanto para el año húmedo y el seco se reflejaron diferencias altamente significativas.



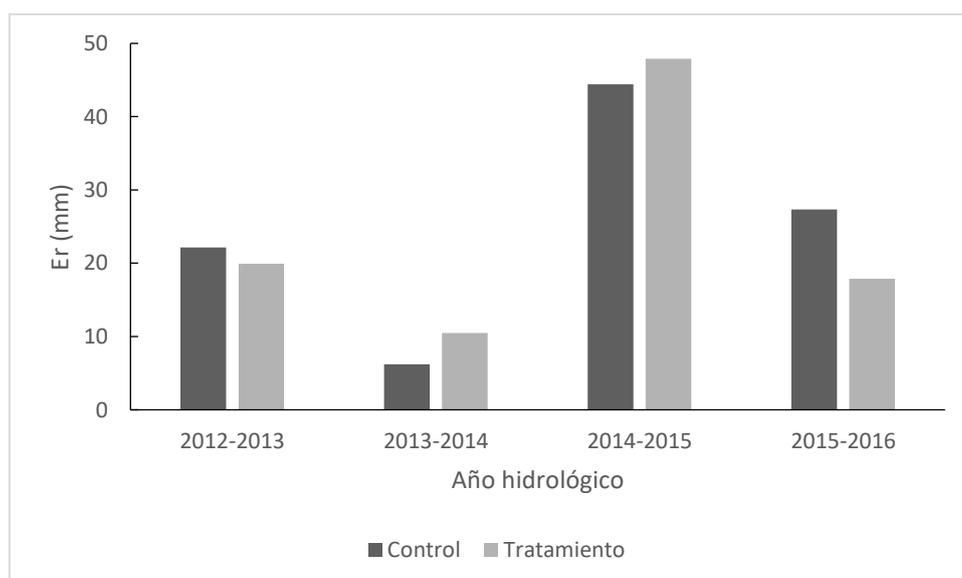
**Figura 30- Valores anuales de la transpiración en las parcelas de control y tratamiento.**

En el estudio de la **evaporación residual (Er)** se presentaron valores similares en ambas parcelas durante todo el período de estudio, tal y como se puede ver en la Figura 31. Por otro lado, de un total de 662 mm y 784 mm de ET acumulada para las parcelas C y T respectivamente, analizadas para el mismo período de estudio, se obtuvo un total acumulado de 100 mm y 96 mm de Er para las parcelas C y T respectivamente.

Del mismo modo, para el año hidrológico más húmedo (2012-2013), se obtuvo un total acumulado de 22 mm y 20 mm de Er para las parcelas C y T respectivamente, mientras que para el año más seco (2013-2014), se registraron valores totales de 6 mm y 10 mm para C y T respectivamente.

Sin embargo, se puede observar que los efectos a partir del tratamiento no afectaron a la variable Er, donde T muestra un aumento en las tasas de Pg evaporada desde un 4% (2013) hasta un 6% (2016), de igual modo, para la misma tasa se presenta en C un aumento desde un 4% hasta un 7%; estos valores son tan bajos que se prestan a errores (Ver, Tabla 5).

Finalmente, se utilizó una serie diaria de Er para realizar el análisis estadístico, donde el ANCOVA (covariable  $R_{s,a}$ ) no mostró una diferencia significativa entre ambos tratamientos durante todo el período de estudio, ni durante el periodo húmedo y seco.



**Figura 31- Valores anuales de la evaporación residual las parcelas de control y tratamiento.**

En las parcelas de estudio, el comportamiento de la evapotranspiración de las encinas se debió a la confluencia de dos aspectos. Primero al despejar la masa forestal de la parcela T, la incidencia de la radiación solar sobre el suelo fue mayor y en consecuencia se vio incrementada la evaporación del suelo y segundo que la encina al ser una especie freatófito facultativo, lo que significa que, en periodos de baja disponibilidad de agua, es capaz de captar agua a una gran profundidad debido a que poseen un sistema radicular muy pivotante; lo que ha ocasionado que las encinas realicen un consumo de agua excesivo durante el verano y esto se ve reflejado con el aumento de la transpiración en la parcela T a partir del segundo año. La transpiración se la considera como una pérdida de agua productiva, ya que está asociada al crecimiento de la planta.

**Tabla 5. Valores totales acumulados de las variables de la distribución de la lluvia neta, en magnitud (mm) y tasas (%), del periodo total de estudio, del año más húmedo y del año seco. Con la representación de los análisis estadísticos (ANCOVA) realizados para la comparación de la influencia del tratamiento de las variables mencionadas; donde \*, \*\* significación en p-niveles  $\leq 0.05$  y  $0.001$  respectivamente.**

AÑO HIDROLÓGICO		CONTROL		TRATAMIENTO	
		Magnitud (mm)	tasa (%)	Magnitud (mm)	tasa (%)
2012-2013	ET	140**	26%	153**	29%
	ES	44**	8%	79**	15%
	Er	22	4%	20	4%
	Et	73**	14%	54**	10%
2013-2014	ET	165**	61%	201**	74%
	ES	53**	20%	95**	35%
	Er	6	2%	10	4%
	Et	106**	39%	95**	35%
2012-2016	ET	662**	43%	784**	51%
	ES	188**	12%	320**	21%
	Er	100	7%	96	6%
	Et	374	24%	368	24%

#### 4.6 Balance del ciclo hidrológico anual de la lluvia bruta.

Para la evaluación de los recursos hídricos en nuestras parcelas de investigación, se requiere de un balance hidrológico correctamente estimado o de la repartición de la precipitación entre los procesos de drenaje, recarga de acuíferos, escorrentía y evapotranspiración (Llorens, 2003).

La ecuación del balance del ciclo hidrológico es una expresión de primer orden muy sencilla, aunque la cuantificación de algunos de sus términos presenta dificultades, debido a la falta de mediciones directas y por la variación espacial de la evapotranspiración, de las

percolaciones profundas (recarga de acuíferos) y de las variaciones del agua almacenada en la parcela (Llorens, 2003).

En general podemos afirmar que la precipitación bruta que cae sobre las parcelas deberá ser igual a la suma de la interceptación y la lluvia neta; donde la lluvia neta es la suma entre la trascolación y escorrentía cortical. Parte de esta agua regresa a la atmosfera mediante la evaporación del suelo y la transpiración de la vegetación. Sin embargo, existe un determinado porcentaje de agua drenada que se encuentra fuera del alcance de las plantas, a esta variable la denominaremos recarga de acuíferos ( $R_A$ ).

En los balances anuales, el termino RA representó un 30% y 34% de la lluvia bruta acumulada en los 4 años de estudio para las parcelas C y T respectivamente. Se puede observar en la Tabla 6 que para el periodo húmedo (2012-2013) las diferencias de intensidades de  $R_A$  entre ambas parcelas son de 85 mm, mientras que durante los años siguientes esta diferencia no sobrepaso los 12 mm.

En el balance hidrológico para las parcelas C y T, todas las variables son valores acumulados anuales y están expresadas en mm. Quedando expresada de la siguiente manera:

$$Pg = It + Ro + ET + R_A$$

Donde:

Pg = Precipitación bruta, mm.

It= Interceptación, mm.

Ro= Escorrentía, mm.

ET = Evapotranspiración, mm.

$R_A$  = Recarga del acuífero, mm.

**Tabla 6. Valores de RA por año hidrológico y porcentajes de lluvia bruta de RA.**

AÑO HIDROLÓGICO	CONTROL		TRATAMIENTO	
	Magnitud (mm)	tasa (%)	Magnitud (mm)	tasa (%)
2012-2013	236	44%	321	60%
2013-2014	38	14%	27	10%
2014-2015	126	30%	122	29%
2015-2016	65	22%	53	18%
2012-2016	464	30%	523	34%

## 5. CONCLUSIONES.

### 5.1 Conclusiones del trabajo.

El aunar de estos estudios puede contribuir a la implementación de la silvicultura orientada a la eco-hidrología en regiones semiáridas al exponer los problemas relacionados con la magnitud, la eficiencia y la duración de los efectos de los tratamientos en estos bosques forestales de baja biomasa sobre la precipitación bruta. Los datos presentados aquí demuestran que estas parcelas de encina están experimentando un claro declive que ha sido contrarrestado por la efectividad del manejo forestal, con un profundo efecto en los flujos de agua en las escalas de parcela.

De los componentes analizados podemos observar que la interceptación se vio reducida notablemente en el tratamiento, lo que permitió que la trascolación en T estuviera por encima del 80% de la lluvia bruta durante todo el periodo de estudio y a su vez se consiguió disminuir la evaporación física, la cual no es biológicamente productiva. Por otro lado, que los componentes que no se vieron afectados por el tratamiento fueron la escorrentía cortical y la escorrentía superficial y subsuperficial.

Los componentes de la evapotranspiración en períodos de sequía, así como la redistribución del agua infiltrada, deben abordarse más a fondo para tener una visión completa de la eficiencia de los tratamientos en términos de equilibrio entre el agua azul y verde.

Mediante el análisis del balance hidrológico, se pudo observar que únicamente para el año más húmedo se consiguió una recarga importante de los acuíferos por acción del tratamiento, lo que indica que no se pudo generar mucha más agua para la recarga de los acuíferos a mediano plazo.

Por otro lado, la transpiración fue el componente más afectado por el tratamiento, teniendo en cuenta que la transpiración es una evaporación biológicamente productiva se puede concluir que el tratamiento ha sido acertado desde el punto de vista de que la encina está más vigorosa y por lo tanto es más resiliente a sequías, cambios climáticos y se ha observado una mejora en el crecimiento de la encina.

## **5.2 Líneas de investigación futura.**

- Validación del agua de recarga de acuífero mediante el uso de piezómetros.
- Realizar un estudio del papel del matorral, para determinar su papel en el ET.
- Agregar años adicionales de monitoreo para conocer mejor la dinámica temporal de los efectos de las variables eco-hidrológicas a mediano y largo plazo.
- Realizar un seguimiento del crecimiento de los árboles y la constancia estomática.
- Realizar una caracterización de la evaporación del suelo mediante una medición experimental.

## 6. REFERENCIAS

- Sociedad Española de Ciencias Forestales. (2019). *Diccionario Forestal Español*. Obtenido de Glosario Técnico Forestal: [http://secforestales.org/diccionario\\_forestal\\_secf\\_publico](http://secforestales.org/diccionario_forestal_secf_publico)
- Acharya, K. P., Dangi, R. B., & Acharya, M. (febrero de 2011). Análisis de la degradación del bosque en Nepal. *Unasyva*, 62(238), 31-38.
- Allen, C. D., Macalady, A. K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Vennetier, M., . . . Cobb, N. (2010). A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *For. Ecol. Manag.*, 259(660), 684.
- Anadranistakis, M., Liakatas, A., Kerkides, P., Rizos, S., Gavanosis, J., & A., P. (2000). Crop water requirements model tested for crops grown in Greece. *Agric. Water Manag*, 45, 297-316.
- Aylward, B. (2005). Land use, hydrological function and economic valuation. En M. Bonell, & L. A. Brujinzeel, (Edits.), *Forests, Water and People in the Humid Tropics: Past, Present and Future Hydrological Research for Integrated Land and Water Management* (págs. 99-120). Cambridge, Reino Unido.: Cambridge University Press.
- Bargués Tobella, A. (2016). *The importance of tree cover for water resources in semiarid West Africa*. Tesis Doctoral., Swedish University of Agricultural, Umeå, Suecia.
- Bellot, J., & Escarré, A. (1998). Flujo de tallos y determinación de la caída en el bosque de encinares del Mediterráneo resucitado. *Ana. Por. Sci.*, 55(7), 847-865.
- Blanco, E., Casado, M., Costa, M., Escribano, R., García, M., Génova, M., . . . Sainz, H. (2001). *Los bosques ibéricos: Una interpretación geobotánica* (2da ed.). Barcelona, España: Planeta S.A.
- Blanco, J. A. (2017). Bosques, suelo y agua: explorando sus interacciones. *Ecosistemas*, 26(2), 1-9.
- Brujinzeel, L. A. (1990). *Hydrology of moist tropical forests and effects of conversion: a state of knowledge review*. UNESCO. París, Francia: Programa Hidrológico Internacional.
- Burgess, S., Adams, M. A., Turner, N. C., Beverly, C. R., Ong, C. K., Khan, A., & Bleby, T. (2001). An improved heat pulse method to measure low and reverse rates of sap flow in woody plants. *Tree Physiol*, 21, 589-598.
- Calvo-Cases, A., Boix-Fayos, C., & Imeson, A. (2003). Runoff generation, sediment movement and soil water behaviour on calcareous (limestone) slopes of some Mediterranean environments in southeast Spain. *Geomorphology*, 50, 269-291.
- Campbell Sci. (2019). *CAMPBELL SCIENTIFIC SPAIN*. Obtenido de <https://www.campbellsci.es/cr1000>

- Committee on Hydrologic Impacts of Forest Manageme. (2008). *Hydrologic effects of a changing forest landscape*. Washington, Estados Unidos.: National Research.
- CR Lloyd, A., & De Marques, O. (1988). Variabilidad espacial de las mediciones de caudales y de flujo del tallo en la selva amazónica. *Agric Bosque Meteo*, 42(1), 63-73.
- CREAF. (15 de mayo de 2017). *Centro de Investigación Ecológica y Aplicaciones Forestales*. (C. Verónica, Editor) Obtenido de La falta de gestión de los bosques mediterráneos está acelerando la sustitución de pinos por encinas: <https://www.efeverde.com/noticias/las-encinas-estan-sustituyendo-los-pinos-espana-cambio-climatico/>
- Davis instrument Corp. (2019). *Estaciones Davis*. Obtenido de <https://www.estacionesdavis.es/>
- Decagon. (2019). *AlphaOmega electronics*. Obtenido de <https://www.alphaomega-electronics.com/es/>
- del Campo, A. D., González-Sanchis, M., García-Prats, A., Ceacero, C. J., & Lull, C. (2019 a). The impact of adaptive forest management on water fluxes and growth dynamics in a water-limited low-biomass oak coppice. *Agricultural and Forest Meteorology*, 264, 266-282. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.10.016>
- del Campo, A. D., González-Sanchis, M., Lindón, A., Ceacero, C. J., & García-Prats, A. (2018 ). Rainfall partitioning after thinning in two low-biomass semiarid forests: impact of meteorological variables and forest structure on the effectiveness of water-oriented treatments. *Journal of Hydrology*, 565, 74-86. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.08.013>
- del Campo, A., Fernandes, T., & Molina, A. (2014). Hydrology-oriented (adaptive) silviculture in a semiarid pine plantation: How much can be modified the water cycle through forest management? *European Journal of Forest Research*, 133, 879-894.
- del Campo, A., Gonzales-Sanchis, M., Molina, A., Garcia-Prats, A., Ceacero, C., & Bautista, I. (2019 b). Effectiveness of water-oriented thinning in two semiarid forests: the redistribution of increased net rainfall into soil water, drainage and runoff. *FORECO*.
- di Prima, S., Bagarello, V., Angulo-Jaramillo, R., Bautista, I., Cerdà, A., del Campo, A., . . . Maetzke, F. (2017). Impactos del adelgazamiento de un Bosque mediterráneo de robles en las propiedades del suelo que influyen en la infiltración del agua. *J. hydrol. Hidromecánica*, 65(3), 276-286.
- Fernandes, T. J., Del Campo, A. D., Herrera, R., & Molina, A. J. (2016). Simultaneous assessment, through sap flow and stable isotopes, of water use efficiency (WUE) in thinned pines shows improvement in growth, tree-climate sensitivity and WUE, but not in WUEi. *Forest Ecology and Management*, 61, 298-308.
- Fernández, J. (2010). El recurso suelo-agua en medios áridos y semiáridos. En F. R. Areces, J. Gonzalez, & S. Chueca (Edits.), *C4 y CAM. Características generales y uso en*

- programas de desarrollo de tierras áridas y semiáridas. Homenaje del doctor Julio López Gorgé* (págs. 143-149). Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- Fuchs, M., & Hadas, A. (2011). Mulch resistance to water vapor transport. *Agric. Water Manag*, 98(6), 990-998.
- Gallart, F., & Llorens, P. (2004). Catchment management under Environmental change: Impact of and cover change on water resources. *Water International*, 28(3), 334-340.
- García de la Serrana, R., Vilagrosa, A., & Alloza, J. A. (2015). Pine mortality in southeast Spain after an extreme dry and warm year: Interactions among drought stress, carbohydrates and bark beetle attack. *Trees*. doi:10.1007/s00468-015-1261-9
- García-Prats, A., del Campo, A., & Molina, A. J. (2015). Development of a Keetch and Byram-based drought index sensitive to forest management in Mediterranean conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 205, 40-50.
- García-Prats, A., del Campo, A., & Pulido-Velazquez, M. (2016). A hydroeconomic modeling framework for optimal integrated management of forest and water. 52, 8277-8294. doi:10.1002/ 2015WR018273.
- García-Ruiz, J. M., López-Moreno,, J. L., Vicente-Serrano, S. M., Lasanta-Martínez, T., & Beguería, S. (2011). Mediterranean water resources in a global change scenario. *Earth-Science Reviews*, 105(3), 121-139.
- Giorgi, F., & Lionello, P. (2008). Climate change projections for the Mediterranean region. *Global and Planetary Change*, 63(2), 90-104.
- Goncalves, H. C., Mercante, M. A., & Santos, E. T. (2011). Hydrological cycle Ciclo hidrológico. *Brazilian Journal of Biology*, 71(1), 241-253.
- González-Sanchis, M., del Campo, A., Lidón, A., Lull, C., Bautista, I., García-Prats, A., & Francés, A. (2015). Incorporación de criterios eco-hidrológicos en la gestión forestal: Adaptación a la escasez de agua de una masa marginal de encina. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 41, 211-218.
- Gouder de Beauregard, A. C., Torres, G., & Malaisse, F. (2002). Ecohydrology: a new paradigm for bioengineers? *Biotechnol Agron Soc Environ*, 17-27.
- Granier, A. (1987). Sap flow measurements in Douglas fir tree trunks by means of a new thermal method. *Ann. For. Sci.*, 44(1), 1-14.
- Grant, G. E., Tague, C. L., & Allen, C. D. (2013). Watering the forest for the trees: an emerging priority for managing water in forest landscapes. *Front. Ecol. Environ*, 11(6), 314-321. Obtenido de <https://doi.org/10.1890/120209>
- Heras, R. (1972). *Manual de hidrología. 2, El ciclo hidrológico*. Madrid: Centro de estudios hidrográficos.

- Herwitz, S. R. (1986). Infiltration-excess caused by stemflow in a cyclone-prone tropical rainforest. *Earth Surf. Process. Landf.*, 11, 401-412.
- HiWET, P. (2014). *High-resolution modelling and monitoring of water and energy transfers in wetland ecosystems*. Obtenido de <http://www.hydr.vub.ac.be/projecthiwet/>
- Ilstedt, U., Bargués Tobella, A., Bazié, H. R., Bayala, J., Verbeeten, E., Nyberg, G., . . . Malmer, A. (2016). Intermediate tree cover can maximize groundwater recharge in the seasonally dry tropics. *Sci. Rep.*, 6(21930), 1-12. Obtenido de <https://doi.org/10.1038/srep21930>
- Instituto Geográfico Nacional. (2018). *Sistema de informacion geográfica nacional*. Obtenido de SignA: <http://signa.ign.es/signa/Pege.aspx?>
- Jackson, R. B., Jobbagy, E. G., Avissar, R., Roy, S. B., Barrett, D. J., Cook, C. W., . . . Murray, B. C. (2005). Trading Water for Carbon with Biological Carbon Sequestration. *Science*, 310(5756), 1944-1947.
- Klein, T., Shpringer, I., Fikler, B., Elbaz, G., Cohen, S., & Yakir, Y. (2013). Relationships between stomatal regulation, water-use, and water-use efficiency of two coexisting key Mediterranean tree species. *For. Ecol. Manag.*, 302, 34-42.
- Leblanc, S. G., & Chen, J. M. (2001). A practical scheme for correcting multiple scattering effects on optical LAI measurements. *Agric. Forest Meteorol.*, 110(125), 139.
- Levia, D., & Germer, S. (2015). Una revisión de la dinámica de generación del flujo del tallo y las interacciones entre el flujo del tallo y el medio ambiente en bosques y matorrales. *Rev. Geophys.*, 53, 673-714.
- Lhomme, J., Montes, C., Jacon, F., & Prévot, L. (2012). Evaporation from heterogeneous and sparse canopies: on the formulations related to multi-source representations. *Boundary Layer Meteorol.*, 144, 243-262.
- Limousin, J., Rambal, S., Ourcival, J., & Joffre, R. (2008). Modelando la intercepción de lluvias en un ecosistema mediterráneo de *Quercus ilex*: Lección de un experimento de exclusión de caídas. *J. hydrol.*, 357, 57-66.
- Lin, H., & Zhou, X. (2008). Evidence of subsurface preferential flow using hydrologic monitoring in the ShaleHills catchment. *Eur. J. soil Sci.*, 59, 34-49.
- Linder, M., Fitzgerald, J., Zimmermann, N. E., Reyer, C., Delzon, S., van der Maaten, E., . . . Hanewinkel, M. (2014). Climate change and European forests: What do we know, what are the uncertainties, and what are the implications for forest management? *Journal of Environmental Management*, 146, 69-83.
- Llorens, P. (2003). La evaluación y modelización del balance hidrológico a escala de cuenca. *ecosistemas*.

- Llorens, P., & Domingo, F. (2007). Partición pluvial por vegetación en condiciones mediterráneas. Una revisión de los estudios en Europa. *J. hydrol.*, *335*, 37-54.
- Llorens, P., Poch, R., Latron, J., & Gallart, F. (1997). Intercepción de precipitaciones por un parche de bosque de *Pinus sylvestris* cubierto en un área montañosa mediterránea abandonada I. Monitoreo del diseño y resultados hasta la escala del evento. *J. hydrol*, *199*, 331-345.
- Lopez Árias, M. (2002). Sobre interceptación, trascolación y escurrimiento cortical en el ciclo hidrológico. *Cuad. Soco Esp. Cien. For*, *13*, 55-66.
- López, B. C., Sabaté, S., & Garcia, C. A. (2003). Thinning effects on carbon allocation to fine roots in a *Quercus ilex* forest. *Tree Physiol*, *23*, 1217-1224.
- Louman, B., Quiroz, D., & Nilsson, M. (2001). *Silvicultura de bosques latifoliados húmedos con énfasis en América Central*. Turrialba, Costa Rica: CATIE.
- Martínez-Vilalta, J., Mangirón, M., Ogaya, R., Sauret, M., Serrano, L., Peñuelas, J., & Piñol, J. (2003). Sap flow of three co-occurring Mediterranean woody species under varying atmospheric and soil water conditions. *Tree Physiol*, *23*, 747-758.
- Metering, D. (2019). *iagua*. Obtenido de <https://www.iagua.es/diehl-metering?>
- Ministerio del Medio Ambiente. (2000). *Libro blanco del agua en España*.
- MMARM. (2006). los incendios forestales en España. *Decenio*, 1996-2005. Obtenido de [http://www.mma.es/secciones/biodiversidad/defensa\\_incendios/estadisticas\\_incendios/pdf/estadisticas\\_decenio\\_1\\_1996-2005.pdf](http://www.mma.es/secciones/biodiversidad/defensa_incendios/estadisticas_incendios/pdf/estadisticas_decenio_1_1996-2005.pdf)
- Molina, A., & del Campo, A. (2011). índice de área foliar de estimación en una plantación de pinos con LAI-2000 bajo condiciones de luz solar directa: relación con variables de inventario e hidrológicos. *Por. Syst.*, *20*(1), 108-121.
- Molina, A., Latron, J., Gallart, C., & llorens, P. (2014). Spatio-temporal variability of soil water content on the local scale in a Mediterranean mountain area (Vallcebre, North Eastern Spain). How different spatio-temporal scales reflect mean soil water content. *J. Hydrol*, *516*, 182-192.
- Monteith, J. L., & Unsworth, M. (1990). *Principles of Environmental Physics* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann, Burlington-MA .
- Pan, Y., Birdsey, R., Phillips, O., & RB., J. (2013). La estructura, distribución y biomasa de los bosques del mundo. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst*, *44*, 593-622.
- Pronamic. (2019). *Pronamic*. Obtenido de <http://pronamic.com/>
- Rodrigo, A., & Avila, A. (2001). Influencia del tamaño de la muestra en la estimación de la caída media en dos bosques mediterráneos de encinas. *J. hydrol*, *243*, 216-227.

- Ruiz de la Torre, J. (2006). *Flora mayor*. Madrid: Organismo autónomo de parques nacionales.
- Sandström, K. (1998). Can forests “provide” water: widespread myth or scientific. *Ambio*, 27(2), 132-138.
- Shaxson, F., & Barber, R. (2005). Optimización de la humedad del suelo para la producción vegetal El significado de la porosidad del suelo. En F. Shaxson, & R. Barber, *Capítulo 2. Hidrología, arquitectura del suelo y movimiento del agua*. Roma, Italia: Organización de las Naciones unidas para la agricultura y alimentación. Obtenido de Optimización de la humedad del suelo para la producción vegetal El significado de la porosidad del suelo.
- Shuttleworth, W., & Wallace, J. (1985). Evaporation from sparse crops-an energy combination theory. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 111, 839-855.
- Spracklen, D. V., Arnold, S. R., & Taylor, C. M. (2012). Observations of increased tropical rainfall preceded by air passage over forests. *Nature*, 489, 282-285.
- Tsiko, C., Makurina, H., Gerrit, A., & Savenije, H. (2012). Measuring forest floor and canopy interception in a savannah ecosystem *Physics and Chemistry of the Earth*. 122-127.
- Ungar, E. D., Rotenberg, E., Raz-Yaseef, N., Cohen, S., Yakir, D., & Schiller, G. (2013). Transpiration and annual water balance of Aleppo pine in a semiarid region: Implications for forest management. *Forest Ecology and Management*, 298, 39-51.
- UPV. (2018). *Hydrosil-Silwamed hydrological characterisation of forest structures at plot scale for an adaptative management*. Obtenido de <http://hydrosil.webs.upv.es/>
- Villagra, P., Meglioli, P., Pugnaire, I., Vidal, B., Aranibar, J., & Jobbágy, E. (2013). *Servicios ecosistémicos hídricos: estudios de caso en América Latina y el Carib.* (A. Lara, P. Laterra, R. Manson , & G. Barrantes, Edits.) Valdivia, Chile: Red ProAgua CYTED.
- Zabret, K., Rakovec, J., & Šraj, M. (2018). Influencia de las variables meteorológicas en la partición de la lluvia para las especies de árboles de hoja caduca y coníferas en áreas urbanas. *J. hydrol.*, 558, 29-41.
- Zalewski, M., Janauer, G. A., & Jolankai, G. (1997). Ecohydrology a new paradigm for the sustainable use of aquatic resources.
- Zhang, B., Kang, S., Li, F., & Zhang, L. (2008). Comparison of three evapotranspiration models to Bowen ratio-energy balance method for a vineyard in an arid desert region of northwest China. *Agric. For. Meteorol.*, 148, 1629-1640.