



2022
Lleida

27·1
junio · juny
julio · juliol

Cataluña
Catalunya

8º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

La **Ciencia forestal** y su contribución a los **Objetivos de Desarrollo Sostenible**

8CFE

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales
Cataluña | Catalunya · 27 junio | juny - 1 julio | juliol 2022
ISBN 978-84-941695-6-4
© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Organiza



Un modelo semi-mecanicista para predecir las variaciones diarias en el contenido de humedad del combustible vivo a nivel de especie.

BALAGUER-ROMANO, R.^{1*}, DÍAZ-SIERRA, R.¹, DE CÁCERES, M.², VOLTAS, J.^{3,4}, RESCO DE DIOS, V.^{3,4}.

¹ Departamento de Física Matemática y de Fluidos, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED), 28040 Madrid, España.

² CREAM, E08193 Bellaterra (Cerdanyola del Valles), Catalonia, España.

³ Joint Research Unit CTFC – AGROTECNIO – CERCA, Av. Alcalde Rovira Roure 191, 25198 Lleida, España.

⁴ Department of Crop and Forest Sciences, Universitat de Lleida, 25198 Lleida, España.

Resumen

La propagación de los incendios está determinada por la humedad de los combustibles vivos (HCV) en muchos ecosistemas. Los métodos actuales para estimar HCV, como la teledetección o los índices de sequía, no permiten predecir la variación de la humedad a nivel específico y presentan una capacidad limitada para pronosticar la ignatibilidad bajo condiciones futuras. En este estudio proponemos un modelo para predecir la HCV basado en simulaciones del balance hídrico (MEDFATE). El modelo ha sido calibrado y validado con valores de HCV medidos en campo por un estudio independiente del que se han analizado 2512 datos de 37 especies en 40 lugares de España. Las predicciones obtenidas con el método desarrollado se ajustan mejor a los datos observados ($R^2 = 0,5$) que las predicciones obtenidas mediante teledetección ($R^2 = 0,3$) o mediante índices de sequía ($R^2 = 0,3$). Nuestro método permite predecir valores de HCV a nivel de especie y estimar su evolución futura bajo diferentes escenarios climáticos y de gestión, constituyendo un punto de partida para un sistema nacional de predicción de HCV.

Palabras clave

Incendios, sequia, modelización.

1. Introducción

En los ecosistemas forestales donde la biomasa vegetal es lo suficientemente abundante como para sostener un incendio, la actividad del fuego está limitada, principalmente, por el contenido de humedad (BOER et al., 2021). Considerando el aumento de la frecuencia y duración de los periodos de sequía que se está produciendo a consecuencia del cambio climático (IPCC, 2014), se prevén temporadas de incendios más largas e intensas a medida que la vegetación registre niveles críticos de humedad durante períodos más prolongados (MA et al., 2021; RESCO DE DIOS et al., 2021). Por lo tanto, un aspecto clave para la prevención y gestión de los incendios forestales es determinar la variación estacional en el contenido de humedad de los combustibles vivos (HCV).

Algunos servicios forestales monitorean rutinariamente la HCV de forma directa, a través de inventarios de campo, o de forma indirecta, mediante teledetección o mediante los índices de sequía. La teledetección, que incluye índices de vegetación espectral y modelos de transferencia de radiación, permite monitorear la HCV a gran escala con resoluciones espaciales y temporales precisas (YEBRA et al., 2013). Los índices de sequía, como el Drought Code (DC) del Canadian Forest Fire Weather Index (VAN WAGNER, 1974), se basan en datos diarios de temperatura y precipitación y están diseñados para representar conceptualmente la dinámica del agua en los reservorios del suelo. La principal limitación que presentan ambos enfoques es la imposibilidad de obtener predicciones de forma directa para las diferentes especies vegetales (RUFFAULT et al., 2018; SOLER MARTIN et al., 2017). Asimismo, se trata de enfoques empíricos, lo que limita su capacidad de predicción a futuro.

EL patrón estacional de la HCV varía de forma diferenciada en las distintas especies que conforman los ecosistemas mediterráneos (RESCO DE DIOS, 2020). Esta variación interespecífica surge de diferencias fisiológicas y anatómicas relacionadas con caracteres como el control estomático, el grado de esclerofilia o la profundidad de las raíces (SANCHEZ-MARTINEZ et al., 2020). A menudo se ha observado cómo la variación estacional de la HCV es mayor en los arbustos germinadores, intermedia en los arbustos rebrotadores y menor en los árboles (NOLAN et al., 2018; PELLIZZARO et al., 2007; VIEGAS et al., 2001). Los arbustos germinadores, presentan sistemas radiculares más someros (NOLAN et al., 2018), alta resistencia del xilema al embolismo (PAUSAS et al., 2016) y menor control estomático (RESCO DE DIOS, 2020), lo que, en conjunto, hace que estas especies registren los valores más bajos de humedad durante los períodos de sequía y la mayor variación estacional. Los arbustos rebrotadores tienen raíces más profundas y menor resistencia a la cavitación que los semilleros, por lo que suelen presentar una variación de humedad intermedia (RESCO DE DIOS, 2020). Finalmente, las especies arbóreas, al tener los sistemas radiculares más profundos y un fuerte control estomático presentan una HCV prácticamente constante incluso durante los periodos de sequía más pronunciada (NOLAN et al., 2018; VIEGAS et al., 2001).

NOLAN et al. (2018), demostraron que la variación de HCV puede inferirse a partir del potencial hídrico de las hojas al amanecer (Ψ_{pd}). El potencial hídrico de las hojas representa una combinación de la demanda hídrica foliar, el agua disponible en suelo, la conductividad hidráulica y la regulación estomática. Ψ_{pd} se equilibra durante la noche con el potencial de la rizosfera (RITCHIE & HINCKLEY, 1975), y se puede obtener a través de un modelo de balance hídrico que permite predecir los distintos potenciales en el suelo y en las plantas (NOLAN et al., 2018). MEDFATE es un modelo diseñado a tal efecto para su aplicación en masas forestales heterogéneas (DE CÁCERES et al., 2015, 2021). El modelo requiere de valores de las características del suelo, de inventario y de atributos fisiológicos de la vegetación, junto con datos meteorológicos diarios para simular los procesos hidrológicos entre el continuo suelo-planta-atmósfera (DE CÁCERES et al., 2015). Por lo que, simulando con MEDFATE los valores diarios de Ψ_{pd} y aplicando una regresión lineal como NOLAN et al. (2018), se pueden obtener predicciones de la humedad de los combustibles vivos para las distintas especies vegetales.

2. Objetivos

El objetivo de este estudio es desarrollar un modelo que permita predecir las variaciones diarias de la HCV a nivel de especie y escala de parcela para los bosques españoles. A tal efecto se acopla el modelo MEDFATE, que permite simular valores específicos de potencial hídrico al amanecer (DE CÁCERES et al., 2021), a la aproximación de NOLAN et al. (2018) para predecir HCV (NOLAN et al., 2018). Este estudio prioriza el desarrollo de un producto que pueda ser usado a nivel operativo frente al desarrollo de un modelo puramente mecanicista y fisiológico. Por ello, se realizarán una serie de asunciones simplificadoras sobre las diferencias fisiológicas de las distintas especies, de forma que se disminuyen los requerimientos durante las fases de calibración y computación, para así poder aumentar su aplicación en entornos operativos.

3. Metodología

3.1 Base de datos Globe-LFMC

Globe-LFMC es una base de datos que recoge medidas directas del contenido de humedad del combustible de 1383 lugares de muestreo en 11 países (YEBRA et al., 2019). Cada registro individual representa una medición in situ de HCV. Para este estudio se han seleccionado todos los sitios dentro de España en los que están identificadas las especies, lo que ha resultado en 40 localizaciones que contienen 2.511 registros de HCV. Los datos incluyen 37 especies de 21 géneros diferentes que cubren un período de muestreo de 21 años desde 1996 hasta 2017. Las localizaciones presentan una graduación climática muy marcada y cubren la mayoría de las

ecorregiones que hay en la España peninsular (Fig. 1). La temperatura media anual varía entre 10,9 y 17,8°C y la precipitación media anual entre 243 y 1345 mm (Fig. 1.b-c). Los tipos de vegetación varían desde los bosques esclerófilos y pinares mediterráneos hasta los bosques mixtos dominados por especies caducifolias de hoja ancha (Fig. 1.a).

3.2 MEDFATE

MEDFATE (versión 2.2.3) es un modelo de ecosistema forestal implementado en un paquete R que requiere datos de suelo, vegetación y meteorología como entradas para simular el balance hídrico en el continuo suelo-planta-atmósfera (DE CÁCERES et al., 2021). El modelo calcula el contenido de agua en el suelo en un momento determinado en base a la diferencia entre la precipitación y la interceptación de la vegetación, la evaporación y transpiración, la escorrentía superficial y el drenaje profundo (DE CÁCERES et al., 2021, 2015). En este estudio, el suelo se ha dividido en cuatro capas (0-10, 10-20, 20-60 y 60-100 cm de profundidad). Los valores de densidad aparente, porcentaje de arcilla, arena, materia orgánica y contenido de fragmentos de roca, se han obtenido de la base de datos SoilGrid250 (HENGL et al., 2017) para cada localización. Los datos de vegetación consisten en el nombre de las especies, la densidad de árboles, la cobertura de arbustos, la altura, el diámetro a la altura del pecho y la profundidad de las raíces. Todos los datos, excepto la profundidad de raíces, se han obtenido de la parcela más cercana a cada localización en el Tercer Inventario Forestal Nacional (ALBERDI et al., 2016). Con el fin de simplificar la parameterización del modelo se ha asumido que la profundidad del 50% (Z50) y el 95% (Z95) del total de las raíces se producía a profundidades de 10 y 20 cm para los arbustos germinadores, 20 y 75 cm para los arbustos rebrotadores y 20 y 100 cm para los árboles. Se han elegido estos valores al ser consistentes con las profundidades del suelo previamente definidas y con las observaciones de estudios anteriores de un aumento de la profundidad radicular de arbustos germinadores a arbustos rebrotadores y a árboles. MEDFATE también incluye un conjunto de características fisiológicas para cada especie (DE CÁCERES et al., 2021), que han permanecido con los valores predeterminados (versión 2.2.3), con la intención de reducir la parameterización. Los datos de temperatura, precipitación y velocidad del viento se obtuvieron para cada localización de la base de datos de ERA-5 Land (HERSBACH et al., 2020), que proporciona datos diarios de las variables climáticas en una cuadrícula de 0,1°. El resto de las variables meteorológicas (humedad relativa, radiación solar incidente y evapotranspiración potencial) se calcularon con el paquete de R *Meteoland* (DE CÁCERES et al., 2018). Finalmente, se utilizaron los datos de suelo, vegetación y meteorología para simular los valores diarios de Ψ_{pd} en cada localización y para cada especie.

3.3 Calibración y validación del modelo

El conjunto de datos seleccionados de Globe-LFMC se ha dividido en dos subconjuntos, uno para calibración y otro para validación. Los datos de calibración se corresponden con tres localizaciones (Fig. 1), que contienen 852 registros de HCV (34% del total). Después de obtener los valores específicos de Ψ_{pd} simulados con MEDFATE, se ha calibrado su relación con HCV en base a una regresión lineal donde, siguiendo a NOLAN et al., (2018), Ψ_{pd} se ha transformado logarítmicamente. El conjunto de datos de validación, que contiene los 37 sitios de muestreo restantes con 1.659 puntos de datos (66% del total), se ha utilizado para validar las predicciones de HCV. La validación del modelo se ha realizado mediante una regresión lineal entre el contenido de humedad observado y el predicho, calculando el R^2 ajustado (para medir la calidad del ajuste de nuestras predicciones), así como la intersección (β_0) y la pendiente (β_1) para evaluar los posibles sesgos del modelo. Además, calculamos la raíz del error cuadrático medio (RECM) y el error absoluto medio (EAM) para cuantificar la precisión de las predicciones, y el error sesgado medio (ESM: JOLLIFF et al., 2009), para evaluar si nuestras predicciones subestiman o sobreestiman los datos observados.

3.4 Índices de sequía e índices de vegetación espectral

Para evaluar la capacidad predictiva del modelo en términos comparativos se modeliza también HCV en base a índices de sequía y los índices de vegetación, utilizando las mismas localizaciones del

subconjunto de datos de validación. Los valores de *Drought Code* (DC) se han obtenido mediante el paquete R del *Canadian Forest Fire Danger Rating System* (WANG et al., 2017), utilizando los mismos datos meteorológicos que los usados para correr las simulaciones con MEDFATE. Por otro lado, de acuerdo con MARINO et al. (2020), se han calculado nueve índices espectrales para inferir HCV utilizando datos del espectrómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS, de MCD43A4 Collection6), extrayendo para cada fecha y localización los valores de cada banda con una resolución espacial de 500 m (LP DAAC, <https://lpdaac.usgs.gov/>). Finalmente se ha realizado una regresión lineal entre los valores de los índices espectrales y los valores de HCV observados, para seleccionar el índice de vegetación que presentara el valor de R^2 ajustado más alto (en este caso, el *Enhanced Vegetation Index*, EVI, $R^2 = 0.33$)

4. Resultados

La base de datos ha permitido calibrar y validar el modelo obteniéndose valores de HCV que han variado entre especies y grupos funcionales según lo esperado. Esta variación del contenido de humedad es mayor en los arbustos germinadores (45-145%, percentiles 5 y 95% respectivamente), e intermedia en arbustos rebrotadores (60-120%). La variación en los árboles (75-140%) es mayor que en arbustos debido a diferencias fisiológicas entre los géneros *Pinus* y *Quercus*, aunque las variaciones estacionales de cada género fueron menores que las obtenidas para los arbustos germinadores y rebrotadores. Finalmente, de media, el contenido de humedad del conjunto de las especies desciende del 125% en primavera al 80% en verano.

4.1 Calibración, validación y comparación entre MEDFATE, DC y EVI.

Utilizando el subconjunto de datos de calibración, se ha aplicado una regresión lineal entre los valores de Ψ_{pd} , simulados con MEDFATE, los valores de DC y los valores de EVI con los valores de HCV observados. Las ecuaciones derivadas de estas regresiones lineales se han aplicado a los valores de Ψ_{pd} , DC y EVI obtenidos con el subconjunto de datos de validación para estimar HCV con los tres métodos. Las predicciones de HCV obtenidas mediante el método desarrollado ($MEDFATE_{HCV}$) se ajustan mejor ($R^2 = 0,5$) a los datos observados que las predicciones obtenidas con *Drought Code* (DC_{HCV} , $R^2 = 0,3$) y con el índice de vegetación espectral (EVI_{HCV} , $R^2 = 0,3$; Tabla 1, Fig. 2). Tanto la RECM como el EAM en $MEDFATE_{HCV}$ (32 y 23%, respectivamente) son menores que en DC_{HCV} (36 y 26%) y que en EVI_{HCV} (60 y 42%). Observamos que la bondad del ajuste en DC_{HCV} depende del tipo funcional. Las predicciones obtenidas con DC_{HCV} en germinadoras presentan un buen ajuste con los datos observados ($R^2 = 0,5$; Fig. 2h), aunque inferior que el obtenido con nuestro modelo ($R^2 = 0,6$; Fig. 2c). Sin embargo, las predicciones obtenidas en las rebrotadoras o en árboles, ya sea con DC_{HCV} o con EVI_{HCV} , presentan coeficientes de determinación muy bajos en todos los casos ($R^2 < 0,05$; Fig. 2).

4.2 Características de $MEDFATE_{HCV}$

A pesar de que las predicciones del contenido de humedad obtenidas con $MEDFATE_{HCV}$ se ajustan mejor a los datos observados en campo que las predicciones obtenidas con DC_{HCV} y EVI_{HCV} , nuestro modelo tiende a subestimar la HCV, sobre todo para los valores por encima del 150% (Figura 2, Tabla 1). Observando la pendiente de la regresión lineal entre la HCV observada y predicha (1,5) y el ESM (-11,7%), observamos cierta tendencia en nuestro modelo a subestimar los datos observados. $MEDFATE_{HCV}$ mostró un mejor ajuste para los arbustos germinadores ($R^2 = 0,6$; EAM = 23%) que para los árboles ($R^2 = 0,5$; EAM = 23%) o arbustos rebrotadores ($R^2 = 0,4$, EAM = 22%). Además, se observa que el ESM fue menor para los arbustos germinadores (-9%) que para los rebrotadores (-16%) o los árboles (-18%; Tabla 1). Es de destacar que las predicciones de $MEDFATE_{HCV}$ han simulado correctamente las variaciones del contenido de humedad, tanto para los géneros (Tabla 2) como para las especies estudiadas (Fig. 3). Observamos los mejores ajustes en géneros de germinadoras como *Cistus* ($R^2 = 0.7$; EAM = 17%), *Thymus* ($R^2 = 0,7$; EAM = 33%), *Rosmarinus* ($R^2 = 0,6$; EAM = 26%), *Lavandula* ($R^2 = 0,5$; EAM = 55%) y *Ulex* ($R^2 = 0,5$; EAM = 16%). Las predicciones de HCV para los dos géneros de árboles, *Pinus* y *Quercus*, mostraron un $R^2 = 0.6$ y EAM entre 18% (*Pinus*) y 24%

(*Quercus*). La tendencia a subestimar los valores reales de HCV es menor en el género *Pinus*, que presenta una pendiente igual a 1. En rebrotadoras, el ajuste varía notablemente entre géneros, donde el coeficiente de determinación fue de 0,3 en *Erica* (MAE = 17%), 0,4 en *Arbutus* (MAE = 55%) y *Buxus* (MAE = 10%) y 0,6 en *Genista* (MAE = 19%).

4. Discusión

Se ha desarrollado, calibrado y validado un nuevo modelo ($MEDFATE_{HCV}$) para predecir la variación diaria de HCV a nivel específico, aplicando una regresión lineal con valores de Ψ_{pd} simulados con un modelo de balance hídrico. Con la intención de que el modelo desarrollado mantenga un equilibrio entre ser mecanicista y operativo, se han realizado una serie de asunciones simplificadoras sobre los parámetros fisiológicos de las distintas especies, como la profundidad de las raíces. El modelo es capaz de predecir variaciones estacionales en HCV entre individuos pertenecientes a diferentes tipos funcionales (Fig. 2), géneros (Tabla 2) y especies (Fig. 3). Por último, las predicciones obtenidas con $MEDFATE_{HCV}$ se ajustan mejor a los datos observados que las predicciones obtenidas con los métodos actuales como los índices espectrales de vegetación o índices de sequía (Tabla 1, Fig. 2).

$MEDFATE_{HCV}$, es capaz de capturar los patrones temporales de variación del contenido de humedad en especies pertenecientes a distintos tipos funcionales. Según lo esperado (NOLAN et al., 2018), las especies con sistemas radiculares menos profundos, como los arbustos germinadores, registran bajadas más rápidas de HCV durante la sequía estival (Fig. 3). Por otro lado, las especies de árboles con sistemas radiculares más profundos muestran poca variación estacional de HCV, al poder acceder a los reservorios de agua más profundos. Finalmente, las especies de arbustos rebrotadores muestran una variación en HCV intermedia entre los arbustos germinadores y los árboles.

Se han obtenido predicciones más precisas para los arbustos germinadores que para los rebrotadores. Esto puede deberse a la falta de continuidad temporal en la toma de datos de HCV para los arbustos rebrotadores, ya que solo hay dos localizaciones con medidas tomadas en al menos tres semanas consecutivas (QUAN et al., 2021). También hay que señalar la menor variación estacional del contenido de humedad que registran los arbustos rebrotadores, lo cual dificulta las capacidades predictivas del modelo. En cualquier caso, hay una mejora significativa en la predicción con $MEDFATE_{HCV}$ de la HCV de arbustos rebrotadores con respecto a los modelos actuales basados en índices de sequía o índices de vegetación espectral (Fig. 2).

Las capacidades predictivas de $MEDFATE_{HCV}$ podrían mejorarse mediante una descripción más realista de las características fisiológicas que afectan a la variación estacional del contenido de humedad de las distintas especies vegetales. La HCV depende del contenido de agua en relación con los tejidos secos (PIMONT et al., 2019), por lo que, la incorporación de procesos que afectan a los tejidos secos, como los cambios estacionales en el área foliar específica (NOLAN et al., 2020), puede conducir a mejoras predictivas. También se mejorarían las capacidades predictivas del modelo con una descripción más realista de la profundidad de las raíces a nivel específico (CABON et al., 2018). Sin embargo, se ha optado por no profundizar en el nivel de detalle en estas variables ya que el objetivo era desarrollar un modelo relativamente simple que pueda regionalizarse fácilmente para ser aplicado a escalas nacionales.

Se observa un buen ajuste entre la HCV observada y la predicha con DC_{HCV} para los arbustos germinadores, pero no para árboles o arbustos rebrotadores (Fig. 2), evidenciando las limitaciones de este método para predecir las diferencias en el contenido de humedad diferenciando entre grupos funcionales. En el caso de EVI_{HCV} , siempre se observa un mal ajuste entre los valores observados y predichos. Este resultado era esperable porque los índices de vegetación espectral de MODIS proveen valores en formato píxel con una resolución de 500 m. Por lo tanto, EVI proporciona el mismo valor

promedio para todas las especies dentro de un píxel. Cabe esperar mejoras en la relación entre los índices espectrales y HCV a nivel de especie si se usan resoluciones espaciales más detalladas.

Nuestro objetivo era desarrollar una metodología que permitiera obtener valores del contenido de humedad de cada especie y, en ese contexto, *MEDFATE_{HCV}* muestra grandes ventajas con respecto a los modelos actuales. Mientras que los modelos actuales suelen proporcionar una estimación integrada, predecir la HCV diferenciando entre las distintas especies permite, por ejemplo, conocer por separado el contenido de humedad de las especies del arbolado y el sotobosque, aspecto clave en el estudio de la transición entre los incendios de superficie y los incendios de copa. Asimismo, nuestra aproximación permitirá modelizar cambios en la humedad de combustible bajo distintos escenarios de cambio climático y de gestión tanto forestal como en ambientes periurbanos o de transición (interfaz) urbano-forestal.

A pesar de la gran cantidad de datos de entrada necesarios para correr las simulaciones en *MEDFATE*, muchas de las complejidades y parámetros pueden ocultarse al usuario con el fin de que *MEDFATE_{HCV}* pueda implementarse en sistemas operativos para obtener valores específicos de HCV, allanando el camino para una nueva generación de modelos mecanicistas aplicados en escenarios de prevención de incendios.

5. Conclusiones

Hemos desarrollado un modelo (*MEDFATE_{HCV}*) para estimar HCV mediante la combinación de un modelo de balance hídrico para simular Ψ_{pd} y una relación empírica entre Ψ_{pd} y HCV, que permite predecir el contenido de humedad diferenciando entre las distintas especies y hacer pronósticos con condiciones climáticas futuras. Las predicciones de *MEDFATE_{HCV}* se ajustan mejor con los valores de humedad observados que las predicciones obtenidas con los índices de sequía o los índices de vegetación espectral, no solo en términos generales, sino también al considerar los distintos tipos funcionales géneros y especies. *MEDFATE_{HCV}* puede implementarse dentro de sistemas de prevención de incendios forestales y puede allanar el camino para una nueva generación de modelos mecanicistas. Dado que la humedad es un factor crítico que limita la propagación del incendio forestal y considerando las previsiones de aumentos en la aridez climática, aquí mostramos cómo la incorporación de los rasgos fisiológicos de las especies vegetales en modelos mecanicistas aporta modelizaciones de las dinámicas estacionales en la variación de HCV más realistas que los métodos actuales.

6. Bibliografía

ALBERDI, I., SANDOVAL, V., CONDES, S., CAÑELLAS, I., VALLEJO, R., 2016. The Spanish National Forest Inventory, a tool for the knowledge, management and conservation of forest ecosystems. *Ecosistemas* 25, 88–97.

BOER, M.M., DE DIOS, V.R., STEFANIAK, E.Z., BRADSTOCK, R.A., 2021. A hydroclimatic model for the distribution of fire on earth. *Environ. Res. Commun.* 3.

CABON, A., MARTÍNEZ-VILALTA, J., MARTÍNEZ DE ARAGÓN, J., POYATOS, R., DE CÁCERES, M., 2018. Applying the eco-hydrological equilibrium hypothesis to model root distribution in water-limited forests. *Ecohydrology* 11.

CHAZARRA BERNABÉ, A., FLÓREZ GARCÍA, E., PERAZA SÁNCHEZ, B., TOHÁ REBULL, T., LORENZO MARIÑO, B., CRIADO PINTO, E., MORENO GARCÍA, J.V., ROMERO FRESNEDA, R., BOTEY FULLAT, R., 2018. Mapas climáticos de España (1981-2010) y ETo (1996-2016), Mapas climáticos de España (1981-2010) y ETo (1996-2016). Agencia Estatal de Meteorología.

DE CÁCERES, M., MARTIN-STPAUL, N., TURCO, M., CABON, A., GRANDA, V., 2018. Estimating daily meteorological data and downscaling climate models over landscapes. *Environ. Model. Softw.* 108, 186–196.

DE CÁCERES, M., MARTÍNEZ-VILALTA, J., COLL, L., LLORENS, P., CASALS, P., POYATOS, R., PAUSAS, J.G., BROTONS, L., 2015. Coupling a water balance model with forest inventory data to predict drought stress: The role of forest structural changes vs. climate changes. *Agric. For. Meteorol.* 213, 77–90.

DE CÁCERES, M., MENCUCCINI, M., MARTIN-STPAUL, N., LIMOUSIN, J.M., COLL, L., POYATOS, R., CABON, A., GRANDA, V., FORNER, A., VALLADARES, F., MARTÍNEZ-VILALTA, J., 2021. Unravelling the effect of species mixing on water use and drought stress in Mediterranean forests: A modelling approach. *Agric. For. Meteorol.* 296.

DINERSTEIN, E., OLSON, D., JOSHI, A., VYNNE, C., BURGESS, N.D., WIKRAMANAYAKE, E., HAHN, N., PALMINTERI, S., HEDAO, P., NOSS, R., HANSEN, M., LOCKE, H., ELLIS, E.C., JONES, B., BARBER, C.V., HAYES, R., KORMOS, C., MARTIN, V., CRIST, E., SECHREST, W., PRICE, L., BAILLIE, J.E.M., WEEDEN, D., SUCKLING, K., DAVIS, C., SIZER, N., MOORE, R., THAU, D., BIRCH, T., POTAPOV, P., TURUBANOVA, S., TYUKAVINA, A., DE SOUZA, N., PINTEA, L., BRITO, J.C., LLEWELLYN, O.A., MILLER, A.G., PATZELT, A., GHAZANFAR, S.A., TIMBERLAKE, J., KLÖSER, H., SHENNAN-FARPÓN, Y., KINDT, R., LILLESØ, J.P.B., VAN BREUGEL, P., GRAUDAL, L., VOGEL, M., AL-SHAMMARI, K.F., SALEEM, M., 2017. An Ecoregion-Based Approach to Protecting Half the Terrestrial Realm. *Bioscience* 67, 534–545.

HENGL, T., JESUS, J.M. DE, HEUVELINK, G.B.M., RUIPEREZ, M., KILIBARDA, M., BLAGOTI, A., SHANGGUAN, W., WRIGHT, M.N., GENG, X., BAUER-MARSCHALLINGER, B., GUEVARA, M.A., VARGAS, R., MACMILLAN, R.A., BATJES, N.H., LEENAARS, J.G.B., RIBEIRO, E., WHEELER, I., MANTEL, S., KEMPEN, B., 2017. SoilGrids250m : Global gridded soil information based on machine learning.

HERSBACH, H., BELL, B., BERRISFORD, P., HIRAHARA, S., HORÁNYI, A., MUÑOZ-SABATER, J., NICOLAS, J., PEUBEY, C., RADU, R., SCHEPERS, D., SIMMONS, A., SOCI, C., ABDALLA, S., ABELLAN, X., BALSAMO, G., BECHTOLD, P., BIAVATI, G., BIDLOT, J., BONAVIDA, M., DE CHIARA, G., DAHLGREN, P., DEE, D., DIAMANTAKIS, M., DRAGANI, R., FLEMMING, J., FORBES, R., FUENTES, M., GEER, A., HAIMBERGER, L., HEALY, S., HOGAN, R.J., HÓLM, E., JANISKOVA, M., KEELEY, S., LALOYLAUX, P., LOPEZ, P., LUPU, C., RADNOTI, G., DE ROSNAY, P., ROZUM, I., VAMBORG, F., VILLAUME, S., THÉPAUT, J.N., 2020. The ERA5 global reanalysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 146, 1999–2049.

IPCC, 2014. Summary for policymakers, in: Field, C.B., Barros, V.R., Dokken, D.J., Mach, K.J., Mastrandrea, M.D., Bilir, T.E. (Eds.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 1–32.

JOLLIFF, J.K., KINDLE, J.C., SHULMAN, I., PENTA, B., FRIEDRICHS, M.A.M., HELBER, R., ARNONE, R.A., 2009. Summary diagrams for coupled hydrodynamic-ecosystem model skill assessment. *J. Mar. Syst.* 76, 64–82.

MA, W., ZHAI, L., PIVOVAROFF, A., SHUMAN, J., BUOTTE, P., DING, J., CHRISTOFFERSEN, B., KNOX, R., MORITZ, M., FISHER, R.A., KOVEN, C.D., KUEPPERS, L., XU, C., 2021. Assessing climate change impacts on live fuel moisture and wildfire risk using a hydrodynamic vegetation model. *Biogeosciences* 18, 4005–4020.

MARINO, E., YEBRA, M., GUILL, M., ALGEET, N., TOM, L., MADRIGAL, J., GUIJARRO, M., HERNANDO, C., 2020. Investigating Live Fuel Moisture Content Estimation in Fire-Prone Shrubland from Remote

Sensing Using Empirical Modelling and RTM Simulations. *Remote Sens.* 12.

NOLAN, R.H., BLACKMAN, C.J., DIOS, R. DE, CHOAT, B., MEDLYN, B.E., LI, X., BRADSTOCK, R.A., BOER, M.M., 2020. Linking Forest Flammability and Plant Vulnerability to Drought. *Forests* 1–16.

NOLAN, R.H., HEDO, J., ARTEAGA, C., SUGAI, T., RESCO DE DIOS, V., 2018. Physiological drought responses improve predictions of live fuel moisture dynamics in a Mediterranean forest. *Agric. For. Meteorol.* 263, 417–427.

PAUSAS, J.G., PRATT, R.B., KEELEY, J.E., JACOBSEN, A.L., RAMIREZ, A.R., VILAGROSA, A., PAULA, S., KANEAKUA-PIA, I.N., DAVIS, S.D., 2016. Towards understanding resprouting at the global scale. *New Phytol.* 209, 945–954.

PELLIZZARO, G., DUCE, P., VENTURA, A., ZARA, P., 2007. Seasonal variations of live moisture content and ignitability in shrubs of the Mediterranean Basin. *Int. J. Wildl. Fire* 16, 633–641.

PIMONT, F., RUFFAULT, J., MARTIN-STPAUL, N.K., DUPUY, J.L., 2019. Why is the effect of live fuel moisture content on fire rate of spread underestimated in field experiments in shrublands? *Int. J. Wildl. Fire* 28, 127–137.

QUAN, X., YEBRA, M., RIAÑO, D., HE, B., LAI, G., LIU, X., 2021. Global fuel moisture content mapping from MODIS. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 101, 102354.

RESCO DE DIOS, V., 2020. *Plant-Fire Interactions, Managing F.* ed. Springer US, Switzerland.

RESCO DE DIOS, V., HEDO, J., CUNILL, À., THAPA, P., MARTÍNEZ, E., MARTÍNEZ, J., ARAGÓN, D., ANTONIO, J., BALAGUER-ROMANO, R., DÍAZ-SIERRA, R., YEBRA, M., BOER, M.M., 2021. Climate change induced declines in fuel moisture may turn currently fire-free Pyrenean mountain forests into fire-prone ecosystems. *Sci. Total Environ.* 797, 149104.

RITCHIE, G.A., HINCKLEY, T.M., 1975. The Pressure Chamber as an Instrument for Ecological Research. *Adv. Ecol. Res.* 9, 165–254.

RUFFAULT, J., MARTIN-STPAUL, N., PIMONT, F., DUPUY, J.L., 2018. How well do meteorological drought indices predict live fuel moisture content (LFMC)? An assessment for wildfire research and operations in Mediterranean ecosystems. *Agric. For. Meteorol.* 262, 391–401.

SANCHEZ-MARTINEZ, P., MARTÍNEZ-VILALTA, J., DEXTER, K.G., SEGOVIA, R.A., MENCUCCINI, M., 2020. Adaptation and coordinated evolution of plant hydraulic traits. *Ecol. Lett.* 23, 1599–1610.

SOLER MARTIN, M., BONET, J.A., MARTÍNEZ DE ARAGÓN, J., VOLTAS, J., COLL, L., RESCO DE DIOS, V., 2017. Crown bulk density and fuel moisture dynamics in *Pinus pinaster* stands are neither modified by thinning nor captured by the Forest Fire Weather Index. *Ann. For. Sci.* 74.

VAN WAGNER, C.E., 1974. Structure of the Canadian forest fire weather index. *Dep. Environ. - Can. For. Serv. Publ.* 37 pp.

VIEGAS, D.X., PIÑOL, J., VIEGAS, M.T., OGAYA, R., 2001. Estimating live fine fuels moisture content using meteorologically-based indices. *Int. J. Wildl. Fire* 10, 223–240.

WANG, X., WOTTON, B.M., CANTIN, A.S., PARISIEN, M.A., ANDERSON, K., MOORE, B., FLANNIGAN, M.D., 2017. *cffdrs: an R package for the Canadian Forest Fire Danger Rating System.* *Ecol. Process.* 6.

YEBRA, M., DENNISON, P.E., CHUVIECO, E., RIAÑO, D., ZYLSTRA, P., HUNT, E.R., DANSON, F.M., QI, Y., JURDAO, S., 2013. A global review of remote sensing of live fuel moisture content for fire danger assessment: Moving towards operational products. *Remote Sens. Environ.* 136, 455–468.

YEBRA, M., SCORTECHINI, G., BADI, A., BEGET, M.E., BOER, M.M., BRADSTOCK, R., CHUVIECO, E., DANSON, F.M., DENNISON, P., RESCO DE DIOS, V., DI BELLA, C.M., FORSYTH, G., FROST, P., GARCIA, M., HAMDY, A., HE, B., JOLLY, M., KRAAIJ, T., MARTÍN, M.P., MOUILLOT, F., NEWNHAM, G., NOLAN, R.H., PELLIZZARO, G., QI, Y., QUAN, X., RIAÑO, D., ROBERTS, D., SOW, M., USTIN, S., 2019. Globe-LFMC, a global plant water status database for vegetation ecophysiology and wildfire applications. *Sci. Data* 6, 1–8.

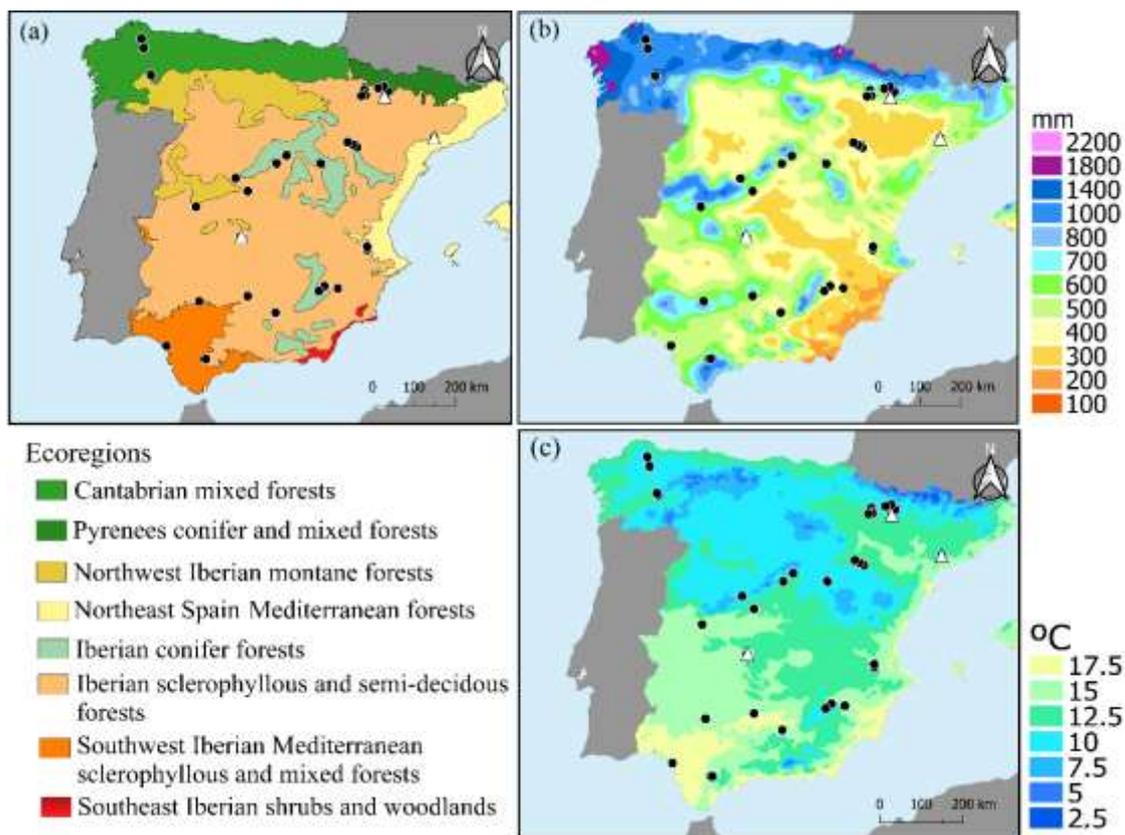


Figura 1. Sitios de muestreo de Globe-LFMC en España. a) Ecorregiones, b) precipitación media anual y c) temperatura media anual del aire. Los triángulos blancos y los círculos negros indican los sitios utilizados para la calibración y la validación, respectivamente. Delimitaciones de ecorregiones obtenidas de (Dinerstein et al., 2017) y gradientes meteorológicos de (Chazarra Bernabé et al. 2018).

Tabla 1. Estadísticas descriptivas del ajuste para los tres modelos utilizados en este estudio: $MEDFATE_{HCV}$, Drought Code (DC_{HCV}) y el índice de vegetación espectral EVI (EVI_{HCV}). Los valores se han desglosado para cada tipo funcional (R-, arbustos germinadores; R+, arbustos rebrotadores; Ar, árboles). Se ha calculado el R-cuadrado ajustado (R^2), la intersección (β_0) y la pendiente (β_1) de la regresión entre HCV observado y predicho, y también la raíz del error cuadrático medio (RECM), error absoluto medio (EAM) y error sesgado medio (ESM).

	R^2	β_0	β_1	RECM	EAM	ESM
$MEDFATE_{HCV}$	0,5	-33,8 ($\pm 3,1$)	1,5 ($\pm 0,0$)	31,8	22,7	-11,7
R-	0,6	-39,2 ($\pm 3,6$)	1,5 ($\pm 0,0$)	30,2	22,7	-8,6
R+	0,4	-30,8 ($\pm 12,9$)	1,5 ($\pm 0,1$)	34,1	21,9	-15,9
Ar	0,5	-15,8 ($\pm 6,5$)	1,4 ($\pm 0,1$)	34,9	23,1	-18,5
DC_{HCV}	0,3	-26,1 ($\pm 4,5$)	1,4 ($\pm 0,1$)	35,9	25,9	-10,4
R-	0,5	-56,6 ($\pm 4,6$)	1,7 ($\pm 0,0$)	32,6	24,4	-7,7
R+	0,01	79,6 ($\pm 16,4$)	0,3 ($\pm 0,2$)	40,3	27,1	-12,1
Ar	0,09	39,8 ($\pm 11,8$)	0,8 ($\pm 0,1$)	42,7	29,9	-18,1
EVI_{HCV}	0,3	-179,9 ($\pm 8,9$)	3,3 ($\pm 0,1$)	60,4	41,8	-11,7
R-	0,08	-22,2 ($\pm 13,1$)	1,4 ($\pm 0,1$)	43,5	32,2	-13,2
R+	0,04	59,0 ($\pm 15,6$)	0,5 ($\pm 0,2$)	30,0	20,7	-13,2
Ar	0,09	-27,3 ($\pm 22,2$)	1,5 ($\pm 0,2$)	40,5	26,3	-16,1

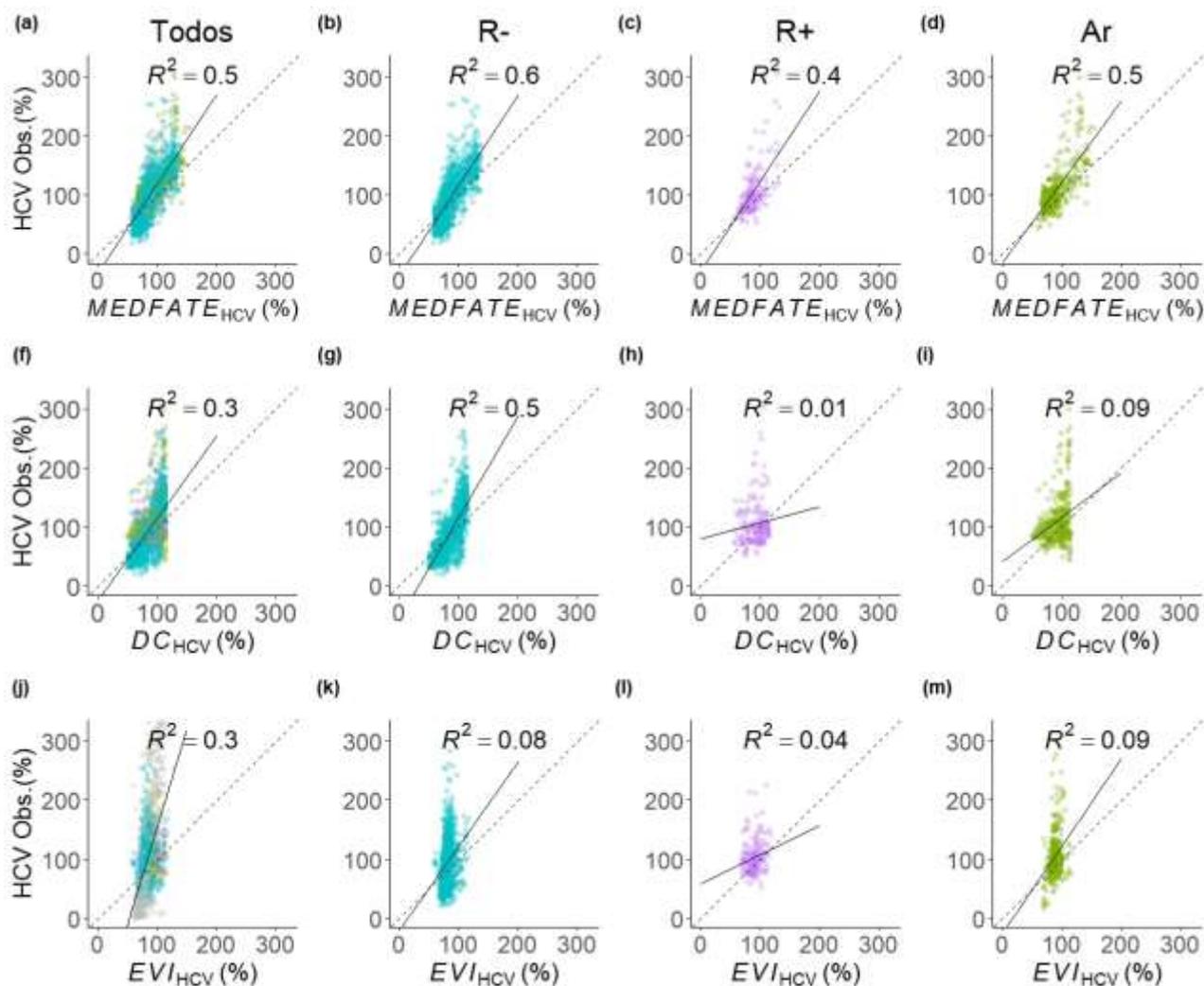


Figura 2. HCV observado frente a valores pronosticados de MEDFATE_{HCV} (a-d), Drought Code (DC_{HCV}; f-i) y el índice de vegetación espectral EVI (EVI_{HCV}; j-m) para todos los datos (a, f, j) y para cada tipo funcional: arbustos germinadores (R-; b, g, k) en azul; arbustos rebrotadores (R+; c, h, l) en violeta y árboles (Ar; d, i, m) en verde.

Tabla 2 Estadísticas de bondad de ajuste de la regresión lineal entre HCV predicho con $MEDFATE_{HCV}$ y HCV observado. Tamaño de la muestra (n), R cuadrado ajustado (R^2), intersección (β_0) y pendiente (β_1) para cada género (cuando $n > 20$), También se ha calculado la raíz del error cuadrático medio (RECM), el error absoluto medio (EAM) y el error de sesgo medio (ESM).

	n	R^2	β_0	β_1	RECM	EAM	ESM
<i>Cistus</i> (R-)	483	0,7	-14,2 ($\pm 3,8$)	1,3 ($\pm 0,0$)	19,8	17,5	-9,0
<i>Lavandula</i> (R-)	33	0,5	-174,1 ($\pm 55,1$)	3,5 ($\pm 0,6$)	49,4	54,6	-37,5
<i>Rosmarinus</i> (R-)	473	0,6	-55,2 ($\pm 5,7$)	1,7 ($\pm 0,1$)	27,1	25,6	-9,6
<i>Thymus</i> (R-)	47	0,7	-282,6 ($\pm 34,2$)	4,5 ($\pm 0,4$)	26,4	33,5	2,3
<i>Ulex</i> (R-)	46	0,5	-29,0 (± 17)	1,3 ($\pm 0,2$)	18,7	15,8	3,6
<i>Arbutus</i> (R+)	29	0,4	-37,7 ($\pm 40,6$)	1,9 ($\pm 0,4$)	35,5	55,3	-54,6
<i>Buxus</i> (R+)	53	0,4	35,9 ($\pm 10,6$)	0,7 ($\pm 0,1$)	9,4	9,8	-6,3
<i>Erica</i> (R+)	43	0,3	-2,7 ($\pm 19,7$)	1,0 ($\pm 0,2$)	20,9	16,9	-0,1
<i>Genista</i> (R+)	30	0,6	-84,8 ($\pm 24,8$)	1,9 ($\pm 0,3$)	17,5	19,4	9,3
<i>Pinus</i> (Ar)	121	0,6	13,7 ($\pm 7,5$)	1,0 ($\pm 0,1$)	19,0	18,0	-11,9
<i>Quercus</i> (Ar)	347	0,6	-39,0 (± 8)	1,7 ($\pm 0,1$)	29,0	24,0	-20,5

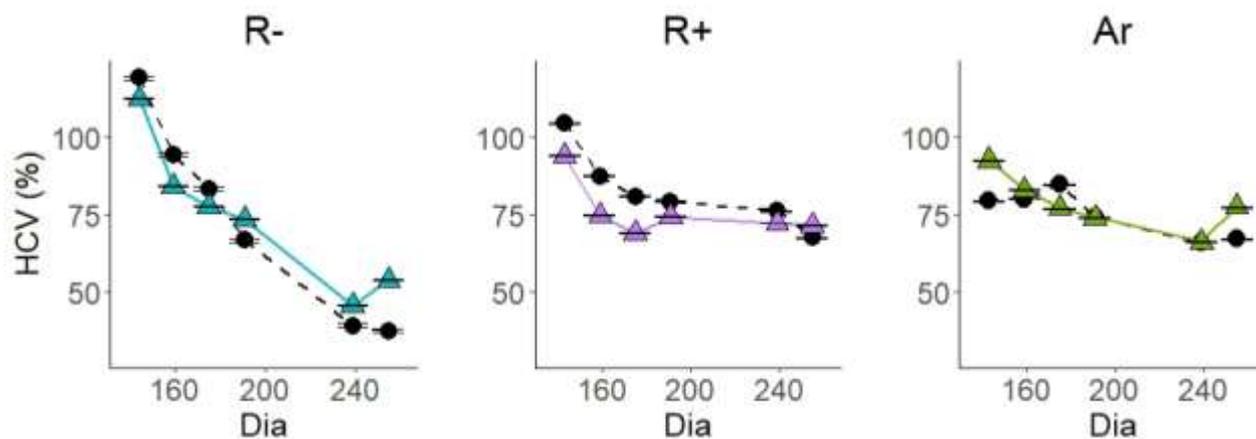


Figura 3. Dinámica estacional de HCV observada (línea discontinua negra) y predicha con $MEDFATE_{HCV}$ (línea continua de color) para cada tipo funcional en la localización AraCin12, Arbusto germinador (R-, *Genista scorpius*) en azul, arbusto rebrotador (R+, *Quercus coccifera*) en púrpura y árbol (Ar, *Quercus ilex*) en verde, Las barras de error indican un error estándar.