



9CFE-1483

Actas del Noveno Congreso Forestal Español
Edita: **Sociedad Española de Ciencias Forestales. 2025.**
ISBN: 978-84-941695-7-1



Evaluación del régimen hídrico de los suelos forestales con teledetección para determinar las funciones hidrológicas del bosque.

PÉREZ ROMERO, J. (1,2), BLANCO CANO L. (1), LIDÓN CERECUELA A. (1), LULL NOGUERA C. (1), AMEZTEGUI GONZALEZ A. (3), VICENTE GONZÁLEZ L. (4), MOYA NAVARRO D. (5), DEL CAMPO GARCÍA A (1).

1. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y del Medio Natural. Dep. Ing. Hidráulica y Medio Ambiente. Re-ForeST. Universitat Politècnica de Valencia (jperrom@upv.es)
 2. Universidad de Córdoba
 3. Universitat de Lleida
 4. Ingeniería del Entorno Natural
 5. Universidad de Castilla La Mancha
- Resumen** Evaluar el contenido de agua en suelo a lo largo del tiempo y del espacio es fundamental para conocer el estado hídrico de los sistemas forestales. El agua del suelo es la pieza clave que modula tanto las funciones de provisión de agua como los aspectos relacionados con la protección hidrológica que se generan en los ecosistemas. Caracterizar el régimen de humedad permite valorar de una forma objetiva y eficaz qué funciones hidrológicas se pueden focalizar con la gestión forestal hidrológica, dado que esta puede cambiar dicho régimen y con ello afectar al uso, regulación, provisión o retención de agua del ecosistema forestal. El presente trabajo pretende conocer espacialmente el régimen de humedad del suelo mediante el empleo de información satelital. Para lograr este trabajo, se emplearán datos reales de humedad recogidos en distintos sitios de estudio y momentos temporales. Estos datos se relacionan con información satelital simultánea para identificar los rangos de humedad del suelo y con ello la potencialidad del territorio para producción vs. conservación de agua. Siendo la banda de humedad superficial del satélite SMAP y el ajuste por la banda de temperatura superficial (LST) de Landsat la mejor opción para obtener mejor ajuste ($R^2 = 0.64$) y poder bajar la resolución espacial a escala de ladera.
- Palabras clave** Humedad superficial, provisión agua, regulación hidrológica, bajo copas.
6. **Introducción** Los bosques desempeñan un papel crucial en el ciclo hidrológico ayudando a la retención y regulación del agua en los suelos. Su capacidad de retención contribuye a mitigar eventos extremos como sequías e inundaciones. Además, esta retención permite que los acuíferos existentes puedan recargarse por medio de la infiltración profunda, ayudando a la estabilidad del sistema y mantenimiento de todos los servicios ecosistémicos (ZEMA ET AL., 2021). El agua es un componente esencial en los sistemas forestales y saber su estado hídrico y fisiológico, ayuda a saber cómo se encuentran estas masas. Además, es la piedra angular de la eco-hidrológica, siendo necesaria su cuantificación para calcular el resto de servicios ecosistémicos que los bosques generan. Además de comprender los flujos y dinámicas que ocurren en estos ecosistemas complejos, los cuales por medio de la gestión se ven afectados (DEL CAMPO ET AL., 2017). El contenido de agua en suelo es un indicador clave para evaluar este el estado y funcionamiento de estos sistemas.



Conocer sus dinámicas y sus rangos es vital para definir una gestión adaptativa que garantice su sostenibilidad a largo plazo. Más aún, en el contexto de cambio climático y social en el que nos encontramos, donde los fenómenos extremos son cada vez más recurrentes (BONAN, 2008).

Comprender el régimen hídrico de los suelos forestales permite dirigir la gestión forestal hacia las necesidades del ecosistema pudiendo aprovechar las fortalezas y debilidades que presenta el territorio. De este modo, sitios que pueden generar agua azul tengan una gestión de producción pero que garantice la fijación del suelo o la reducción de sedimentos en los embalses. Mientras que en sitios donde el régimen hídrico del suelo cuente con pocos días en saturación, deben destinar la gestión a la regulación para garantizar la estabilidad de la masa y evitar colapsos antes los eventos extremos. Para poder conocer el régimen de humedad del suelo es necesario utilizar mediciones tradicionales *in situ*, con sondas de humedad. Esto presenta limitaciones significativas debido a los altos costos, la dificultad de acceso a ciertos terrenos y la falta de representatividad espacial a una escala territorial amplia (ROBINSON ET AL., 2008). Sin embargo, una alternativa que se está consolidando para cubrir mayores extensiones de trabajo es el uso de información satelital. La teledetección se ha posicionado como una herramienta versátil para la observación de la humedad superficial del suelo a escala regional y global. Esta tecnología emplea sensores remotos que detectan cambios en las propiedades electromagnéticas del suelo, para estimar el contenido de agua presente (ENTEKHABI ET AL., 2010). Diversas misiones satelitales, como SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity), Sentinel-1 y SMAP (Soil Moisture Active Passive), han sido diseñadas para recopilar datos precisos sobre la humedad del suelo y contribuir a la comprensión de los ciclos hídricos terrestres. El uso de esta información ha sido ampliamente utilizado para la implantación de estrategias de manejo sostenible (NJOKU AND ENTEKHABI, 1996; KERR ET AL., 2010; ENTEKHABI ET AL., 2010). No obstante, determinar con precisión la humedad del suelo bajo las copas presenta un desafío considerable. La interferencia del dosel limita la penetración de la señal, afectando a las bandas activas y pasivas sensibles a la vegetación (KONINGS ET AL., 2016). Lo que dificulta la interpretación de los datos recolectados y requiere de modelos avanzados que puedan descomponer la señal para obtener la correspondiente al suelo. Además, factores como la humedad del dosel, la densidad foliar y las propiedades dieléctricas de la vegetación complican aún más el análisis (LIU ET AL., 2011). Este trabajo pretende evaluar cómo se comportan las misiones satelitales más utilizadas en proyectos y programas europeos en la detección de humedad superficial, en zonas con cubierta forestal. Ya que la mayoría de trabajos que emplean estos productos son áreas descubiertas o de cultivos donde la interferencia es menor. De esta forma, se podrá comprobar si los resultados son fiables para utilizarlo y poder emplearse a la hora de definir la gestión que se debe realizar a esos ecosistemas.

7. **Objetivos** El objetivo principal que se pretende lograr con este trabajo, es poder evaluar el estado hídrico de los suelos forestales con ayuda de la teledetección para poder saber el número de días que el suelo se encuentra en saturación, capacidad de campo y marchitez permanente para poder enfocar la gestión de cada territorio. Para poder alcanzar este objetivo, se necesita previamente lograr otros secundarios, 1) generar una base datos

homogenizada espaciada en el tiempo y el espacio de datos de humedad de suelo en masas forestales, 2) evaluar los productos satelitales que calculan la humedad de suelo bajo copas, 3) generar un modelo fiable que pueda predecir la humedad bajo cubierta y 4) categorizar las humedades para saber cuándo está en saturación el suelo.

3. Metodología 3.1. Sitios de estudios

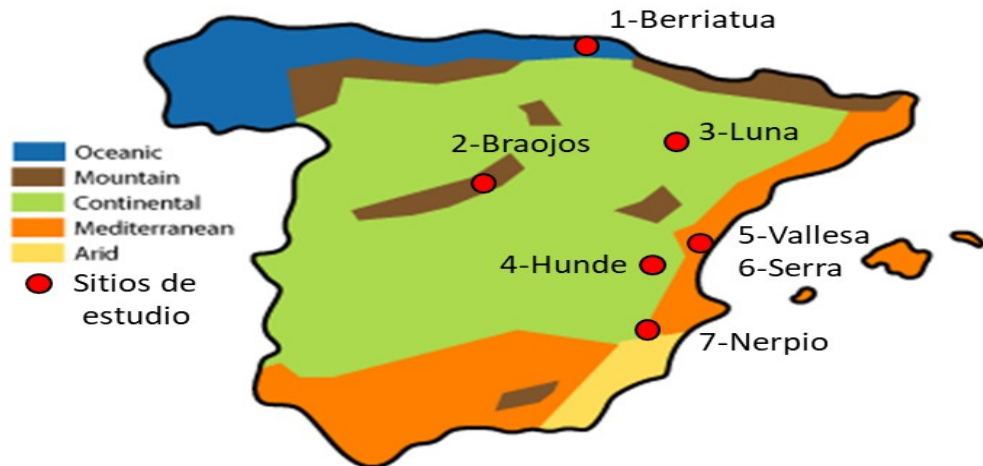


Figura 1. Localización de los sitios de estudio sobre la distribución climática.

Berriatua El área de estudio se localiza en una plantación de *Pinus radiata* de 23 años de edad. La masa, que fue plantada en 1999 con una densidad inicial (Ni) de 1600 árboles/ha, presenta en la actualidad una densidad de 250 árboles/ha, un área basimétrica (G) de 22,1m² ha⁻¹ y un diámetro a la altura del pecho (DAP) de 33,5 cm. La zona tiene un clima mesotérmico, con temperaturas moderadas (temperatura media anual 14,4° C) y es muy lluviosa (precipitación media anual 1200 mm). El itinerario silvícola aplicado en la plantación tiene una rotación de 35 años, un marco de plantación de 3x3 m, repoblado en invierno con una Ni de 1600 árboles/ha y con el objetivo final de madera gruesa de alta calidad para mobiliario y ebanistería, y aprovechamientos intermedios de madera mediana para pequeño aserrado y madera fina para trituración (VARGAS BOHORQUEZ, 2021; GONZÁLEZ-SANCHIS ET AL., 2022). La parcela experimental tiene una superficie de 1000 m², una orientación de 246°, una pendiente media del 66% y una altitud de 252 m.s.n.m. El suelo es franco arcilloso, profundidad superior a 70 cm y tiene una alta capacidad de infiltración.

Braojos de la Sierra El área de estudio está situada en el monte público de la Dehesa Boyal de Braojos de la Sierra (Madrid), con una elevación entre 1200-1500m, una precipitación media anual entre 800-1200 mm, una temperatura media anual de 11,1 °C y una evapotranspiración potencial anual de 379 mm. El clima se clasifica de montaña según el índice de aridez de De Martonne (DE AND WHITELEY, 1926). Los suelos son de origen granítico y silíceo, tienen una profundidad aproximada de 50-70 cm y una textura arenosa-limosa. La vegetación que se encuentra en la parcela es una masa monoespecífica de *Quercus pyrenaica* de realeo que tiene una densidad de 2500 pies/ha donde predominan la clase diamétrica pequeña “<15cm” (71%) y seguida de la clase mediana “<25cm”(26%).

Sierra de Luna El área de estudio se ubica en el Monte de Utilidad Pública Z3123: Los

Pueyos, Terreno Royo, Valdeoliva y otros de la provincia de Zaragoza, con elevación entre 641-761 m.s.n.m, pendientes del 40% en orientación sur, precipitación media anual de 460 mm y temperatura media anual de 13 °C. El clima es continentalizado según índice de aridez de De Martonne (De and Whiteley, 1926). Los suelos son de textura franco-limosa. La vegetación que se encuentra en la parcela es una masa monoespecífica de *Pinus halepensis* en estado latizal-fustal con sotobosque arbustivo.

Hunde El área de estudio está situada en el Monte Público de La Hunde y Palomeras (Valencia) a 950 m.s.n.m. en el oeste de España. Tiene una precipitación media anual de 464 mm, una temperatura media anual de 13,7 °C (entre los años 1960-2007) y una evapotranspiración potencial anual de 749 mm. El clima se clasifica como mediterráneo semiárido según el índice de aridez de De Martonne (De and Whiteley, 1926). Los suelos tienen una alta concentración de carbonatos (26-38%, pH 7,7-8,2), tienen una profundidad aproximada de 50-60 cm y una textura franco-arenosa-limosa (González-Sanchis et al., 2015). Aquí se tiene disposición de 2 parcelas experimentales de monitoreo, la primera esta una plantación homogénea de pino carrasco (*Pinus halepensis*) de alta densidad arbórea con escasa presencia de otras especies arbóreas, ya sea en los huecos como en el sotobosque. La otra parcela está en una masa con la encina (*Quercus ilex subsp. ballota*) como especie dominante y con otras especies acompañantes (*Pinus halepensis*, *Juniperus phoenicea*, *Q. faginea* y *J. oxycedrus*), donde no se realizó ninguna intervención silvícola durante las últimas cinco décadas debido a su marginalidad y al papel protector asignado a este tipo de bosque.

Vallesa La parcela experimental se encuentra en el paraje «La Vallesa» en la provincia de Valencia, España (39.53° N, -0.51° W, 89.9 m s.n.m.), una zona boscosa perteneciente al Parque Natural del Río Turia situada a 20 km de la ciudad de Valencia. La litología dominante está constituida por margas y calcarenitas del Neógeno Continental, y el suelo es somero (profundidad del suelo < 30 cm), muy pedregoso, el pH es de 8,24, la textura es franco-arenosa, y el contenido medio de materia orgánica es del 5,8% a 5-10 cm de profundidad del suelo. El clima es mediterráneo con valores medios anuales (1999-2021) de temperatura, precipitación y evapotranspiración de 17,16 °C, 383,43 mm y 1135,12 mm respectivamente de la estación meteorológica oficial más cercana («Moncada-IVIA», término municipal de Almansa, red SIAR). La especie arbórea dominante es el pino carrasco (*Pinus halepensis*), y los bosques de la zona son en su mayoría masas monoespecíficas de pino carrasco caracterizadas por una baja densidad arbórea y una cubierta forestal intermedia debido a un proceso natural de ajuste de la densidad arbórea. La presencia de sotobosque es escasa, con plantas aisladas de especies típicamente mediterráneas como *Rosmarinus officinalis* L., *Pistacia lentiscus* L., *Rhamnus lycioides* L. y *Rhamnus alaternus* L.

Serra El estudio se llevó a cabo en un pinar plantado situado en la región suroeste de la provincia de Valencia (39° 05' 30" N, 1° 12' 30" O) a 950 m s.n.m. La precipitación media anual es de 465,7 mm. La precipitación media anual es de 465,7 mm y presenta una alta variabilidad intra e interanual. La temperatura media anual es de 13,7 °C, la evapotranspiración potencial media anual es de 749 mm (Thornthwaite), y la evapotranspiración de referencia es de 1200 mm (Hargreaves). Los suelos presentan un pH básico de 7,6, son relativamente poco profundos (50-60 cm) y textura franco-limosa. Las plantaciones de *Pinus halepensis* se establecieron en la zona a

finales de la década de 1940 con altas densidades (aproximadamente 1500 pies/ha), y no se ha llevado a cabo ninguna gestión forestal debido al papel del bosque en la protección del suelo (corroborado por el personal del vivero forestal cercano). A finales de 1998, se realizó una entresaca de 100 metros de ancho para romper la continuidad del dosel forestal, como una práctica típica de prevención de incendios. **Nerpio** El área de estudio se ubica el Monte de Utilidad Pública 138 “Taibilla”, en el término municipal de Nerpio (Albacete), con una elevación entre 985 m.s.n.m con pendientes del 20% en cara oeste, una precipitación media anual de 550 mm, una temperatura media anual de 11,3 °C. El clima es continentalizado según índice de aridez de De Martonne (De and Whiteley, 1926). Los suelos son de textura arenosa-limosa. La vegetación que se encuentra en la parcela es una masa monoespecífica de *Pinus halepensis* en estado latizal alto con sotobosque arbustivo.

3.2. Datos de campo El contenido de agua del suelo (SWC) se midió utilizando sensores FDR de EC-TM (Decagon Devices Inc., Pullman, WA) y Teros 11 (Meter Group, USA), colocados entre 5-10 cm de profundidad y se midió continuamente cada 10 min (del Campo et al., 2014) durante distintos periodos en cada sitio, entre los años 2018 y 2024. Posteriormente se procesaron estos datos y se convirtieron en promedios de datos diarios y se calcularon en cada área de estudio la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP). Además, el SWC se reclasificó en 3 clases (1: PMP, 2: Transición y 3: CC) para tener una variable categórica que permitiera ver el número de días en el que suelo está generando agua de producción (CC).

3.3. Datos de teledetección Los datos de teledetección han sido obtenidos en la plataforma Google Earth Engine, donde se ha realizado un proceso que permite depurar y ajustar las colecciones satelitales para el periodo de interés 2018-2024 y los sitios de estudio. Las colecciones que se han utilizado son Sentinel 1, Sentinel 2, Landsat8, Landsat9 y SMAP. Además de información fisiográfica y de parámetros de suelo que se pueden ver en la Tabla 1.

Tabla 1. Productos de teledetección de la plataforma Google Earth Engine utilizados para la búsqueda de relaciones con la humedad superficial del suelo.

Misión	Enlace
Sentinel 1	https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS_S1_GRD
Sentinel 2	https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS_S2_SR_HARMONIZED
Landsat8	https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/LANDSAT_LC08_C02_T1_L2
Landsat 9	https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/LANDSAT_LC09_C02_T1_L2
SMAP	https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/NASA_SMAP_SPL3SMP_E_005
Índice Aridez	https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/IDAHO_EPSCOR_TERRACLIMATE
Precipitación	https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/ECMWF_ERA5_LAND_DAILY_AGGR
Densidad aparente	https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/OpenLandMap_SOL_SOL_BULKDENS-FINEARTH_USDA-4A1H_M_v02
Modelo digital de elevaciones	https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/CGIAR_SRTM90_V4

Textura	https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/OpenLandMap_SOL_SOL_TEXTURE-CLASS_USDA-TT_M_v02
Contenido de agua en suelo	https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/OpenLandMap_SOL_SOL_WATERCONTENT-33KPA_USDA-4B1C_M_v01

La misión Sentinel-1 del programa Copernicus de la Agencia Espacial Europea (ESA) lanzada en 2014, se basa en el primer sistema de vigilancia mundial SAR (Radar de Apertura Sintética) operativo, proporcionando datos abiertos con una calidad, precisión y cobertura espaciotemporal sin precedentes. Sentinel-1A y Sentinel-1B forman la primera pareja de satélites y observan la Tierra de forma operativa desde octubre de 2014 y 2016, respectivamente. Los satélites Sentinel-1 llevan un instrumento CSAR que funciona a una frecuencia central de 5,405 GHz con soporte para canales de recepción de copolarización y polarización cruzada, y que puede funcionar en cuatro modos de adquisición exclusivos. Mientras que tres modos se centran en operaciones marítimas y de emergencia, el modo de barrido IW es el principal modo de adquisición sobre tierra (no polar), diseñado para satisfacer la mayoría de los requisitos de los usuarios. Sentinel-1 resuelve las características del terreno con un muestreo espacial de 10 m y con una alta precisión radiométrica y, por tanto, permite la recuperación de señales hidrológicas con mucho más detalle espacial. Con información SAR a esta escala, pueden describirse los efectos de la cubierta terrestre, la vegetación, la topografía y también fenómenos hidrológicos a pequeña escala, como lluvias conveccionales o inundaciones, que no se observan con sistemas a escala gruesa. En cuanto a la resolución temporal, el Sentinel-1 no alcanza la frecuencia de los sistemas meteorológicos, pero sigue mejorando mucho con respecto a las misiones SAR precedentes.

La misión Sentinel-2 consta de dos satélites gemelos, Sentinel-2A y Sentinel-2B, lanzados en 2015 y 2017, respectivamente. Estos satélites están equipados con el sensor óptico MSI, que captura imágenes en 13 bandas espectrales, desde el visible hasta el infrarrojo de onda corta. Sentinel-2 es ideal para aplicaciones relacionadas con la vegetación, el monitoreo del uso del suelo y la evaluación de cuerpos de agua. Para este estudio, se descargaron imágenes de nivel 2A (corregidas atmosféricamente). Landsat 8, lanzado en 2013 por la NASA y el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), cuenta con dos sensores principales: el Operational Land Imager (OLI) y el Thermal Infrared Sensor (TIRS). El OLI incluye nueve bandas espectrales que abarcan desde el visible hasta el infrarrojo cercano, mientras que el TIRS mide la radiación térmica en dos bandas infrarrojas Landsat 9, lanzado en 2021, es una extensión de la misión Landsat 8 y fue diseñado para garantizar la continuidad de las observaciones multiespectrales de alta calidad. Similar a su predecesor, Landsat 9 está equipado con el Operational Land Imager-2 (OLI-2) y el Thermal Infrared Sensor-2 (TIRS-2), que proporcionan una resolución espacial de 30 metros en bandas multiespectrales y 100 metros en bandas térmicas. Los datos adquiridos de Landsat 8 y 9 fueron procesados para calcular la temperatura superficial terrestre (LST) (Roy et al., 2014).

La misión SMAP, lanzada en 2015 por la NASA, está diseñada para medir la humedad del suelo y detectar su estado de congelación/descongelación a escala global. SMAP combina un radar en banda L y un radiómetro pasivo, permitiendo la generación de mapas globales con una resolución espacial de hasta 9 km para los productos de humedad del suelo. Los datos de esta misión son fundamentales para

evaluar procesos hidrológicos, como el balance hídrico y la disponibilidad de agua en ecosistemas agrícolas y naturales (Entekhabi et al., 2010).

Mientras que el resto de variables presentes en la Tabla 1 son datos estatísticos que se extrajeron los valores para las zonas de estudio.

Para Sentinel 1 se ha calculado el SSM (Soil Surface Moisture) propuesta por (Bauer-Marschallinger et al., 2019) (ecuación 1) cuya metodología implanta el programa Copernicus Global Land Service (CGLS) donde proporciona en su web información diaria de datos de humedad.

Este enfoque se basa en la retrodispersión radar (coeficiente,) obtenida de las imágenes del satélite Sentinel-1, que proveen mediciones de la superficie terrestre sin la dependencia de las condiciones meteorológicas o de iluminación, lo cual es fundamental para una monitorización constante. La metodología inicia con la adquisición de datos de Sentinel-1 en el modo Interferometric Wide (IW), con polarizaciones VV (Vertical-Vertical) y VH (Vertical-Horizontal), que son utilizadas para obtener las señales de retrodispersión, las cuales reflejan las propiedades de la superficie del suelo. El primer paso en el procesamiento es la corrección radiométrica y geométrica de los datos para garantizar que las mediciones sean coherentes y comparables. A continuación, se aplica un filtro de reducción de ruido (speckle filtering), ya que los datos SAR son susceptibles a este tipo de ruido. El siguiente paso crucial es la relación empírica entre los valores de retrodispersión y la humedad del suelo. Esta relación se calibra utilizando mediciones *in situ* de humedad del suelo proporcionadas por redes como el International Soil Moisture Network (ISMN), lo que garantiza que las estimaciones sean precisas a nivel global. La metodología también incorpora un proceso de normalización de los valores de retrodispersión, donde se definen umbrales de retrodispersión para suelos secos y saturados (dry_{ref} y wet_{ref} , respectivamente), con el fin de estimar el contenido de humedad en porcentaje. Además, se implementan correcciones adicionales para tener en cuenta factores como la rugosidad de la superficie y la cobertura vegetal, utilizando índices como el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), que ayudan a ajustar la señal radar para áreas con alta vegetación. Finalmente, el producto de humedad superficial del suelo se genera con resoluciones espaciales de 1 km o 10 m.

$$SSM = \frac{\sigma_0 - dry_{ref}}{wet_{ref} - dry_{ref}}$$

(Ecuación 1)

Posteriormente, también se descargó las bandas VH y VV para cada satélite A y B (ascendente y descendente), para relacionarlas en un segundo análisis de combinación de Sentinel 1 y 2 buscando relaciones entre imágenes SAR y multiespectrales. Realizando en la colección de imágenes multiespectrales de Sentinel 2 un reescalado de las bandas, enmascarado de nubes y sombras de nubes y aplicado diversas formulaciones que permiten obtener los índices espectrales que se indican en la Tabla 2.

Tabla 2. Índices espectrales calculados para Sentinel 2.

Índice	Ecuación	Referencia
--------	----------	------------

3.4. Análisis estadísticos

Los análisis estadísticos se llevaron a cabo utilizando RStudio (versión 4.4), empleando diversos paquetes para los análisis estadísticos. Para evaluar la normalidad de las variables continuas, se utilizó la prueba de Shapiro-Wilk mediante la función `shapiro.test` del paquete base de R, ampliamente recomendada para muestras pequeñas y medianas debido a su sensibilidad en detectar desviaciones significativas (RAZALI & WAH, 2011). Dado que ninguna variable cumple con los supuestos de normalidad, las correlaciones no paramétricas se calcularon mediante el coeficiente de Spearman, implementado con la función `cor` del paquete base, que permite una comparación robusta entre variables ordinales y no lineales (HAUKE & KOSSOWSKI, 2011). Para identificar posibles problemas de colinealidad, se estimó el factor de inflación de la varianza (VIF) utilizando el paquete `car`, específicamente con la función `vif`, que cuantifica el grado de multicolinealidad en los predictores del modelo y ayuda a descartar variables redundantes (FOX & WEISBERG, 2019). Finalmente, para abordar la heterocedasticidad y posibles valores atípicos en los modelos predictivos, se ajustaron modelos de regresión robusta mediante el estimador MM-robust del paquete `robustbase`, utilizando la función `lmrob`, reconocida por ofrecer estimaciones fiables en presencia de datos contaminados por outliers (KOLLER & STAHEL, 2011).

Para evaluar la generalidad y precisión de las series de datos reales frente a las obtenidas de teledetección, se utilizaron 3 criterios estadísticos para comparar los valores simulados con los observados según trabajos similares de gestión forestal (ZIERL ET AL., 2007; ZABALZA-MARTÍNEZ ET AL., 2018): 1) El índice de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), compara la varianza residual de los datos con la varianza de los datos medidos (ecuación 2); 2) El sesgo porcentual (PBIAS), mide la tendencia media de los datos simulados a ser mayores o menores que las series observadas (ecuación 3); 3) El error cuadrático medio (RMSE), se calcula como la diferencia total entre los valores simulados y los observados (ecuación 4).

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^N (Y_i^{obs} - Y_i^{mean})^2} \right] \quad (\text{Ecuación 2})$$

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i^{obs} - Y_i^{sim}) * 100}{\sum_{i=1}^N (Y_i^{obs})} \right] \quad (\text{Ecuación 3})$$

(Ecuación 4)

4. Resultados

Los datos de humedad superficial bajo cubierta medidos en campo, son obtenidos con los mismos sensores y a la misma profundidad, pero con ubicaciones espaciales y temporales distintas. Cada área de estudio tiene un periodo diferente de obtención de datos y se encuentra en un tipo de clima. Esto hace que existan diferencias en el rango de distribución de los valores y la distribución de frecuencia. (Figura 2).

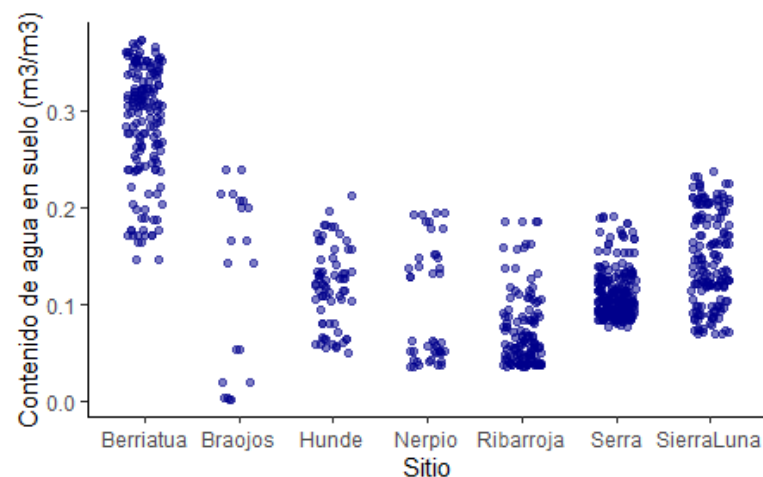


Figura 2. Distribución de valores de contenido de humedad superficial bajo cubierta de cada área de estudio.

4.1. Relación de humedad superficial bajo cubierta con Sentinel

Los datos obtenidos de humedad superficial de Sentinel, propuesta por Bauer-Marschallinger et al. 2019, no muestran relación con ningún caso de estudio. Además, de que no muestra ni patrones, ni tendencias parciales comparables en los sitios de estudio (Figura 3).

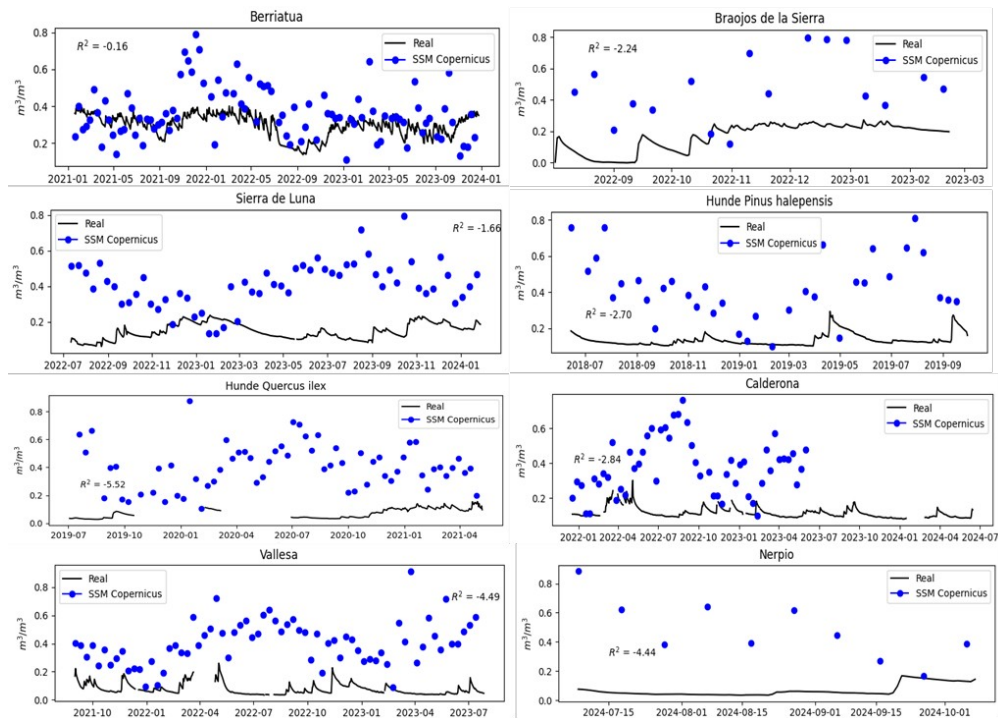


Figura 3. Humedad superficial bajo copas real y obtenidas con Sentinel 1.

Buscando relación directa entre la humedad superficial bajo cubierta con los índices de Sentinel 1 y 2, existen correlaciones entre la humedad real (mean en la Figura 4) con varios índices espectrales y con las bandas polarizadas de retrodispersión, siendo más alto los valores de Sentinel 1.

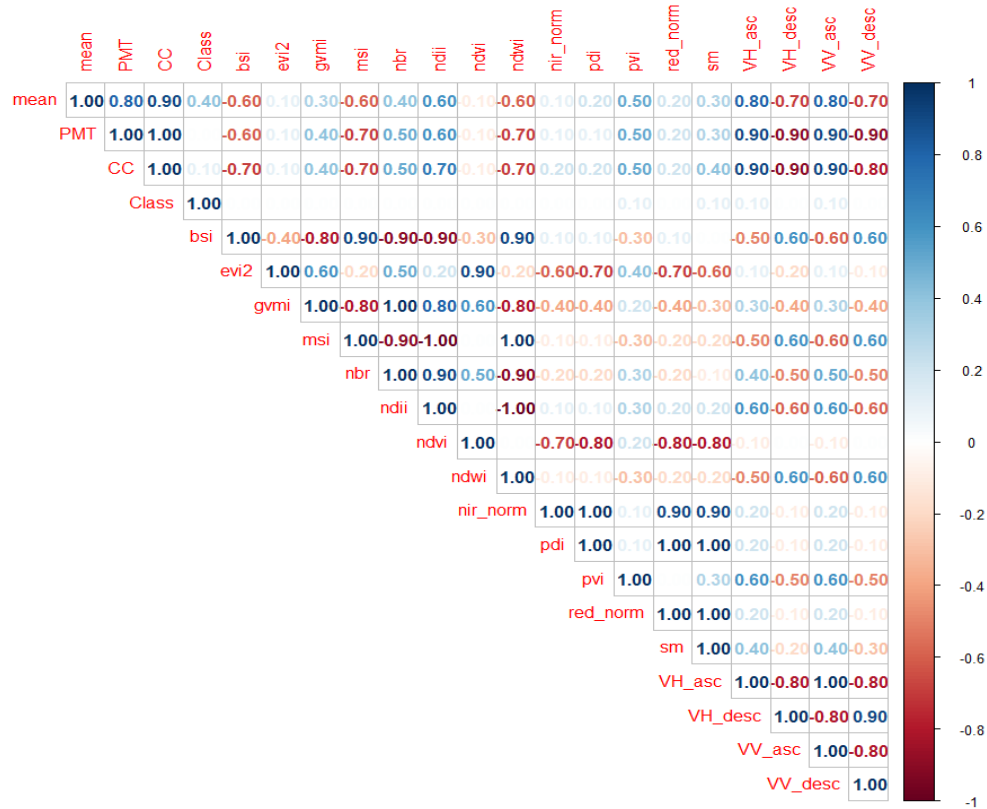


Figura 4. Correlación de Spearman con las variables procedente de Sentinel 1 y 2.

Tras los análisis de colinealidad se redujeron las variables a NDVI y VH_asc (banda Vertical-horizontal del Sentinel 1-A) para calcular una regresión robusta que generó un R² de 0.72 pero que no presenta una distribución lineal. Lo que, pese a tener un buen ajuste de medias entre real y simulado no permite encontrar una relación fácilmente explicable y replicable, ya que hay valores reales que se solapan con los simulados y no permite la clasificación en categorías de capacidad de campo, saturación y marchitez permanente (Figura 5).

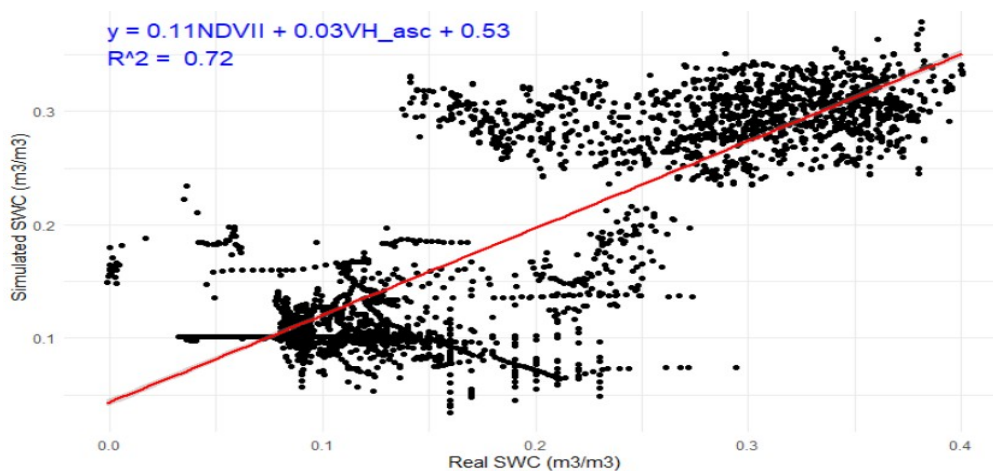


Figura 5. Modelo de regresión robusta para obtener la humedad superficial bajo copa.



4.2. Relación de humedad bajo copas con SMAP

Los datos obtenidos con SMAP (Figura 6) muestran una relación alta con los datos reales diarios en todos los sitios de estudios, con R^2 por encima de 0.4 en todos los casos y especialmente en el caso de Berriatua que llega al 0.63. Siendo estos datos satelitales de un pixel de 9km de resolución espacial, donde todos estos sitios presentan una heterogeneidad alta por el componente humano, podemos decir que refleja con veracidad lo que sucede en la superficie terrestre.

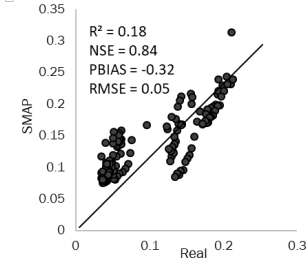
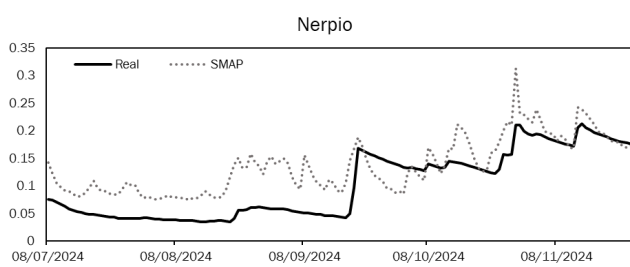
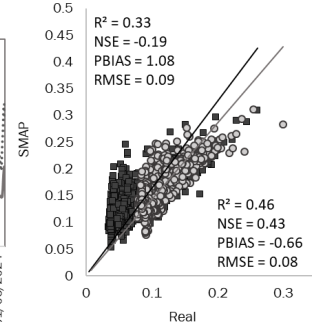
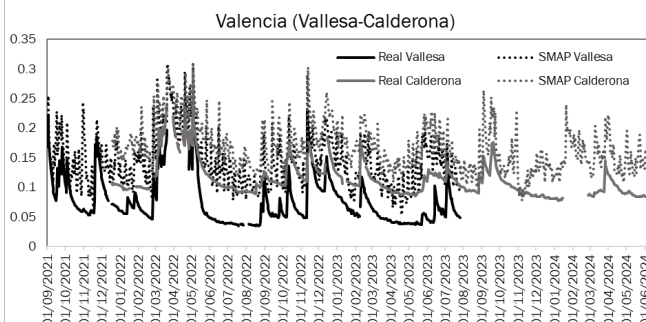
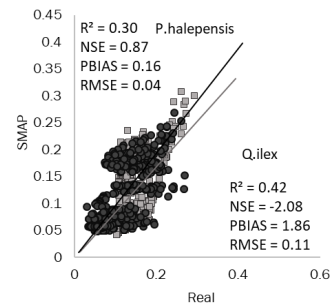
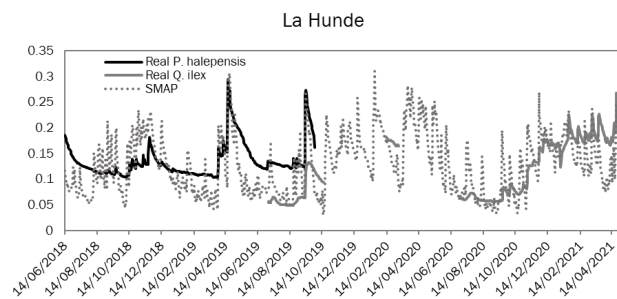
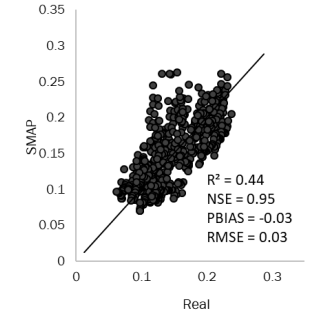
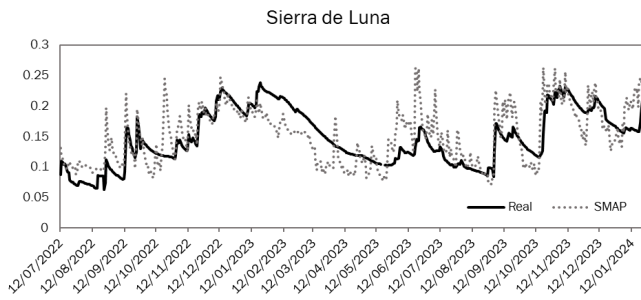
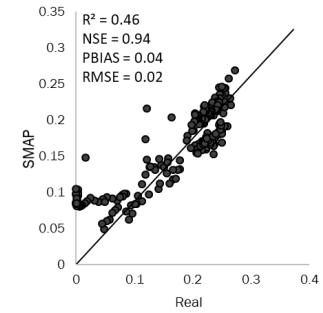
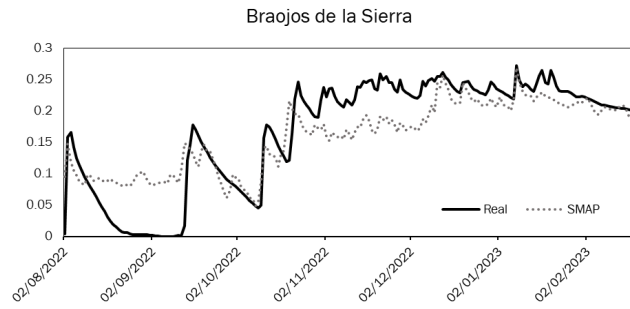
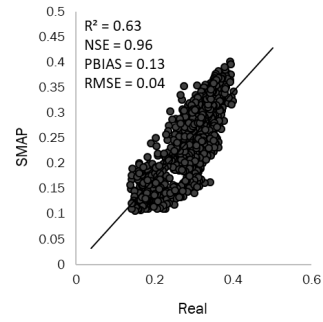
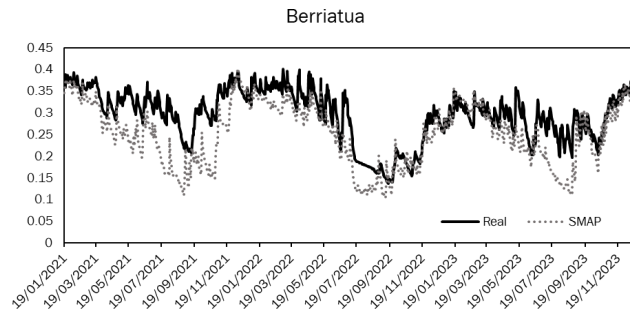




Figura 6. Datos diarios reales y obtenidos de la misión SMAP para cada sitio de estudio. (Izq) Gráfica diaria (continuo-real, discontinuo-SMAP), (der.) Dispersión de ambos datos, junto a los estadísticos índice de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), sesgo porcentual (PBIAS) y error cuadrático medio (RMSE).

Se puede apreciar que los patrones y tendencias estacionales que reflejan lluvias eventuales son reflejadas en todos los casos y que principalmente lo que cambia en todos es la escala. El caso de Nerpio es el menos exacto pero dado que es la serie temporal más corta puede influir en las relaciones. Todas estas series temporales son obtenidas en distintos momentos temporales, sitios climáticos y especies presente que cubren el suelo.

4.3. Modelización de la humedad bajo copas con SMAP y LST

Dado que la humedad superficial obtenida con el satélite SMAP presenta buenas relaciones para detectar la humedad superficial bajo copas en los suelos forestales, puede emplearse para diferenciar el estado hídrico de estos suelos en categorías (Saturación, Capacidad de campo o marchitez permanente. El principal problema que este método presenta es su escala espacial, que no permite diferenciar que zonas del bosque son más potenciales en esa superficie tan extensa (8100 hectáreas). Por este motivo, se pretende ajustar y reescalar este producto de SMAP con la temperatura superficial que proporciona Landsat 8 y 9, al corregir la humedad de 9km a 30m permitiendo bajar la escala del pixel según la demanda atmosférica que produce la radiación. En la Figura 7 se puede ver que la relación que presentan todos los sitios de estudios de datos reales de humedad y datos de humedad de SMAP es prácticamente lineal, mientras que la dispersión que presenta la temperatura superficial cubre prácticamente todos los valores de temperatura para mismas humedades, cosa que permite poner a prueba estas relaciones para todos los momentos y climas posibles.

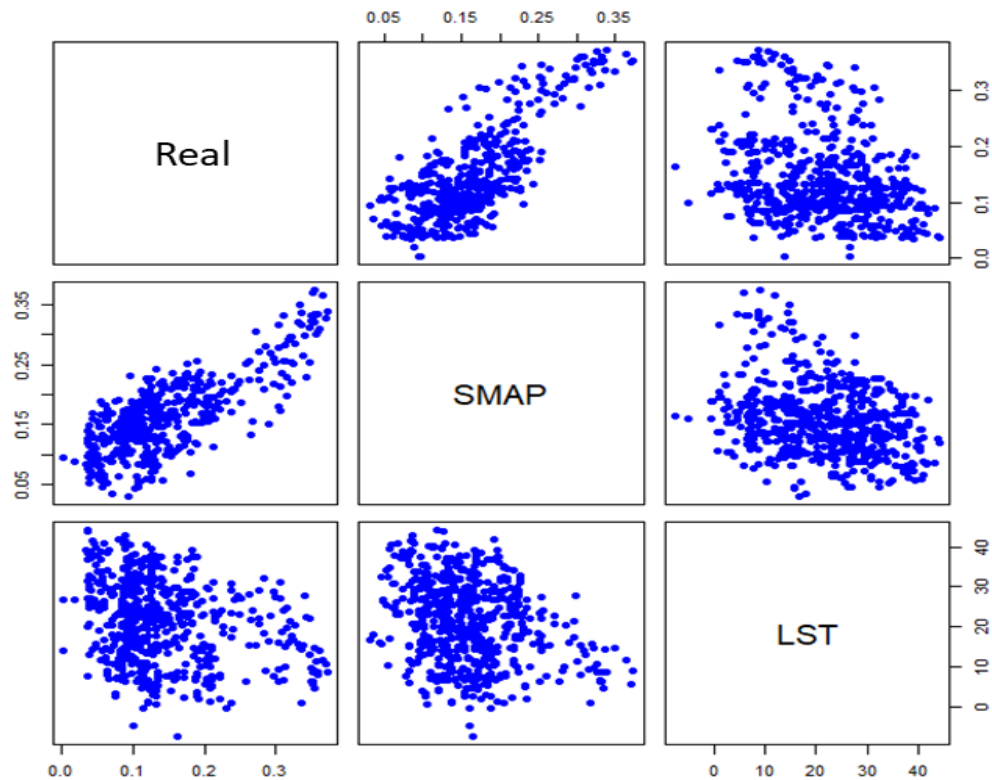


Figura 7. Dispersión entre datos reales de humedad y datos obtenidos de humedad con SMAP y temperatura superficial (LST) con Landsat para todos los sitios y periodos de estudio.

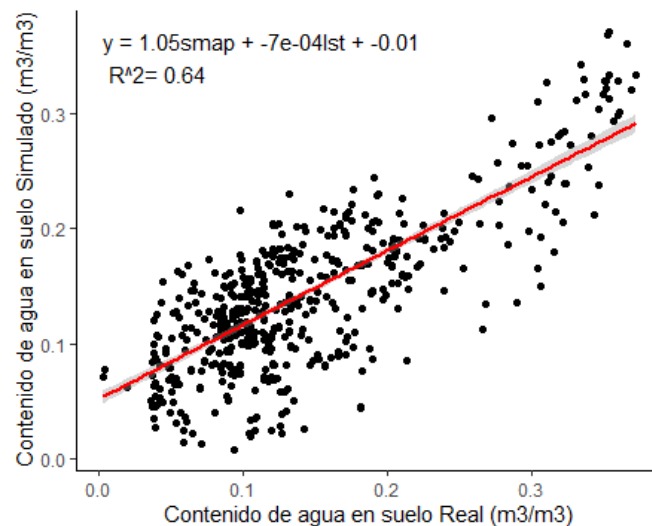


Figura 8. Modelo de regresión robusta de humedad superficial bajo copas de datos de humedad de SMAP y Temperatura superficial (LST) de Landsat para todos los sitios de estudio.

El uso de una regresión robusta para modelar la humedad superficial bajo copas incluyendo la humedad proporcionada por el satélite SMAP y con el ajuste de la temperatura superficial de Landsat (Figura 8) hace que el ajuste sea de un R^2 0,64. Además presenta una distribución más lineal que la presentada en los datos de

Sentinel 1 y 2. Este modelo puede considerarse robusto puesto que está espacialmente representado e incluye una serie de años húmedos y secos.

4.4. Categorización de humedades del suelo con covariables

Cada serie de humedad superficial real, fue categorizada revisando individualmente de forma supervisada cada una, para detectar las mesetas (punto de saturación) y los valles (marchitez permanente), pudiendo definir en cada sitio de estudio el régimen hídrico del suelo. Generando así una serie categórica de 3 clases: marchitez permanente (1), capacidad de campo (2) y punto de saturación (3).

El objetivo de este trabajo es detectar en los suelos forestales el número de días que el suelo se encuentra en saturación. Por tanto, se buscó una relación de la humedad y sus regímenes hídricos para poder predecir la categoría en la que se encuentran los suelos forestales según su humedad y las condiciones de sitio. Para ello, se realizó una regresión robusta con la humedad superficial real categórica y las variables que tenía más correlación y que no presentaban colinealidad entre ellas. Las variables utilizadas en la ecuación son: 1) humedad superficial de SMAP ajustada con LST, 2) normalización histórica de esta variable para cada pixel, 3) pendiente del terreno, 4) índice de aridez y 5) densidad aparente del suelo. Esto hace que tenga un ajuste de R^2 de 0.6 y hay diferencia significativa entre las clases 1 y 3, pudiendo diferenciar el estado de hidratación del suelo en las condiciones extremos (marchitez o saturación).

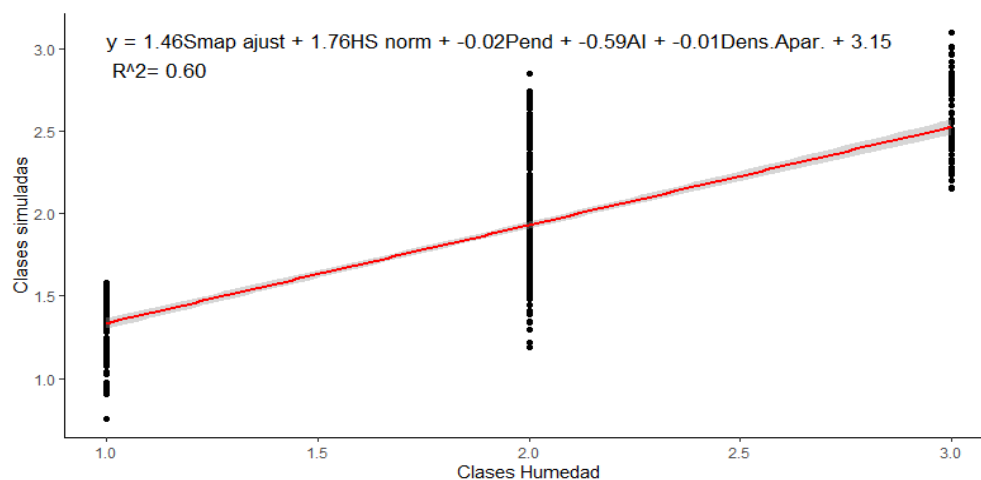


Figura 9. Modelo de regresión robusta para categorizar el estado hídrico del suelo en marchitez permanente (1), capacidad de campo (2) y saturación (3) con la humedad superficial ajustada de SMAP con LST y variables fisiográficas.

Una vez se tiene el modelo que predice la clase en la que se encuentra la humedad superficial de los suelos forestales arbolados, lo siguiente es programar esta ecuación en la plataforma Google Earth Engine para poder representar espacialmente esta extrapolación. En la Figura 10 se puede ver cómo queda el resultado para la humedad promedio de 2 años hidrológicos distintos. Faltando por realizar el cálculo diario y contar el número de días al año que los suelos están por encima de 2 este valor. La comprobación preliminar que se ha realizado hasta el momento, es evaluar la distribución anual de lluvias para comprobar si tiene una

distribución lógica.

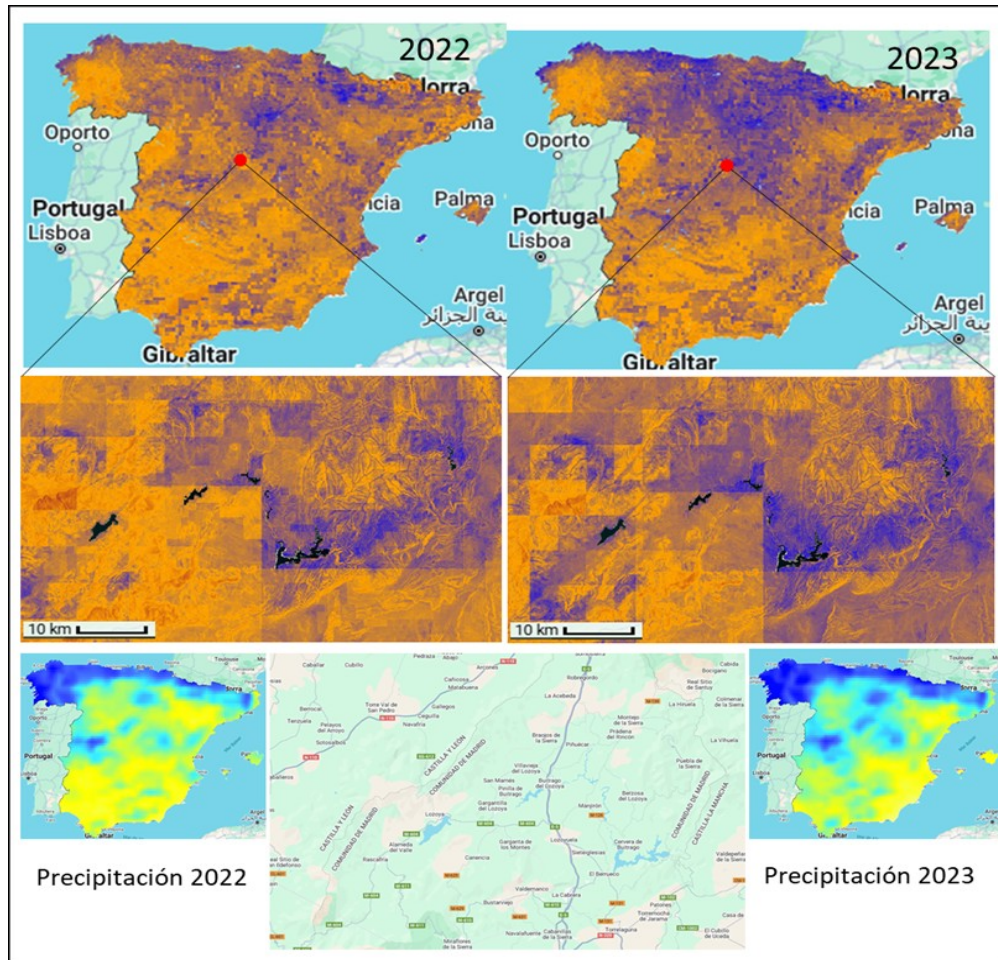


Figura 10. Promedios anuales de días en saturación (azul) calculado en Google Earth Engine con el modelo de regresión robusta de categorización del estado hídrico del suelo. Esta realizado para el año hidrológico 2022 y 2023 para toda España, zoom en Sierra Norte de Madrid para ver reducción de escala y representación de precipitación anual de cada año para evaluar exactitud.

5. **Discusión5.1. Humedad superficial obtenida con Sentinel** Los resultados obtenidos con Sentinel han demostrado la falta de penetración del sensor de banda C en el dosel, por la falta de relación que presentan los datos reales y los observados. Empezando con el índice SSM propuesto por BAUER-MARSCHALLINGER ET AL. (2019), que es el recurso que actualmente proporciona el programa Copernicus Global Land Service (CGLS), podemos corroborar que la mayoría de puntos de calibración y validación utilizados en el modelado, procedentes de la red International Soil Moisture Network (ISMN) son suelos despejados o con copas dispersas (DORIGO ET AL., 2011). Esta afirmación del fallo bajo dosel y falta de entrenamiento para detectar adecuadamente la humedad superficial en estas condiciones, es uno de los reproches que el propio desarrollador del índice BAUER-MARSCHALLINGER ET AL. (2019), discute en su trabajo.

Otros trabajos también denotan esta falta de relación en estas situaciones, como BALENZANO ET AL., (2021). Sin embargo, esta información para otros casos con suelos descubiertos o para trabajo de cultivos anuales, ha sido muy utilizada y presentan buenos resultados (AMAZIRH ET AL., 2018; RABIEI ET AL., 2021). Por otro lado, emplear relación de Sentinel 1 y 2 para buscar relaciones directas entre los sitios de estudio y la humedad superficial tampoco ha funcionado dado que Sentinel 1 no penetra como hemos comentado y la información espectral de la copa interfiere ya que la hidratación de las copas va con retraso frente a la humedad del suelo (LYONS ET AL., 2021). Para poder sortear esto quizás haya que incluir la escala del tiempo entre la información de sentinel 1 y sentinel 2 (BRUNELLI ET AL., 2024). A parte de esto, el hecho de que haya nubes pierde información en muchos casos, por lo que para buscar relaciones necesitas periodos más largos. Para ajustar correctamente la humedad satelital a la real, se podría buscar relaciones entre fuera y dentro del dosel para detectar esos puntos de calibraciones automáticamente y ajustar lo que ocurre bajo las copas. Pero por el momento, para poder utilizar estas misiones aún se necesita realizar una modelación adecuada de los datos SAR y ópticos, para manejar la heterogeneidad del dosel y las variaciones espaciales. Siendo principalmente útiles actualmente para casos donde las coberturas forestales no son densas.

5.2. Humedad superficial obtenida con SMAP y LST

La misión SMAP monitorea la humedad del suelo a escala global, utilizando tecnología de microondas activa y pasiva, a diferencia de Sentinel-1, opera en la banda L, teniendo una mayor penetración en la vegetación. Aun así, las señales de microondas son atenuadas por el dosel y afectadas por la rugosidad del suelo y la biomasa con la que interfieren, lo que introduce incertidumbres en la interpretación de la humedad superficial (ENTEKHABI ET AL., 2010). Otro aspecto limitante es su resolución espacial de 9 km, que produce mucho ruido en el proceso. Sin embargo, como dato bruto presenta un patrón muy similar al real que ocurre en la masa y aun teniendo paisajes tan heterogéneos. Otro aspecto a destacar, es la posibilidad de disponer de información diaria. Existen muchos trabajos que han empleado esta información e incluso los han adaptado con otra información satelital para poder bajar la resolución y darle un mayor uso en el sector forestal (OUAADI ET AL., 2024). La corrección más presente es incorporarle información térmica, como la banda de temperatura de superficie o información espectral con algún índice de verdor (COLLIANDER ET AL., 2017; FANG ET AL., 2018; MOHSENI ET AL., 2024). Los resultados encontrados en este trabajo confirman la notoria mejora que presentan cuando se aplican estas correcciones, como es este caso la temperatura superficial de Landsat. Donde el modelo presenta un ajuste de 0,64 (Figura 8) para todo el conjunto de sitios de estudios, siendo sitios tan espacialmente distantes y con condiciones de sitio variadas. Ya que cada área de estudio tiene un tipo de suelo y de vegetación distinto. Lo que le da más robustez al modelo, integrando todas estas posibles opciones que se encuentran en los suelos forestales españoles. Este mismo proceso se podría repetir e incluir además datos fuera de copa y de zonas despejadas para generar un modelo que prediga de forma adecuada la humedad superficial independientemente de las coberturas vegetales.

5.3. Categorización del régimen hídrico con teledetección

Poder categorizar el régimen hídrico de los suelos forestales es fundamental para destinar una correcta gestión al territorio y garantizar su sostenibilidad. Para poder realizar esto es necesario tener la humedad superficial del suelo y con la ayuda de sensores como SMAP y con ajustes de bandas térmicas que permitan acercarse un poco más al territorio, se puede llegar a saber los días que puede el suelo estar en saturación en un territorio amplio. Esto ayuda a desarrollar las estrategias de gestión que regulen el agua ya sea para afectar al uso, regulación, provisión o retención de agua de los ecosistemas forestales. Por tanto, los resultados obtenidos en la categorización de humedades superficiales (Figura 9) permite predecir esto y por tanto reproducirlo (Figura 10). La categorización presenta un ajuste de R^2 0.60, lo que permite predecir si el valor diario del suelo está entre 1 y 3, pudiendo obtenerse para un año hidrológico el valor en el que han estado y pudiendo ayudar a saber si son suelo con posibilidad de producir más agua en los embalses realizándoles una gestión adecuada. Sin embargo, hay que destacar que en la Figura 9, se aprecia que la zona de Galicia puede ser que se esta infravalorando por la falta de datos de humedad y temperatura de esa región que tiene un clima completamente diferente al del este peninsular donde los datos son más presentes. Esto debería evaluarse y hacer una validación con datos de ese territorio y comprobar qué tal funciona primero el modelo de humedad superficial ajustado de SMAP y posteriormente asignarle categorías y comprobar con el modelo de categorización.

6. **Conclusiones** Disponer del régimen hídrico de los suelos forestales es fundamental para desempeñar adecuadamente una gestión sostenible en un mundo tan cambiante. Y para tener esta información el uso de la humedad superficial es clave para lograrlo. Dado que el método tradicional de tener sondas de humedad instaladas es costoso y difícil de mantener, el uso de información satelital puede facilitar mucho este objetivo. Sin embargo, muchas misiones satelitales con este fin, de saber la humedad superficial, no tienen un fin forestal o tiene una escala de trabajo muy extensa, haciendo que por su resolución pierda utilidad. Por tanto, ajustar estas misiones a condiciones locales para determinar adecuadamente la humedad y poder bajar la escala de trabajo es el camino a seguir. Actualmente, hay muchos trabajos que desarrollan estas técnicas y seguramente en unos años finalmente se logren productos de muy buena resolución. En el caso de los ecosistemas forestales, el hecho de tener un dosel arbóreo dificulta este trabajo, pero con los resultados obtenidos hasta hora, se puede decir que la meta está más cerca. Con el modelo de humedad superficial de SMAP ajustado con LST, se puede obtener información diaria para cualquier sitio de la península con un ajuste aceptable. Falta seguir mejorando todas las posibles combinaciones y regiones que no se han incluido, para lograr el objetivo de poder realizar una gestión que mire al régimen hídrico de cada monte.
7. **Agradecimientos** Este trabajo ha sido co-financiado por proyecto LIFE ADAPT-ALEPPO (LIFE20CCA/ES/001809) y SALAM-MED (programa PRIMA 2021 de la UE “número de subvención: 2123; número CUP: J83C21000200006”). Los autores expresan su agradecimiento a todos los participantes por proporcionar los datos de los diferentes sitios de estudios

para realizar este estudio.

8. Bibliografía

- AMAZIRH, A., MERLIN, O., ER-RAKI, S., GAO, Q., RIVALLAND, V., MALBETEAU, Y., KHABBA, S., ESCORIHUELA, M.J., 2018. Retrieving surface soil moisture at high spatio-temporal resolution from a synergy between Sentinel-1 radar and Landsat thermal data: A study case over bare soil. *Remote Sensing of Environment* 211, 321–337. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.04.013>
- BALENZANO, A., MATTIA, F., SATALINO, G., LOVERGINE, F.P., PALMISANO, D., PENG, J., MARZAHN, P., WEGMÜLLER, U., CARTUS, O., DĄBROWSKA-ZIELIŃSKA, K., MUSIAL, J.P., DAVIDSON, M.W.J., PAUWELS, V.R.N., COSH, M.H., MCNAIRN, H., JOHNSON, J.T., WALKER, J.P., YUEH, S.H., ENTEKHABI, D., KERR, Y.H., JACKSON, T.J., 2021. Sentinel-1 soil moisture at 1km resolution: a validation study. *Remote Sensing of Environment* 263, 112554. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112554>
- BAUER-MARSCHALLINGER, B., FREEMAN, V., CAO, S., PAULIK, C., SCHAUFLE, R., STACHL, T., MODANESI, S., MASSARI, C., CIABATTA, L., BROCCA, L., WAGNER, W., 2019. Toward Global Soil Moisture Monitoring With Sentinel-1: Harnessing Assets and Overcoming Obstacles. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 57, 520–539. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2018.2858004>
- BONAN, G.B., 2008. Forests and Climate Change: Forcings, Feedbacks, and the Climate Benefits of Forests. *Science* 320, 1444–1449. <https://doi.org/10.1126/science.1155121>
- BRUNELLI, B., DE GIGLIO, M., MAGNANI, E., DUBBINI, M., 2024. Surface soil moisture estimate from Sentinel-1 and Sentinel-2 data in agricultural fields in areas of high vulnerability to climate variations: the Marche region (Italy) case study. *Environ Dev Sustain* 26, 24083–24105. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03635-w>
- CECCATO, P., FLASSE, S., GRÉGOIRE, J.-M., 2002. Designing a spectral index to estimate vegetation water content from remote sensing data: Part 2. Validation and applications. *Remote Sensing of Environment* 82, 198–207. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00036-6](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00036-6)
- COLLIANDER, A., FISHER, J.B., HALVERSON, G., MERLIN, O., MISRA, S., BINDLISH, R., JACKSON, T.J., YUEH, S., 2017. Spatial Downscaling of SMAP Soil Moisture Using MODIS Land Surface Temperature and NDVI During SMAPVEX15. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 14, 2107–2111. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2017.2753203>
- DE, E., WHITELEY, M., 1926. Une nouvelle fonction climatologique: L'indice d'aridité. *Meteorologie* 2, 449–459.
- DEL CAMPO, A.D., GONZÁLEZ-SANCHIS, M., LIDÓN, A., GARCÍA-PRATS, A., LULL, C., BAUTISTA, I., RUÍZ-PÉREZ, G., FRANCÉS, F., 2017. Ecohydrological-Based Forest Management in Semi-arid Climate, in: Křeček, J., Haigh, M., Hofer, T., Kubin, E., Promper, C. (Eds.), *Ecosystem Services of Headwater Catchments*. Springer International Publishing, Cham, pp. 45–57. https://doi.org/10.1007/978-3-319-57946-7_6
- DORIGO, W.A., WAGNER, W., HOHENSINN, R., HAHN, S., PAULIK, C., XAVER, A., GRUBER, A., DRUSCH, M., MECKLENBURG, S., VAN OEVELEN, P., ROBOCK, A., JACKSON, T., 2011. The International Soil Moisture Network: a data hosting facility for global in situ soil moisture measurements. *Hydrology and Earth System*



Sciences 15, 1675–1698. <https://doi.org/10.5194/hess-15-1675-2011>

ENTEKHABI, D., NJOKU, E.G., O'NEILL, P.E., KELLOGG, K.H., CROW, W.T., EDELSTEIN, W.N., ENTIN, J.K., GOODMAN, S.D., JACKSON, T.J., JOHNSON, J., KIMBALL, J., PIEPMEIER, J.R., KOSTER, R.D., MARTIN, N., MCDONALD, K.C., MOGHADDAM, M., MORAN, S., REICHLE, R., SHI, J.C., SPENCER, M.W., THURMAN, S.W., TSANG, L., VAN ZYL, J., 2010. The Soil Moisture Active Passive (SMAP) Mission. Proceedings of the IEEE 98, 704–716. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2010.2043918>

FANG, B., LAKSHMI, V., BINDLISH, R., JACKSON, T.J., 2018. Downscaling of SMAP Soil Moisture Using Land Surface Temperature and Vegetation Data. Vadose Zone Journal 17, 170198. <https://doi.org/10.2136/vzj2017.11.0198>

GITELSON, A.A., GRITZ, Y., MERZLYAK, M.N., 2003. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. Journal of Plant Physiology 160, 271–282. <https://doi.org/10.1078/0176-1617-00887>

GONZÁLEZ-SANCHIS, M. A., DEL CAMPO, A.D., MOLINA, A.J., FERNANDES, T. SIO J.G., 2015. Modeling adaptive forest management of a semi-arid Mediterranean Aleppo pine plantation. Ecological Modelling 308, 34–44. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2015.04.002>

GONZÁLEZ-SANCHIS, M., DEL CAMPO, A.D., PÉREZ-ROMERO, J., MOLINA, A., BLANCO-CANO, L., ONAINDA, A., URIAGEREKA, J., SALABERRIA, L., ASTORKIZA, I., ALBIAC MURRILLO, J., TAPIA, J., LIDÓN, A., LULL, C., 2022. Las plantaciones forestales y los servicios ecosistémicos: un caso práctico en el País Vasco | Congreso Forestal Español [WWW Document]. URL <https://8cfe.congresoforestal.es/sites/default/files/actas/8CFE-1081.pdf>

HARDISKY, M.A., DAIBER, F.C., ROMAN, C.T., KLEMAS, V., 1984. Remote sensing of biomass and annual net aerial primary productivity of a salt marsh. Remote Sensing of Environment 16, 91–106. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(84\)90055-5](https://doi.org/10.1016/0034-4257(84)90055-5)

HUNT, E., ROCK, B.N., NOBEL, P.S., 1987. Measurement of leaf relative water content by infrared reflectance. Remote Sensing of Environment 22, 429–435. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(87\)90094-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(87)90094-0)

HUNT, E.R., ROCK, B.N., 1989. Detection of changes in leaf water content using Near- and Middle-Infrared reflectances. Remote Sensing of Environment 30, 43–54. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(89\)90046-1](https://doi.org/10.1016/0034-4257(89)90046-1)

JIANG, Z., HUETE, A.R., DIDAN, K., MIURA, T., 2008. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. Remote Sensing of Environment 112, 3833–3845. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.06.006>

JORDAN, C.F., 1969. Derivation of Leaf-Area Index from Quality of Light on the Forest Floor. Ecology 50, 663–666. <https://doi.org/10.2307/1936256>

KERR, Y.H., WALDTEUFEL, P., WIGNERON, J.-P., DELWART, S., CABOT, F., BOUTIN, J., ESCORIHUELA, M.-J., FONT, J., REUL, N., GRUHIER, C., JUGLEA, S.E., DRINKWATER, M.R., HAHNE, A., MARTÍN-NEIRA, M., MECKLENBURG, S., 2010. The SMOS Mission: New Tool for Monitoring Key Elements of the Global Water Cycle. Proceedings of the IEEE 98, 666–687. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2010.2043032>

KEY, C.H., BENSON, N.C., 2005. Landscape assessment: remote sensing of severity, the normalized burn ratio and ground measure of severity, the composite burn



index. FIREMON: Fire effects monitoring and inventory system Ogden, Utah: USDA Forest Service, Rocky Mountain Res. Station.

KONINGS, A.G., PILES, M., RÖTZER, K., MCCOLL, K.A., CHAN, S.K., ENTEKHABI, D., 2016. Vegetation optical depth and scattering albedo retrieval using time series of dual-polarized L-band radiometer observations. *Remote Sensing of Environment* 172, 178–189. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.11.009>

LIU, Y.Y., PARINUSSA, R.M., DORIGO, W.A., DE JEU, R. A. M., WAGNER, W., VAN DIJK, A.I.J.M., MCCABE, M.F., EVANS, J.P., 2011. Developing an improved soil moisture dataset by blending passive and active microwave satellite-based retrievals. *Hydrology and Earth System Sciences* 15, 425–436. <https://doi.org/10.5194/hess-15-425-2011>

LYONS, D.S., DOBROWSKI, S.Z., HOLDEN, Z.A., MANETA, M.P., SALA, A., 2021. Soil moisture variation drives canopy water content dynamics across the western U.S. *Remote Sensing of Environment* 253, 112233. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112233>

MCFEETERS, S.K., 1996. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing* 17, 1425–1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>

MOHSENI, F., AHRARI, A., HAUNERT, J.-H., MONTZKA, C., 2024. The synergies of SMAP enhanced and MODIS products in a random forest regression for estimating 1 km soil moisture over Africa using Google Earth Engine. *Big Earth Data* 8, 33–57. <https://doi.org/10.1080/20964471.2023.2257905>

NJOKU, E.G., ENTEKHABI, D., 1996. Passive microwave remote sensing of soil moisture. *Journal of Hydrology, Soil Moisture Theories and Observations* 184, 101–129. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)02970-2](https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)02970-2)

OUAADI, N., JARLAN, L., LE PAGE, M., ZRIBI, M., PAOLINI, G., AIT HSSAINE, B., ESCORIHUELA, M.J., FANISE, P., MERLIN, O., BAGHDADI, N., BOONE, A., 2024. Intercomparison of very high-resolution surface soil moisture products over Catalonia (Spain). *Remote Sensing of Environment* 309, 114225. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114225>

RABIEI, S., JALILVAND, E., TAJRISHY, M., 2021. A Method to Estimate Surface Soil Moisture and Map the Irrigated Cropland Area Using Sentinel-1 and Sentinel-2 Data. *Sustainability* 13, 11355. <https://doi.org/10.3390/su132011355>

RIKIMARU, A., ROY, P., MIYATAKE, S., 2002. Tropical forest cover density mapping. *Tropical Ecology*.

ROBINSON, D.A., CAMPBELL, C.S., HOPMANS, J.W., HORNBUCKLE, B.K., JONES, S.B., KNIGHT, R., OGDEN, F., SELKER, J., WENDROTH, O., 2008. Soil Moisture Measurement for Ecological and Hydrological Watershed-Scale Observatories: A Review. *Vadose Zone Journal* 7, 358–389. <https://doi.org/10.2136/vzj2007.0143>

ROY, D.P., WULDER, M.A., LOVELAND, T.R., C.E., W., ALLEN, R.G., ANDERSON, M.C., HELDER, D., IRONS, J.R., JOHNSON, D.M., KENNEDY, R., SCAMBOS, T.A., SCHAAF, C.B., SCHOTT, J.R., SHENG, Y., VERMOTE, E.F., BELWARD, A.S., BINDSCHADLER, R., COHEN, W.B., GAO, F., HIPPLE, J.D., HOSTERT, P., HUNTINGTON, J., JUSTICE, C.O., KILIC, A., KOVALSKYY, V., LEE, Z.P., LYMBURNER, L., MASEK, J.G., MCCORKEL, J., SHUAI, Y., TREZZA, R., VOGELMANN, J., WYNNE, R.H., ZHU, Z., 2014. Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote Sensing of Environment* 145, 154–172. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.001>



STEFANOV, W.L., 1975. NDVI (Normalized difference vegetation index) Image of 1975 Landsat MSS Image. LTER Network Information System Repository. <https://doi.org/10.6073/pasta/2d492e3709a272d694cbbeeea4bcff41>

VARGAS BOHORQUEZ, E., 2021. Inclusión de servicios ecohidrológicos en la gestión forestal de la cuenca piloto del proyecto sincere en Berriatua (Vizcaya) (Proyecto/Trabajo fin de carrera/grado). Universitat Politècnica de València.

ZABALZA-MARTÍNEZ, J., VICENTE-SERRANO, S.M., LÓPEZ-MORENO, J.I., BORRÀS CALVO, G., SAVÉ, R., PASCUAL, D., PLA, E., MORÁN-TEJEDA, E., DOMÍNGUEZ-CASTRO, F., TAGUE, C.L., 2018. The Influence of Climate and Land-Cover Scenarios on Dam Management Strategies in a High Water Pressure Catchment in Northeast Spain. *Water* 10, 1668. <https://doi.org/10.3390/w10111668>

ZIERL, B., BUGMANN, H., TAGUE, C.L., 2007. Water and carbon fluxes of European ecosystems: an evaluation of the ecohydrological model RHESSys. *Hydrological Processes* 21, 3328–3339. <https://doi.org/10.1002/hyp.6540>